

การวิเคราะห์กับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบตรวจรับ
ของโรงงานโดยการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

DISAPPROVED METAL OXIDE SURGE ARRESTER ANALYSIS FROM FACTORY
ACCEPTANCE TEST USING POLARIZATION AND DEPOLARIZATION
CURRENT ANALYSIS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M-027-084
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DISAPPROVED METAL OXIDE SURGE ARRESTER ANALYSIS FROM FACTORY
ACCEPTANCE TEST USING POLARIZATION AND DEPolarIZATION
CURRENT ANALYSIS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING
(MULTI-DISCIPLINARY PROGRAM)
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

KMITL-2023-EN-M-027-084

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์กับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ไม่ผ่านมาตรฐาน การทดสอบตรวจรับของโรงงานโดยการวิเคราะห์กระแส โพล่าไรเซชันและดีโพล่าไรเซชัน
นักศึกษา	นายศักรินทร์ ตระธรรม
รหัสประจำตัว	64601137
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร.พิทยา ปานนิล

บทคัดย่อ

การใช้งานกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Surge Arrester: MOSA) ที่มีสภาพความเป็นฉนวนไม่สมบูรณ์ เป็นหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้าแรงสูง การทำความเข้าใจคุณลักษณะการฉนวนของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์จะช่วยให้อธิบายความบกพร่องของฉนวน โลหะออกไซด์ได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การวิเคราะห์การตอบสนองไดอิเล็กตริกของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบตรวจรับของโรงงาน กับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ดังกล่าวจะถูกนำมาทดสอบวัดกระแสโพล่าไรเซชันและดีโพล่าไรเซชัน กับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ขนาด 21 kV และ 24 kV ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ การทดสอบตรวจรับ จากโรงงานจากหัวข้อที่กำหนดเช่นการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง ลักษณะเฉพาะแรงดันกับกระแส และดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge: PD) จะถูกนำมาวัดกระแสโพล่าไรเซชันและดีโพล่าไรเซชัน (Polarization and Depolarization Currents: PDC) จากนั้น ค่าความต้านทาน ค่าความจุไฟฟ้า และดัชนีโพล่าไรเซชัน และการตอบสนองไดอิเล็กตริกของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ จะถูกนำมาวิเคราะห์และอภิปราย

Thesis	Disapproved Metal Oxide Surge Arrester Analysis from Factory Acceptance Test Using Polarization and Depolarization Current Analysis
Student	Mr. Sakkarin Turatham
Student ID.	64601137
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical and Computer Engineering (Multi-Disciplinary Program)
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech
Co-thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Pittaya Pannil

ABSTRACT

Utilization of the imperfection metal oxide surge arresters (MOSA) negatively affects the quality of electrical distribution networks. Understanding the insulation characteristics of the metal oxide surge arrester provides the cause of insulation imperfection of such surge arrester. This thesis presents the analysis of the dielectric response of disapproved metal oxide surge arresters from factory acceptance tests using polarization and depolarization techniques. The polarization and depolarization current measurements were performed on 21 kV and 24 kV disapproved metal oxide surge arresters that did not meet a factory test topic, i.e., the reference voltage, voltage-current characteristic curves, and partial discharge (PD). The resistivity, capacitance, and polarization index, including the dielectric response of such metal oxide surge arresters, are analyzed and discussed.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และ รศ.ดร.พิทยา ปานนิล ที่ให้ความช่วยเหลือให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณบริษัทพาราเล็ก เอ็นเนอร์จี จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนการศึกษาในระดับปริญญาโท รวมถึงให้โอกาสร่วมงานเพื่อส่งมอบประสบการณ์ทำงานในด้านไฟฟ้าแรงสูง

ขอขอบคุณบริษัท ชัมมิท เพาเวอร์ ซิสเต็ม จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหาตู้ดับเครื่องจักรไฮดรอลิกเพื่อใช้ในการทดสอบค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน จนสำเร็จงานวิจัย

ขอขอบคุณกองทดสอบไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ทดสอบ MOD-1 PDC Analyzer เพื่อใช้ในการทดสอบค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันจนสำเร็จงานวิจัย

ขอขอบคุณนักศึกษาในห้องปฏิบัติการการทดสอบและวินิจฉัยฉนวนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (Dika Lab) และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพ และผู้มีพระคุณต่อข้าพเจ้าทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ศักรินทร์ ตระธรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
1.6 บททบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ (Surge Protection Device: SPD).....	8
2.1.1 ปრაกฏการณ์ฟ้าผ่า.....	9
2.1.2 กระแสอิมพัลส์.....	11
2.1.3 ประเภทและการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ.....	12
2.2 ฉนวนภายในกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์.....	13
2.2.1 การจำแนกกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์.....	13
2.2.2 ลักษณะเฉพาะแรงดันกับกระแสของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์.....	16
2.2.3 ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การทดสอบฉนวนทางไฟฟ้า	21
2.3.1 การทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง	21
2.3.2 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน	22
2.3.3 การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current: PDC)	28
บทที่ 3 การออกแบบการทดลองและการทดสอบ	33
3.1 การทดลองที่ 1 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง	33
3.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน	34
3.3 การทดลองที่ 3 การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน	35
บทที่ 4 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล	38
4.1 การทดลองที่ 1 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง	38
4.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	40
4.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน	40
4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	42
4.3 การทดลองที่ 3 การทดลองที่ 3 การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ..	43
4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดสอบ	46
5.1 สรุปผลการทดสอบ	46
5.1.1 ผลการทดสอบกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่มีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงไม่ผ่าน มาตรฐานจากโรงงานเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพล ลาริเซชัน	46
5.1.2 ผลการทดสอบกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่มีค่าประจุดิสชาร์จบางส่วนไม่ผ่าน มาตรฐานจากโรงงานเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพล ลาริเซชัน	47
5.2 ข้อเสนอแนะ	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	48
ภาคผนวก.....	50
ประวัติผู้เขียน.....	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงอาจเสียหายจากความผิดพลาดที่ไม่สามารถทำนายได้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง กักตักเสิร์จโลหะออกไซด์ (Metal Oxide Surge Arrester: MOSA) มีความจำเป็นอย่างมากในการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบไฟฟ้าแรงสูงเพื่อป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าและสายส่ง มีความสามารถในการป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจากความเครียดทางไฟฟ้าที่เกิดจากทรานเซียนท์ ฟาผ่าหรือแรงดันไฟฟ้าเกิน นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันคนงานหรือวิศวกรในงานบำรุงรักษา ความไม่สมบูรณ์ของดักเสิร์จโลหะออกไซด์มีความเสี่ยงจะนำไปสู่ความล้มเหลวของระบบไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงมีอีกหลากหลายปัจจัยที่ทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ระบบฉนวนโดยปกติแล้วฉนวนจะได้รับผลกระทบจากความเครียดทางความร้อน ไฟฟ้า สภาพแวดล้อมและแรงทางกลที่เกิดขึ้นในแต่ละระบบจำหน่ายและระบบส่งกำลังไฟฟ้า กักตักเสิร์จโลหะออกไซด์อาจได้รับความเสียหายจากฟาผ่าหรือแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วคราวด้วยพลังงานที่สูงขึ้นได้ ดังนั้นการตรวจสอบฉนวนสำหรับกักตักเสิร์จโลหะออกไซด์ควรได้รับการดำเนินการ เมื่อกักตักเสิร์จโลหะออกไซด์ทำงานเป็นฉนวนลูกถ้วยที่สภาวะปกติที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่าปกติ ผลของโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของดีโพลภายในฉนวนสามารถตรวจสอบได้ด้วยพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ค่าความต้านทาน ความจุไฟฟ้า และดัชนีโพลาริเซชันจะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์และอธิบายระบบฉนวนของกักตักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ผิดพลาดจากการผลิตของโรงงานเพื่อสามารถนำข้อมูลพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าไปเป็นแนวทางในการออกแบบแก้ไขในการผลิตกักตักเสิร์จโลหะออกไซด์ได้

ในปฏิญานิพนธ์เล่มนี้มุ่งเน้นถึงประเภทของความไม่สมบูรณ์ในกรณีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ผิดปกติจากแรงดันและกระแส และ ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge: PD) เพื่อศึกษาความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างกักตักเสิร์จโลหะออกไซด์ โดยในผลการทดลองที่ 3 ความต้านทาน ความจุไฟฟ้า และดัชนีโพลาริเซชันสามารถนำมาใช้อธิบายความไม่สมบูรณ์ของระบบการฉนวนของกักตักเสิร์จโลหะออกไซด์ตัวอย่างในทางไฟฟ้าได้ โดยมีข้อมูลผลการทดสอบอื่นเป็นข้อมูลสนับสนุน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อวิเคราะห์กักตักเสิร์จโลหะออกไซด์ด้วยวิธีการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน
2. เพื่อศึกษาการตอบสนองไดอิเล็กตริกของกักตักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากดิสชาร์จบางส่วน
3. เพื่อศึกษาการตอบสนองไดอิเล็กตริกของกักตักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่มีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงผิดปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาดักฟ้าผ่าโลหะออกไซด์ที่ใช้งานในระบบจำหน่ายไฟฟ้า (มีระดับพิกัดแรงดันแรงดัน 21 kV ถึง 24 kV) ซึ่งตัวอย่างทดสอบเป็นชิ้นงานที่ตักมาตรฐานการผลิตจากโรงงาน โดยศึกษาจำแนกตามความไม่สมบูรณ์ 2 รูปแบบ

1. ศึกษาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์พิกัด 21 kV 5 kA ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากดิสชาร์จบางส่วนเปรียบเทียบกับตัวอย่างกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์พิกัดเดียวกันที่สมบูรณ์ผ่านการทดสอบด้วยวิธีการโพลาไรเซชัน
2. ศึกษาพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์พิกัด 24 kV 5 kA ที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงผิดปกติเปรียบเทียบกับตัวอย่างกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์พิกัดเดียวกันที่สมบูรณ์ผ่านการทดสอบด้วยวิธีการโพลาไรเซชัน

โดยตัวอย่างชิ้นงานทั้ง 2 ประเภทมีลักษณะของระบบการฉนวนในรูปแบบเดียวกัน

1.4 สมมติฐานของการศึกษา

ความนำไฟฟ้าของฉนวนความต้านทานไม่เชิงเส้นของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ทั้ง 2 แบบมีผลต่อการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน เมื่อพิจารณาความไม่สมบูรณ์ทั้ง 2 แบบเป็นความไม่สมบูรณ์ทางไฟฟ้า ค่าความต้านทาน ความจุไฟฟ้า และ ดัชนีโพลาริเซชันที่ได้จากการแปรผลของกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน ของตัวอย่างกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบตรวจรับจากโรงงานจะต้องแตกต่างจากตัวอย่างกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์พิกัดเดียวกันที่สมบูรณ์อย่างเห็นได้ชัด รวมถึงลักษณะกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่ทำการวัดจากเครื่องมือทดสอบต้องมีความแตกต่างจากตัวอย่างอ้างอิงของแต่ละกรณีของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบตรวจรับจากโรงงาน

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2564					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2564				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	●	●	●							
2. ศึกษาข้อมูลการทดสอบทางไฟฟ้าของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์			●	●	●	●				
3. ออกแบบและเตรียมเครื่องมือการทดสอบ							●	●		
4. ทดสอบเบื้องต้นและแก้ไขปัญหาจากการทดสอบ									●	●

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการศึกษา (ต่อ)

การดำเนินงาน	ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2565					ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2565				
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
4. ทดสอบเบื้องต้นและแก้ไขปัญหาจากการทดสอบ (ต่อ)	●									
5. ทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์		●	●							
6. ตรวจสอบข้อมูลและทดสอบซ้ำ				●	●	●				
7. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง							●	●		
8. จัดทำวิทยานิพนธ์							●	●	●	●

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 บทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2550 Hinrichsen และคณะได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Energy Handling Capability of High-voltage Metal-oxide Surge Arresters ได้ศึกษาความสามารถในการทนพลังงานของอุปกรณ์กับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ในมาตรฐานสากล โดยมุ่งเน้นที่มาตรฐาน IEC 60099-4 และ IEEE C62.11 เป็นหลัก มาตรฐานแห่งชาติบางมาตรฐานได้รับการตรวจสอบเพิ่มเติมสำหรับความแตกต่างของมาตรฐานเหล่านี้ มีการประเมินความต้องการตลอดจนขั้นตอนการทดสอบและข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงในอนาคต แต่ก็ยังมีคำถามเปิดเกี่ยวกับการจัดการพลังงาน ซึ่งกำลังถูกตรวจสอบในโครงการวิจัยในห้องปฏิบัติการ [7]

ในปี พ.ศ. 2565 Q. Wang และคณะได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Study on the Difference of Fault Detection Effect of AC Leakage Current Live Test Technology Under Operating Voltage on Different Insulating Parts of MOA ศึกษาและจำลองกระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ระดับสถานีภายใต้สภาวะการทำงานปกติที่ทำการป้องกันสัญญาณกระแสผิดพ่วงเข้าไปในระบบ ในการจำลองได้ใช้กับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ระดับสถานีที่มีโครงสร้างโลหะออกไซด์เสริมไฟเบอร์กลาสที่มีฉนวนภายนอกเป็นเซรามิก ผลจากการวัดกระแสรั่วไหลมีอัตราการเพิ่มขึ้นที่น้อยเนื่องจากลักษณะโครงสร้างภายนอกเป็นวัสดุเซรามิก ในขณะที่เดียวกันกระแสจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ถูกตรวจจับได้เมื่อกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ผ่านการทดสอบเป็นระยะเวลาสั้น [10]

ในปี พ.ศ. 2558 D. A. da Silva และคณะได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Partial Discharge Activity in Distribution MOSAs due to Internal Moisture ได้ศึกษาการวัดระดับกระแสรั่วไหลและกระแสดิสชาร์จบางส่วนในกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ พารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ขนาดกระแสดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นซ้ำๆ ที่มีขนาดสูงที่สุด กระแสดิสชาร์จบางส่วนและอัตราการเกิดซ้ำของดิสชาร์จบางส่วน ถูกบันทึกไว้สำหรับการเปรียบเทียบในภายหลังกับการสูญเสียพลังงานที่คำนวณจากกระแสรั่วไหล ในบางส่วนของความชื้นภายในกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ อย่างไรก็ตาม การวัดการคายประจุดิสชาร์จบางส่วนใช้เวลาในการวัดไม่เพียงพอต่อการสูญเสียพลังงานจากการทดสอบ สำหรับตัวอย่างที่ระบุด้วยความชื้นภายใน ปรากฏการณ์การปลดปล่อยประจุดิสชาร์จบางส่วนแสดงพฤติกรรมพิเศษที่รักษาแอมพลิจูดที่จำกัดแต่นำเสนออัตราการเกิดซ้ำสูง [12]

ในปี พ.ศ. 2548 T. K. Saha และคณะได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Modeling Metal Oxide Surge Arrester for the Modern Polarization Based Diagnostics โดยศึกษาวงจรมูลของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์จากการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน วงจรมูลที่นำเสนอได้ผ่านการแปรผลกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันจากโปรแกรมทางคณิตศาสตร์และไฟฟ้าเพื่อระบุพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าสำหรับองค์ประกอบในวงจรมูลได้แก่ ความต้านทานและความจุไฟฟ้า พร้อมทั้งนำเสนอค่าดัชนีโพลาริเซชันที่ได้จากการวิเคราะห์กำลังไฟฟ้ากระแสตรงจากการทดสอบ จากนั้นนำวงจรมูลและค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดทำการวิเคราะห์กับกับดักเสิร์จจริง โดยกับดักเสิร์จโลหะ

ออกไซด์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นกับดักเสิร์จที่ผ่านการใช้งานเป็นระยะเวลาสั้น โดยผลของกระแสโพลาริเซชันเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลาไรเซชันและดีโพลาริเซชันรวมถึงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบสามารถอธิบายการเสื่อมสภาพของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ได้ [15]

ในปี พ.ศ. 2548 K. P. Mardira และคณะได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง Investigation of Modern Diagnostic Techniques for Metal Oxide Surge Arresters โดยศึกษาการใช้กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันทดสอบกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ระดับจำหน่ายที่มีการออกแบบฉนวนแข็งต่างกัน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของเนื้อฉนวนโดยการสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางจุลภาคของฉนวนแข็งโลหะออกไซด์ โดยกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษาจะถูกนำไปทดสอบแรงดันคงเหลือจากกระแสอิมพัลส์ และการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง การทดสอบทางไฟฟ้าแบบไม่ทำลายโดยใช้วิธีโพลาริเซชัน เช่น แรงดันย้อนกลับและโพลาริเซชันการวัดกระแสโพลาริเซชันได้แสดงตัวบ่งชี้ที่ดีของระดับอายุของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ ผลการทดสอบแบบไม่ทำลายและการทดสอบแบบทำลายที่ได้จากการศึกษานี้ยังพิสูจน์ว่ามีความสัมพันธ์อย่างมากระหว่างคุณสมบัติทางไฟฟ้าและลักษณะโครงสร้างจุลภาคของฉนวนโลหะออกไซด์ [14]

ในปี พ.ศ. 2563 C. Chuayin และคณะได้นำเสนองานวิจัยเรื่อง The Effect of Electrical and Moisture Degradation of Metal Oxide Varistor with Insulation Diagnosis ทำการวิเคราะห์การตอบสนองไดอิเล็กตริกของฉนวนโลหะออกไซด์ของกัปดักเสิร์จที่ผ่านการเร่งการเสื่อมสภาพของฉนวนโดยวิธีการป้อนกระแสอิมพัลส์และการเพิ่มความชื้น ผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสามารถอธิบายความแตกต่างของการเสื่อมสภาพของฉนวนโลหะออกไซด์จากการเร่งการเสื่อมสภาพทั้งสองกรณีได้ [17]

บทที่ 2

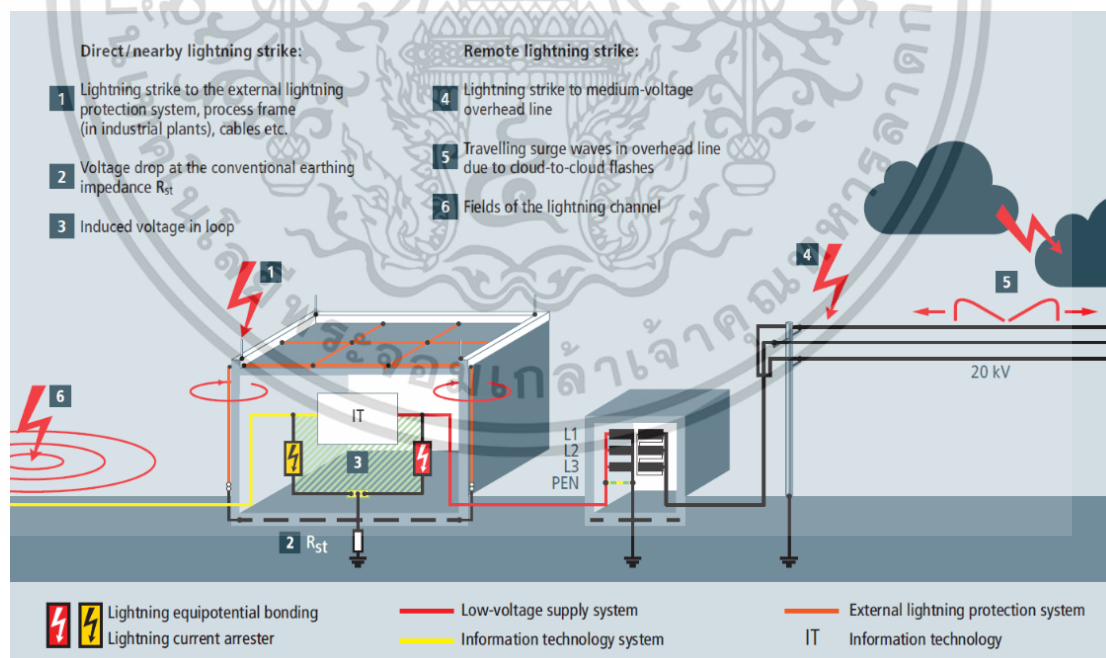
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้อธิบายถึงหลักการการทำงานของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ รวมถึงการทดสอบทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ ได้แก่ การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนและการวัดค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

2.1 อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ (Surge Protection Device: SPD) [1-2]

อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ (SPD) คืออุปกรณ์หรืออุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าจากเสิร์จหรือไฟกระชาก อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จทำหน้าที่จำกัดแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้า

เพื่อความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า การติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับระบบไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพของระบบ โดยระบบไฟฟ้าทั้งระบบส่งและจำหน่ายกำลังไฟฟ้ามักมีค่าใช้จ่ายที่สูง เนื่องจากอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบส่วนใหญ่มีราคาต้นทุนและราคาบำรุงรักษาที่สูง อุปกรณ์ดังกล่าวได้แก่ สายส่ง (แบบเหนือศีรษะหรือใต้ดิน) และหม้อแปลงไฟฟ้าตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในระหว่างการใช้อาจมีปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดแรงดันเกินในระบบได้ โดยมีสาเหตุจากปัจจัยที่ควบคุมได้และควบคุมไม่ได้ ปัจจัยดังกล่าวรวมถึงปัจจัยเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและสวิตชิง ซึ่งเป็นสิ่งที่ควบคุมไม่ได้ [3-5]

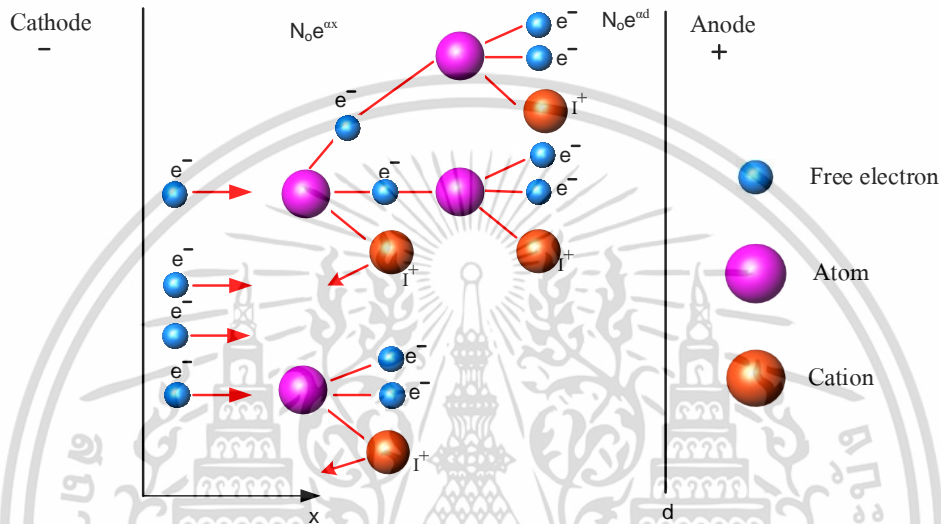


รูปที่ 2.1 ผลของแรงดันเหนี่ยวนำจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าที่มีต่อระบบไฟฟ้า

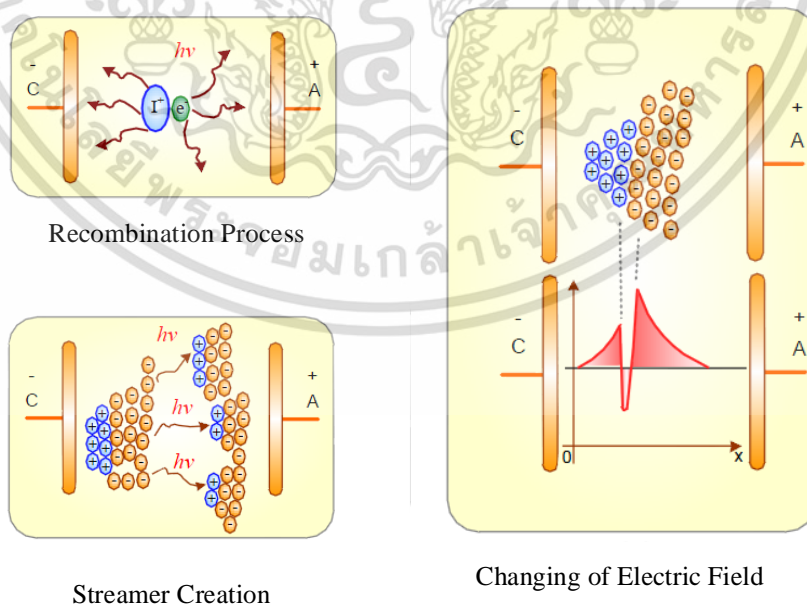
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเป็นการปล่อยกระแสไฟฟ้าที่มองเห็นได้ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อบริเวณหนึ่งของเมฆได้รับประจุไฟฟ้าส่วนเกิน ไม่ว่าจะเป็นบวกหรือลบ ซึ่งเพียงพอที่จะทำลายความคงทนต่อการเบรกดาวนซ์ของอากาศ การเกิดเบรกดาวนซ์ในอากาศสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีกลไกการเบรกดาวนซ์ของทาวนเซนต์และสตรีเมอร์



รูปที่ 2.2 กลไกการเบรกดาวนซ์ของอากาศจากการเกิดประจุอิสระของทาวนเซนต์

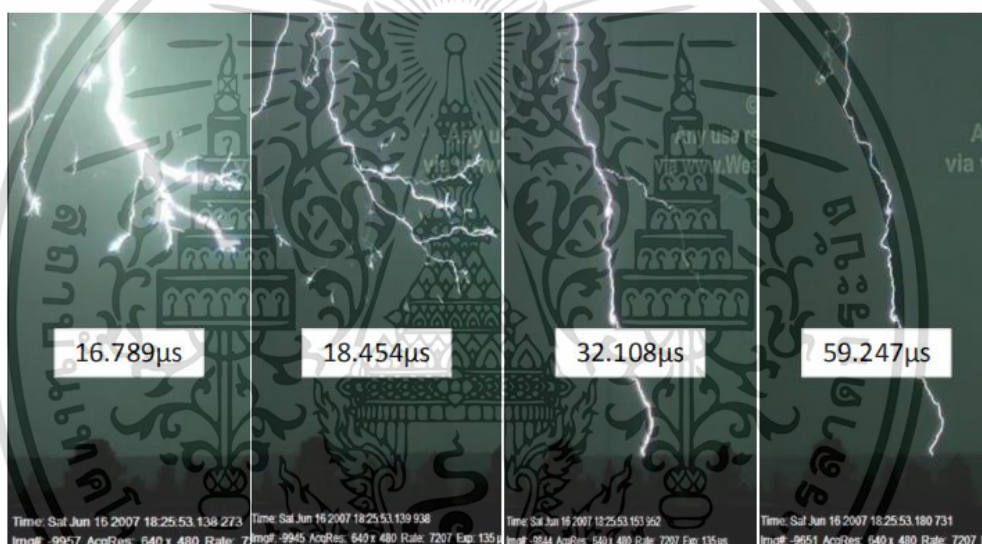


รูปที่ 2.3 กลไกการเบรกดาวนซ์ของอากาศของสตรีเมอร์

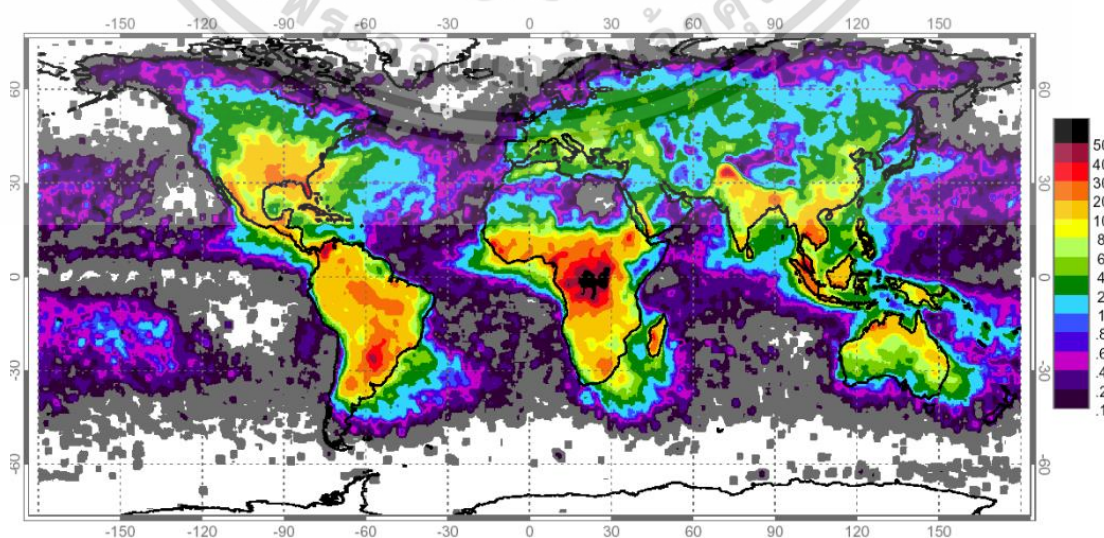
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการเบรกดาวนทั้งสองอาศัยทฤษฎีจลน์เป็นพื้นฐานการอธิบายระยะเบรกดาวนอิสระ การถ่ายทอดพลังงาน การเกิดประจุอิสระ โดยการไอออไนเซชันทำให้เกิดการเพิ่มทวีคูณของอนุภาค ประจุอากาศ นำไปสู่การดิสชาร์จที่ระยะเฉลี่ยของการเบรกดาวนภายใต้สนามไฟฟ้า ไฟฟ้านั้นสามารถเกิดได้ด้วยกระบวนการ 4 ประเภทได้แก่

1. การแยกประจุ คือการชนกันของมวลอากาศจนทำให้เกิดประจุอิสระตามกระบวนการเบรกดาวน
2. การก่อตัวของหัวนำร่อง (Leader) เมื่อการแยกประจุสร้างสตรีมเมอร์ที่มากพอ ประจุที่อยู่บนพื้นที่ ต่ำกว่ากลุ่มประจุบนอากาศจะเกิดกระบวนการแยกประจุในลักษณะเดียวกัน
3. การเกิดดิสชาร์จ เกิดขึ้นเมื่อกระบวนการในข้อที่ 1 และ 2 สร้างประจุมากพอจนเชื่อมเส้นทางเบรก ดาวนของอากาศจนเกิดเป็นปรากฏการณ์ฟ้าผ่า
4. การผ่าซ้ำ เกิดขึ้นซ้ำตามกระบวนการที่ 1 ถึง 3 และสิ้นสุดลงเมื่อพลังงานของกระบวนการหมดไป



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการเกิดฟ้าผ่าที่ถูกบันทึกด้วยกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างแผนที่ความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า

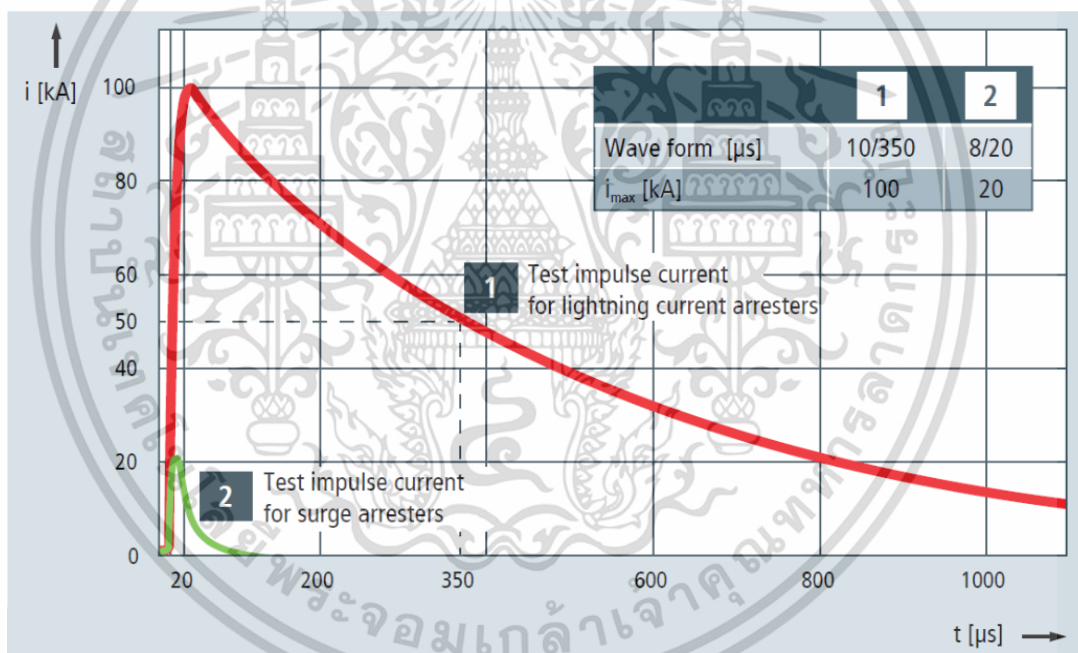
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการแข่งขันเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปจะประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟ้าผ่านั้นจัดเป็นเสิร์จประเภทหนึ่ง เมื่อปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเกิดขึ้นในระบบสัญญาณไฟฟ้าจะแสดงสัญญาณความถี่สูงและพลังงานสูง โดยลักษณะสัญญาณจะเป็นคลื่นความถี่สูงที่มีระยะเวลาหน้าคลื่น 8 μs และหลังคลื่น 10 μs เรียกว่ากระแสอิมพัลส์ 8/20 μs โดยนอกจากฟ้าผ่ายังมีสัญญาณความถี่สูงพลังงานสูงรูปแบบอื่น เช่น สัญญาณสวิตชิง

2.1.2 กระแสอิมพัลส์ [5-8]

พารามิเตอร์ลักษณะเฉพาะของกระแสอิมพัลส์ได้แก่ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส ประจุ และพลังงานจำเพาะ สามารถอธิบายได้โดยใช้รูปแบบคลื่นกระแสอิมพัลส์ 10/350 μs โดยได้มีการกำหนดไว้ในมาตรฐานสากล ยุโรป และระดับชาติว่าเป็นกระแสทดสอบสำหรับส่วนประกอบและอุปกรณ์ที่ป้องกันฟ้าผ่าโดยตรง นอกจากนี้แรงดันตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ของสายดินในระบบส่งและจำหน่ายไฟฟ้าแล้ว เสิร์จยังเกิดขึ้นได้ในการติดตั้งระบบไฟฟ้าในอาคารและระบบอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อด้วย

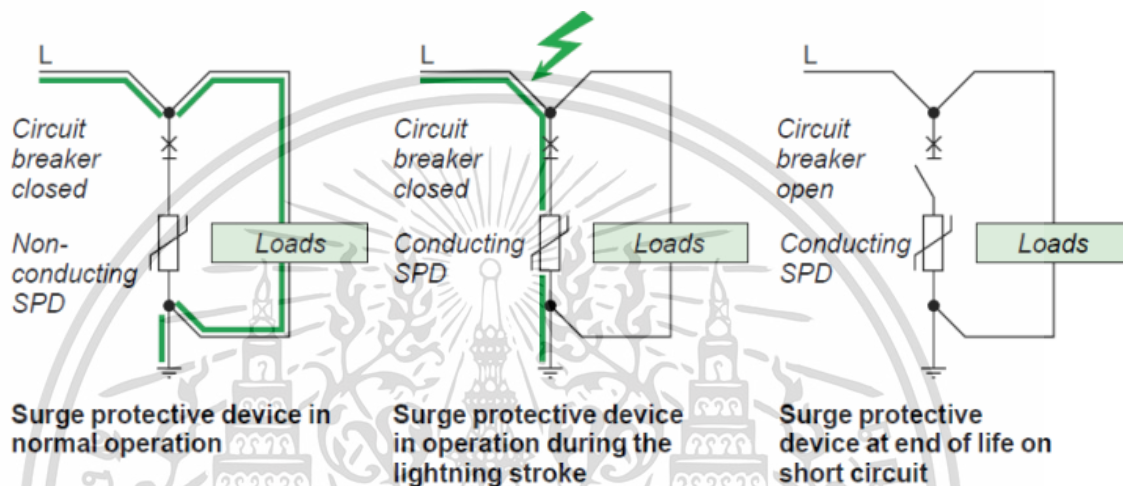


รูปที่ 2.6 กระแสอิมพัลส์สำหรับการทดสอบกับดักเสิร์จ

เนื่องจากผลเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานของเสิร์จเหนี่ยวนำเหล่านี้และกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นนั้นต่ำกว่าพลังงานของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าโดยตรงมาก ดังนั้นจึงสามารถอธิบายได้ด้วยรูปแบบคลื่นกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs ส่วนประกอบและอุปกรณ์ที่ไม่ต้องนำกระแสที่เกิดจากฟ้าผ่าโดยตรงจึงได้รับการทดสอบด้วยกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs

2.1.3 ประเภทและการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันลျี่จ

ความต้านทานต่อกระแสฟ้าผ่าเป็นลักษณะสำคัญของอุปกรณ์ตัดการเชื่อมต่อกายนอกของอุปกรณ์ป้องกันลျี่จ อุปกรณ์ต้องสามารถผ่านการทดสอบมาตรฐานโดยไม่เกิดการทริปของตัวตัดวงจร ณ กระแสอิมพัลส์ต่อเนื่อง 15 ครั้งที่ค่ากระแสดิสชาร์จปกติ (I_n) อุปกรณ์ตัดการเชื่อมต่อกายนอกต้องมีความสามารถในการตัดการเชื่อมต่อกเท่ากับหรือมากกว่าค่ากระแสไฟล้ตวงจรที่สันนิษฐานไว้ที่จุดติดตั้ง



รูปที่ 2.7 การทำงานอุปกรณ์ป้องกันลျี่จภายใต้กระแสอิมพัลส์

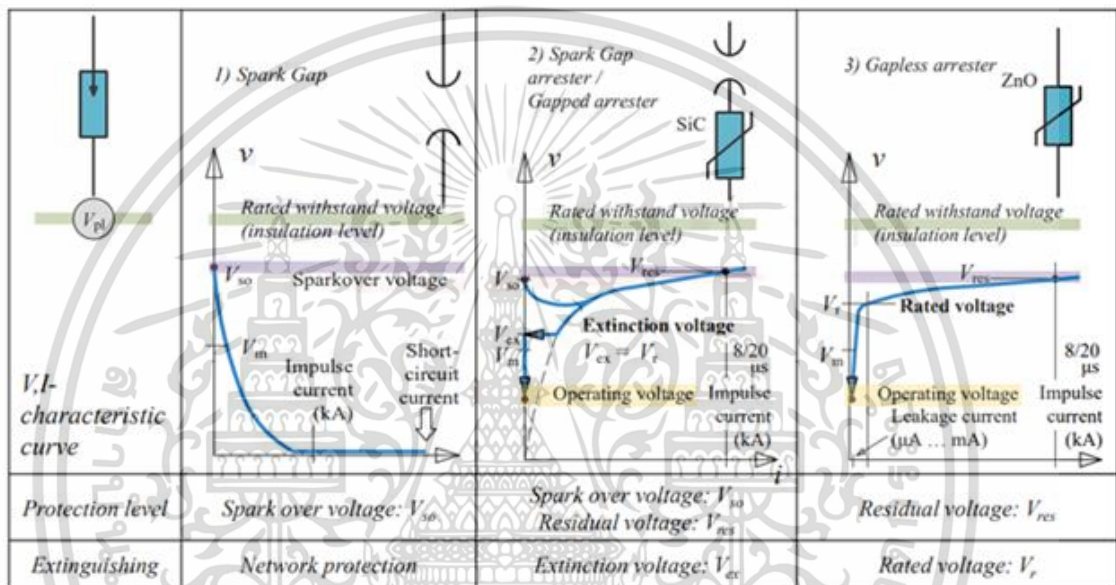
อุปกรณ์ป้องกันลျี่จที่นิยมใช้งานในระบบไฟฟ้าแรงต่ำถึงแรงสูงได้แก่

1. สปาร์คแกป คืออุปกรณ์ป้องกันลျี่จที่อาศัยหลักการเบรกดาวนของสลุญญากาศในการใช้งาน โดยภายในสปาร์คแกปจะเป็นช่องว่างอากาศระหว่างอิเล็กโตรด เมื่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่ามากถึงระดับแรงดันป้องกันจะเกิดการดิสชาร์จระหว่างอิเล็กโตรด โดยกระแสดิสชาร์จจะถูกนำลงกราวด์ของสปาร์คแกป แต่มีข้อจำกัดในการใช้งานคือสามารถกำจัดพลังงานจากการเกิดไฟฟ้าล้ตวงจรเพียงอย่างเดียว
2. กัปเดตลျี่จแบบมีแกปหรือวาริสเตอร์ คืออุปกรณ์ป้องกันลျี่จที่อาศัยฉนวนซิลิกอนคาไบด์ (SiC) ซึ่งเป็นฉนวนแข่งร่วมนกับแกปอากาศในการใช้งาน โดยฉนวนแข่งซิลิกอนคาไบด์ทำหน้าที่เป็นความต้านทานในวงจร ณ ค่าความนำไฟฟ้าค่าหนึ่ง เมื่อแรงดันไฟฟ้าระหว่างอิเล็กแกปรวมถึงฉนวนซิลิกอนคาไบด์มีค่ามากถึงระดับแรงดันป้องกัน การเกิดดิสชาร์จจะถูกนำลงกราวด์ได้ดีกว่าการใช้สปาร์คแกปในการป้องกัน นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการกำจัดพลังงานจากกระแสอิมพัลส์ที่เข้ามาในระบบได้ แต่มีข้อจำกัดในส่วนองกระแสแยกไหลที่เกิดขึ้น เนื่องจากความต่างของแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จของแกปอากาศ ทำให้มีกระแสอิมพัลส์บางส่วนที่มีค่ายอดกระแสต่ำแยกไหลเข้าไปในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กัปดักเสิร์จแบบไร้แกปหรือกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ คืออุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่อาศัยฉนวนซิงก์ออกไซด์ (ZnO) ในการใช้งาน โดยมีความแตกต่างจากฉนวนซิลิกอนคาไบด์คือ ไม่มีแกประหว่างพื้นที่หน้าตัดฉนวนในกรณีใช้งานโดยติดตั้งฉนวนซิงก์ออกไซด์ซ้อนกัน กัปดักเสิร์จแบบไร้แกปมีความสามารถในการกำจัดพลังงานจากกระแสอิมพัลส์ที่ดีกว่ากัปดักเสิร์จประเภทอื่น เนื่องจากมีความสามารถในการนำกระแสจากการดิสชาร์จ ณ แรงดันป้องกันทำให้มีกระแสแยกไหลเข้าวงจรป้องกันที่น้อยมาก

โดยรูปอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกันของอุปกรณ์เหล่านี้แสดงในรูปที่ 2.7

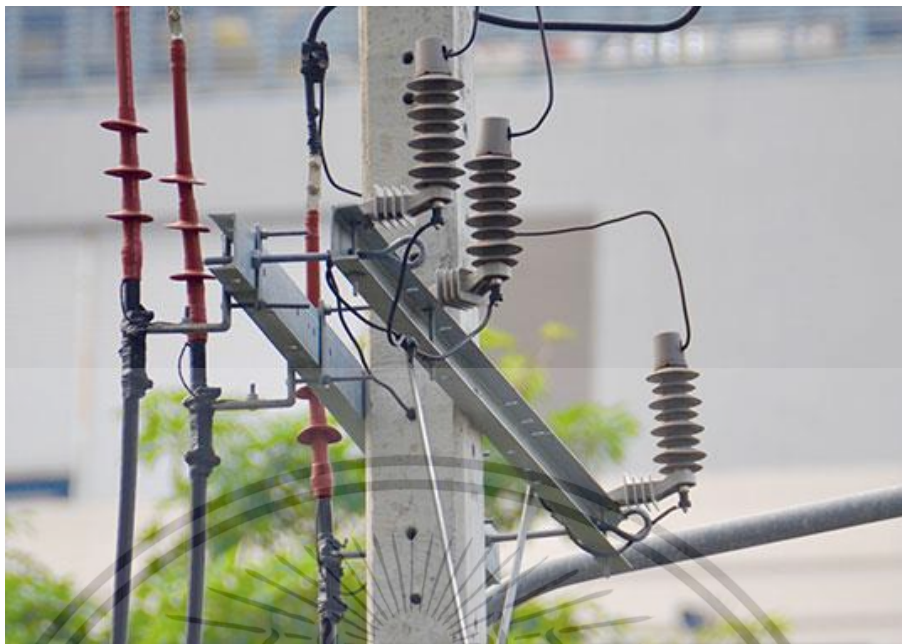


รูปที่ 2.8 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและระดับการป้องกันระบบไฟฟ้าของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ

2.2 กัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์

2.2.1 การจำแนกกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์

หน้าที่หลักของกัปดักเสิร์จคือการปกป้องอุปกรณ์ทั้งหมดในระบบจากแรงดันไฟเกินกว่าระดับปกติของระบบและการใช้งานภายใต้ไฟฟ้ากระแสสลับอย่างต่อเนื่อง รวมถึงป้องกันปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและสวิตซิงซึ่งเป็นสาเหตุของการสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั้งในระบบจำหน่ายและระบบสถานีไฟฟ้า โดยอุปกรณ์หลักที่ต้องทำการติดตั้งกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง หม้อแปลงไฟฟ้าจำหน่าย และสายเคเบิลไฟฟ้าแรงสูงใต้ดิน โดยอุปกรณ์เหล่านี้เป็นอุปกรณ์ที่มีต้นทุนในการจัดซื้อ ติดตั้ง และบำรุงรักษาสูง ในปัจจุบันอุปกรณ์ดังกล่าวได้มีข้อกำหนดเพิ่มเติมเพื่อการใช้งานด้วยระยะเวลาที่นานขึ้น เช่น การตรวจจับกระแสดิสชาร์จบางส่วน การตรวจจับสัญญาณเสิร์จ เพื่อให้มีข้อมูลสำหรับการแก้ไขและป้องกันระบบไฟฟ้าที่มากขึ้น



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการติดตั้งกับดักเสิร์จระดับจำหน่ายเพื่อป้องกันสายส่งไฟฟ้าใต้ดิน

ปัจจุบันหลังจากการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับดักเสิร์จ การออกแบบและทดสอบกับดักเสิร์จตามมาตรฐาน IEC ได้มีการมุ่งเน้นจุดประสงค์การทดสอบโดยใช้ขั้นตอนการเร่งอายุคือการทดสอบแบบสแตนด์โลนหากโดยมีเกณฑ์การผ่านหรือไม่ผ่านที่แตกต่างกัน โดยมีการจำแนกประเภทดักฟ้าผ่าโลหะออกไซด์โดยการทดสอบความทนทานต่อพลังงาน ข้อกำหนดการทดสอบขึ้นอยู่กับการใช้งานกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์คือการใช้งานในระดับจำหน่ายและระดับสถานีไฟฟ้า [3-5] โดยมีข้อกำหนดการออกแบบดังต่อไปนี้

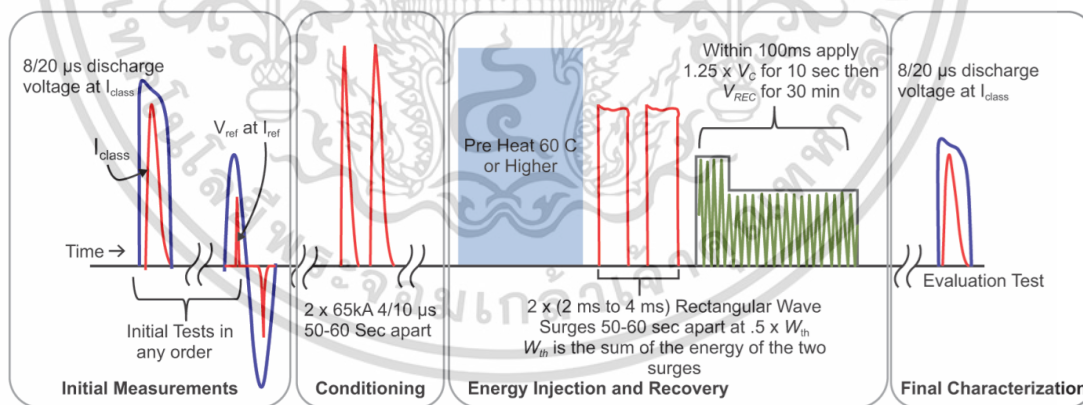
1. กระแสดีสชาร์จปกติ (Nominal Discharge Current) คือ ค่ายอดของกระแสไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นอิมพัลส์ 8/20 μs ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกระแสที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและการเกิดสวิตชิงขึ้นในระบบ
2. กระแสสวิตชิงอิมพัลส์ดีสชาร์จ (Switching Impulse Discharge Current) คือ กระแสในช่วงระยะเวลาสั้นของสัญญาณอิมพัลส์ รูปแบบมาตรฐานของอิมพัลส์สวิตชิงทั่วไปคือรูปคลื่น 250/2500 μs โดยปรากฏการณ์สวิตชิงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบ
3. ประจุถ่ายเทปรากฏ (Q_{rs}) คือความสามารถในการถ่ายโอนประจุสูงสุดที่ระบุของกับดักเสิร์จ ในรูปแบบของเหตุการณ์เดี่ยวหรือต่อเนื่องของไฟกระชากที่อาจถูกถ่ายโอนผ่านกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์โดยไม่ทำให้เกิดความล้มเหลวทางกลหรือการเสื่อมสภาพทางไฟฟ้าที่ยอมรับไม่ได้กับตัวต้านทานโลหะออกไซด์ ซึ่งใช้ในการออกแบบทั้งระดับสถานีและระดับจำหน่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ประจุถ่ายเทเนื่องจากอุณหภูมิ (Q_{th}) คือประจุไฟฟ้าสูงสุดที่ระบุซึ่งอาจถูกถ่ายโอนผ่านกับดักเสิร์จ มีกำหนดเวลา 3 นาทีในการทดสอบด้วยวิธีอุณหภูมิหมุนเวียนโดยไม่ทำให้เกิด Thermal Runaway ใช้เฉพาะการออกแบบกับดักเสิร์จระดับจำหน่ายเท่านั้น
5. ระดับพลังงานเนื่องจากอุณหภูมิ (W_{th}) คือ พลังงานที่ระบุสูงสุดที่กำหนดในหน่วย kJ/kV ของ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (U_r) ที่อาจถูกฉีดเข้าไปในส่วน Arrester หรือ Arrester ภายใน 3 นาทีในการทดสอบการนำความร้อนกลับมาใช้ใหม่โดยไม่ทำให้เกิด Thermal Runaway โดยใช้เฉพาะการออกแบบกับดักเสิร์จระดับสถานีเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 การจำแนกประเภทดักฟ้าผ่า [1]

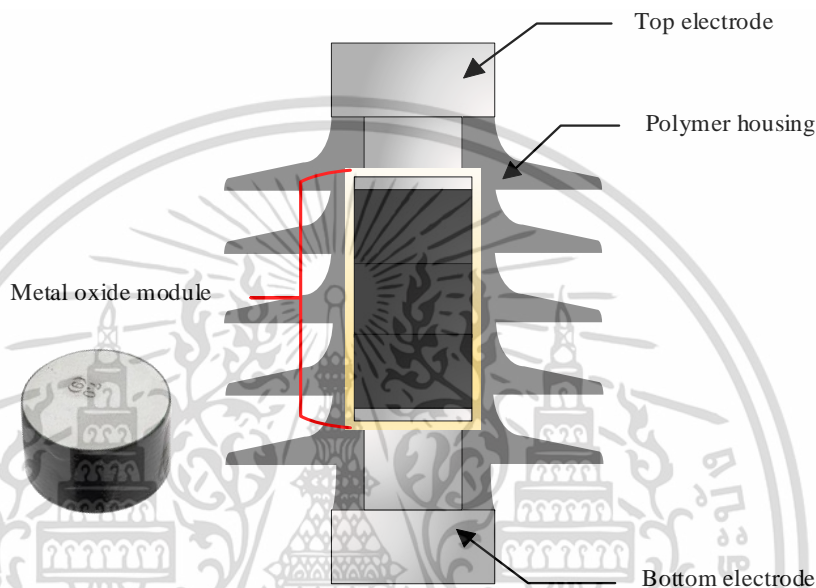
การจำแนกประเภทดักฟ้าผ่า	ระดับสถานีไฟฟ้า			ระดับจำหน่าย		
	ระดับความสูง			ระดับความสูง		
	ต่ำ	กลาง	สูง	ต่ำ	กลาง	สูง
Nominal Discharge Current	10 kA	10 kA	20 kA	2.5 kA	5 kA	10 kA
Switching impulse discharge current	0.5 kA	1 kA	2 kA	-	-	-
Q_{rs} (C)	≥ 1.0	≥ 1.6	≥ 2.4	≥ 0.1	≥ 0.2	≥ 0.4
W_{th} (kJ/kV) of rated voltage	≥ 4	≥ 7	≥ 10	-	-	-
Q_{th} (C)	-	-	-	≥ 0.45	≥ 0.7	≥ 1.1



รูปที่ 2.10 แผนผังแสดงขั้นตอนการทดสอบความทนทานต่อพลังงานของกับดักเสิร์จ [1]

กับดักเสิร์จโลหะออกไซด์จัดเป็นกับดักเสิร์จประเภทไร้แก๊บ มีลักษณะการฉนวนที่เป็นวัสดุทรงกระบอกวางทับซ้อนกันเป็นชั้น โดยจำนวนชั้นของฉนวนแข็งทรงกระบอกจะขึ้นอยู่กับระบบที่นำกับดักเสิร์จไปใช้งาน โครงสร้างที่นิยมออกแบบสำหรับระบบจำหน่ายมีประกอบหลักเป็นโมดูลโลหะออกไซด์ ฉนวนโพลีเมอร์ อิเล็กโตรดและขั้วต่อไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยบล็อกโลหะออกไซด์ทรงกระบอกซ้อนกันเป็นโมดูลจะเสริมความแข็งแรงด้วยการพันด้วยไฟเบอร์กลาส โมดูลบล็อกโลหะออกไซด์นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ทำหน้าที่เป็นความต้านทานแบบไม่เชิงเส้น บล็อกทรงกระบอกภายในโมดูลจะไม่นำกระแสในระหว่างที่ทำงานภายใต้แรงดันไฟฟ้าใช้งาน (มีคุณสมบัติเหมือนลูกถ้วยที่ใช้ป้องกันสายส่ง) กระบวนการนำกระแสของโลหะออกไซด์เหล่านี้จะดำเนินต่อไปหลังจากที่บล็อกโลหะออกไซด์ใช้แรงดันไฟฟ้าเกินจากระบบหรือฟ้าผ่า บล็อกโลหะออกไซด์ภายในโมดูลไฟเบอร์กลาสจะดิสชาร์จกระแสจากพลังงานส่วนเกินจากระบบไปยังพื้นดิน ฉนวนภายนอกที่เป็นโพลีเมอร์มีหน้าที่ในการช่วยลดระยะดิสชาร์จจากปรากฏการไฟวาบตามผิวของกับดักเสิร์จ [2,8]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ใช้ในการศึกษา

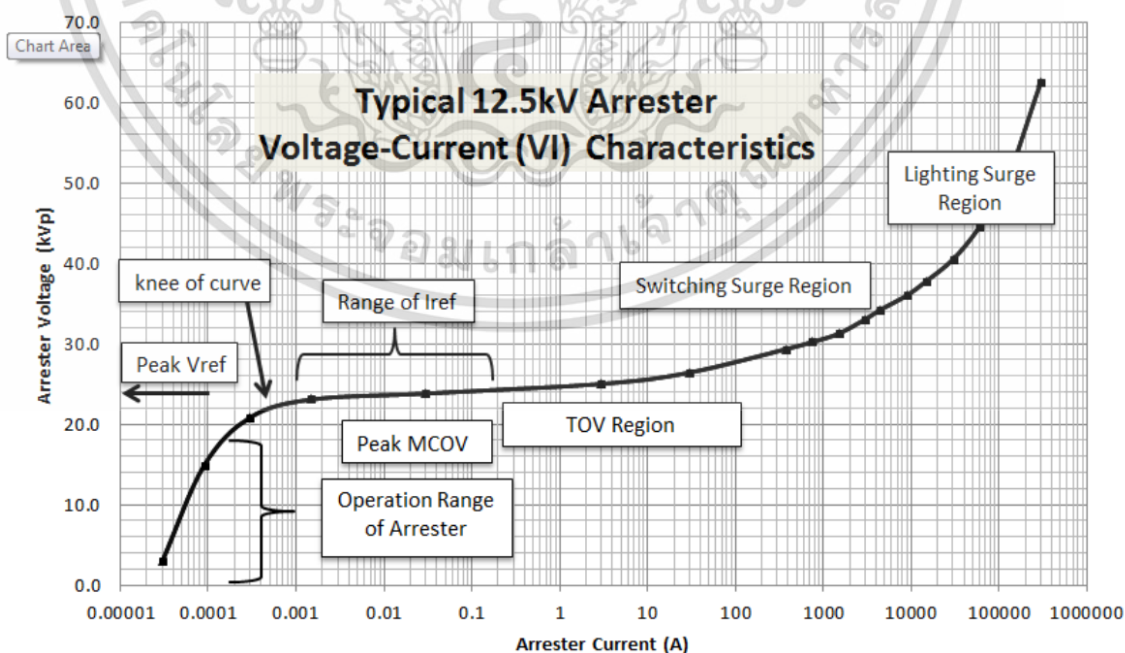
2.2.2 ลักษณะเฉพาะแรงดันกับกระแสของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ [2-8]

การเปลี่ยนแปลงความต้านทานของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์จะถูกระบุด้วยลักษณะเฉพาะแรงดันกับกระแสซึ่งบ่งบอกถึงช่วงแรงดันการใช้งานและลักษณะการทำงานของฉนวนความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกับดักเสิร์จได้ โดยสภาวะการทำงานสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สภาวะกับดักเสิร์จทำงานปกติ (Operate Mode) เป็นช่วงที่ความนำไฟฟ้าของฉนวนความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นมีความนำไฟฟ้าน้อยมาก ทำให้มีกระแสรั่วไหลเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย (ไม่เกิน 1 mA สำหรับกับดักเสิร์จระดับจำหน่าย) โดยมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่ายอดของกระแสรั่วไหลและองค์ประกอบกระแสความต้านทานของกระแสรั่วไหล
2. สภาวะเปลี่ยนการทำงาน เป็นช่วงที่ ระบุจากจุดหัวเข่า (Knee Point) ของกราฟลักษณะเฉพาะแรงดันกับกระแสของกับดักเสิร์จ ณ สภาวะนี้ กับดักเสิร์จจะใช้เวลาในการเปลี่ยนการทำงานเร็วมาก โดยในช่วงนี้จะเป็นจุดที่ฉนวนโลหะออกไซด์มีการเปลี่ยนค่าความต้านทานและความนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ช่วงสภาวะความต้านทานหรือสภาวะทำงานที่แรงดันและกระแสอ้างอิง (U_{ref} และ I_{ref}) เป็นช่วงที่เกิดขึ้นหลังกับดักเสิร์จเปลี่ยนการทำงานจากสภาวะปกติ ในสภาวะนี้ฉนวนความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจะมีพฤติกรรมการนำไฟฟ้ามากขึ้น โดยองค์ประกอบของกระแสความต้านทานจะสูงกว่ากระแสความจุไฟฟ้า เมื่อมีเหตุการณ์ที่ส่งผลให้แรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จเปลี่ยนแปลงแม้เพียงเล็กน้อยจะส่งผลให้ค่ายอดของกระแสรวมเปลี่ยนแปลงมากเนื่องจากพฤติกรรมของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น โดยสภาวะนี้จะเกิดขึ้นใช้เวลานานหรือน้อยขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น
4. สภาวะทำงานต่อเนื่อง (Maximum Continuous Operating Voltage – MCOV) เป็นสภาวะที่กับดักเสิร์จทำงานภายใต้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงอย่างต่อเนื่อง โดยความเครียดสนามไฟฟ้านี้จะเกิดขึ้นจากแรงดันที่มีค่ายอด 75 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง
5. สภาวะทำงานภายใต้แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage – TOV) เป็นสภาวะที่เกิดขึ้นเมื่อกับดักเสิร์จได้รับแรงดันเกินจากระบบ (มากกว่า 10 เท่าของแรงดันปกติของระบบ) กระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จจะมีค่าสูงมากในช่วงการทำงานนี้ โดยช่วงสภาวะทำงานภายใต้แรงดันเกินชั่วคราวจะระบุด้วยจุดหัวเข่า (Knee Point) ณ ค่ากระแสสูงกว่ากระแสอ้างอิงของลักษณะเฉพาะแรงดันกับกระแส
6. สภาวะทำงานภายใต้ปรากฏการณ์สวิตชิงและฟ้าผ่า (Switching and Impulse Surge) เป็นสภาวะที่กับดักเสิร์จทำงานเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่กำจัดพลังงานจากปรากฏการณ์ข้างต้น



รูปที่ 2.12 กราฟลักษณะเฉพาะแรงดันกับกระแสของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ ณ แรงดันปกติ 12.5 kV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟลักษณะเฉพาะแรงดันกับกระแสของกัปดักเสิร์จสามารถระบุได้จากสมการที่ (2.1) ซึ่งเป็นรูปทั่วไปของเส้นโค้งลักษณะเฉพาะแรงดันกับกระแสของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ ได้แก่ สปาร์คแกป วาริสเตอร์ และกัปดักเสิร์จ โดยสมการทั่วไปดังกล่าวสามารถอธิบายได้เพียงแรงดันและกระแสที่ใช้งานในระบบแรงดันต่ำ สำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูงจะใช้สมการที่ (2.2) ค่าคงที่วัสดุและฉนวนความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นจะระบุเป็น a_n ที่สภาวะการใช้งานของวัสดุนั้น ๆ โดยตัวแปรแรงดัน (U) และกระแส (I) จะได้จากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและความคงทนต่อพลังงานอิมพัลส์

$$I = kU^\alpha \tag{2.1}$$

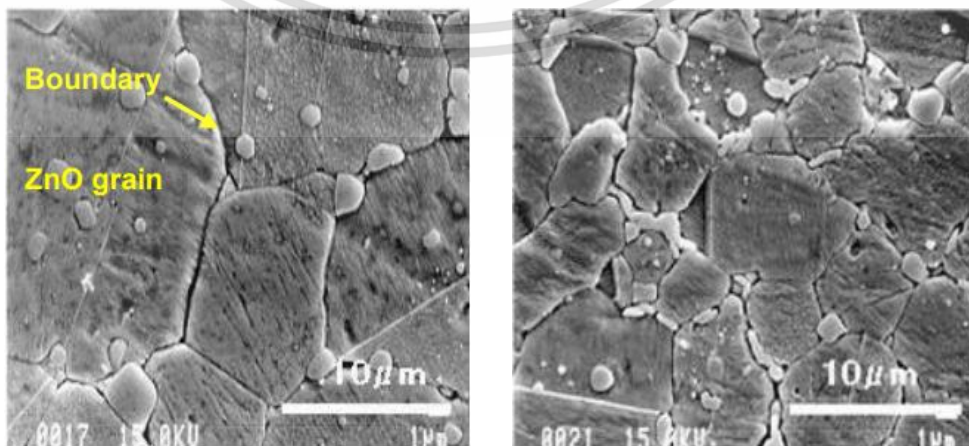
เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า
 U คือ แรงดันไฟฟ้า
 k คือ ค่าคงที่ทางฉนวนของวัสดุที่ใช้งานเป็นอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ
 α คือ แฟกเตอร์ความไม่เป็นเชิงเส้นของฉนวน (มีค่าเป็น 1 ณ สภาวะทำงานปกติ)

$$\text{Log}(U) = a_1 + a_2 \log(I) + a_3 (\log(I))^2 + a_4 (\log(I))^3 \tag{2.2}$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า
 U คือ แรงดันไฟฟ้า
 a_n คือ ค่าคงที่ทางฉนวนของวัสดุในแต่ละสภาวะการทำงานของกัปดักเสิร์จ

2.2.3 ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น [6-9]

โลหะออกไซด์ที่ใช้งานในกัปดักเสิร์จเป็นฉนวนแข็งที่มีความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำเช่นเดียวกับวัสดุที่ใช้ในวาริสเตอร์หรือไดโอด แต่โลหะออกไซด์นั้นมีความสามารถในการทนพลังงานจากฟ้าผ่าได้ดีกว่าซิลิกอนซึ่งเป็นฉนวนแบบเดียวกัน ในปัจจุบันโลหะออกไซด์จึงนิยมนำมาใช้ฉนวนกัปดักเสิร์จมากกว่า



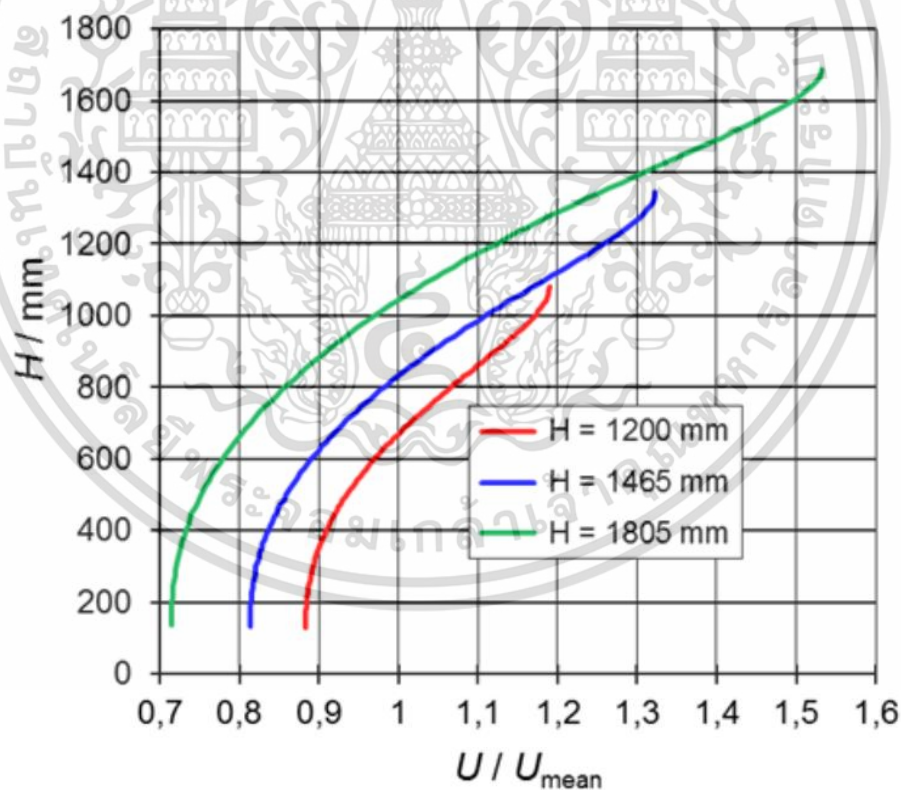
รูปที่ 2.13 ตัวอย่างเกรนของฉนวนโลหะออกไซด์ในแนวตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติที่ไม่เป็นเชิงเส้นของฉนวนโลหะออกไซด์นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นขอบเขตระหว่างเม็ดซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งหมายความว่าความแรงของสนามของตัวต้านทานโลหะออกไซด์ถูกกำหนดโดยจำนวนของชั้นขอบเขตต่อความสูงหนึ่งหน่วยของฉนวนโลหะออกไซด์และสามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการลดขนาดเกรนแล้วเพิ่มจำนวนของชั้นขอบเขตเนื้อของฉนวน

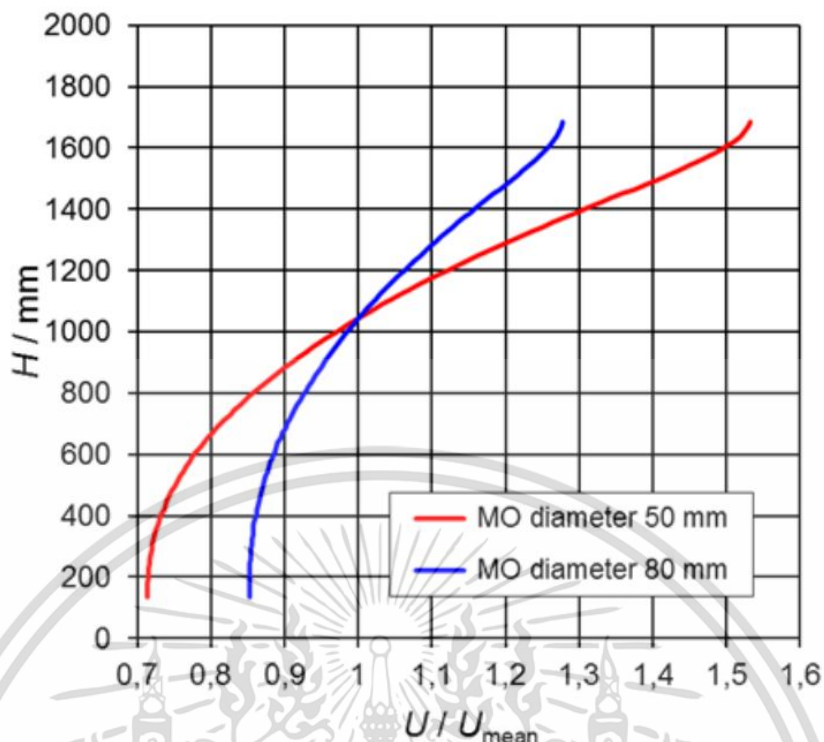
ในโหมดการทำงานต่อเนื่องอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทานโลหะออกไซด์กันจะสูงเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าและกระแสความถี่พลังงานขนาดเล็ก (หรือกระแสตรงในกรณีของระบบไฟฟ้ากระแสตรง) ซึ่งก็คือกระแสรั่วไหลจะเกิดขึ้น โหมดนี้มีผลภายใต้การทำงานต่อเนื่องจนถึงสถานะแรงดันไฟฟ้าเกินชั่วคราว โดยที่ตัวต้านทานหรือกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ แทบไม่มีผลกระทบต่อแรงดันไฟ แต่ต้องออกแบบให้ทนต่อความเครียดประเภทนี้

จากข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์อื่นๆ ทั้งหมดในระบบ ในกรณีที่เหมาะที่สุด ตัวต้านทานหรือกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ จะทำตัวเหมือนฉนวนในโหมดการทำงานนี้ ความจุไฟฟ้าจะจัดไปยังกราวด์หรือขึ้นส่วนชีวิตข้างเคียงทำให้เกิดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า การสูญเสียพลังงาน และอุณหภูมิในแนวแกนที่ไม่สม่ำเสมอ ในกรณีของกับดักเสิร์จแรงดันสูง

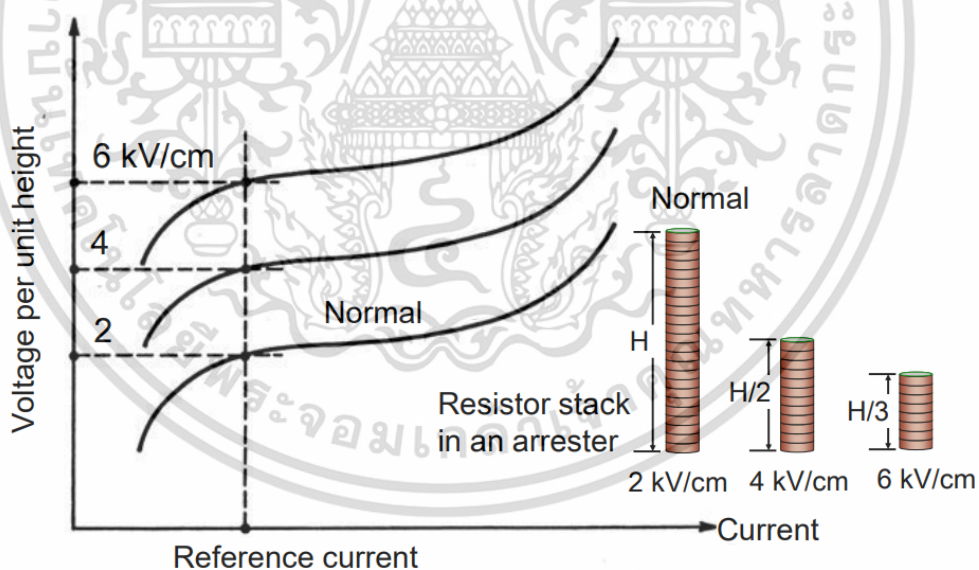


รูปที่ 2.14 ตัวอย่างผลของความสูงฉนวนที่มีผลกระทบต่อแรงดันของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างผลของขนาดหน้าตัดฉนวนที่มีผลกระทบต่อแรงดันของกักตักเสิร์จโลหะออกไซด์



รูปที่ 2.16 คุณสมบัติความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสของตัวต้านทานโลหะออกไซด์ที่มีการออกแบบบล็อกโลหะออกไซด์รองรับสนามไฟฟ้า 2 kV/cm มีความสูงเท่ากับ H

ขอบเขตที่ฉนวนโลหะออกไซด์สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้ระบบการคุมสนามไฟฟ้าเพิ่มเติม เงื่อนไขที่ระบบการคุมสนามไฟฟ้าถูกนำมาใช้และวิธีการดำเนินการโดยพื้นฐานแล้วขึ้นอยู่กับความยาวของฉนวนโลหะออกไซด์แต่ยังรวมถึงเส้นผ่านศูนย์กลางด้วย ดังนั้นจึงขึ้นอยู่กับความจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้โดยไม่หวังกำไรใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในตัวเองของตัวต้านทานฉนวนโลหะออกไซด์ที่ใช้ อิทธิพลของมาตรการในการปรับปรุงการจัดระบบ การคุมสนามไฟฟ้าตามส่วนที่ใช้งาน กับดักเสิร์จโลหะออกไซด์สามารถกำหนดได้ทั้งจากการจำลอง และโดยการวัดแรงดัน กระแส และอุณหภูมิ ไม่ว่าจะในกรณีใด ต้องมีการจำลองและวิธีการวัดที่ไม่ได้ เป็นมาตรฐาน รูปที่ แสดงตัวอย่าง (กำหนดโดยการจำลอง) ของอิทธิพลของความสูงของกับดักเสิร์จ (เช่น ความจุไฟฟ้าโดยรวมของกราวด์) และเส้นผ่านศูนย์กลางตัวต้านทานโลหะออกไซด์ (เช่น ความจุ ไฟฟ้าในตัวเองโดยรวม) รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างลักษณะแรงดันและกระแสที่แตกต่างกัน 3 แบบ ใน กรณีของความแรงของสนามเท่ากับ 4 kV/cm ความสูงรวมของตัวต้านทานโลหะออกไซด์ในกับดัก เสิร์จเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของความสูงปกติ

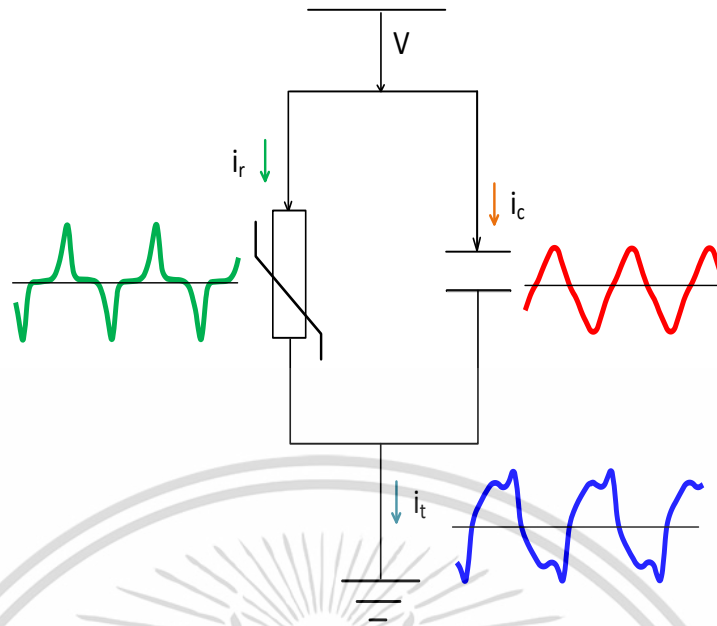
2.3 การทดสอบฉนวนทางไฟฟ้า

การทดสอบทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ในงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบแบบ ไม่ทำลาย โดยในกรณีการทดสอบยืนยันความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์จะใช้ การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงและการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน หลังจากยืนยันตัวอย่างทดสอบแล้ว ตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ทั้งหมดจะถูกนำไปทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน เพื่อวิเคราะห์ความไม่สมบูรณ์

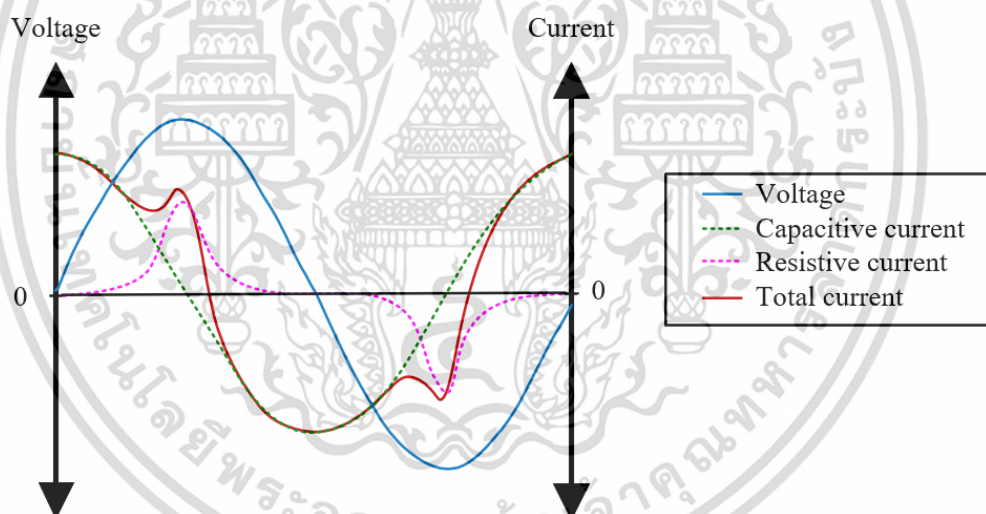
2.3.1 การทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง [10-11]

การสร้างองค์ประกอบความต้านทานกระแสเท่ากับกระแสอ้างอิงของกับดักเสิร์จหรือ ส่วนประกอบกับดักเสิร์จอาศัยแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของกับดักเสิร์จหลายหน่วยคือผลรวมของค่าอ้างอิง ในการทดสอบจะใช้กระแสอ้างอิง (ค่ายอด 0.05 – 1 mA) จะถูกป้อนให้กับดักเสิร์จโลหะออกไซด์เพื่อ บันทึกร่างดันไฟฟ้าอ้างอิง กระแสความจุไฟฟ้า กระแสความต้านทานและกระแสรวมจะถูกบันทึกเป็น เส้นโค้งแรงดันกับกระแสเพื่อนำไปสร้างเส้นโค้งคุณลักษณะแรงดันและกระแสของกับดักเสิร์จโลหะ ออกไซด์ โดยมาตรฐาน IEC และ IEEE ได้ให้คำนิยามสำหรับพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบไว้ดังนี้

1. Reference Voltage (U_{ref}) คือค่ายอดที่ต่ำที่สุดที่ไม่ขึ้นอยู่กับช่วงของแรงดันไฟฟ้าความถี่ กำลังไฟฟ้าหารด้วยรากที่สองของ 2 ซึ่งจำเป็นสำหรับการสร้างองค์ประกอบความ ต้านทานของกระแส โดยค่ายอดกระแสมีค่าเท่ากับกระแสอ้างอิงของสายดิน
2. Reference Current (I_{ref}) ค่าสูงสุดของส่วนประกอบตัวต้านทานของกระแสไฟความถี่ สูงพอที่จะทำให้ผลกระทบของความจุไฟฟ้าจรจัดของกับดักเสิร์จเล็กน้อย ซึ่ง ค่าพารามิเตอร์นี้จะต้องระบุโดยผู้ผลิต



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของกับดักเสิร์จภายใต้การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง [6]



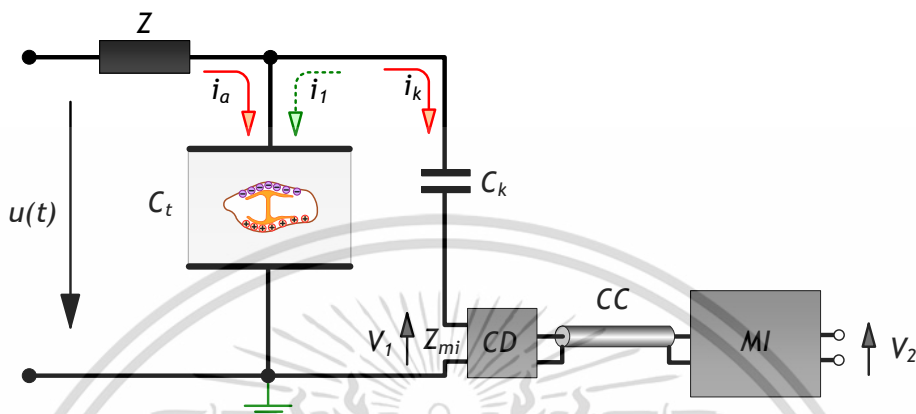
รูปที่ 2.18 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง กระแสความจุไฟฟ้า กระแสความต้านทานและกระแสรวมจากการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์

2.3.2 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน [12-13]

การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนเป็นการทดสอบไม่ทำลาย ดิสชาร์จบางส่วนคือการเบรกดาวนที่ไม่สมบูรณ์ พลังงานที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จนั้นมีไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดระหว่างแนวอิเล็กโตรดหรือแนวสนามไฟฟ้า เพราะด้านใดด้านหนึ่งยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์อยู่ ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือ ฉนวนมีความไม่สม่ำเสมอ หรือ ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือ มีสิ่งเจือปน ดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้ากระแสลับและสนามไฟฟ้ากระแสตรง ภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสลับ ดิสชาร์จบางส่วน จะเกิดขึ้นซ้ำๆ ทุกๆ ไซเคิลของแรงดัน โดยปกติจะเกิดขึ้นขณะที่แรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่ค่า ยอดในลักษณะแรมพ์



รูปที่ 2.19 วงจรการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน [13]

องค์ประกอบหลักของวงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสามารถสรุปได้ดังนี้

1. $U(t)$ คือแรงดันทดสอบ ซึ่งใช้หม้อแปลงทดสอบ AC เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน โดยหม้อแปลงทดสอบนี้จะต้องไม่มีแหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วน
2. Z คือวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณความถี่สูงจากวัสดุทดสอบไหลเข้าหม้อแปลงทดสอบ
3. C_k คือตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling Capacitor) ทำหน้าที่จ่ายประจุชดเชยให้กับวัสดุทดสอบเมื่อเกิดการดิสชาร์จบางส่วนภายในวัสดุทดสอบ
4. C_t คือวัสดุทดสอบโดยระบุเป็นค่าความจุไฟฟ้า โดยค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบจะต้องน้อยกว่าค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุคัปปลิงอย่างน้อย 10 เท่า
5. CD คืออุปกรณ์คัปปลิง (Coupling Device) ทำหน้าที่แปลงสัญญาณกระแสดิสชาร์จให้อยู่ในรูปสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้า ภายในจะเป็นองค์ประกอบของความต้านทาน ความนำไฟฟ้า และความจุไฟฟ้าซึ่งทำหน้าที่ร่วมกันเป็นวงจรความถี่รวม โดยค่าความถี่กลางควรออกแบบให้อยู่ที่ 250 kHz และมีขอบเขตความถี่บนและขอบเขตความถี่ล่างห่างจากค่าความถี่กลาง 150 kHz
6. CC คือสายสัญญาณเชื่อมต่ออุปกรณ์ (Connecting Cable) ทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณจากอุปกรณ์คัปปลิงเข้าสู่อุปกรณ์วัด
7. MI คืออุปกรณ์วัด (Measuring Instrument) ทำหน้าที่อ่านค่าแรงดันและแปลงค่ากระแสให้อยู่ในเทอมประจุไฟฟ้า โดยทั่วไปจะใช้เครื่องมือวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วน

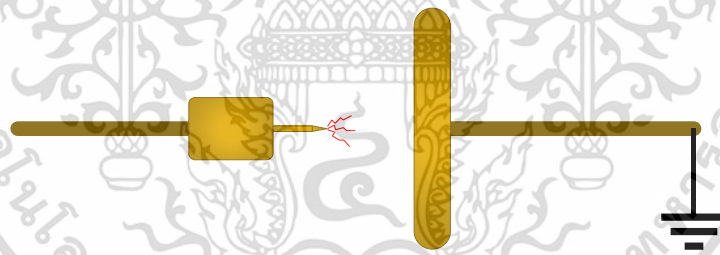
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองอิเล็กทรอนิกส์คู่ขนาน ดิสชาร์จบางส่วนสามารถจำแนกออกเป็น 3 แบบ รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์จำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนแสดงดังรูปที่ 2.20 รูปที่ 2.22 และ รูปที่ 2.24 และรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Phase Resolved Partial Discharge pattern: PRPD Pattern) แสดงดังรูปที่ 2.21 รูปที่ 2.23 และรูปที่ 2.25 โดย PRPD Pattern จากการวัดจะแสดงในรูปของค่ายอดประจุต่อเวลา โดยค่ายอดประจุที่ทำการวัดเป็นค่ายอดประจุที่ผ่านการคำนวณด้วยอัตราการเกิดซ้ำ

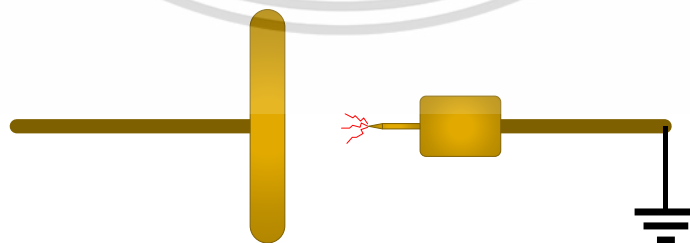
2.2.3.1 โคโรนาดิสชาร์จ (Corona discharge)

โคโรนาดิสชาร์จเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าพลังงานสูงภายในเนื้อฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เช่น ขอบคม ปลายแหลม ในบางกรณีอาจส่งผลทำให้เกิดแสง และเกิดปฏิกิริยาเคมี เมื่อโคโรนาถูกสะสมมากขึ้นจะยิ่งทำลายเนื้อฉนวนมากขึ้น ภายใต้แรงดันค่าหนึ่ง ประจุสะสมที่ขอบคมหรือปลายแหลมถูกสะสมบริเวณที่ประจุสะสมจะเปรียบเสมือนเป็นส่วนหนึ่งของตัวนำไฟฟ้า เมื่อตัวนำไฟฟ้างอกยาวใหญ่ขึ้น จะทำให้ระยะระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทรดลดลงและระยะเบรกดาวนระหว่างอิเล็กทรอนิกส์ทรดสั้นลง ทำให้นำไปสู่การดิสชาร์จได้ง่ายขึ้น

PRPD Pattern ของโคโรนาดิสชาร์จจากการวัดสัญญาณกระแสดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นที่มุม 90 และ 270 องศาของสัญญาณแรงดัน



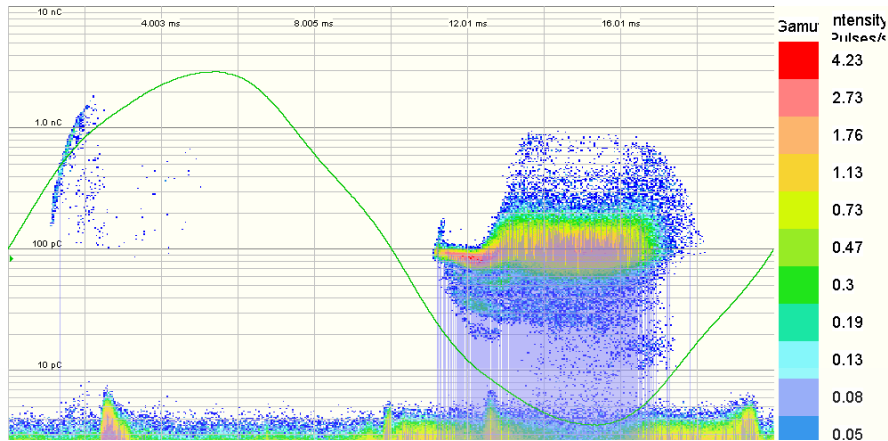
(ก) ฝั่งไฟฟ้าแรงสูง



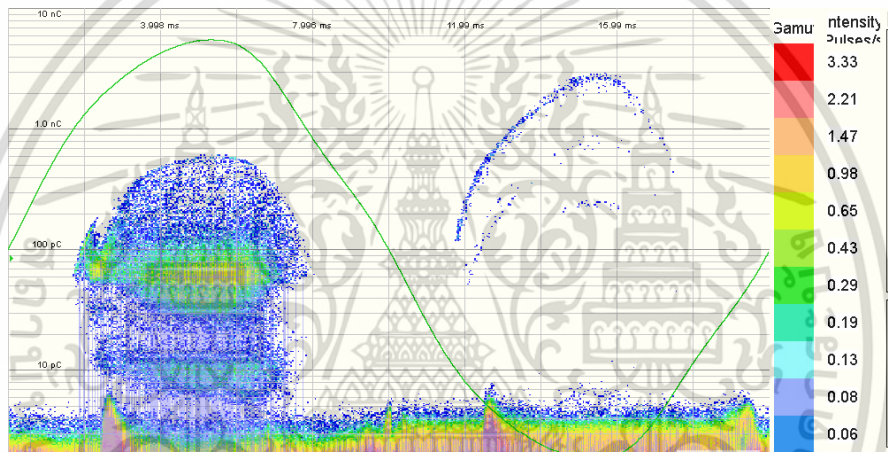
(ข) ฝั่งดิน

รูปที่ 2.20 รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์จำลองการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผีงไฟฟ้าแรงสูง



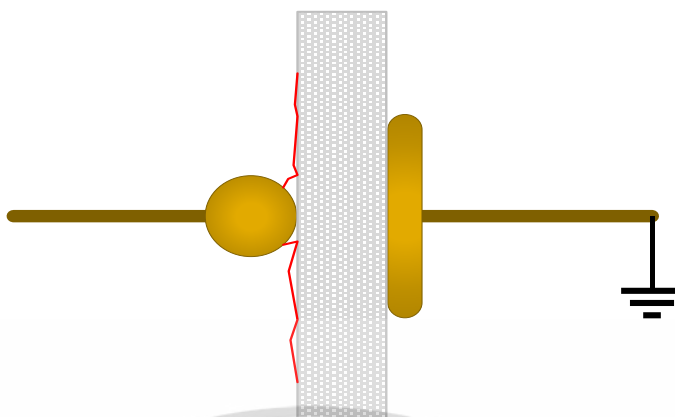
(ข) ผีงดิน

รูปที่ 2.21 ตัวอย่าง PRPD Pattern ของจำลองการเกิดโคโรนาดิสชาร์จ

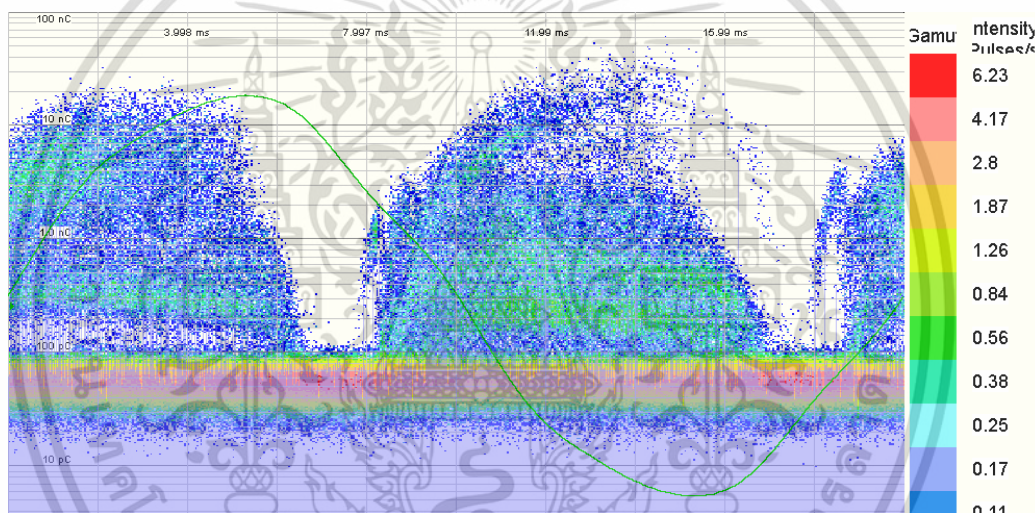
2.2.3.2 ดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge)

ดิสชาร์จตามผิวเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จ ณ บริเวณผิวฉนวน เกิดจากสนามไฟฟ้าสูงที่ผิวฉนวน การดิสชาร์จตามผิวจะทำให้เกิดเส้นทางเดินไฟฟ้าได้ เมื่อดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นจนสร้างเส้นทางจนลัดวงจรระหว่างอิเล็กโทรดด้านแรงสูงและแรงต่ำทำให้เกิดการลัดวงจรระหว่างฉนวนได้ ฉนวนจึงมีความสำคัญต่อระบบไฟฟ้าอย่างมาก หากสกปรก หรือเกิดรอยชำรุดทำให้จุดนั้นเกิดความเครียดทางไฟฟ้าสูงกว่าจุดอื่น ซึ่งมีโอกาสนำไปสู่ความล้มเหลวของระบบไฟฟ้า

PRPD Pattern ของดิสชาร์จตามผิวจากการวัดสัญญาณกระแสดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นที่มุม 0 และ 180 องศาของสัญญาณแรงดันและมีลักษณะเป็นรี้ว



รูปที่ 2.22 รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์จำลองการเกิดดิสชาร์จตามผิว

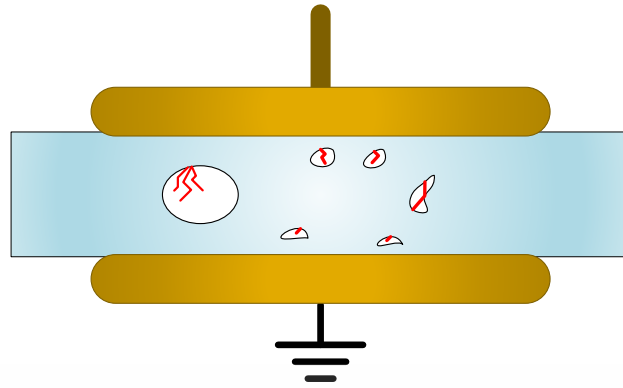


รูปที่ 2.23 ตัวอย่างPRPD pattern ของดิสชาร์จตามผิว

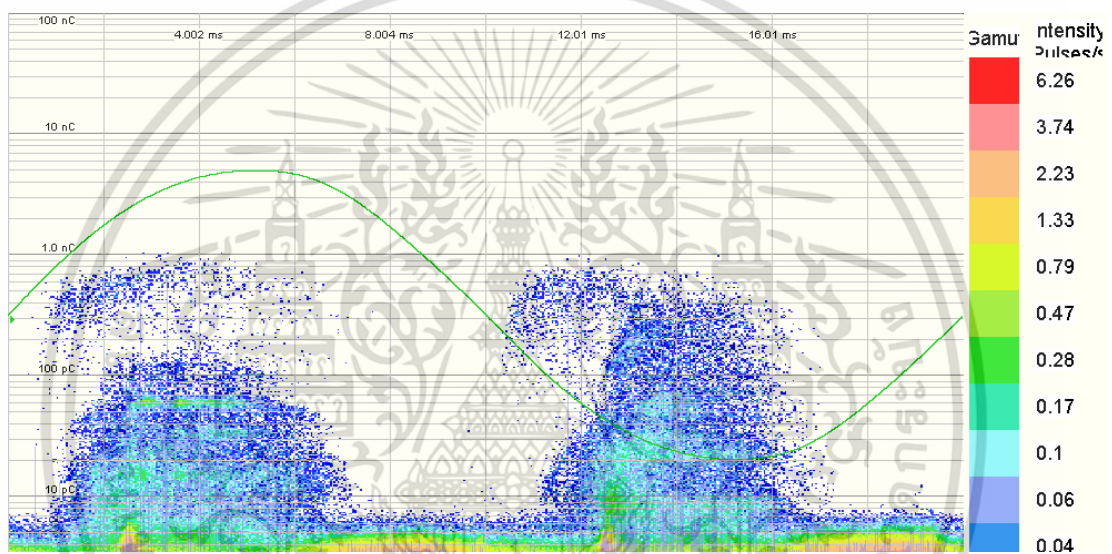
2.2.3.3 ดิสชาร์จภายใน (Internal Discharge)

ดิสชาร์จภายในเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จ ณ ตำแหน่งภายในฉนวนโดยความไม่สมบูรณ์ของเนื้อฉนวน เช่น โพรงอากาศ สิ่งเจือปน ฉนวนภายในชำรุด เป็นต้น จุดเหล่านี้ล้วนเป็นสาเหตุการดิสชาร์จภายใน บริเวณดังกล่าวเมื่อเกิดสนามไฟฟ้าสูงจะทำให้บริเวณนั้นเบรกดาวน์ได้ง่ายมาก เนื่องจากมีระยะดิสชาร์จที่น้อยมากและไม่มีแหล่งระบายพลังงานจากตำแหน่งนั้น การเกิดดิสชาร์จภายในจึงสู่การเจาะทะลุ หรือเบรกดาวน์ในที่สุด

PRPD Pattern ของดิสชาร์จภายในจากการวัดสัญญาณกระแสดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นที่มุม 60 และ 240 องศาของสัญญาณแรงดัน หรือในทางตรงกันข้ามอาจเกิดที่มุม มุม 30 และ 210 องศาของสัญญาณแรงดัน



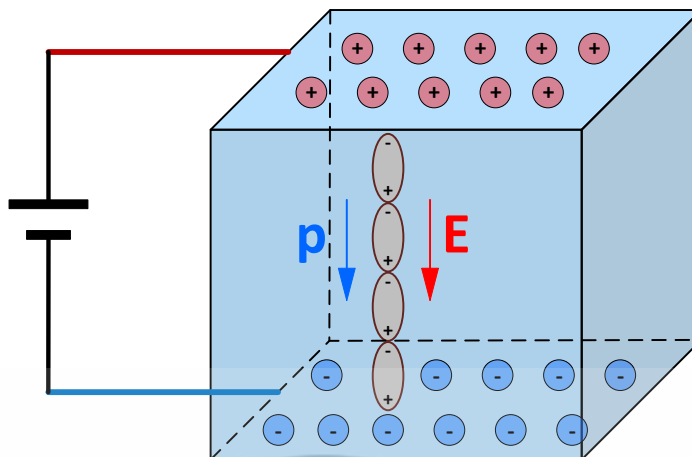
รูปที่ 2.24 รูปแบบอิเล็กทรอนิกส์จำลองการเกิดดิสชาร์จภายใน



รูปที่ 2.25 ตัวอย่าง PRPD pattern ของดิสชาร์จภายใน

2.3.3 การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน (Polarization and Depolarization Current: PDC) [14-17]

การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันเป็นการทดสอบไม่ทำลายโดยการป้อนแรงดันกระแสตรงให้กับชิ้นงานทดสอบ โดยขนาดของแรงดันไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวน ในที่ที่มีสนามไฟฟ้า E จะมีส่วนประกอบกระแสรั่วไหลสองส่วนที่มีอยู่ในระบบฉนวน เป็นกระแสคอนดักชันและโพลาริเซชัน กระแสคอนดักชันและโพลาริเซชันจะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค กระแสโพลาริเซชันเกิดจากแนวโน้มของไดโพลที่จะเรียงตัวกันไปทิศทางของสนาม สำหรับวัสดุที่เป็นฉนวนแข็ง การพิจารณาฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง จะพิจารณาฉนวนแข็งเป็นตัวเก็บประจุในรูปแบบของอิเล็กทรอนิกส์แบบแผ่นคู่ขนานประกบกันระหว่างเนื้อฉนวนด้วยค่าเพอร์มิติวิตี ϵ

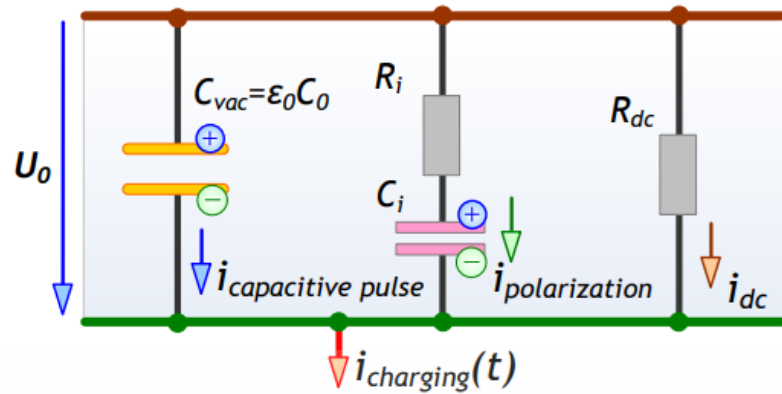


รูปที่ 2.26 การเรียงตัวของไดโพลภายในไดอิเล็กทริกภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง

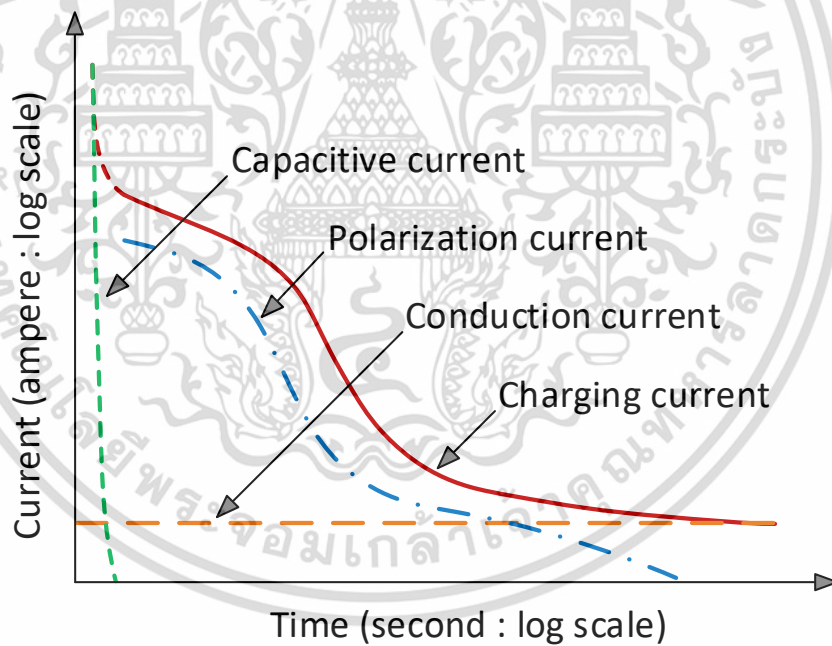
2.3.3.1 กระแสโพลาริเซชัน (Polarization current)

ในการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับชิ้นงานทดสอบ โมเลกุลในชิ้นงานทดสอบจะเกิดการตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าที่ป้อน จะทำให้เกิดกระบวนการโพลาริเซชันขึ้นภายในชิ้นงานทดสอบ ค่ากระแสที่วัดได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า กระแสโพลาริเซชัน

กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีจะมียอดประกอบ 3 ส่วน คือ 1. กระแสความจุไฟฟ้า (capacitive current, i_c) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นและจะลดลงในทันทีทันใดในขณะที่วัสดุทดสอบได้รับความเครียดทางไฟฟ้ากระแสตรง 2. กระแสความนำไฟฟ้า (conduction current, i_{con}) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดจากค่าความนำไฟฟ้าของวัสดุทดสอบและมีระบุอยู่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุทดสอบ และ 3. กระแสชาร์จิง (charging current, i_{charge}) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นทั้งหมดจากกระบวนการโพลาริเซชัน กระแสโพลาริเซชันในทางทฤษฎีมีองค์ประกอบของกระแสและแสดงได้ดังรูปที่ 2.28 แต่ในทางปฏิบัติกระแสโพลาริเซชันที่วัดได้จะมีกระแสรั่วไหล (leakage current, i_l) รวมอยู่ด้วย ซึ่งกระแสรั่วไหลนี้เกิดขึ้นจากสิ่งปนเปื้อนที่ผิวฉนวนหรือเกิดจากความสกปรกของสภาพแวดล้อมขณะทำการทดสอบ โดยจะพิจารณากระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลเป็นกระแสนำไฟฟ้าที่วัดได้ในทางปฏิบัติ (practical conduction current, $i_{con(practical)}$)



รูปที่ 2.17 องค์ประกอบกระแสไฟฟ้าในระบบฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 2.28 องค์ประกอบของกระแสโพลาริเซชัน

กระแสโพลาริเซชันในทางปฏิบัติสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.3) และ (2.4)

$$i_{pol(practical)} = i_{charge} - i_c - i_{con} - i_l \tag{2.3}$$

$$i_{pol(practical)} = i_{con} + i_l \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสโพลาร์ไรซ์เซชันในทางทฤษฎีสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.5)

$$i_{pol}(t) = C_0 V_0 \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0} + \epsilon_\infty \sigma(t) + f(t) \right] \quad (2.5)$$

เมื่อ

- C_0 คือ ค่าความจุไฟฟ้าทางเรขาคณิต (geometric capacitance) ของวัตถุทดสอบ
- V_0 คือ แรงดันกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ
- σ_0 คือ ค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงบริสุทธิ์ (pure dc conductivity)
- ϵ_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ (permittivity of vacuum)
- ϵ_∞ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (relative permittivity) ที่เวลาเริ่มต้น (ที่เวลา 0 วินาที)
- $\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันเดลต้า (delta function) ที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันรูปขั้นแบบทันทีทันใดให้กับวัตถุทดสอบที่เวลาเริ่มต้น
- $\sigma(t)$ คือ ฟังก์ชันผลตอบสนองของไดอิเล็กตริก (dielectric response function)

จากสมการที่ (2.5) สามารถแบ่งกระแสโพลาร์ไรซ์เซชันออกเป็น 3 เทอม โดยแยกพิจารณาเรียงลำดับจากซ้ายไปขวาของสมการดังนี้

เทอมที่ 1 คือ เทอม $\frac{\sigma_0}{\epsilon_0}$ เป็นเทอมที่มีความสัมพันธ์กับค่าความนำไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนโดยเทอมนี้ไม่ขึ้นอยู่กับกระบวนการโพลาร์ไรซ์ของฉนวน ผลของเทอมที่ 1 นี้จะปรากฏขึ้นในขณะที่ทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า DC ให้กับฉนวนเท่านั้น ตัวแปรค่าความนำไฟฟ้ากระแสตรงบริสุทธิ์จะเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กระแสความนำไฟฟ้าของฉนวน

เทอมที่ 2 คือ เทอม $\epsilon_\infty \delta(t)$ เป็นเทอมที่ไม่สามารถบันทึกได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากสภาวะการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของขนาดกระแส ซึ่งฟังก์ชันเดลต้าที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันรูปขั้นแบบทันทีทันใดให้กับวัตถุทดสอบที่เวลาเริ่มต้นจะอธิบายการเกิดจากกระบวนการโพลาร์ไรซ์เซชันที่ใช้ระยะเวลาในการเกิดรวดเร็ว

เทอมที่ 3 คือ เทอม $f(t)$ เป็นเทอมที่ระบุความสัมพันธ์กับกระบวนการโพลาร์ไรซ์เซชันทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวน ซึ่งฟังก์ชัน $f(t)$ จะเป็นที่อธิบายความสัมพันธ์กระแสความจุไฟฟ้าและกระแสดูดกลืน (Absorption Discharge Current)

2.3.3.2 กระแสดีโพลาร์ไรเซชัน (Depolarization Current)

จากข้อ 2.2.3.1 เมื่อหยุดจ่ายแรงดันให้กับฉนวนและทำการลัดวงจรฉนวนเพื่อให้ฉนวนเกิดการคายประจุลงสู่กราวด์ โมเลกุลและประจุไฟฟ้าภายในเนื้อฉนวนจะเกิดการจัดเรียงตัวเข้าสู่สภาวะปกติก่อนที่จะมีสนามไฟฟ้ามากระทำ กระแสคายประจุ (Discharge Current) ที่วัดได้ขณะทำการลัดวงจรให้กับฉนวนจะถูกเรียกว่า กระแสดีโพลาร์ไรเซชัน (Depolarization Current, i_{depol}) กระแสดี

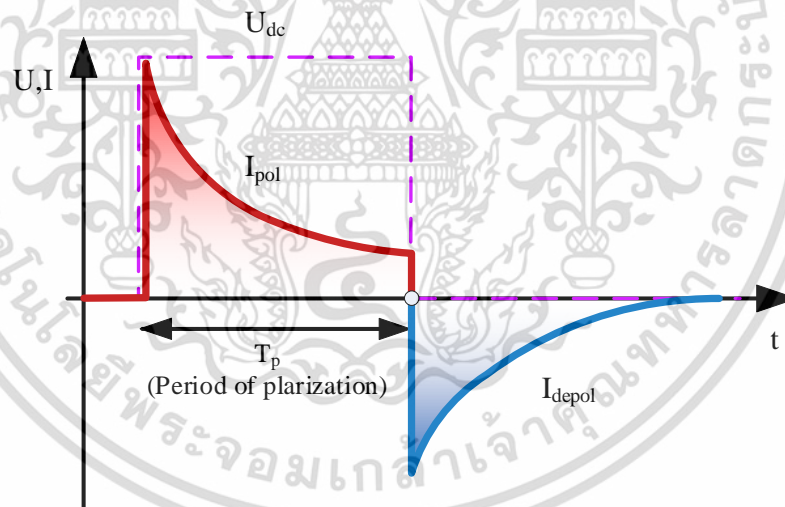
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลาริเซชันจะมีองค์ประกอบ 2 ส่วน คือ 1. กระแสคาปาซิทีฟดิสชาร์จ (Capacitive Discharge Current, $i_{c(discharge)}$) ซึ่งเป็นกระแสที่เกิดขึ้นและลงลงอย่างทันทีทันใดและจะมีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสคาปาซิทีฟของกระแสโพลาริเซชันแต่มีขั้วตรงข้ามกัน และ 2. กระแสแอมชอปชันดิสชาร์จ (Absorption Discharge Current, $i_{ab(discharge)}$) ซึ่งเป็นกระแสที่มีค่าสูงในช่วงแรกและเมื่อทำการคายประจุให้กับฉนวนต่อไปเรื่อยๆ กระแสดังกล่าวจะมีค่าลดลง กระแสแอมชอปชันดิสชาร์จนี้จะมีคุณลักษณะเหมือนกับกระแสแอมชอปชันของกระแสโพลาริเซชันแต่จะมีขั้วตรงข้ามกันสำหรับกระแสดีโพลาริเซชันจะไม่มีองค์ประกอบของกระแสการนำไฟฟ้าและกระแสรั่วไหลรวมอยู่ด้วย เนื่องจากทำการหยุดป้อนแรงดันให้กับฉนวนแล้ว กระแสดีโพลาริเซชันเขียนได้ดังสมการที่ (2.7) และกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชันที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 2.29

$$i_{depol} = i_{c(discharge)} + i_{ab(discharge)} \tag{2.6}$$

$$i_{depol}(t) = -C_0 V_0 [f(t) - f(t + T_c)] \tag{2.7}$$

T_c คือ ระยะเวลาที่ทำการจ่ายแรงดันให้กับวัตถุทดสอบ



รูปที่ 2.29 กระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.3) และ (2.6) พบว่า สามารถหากระแสการนำไฟฟ้าในทางปฏิบัติได้ โดยการนำกระแสดีโพลาริเซชันที่วัดได้มาลบออกจากกระแสโพลาริเซชันที่วัดได้ในทางปฏิบัติ

$$i_{con(practical)} = i_{pol(practical)} - i_{depol} \tag{2.8}$$

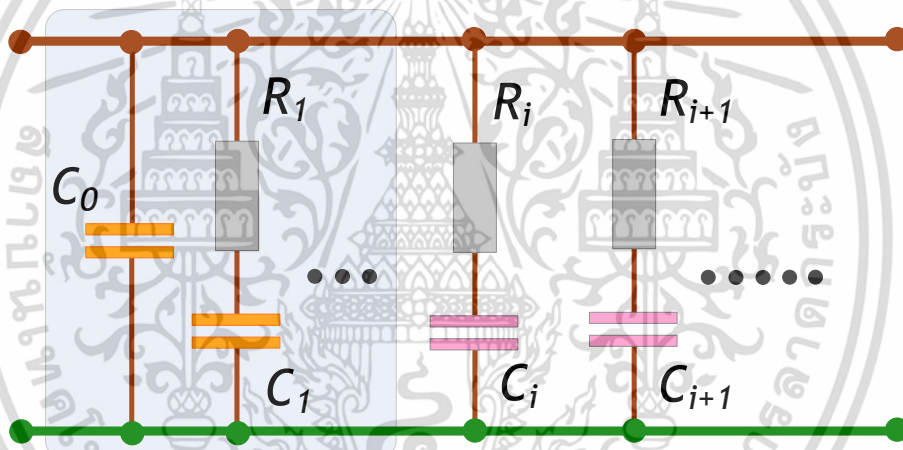
$$i_{con(practical)} = i_{charge} - i_c - i_{con} - i_l - i_{c(discharge)} - i_{ab(discharge)} \tag{2.9}$$

$$i_{con(practical)} = i_{con} - i_l \tag{2.10}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกป้อนให้กับตัวอย่างทดสอบกระแสการชาร์จจะผ่านตัวอย่างทดสอบ (เครื่องวิเคราะห์กระแสจะบันทึกกระแสโพลาริเซชันในกระบวนการนี้) หลังจากนั้นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกตัดการเชื่อมต่อจากตัวอย่างทดสอบและวัดกระแสดีโพลาริเซชัน กระแสดีสชาร์จจากตัวอย่างทดสอบจะไหลผ่านแอมมิเตอร์ในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสชาร์จ เครื่องวิเคราะห์จะบันทึกกระแสดีโพลาริเซชันในกระบวนการนี้ หลังจากนั้นกระแสดีโพลาริเซชันจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะเข้าสู่สถานะคงที่หรือเสถียรขึ้นกระบวนการโพลาริเซชัน การวัดนี้จะให้เส้นโค้งกระแสซึ่งใช้อธิบายการตอบสนองของฉนวน

ในกระบวนการโพลาริเซชันของบล็อกโลหะออกไซด์ เนื้อฉนวนจะถูกทำให้เกิดความเครียดไฟฟ้าและระบุงจรสมมูลความต้านทานและความจุไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.16 กระแสการนำไฟฟ้าในฉนวนขึ้นอยู่กับความต้านทานรั่วไหลหรือภายใน ในขณะที่กระแสการกระจัดไหลผ่านความจุไฟฟ้าทางเรขาคณิต ความต้านทานภายในและคู่ของกิ่ง R-C ของระบบฉนวนของบล็อกโลหะออกไซด์



รูปที่ 2.30 วงจรสมมูลความต้านทานและความจุไฟฟ้าโลหะออกไซด์ที่ได้จากกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน [14]

บทที่ 3

การออกแบบการทดลองและการทดสอบ

ในบทนี้อธิบายถึงการออกแบบการทดลอง รายละเอียดของการทดลอง ชุดทดสอบ และวงจรการทดสอบ โดยการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง ได้แก่ 1. การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเพื่อยืนยันรูปคลื่นกระแสรั่วไหล 2. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนเพื่อศึกษารูปแบบ PRPD Pattern ของตัวอย่างกับดักเสิร์จ และ 3. การทดสอบกระแสไหลาไรเซชันและดีโพลาริเซชันเพื่อวิเคราะห์ความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

กับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ระดับจำหน่ายซึ่งไม่ผ่านมาตรฐานการทดสอบตรวจรับจากโรงงานทั้งหมดจะแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1 ตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์จากโรงงานได้ผ่านการรายงานด้วยขนาดประจุจากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนและแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ไม่ได้มาตรฐาน ตัวอย่างเหล่านี้จะถูกเปรียบเทียบกับกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์อ้างอิงที่ผ่านมาตรฐานโรงงาน (R1 สำหรับกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์พิกัด 21 kV 5 kA และ R2 สำหรับกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์พิกัด 24 kV 5 kA) ซึ่งยืนยันผลการทดสอบในตารางที่ 3.1 และ 3.2 เมื่อทำการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนที่แรงดันไฟฟ้าต่อเนื่องสูงสุด (MCOV) ของพิกัดแรงดันของตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์อ้างอิง

ตารางที่ 3.1 รายการตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ใช้ในการทดสอบ

หมายเลขตัวอย่าง	พิกัด	ความไม่สมบูรณ์
S1	21 kV, 5kA	ขนาดประจุดิสชาร์จบางส่วน 10 pC
S2		
S3		
P1	24 kV, 5 kA	ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงไม่ผ่านมาตรฐาน
P2		
P3		

ตารางที่ 3.2 ผลการยืนยันการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ R1

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง		การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน	
Maximum U_{ref} (kV)	25.00	MCOV (kV, rms)	17.00
Minimum U_{ref} (kV)	22.00	PD (pC)	< 10.00
Measured U_{ref} (kV)	22.91	Measured PD (pC)	0.61

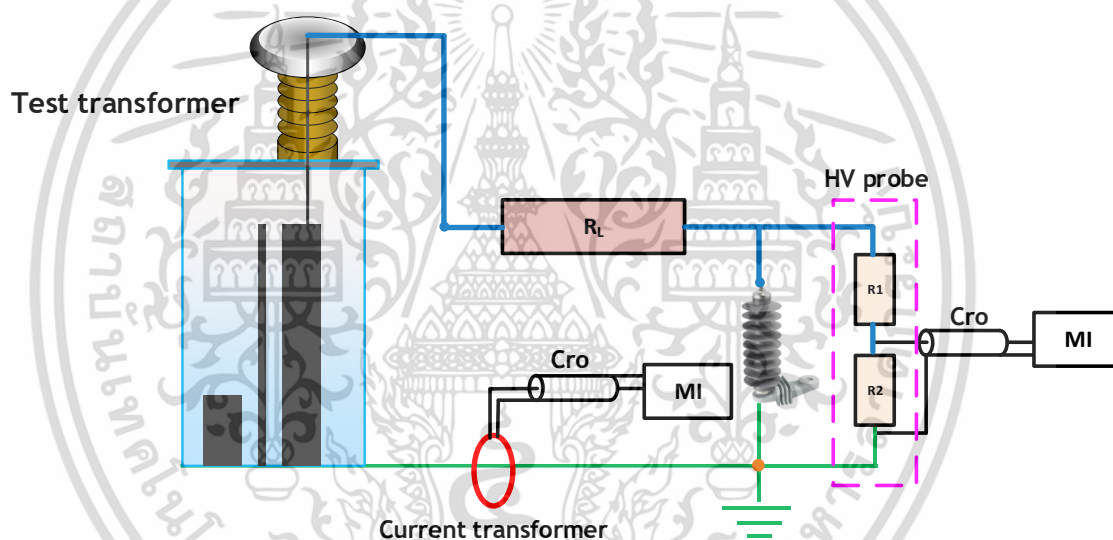
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ผลการยืนยันการทดสอบตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ R2

การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง		การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน	
Maximum U_{ref} (kV)	29.00	MCOV (kV, rms)	19.50
Minimum U_{ref} (kV)	25.00	PD (pC)	< 10.00
Measured U_{ref} (kV)	26.62	Measured PD (pC)	4.58

3.1 การทดลองที่ 1 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

การทดลองนี้ศึกษาคุณลักษณะกระแสรั่วไหลที่ได้จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเท่ากับค่าแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงต่ำสุดที่ระบุให้กับตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่สมบูรณ์



รูปที่ 3.1 วงจรทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

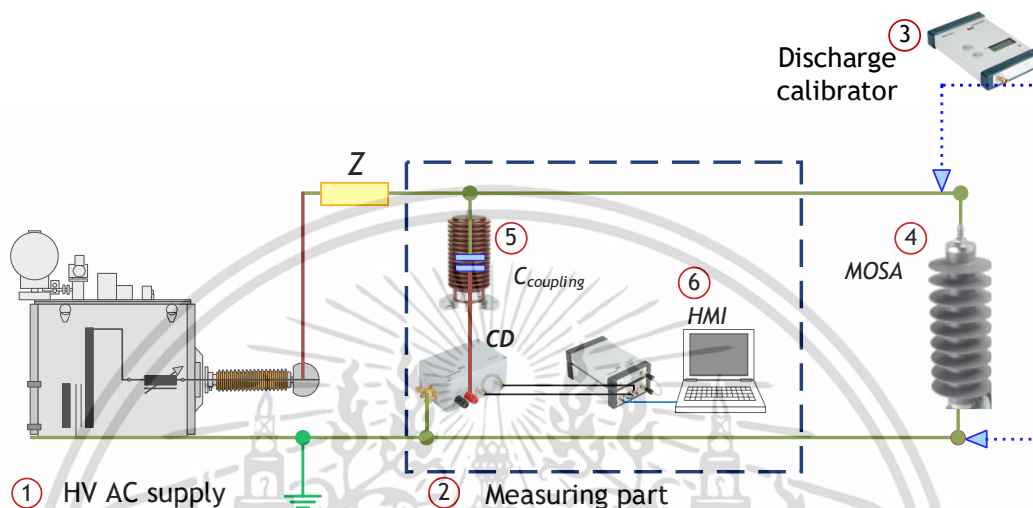
ขั้นตอนการทดสอบมีดังนี้

1. จัดตั้งวงจรทดสอบ
2. ตั้งค่าออสซิลโลสโคปให้ช่องวัดสัญญาณแรงดันและกระแสเหมาะสมกับการวัดที่แรงดันทดสอบ 29 kV
3. นำตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์พิกัด 21 kV 5 kA ใส่เข้าไปในวงจรทดสอบ
4. ทำการป้อนแรงดันทดสอบ 29 kV แล้วบันทึกรูปคลื่นกระแสรั่วไหล
5. ทำการลดแรงดันจนเป็น 0 V จากนั้นดิสชาร์จประจุจากวงจรแล้วเปลี่ยนตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ พิกัด 24 kV 5 kA
6. ทำขั้นตอนที่ 3 – 5 สำหรับตัวอย่าง R2 P1 P2 และ P3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

การทดลองนี้ศึกษาลักษณะ PRPD และขนาดประจุที่คำนวณจากอัตราการเกิดซ้ำของ PD ที่ได้จากการป้อนแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 1.05 เท่าของค่าแรงดัน MCOV ระบุให้กับตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่สมบูรณ์



รูปที่ 3.2 วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์

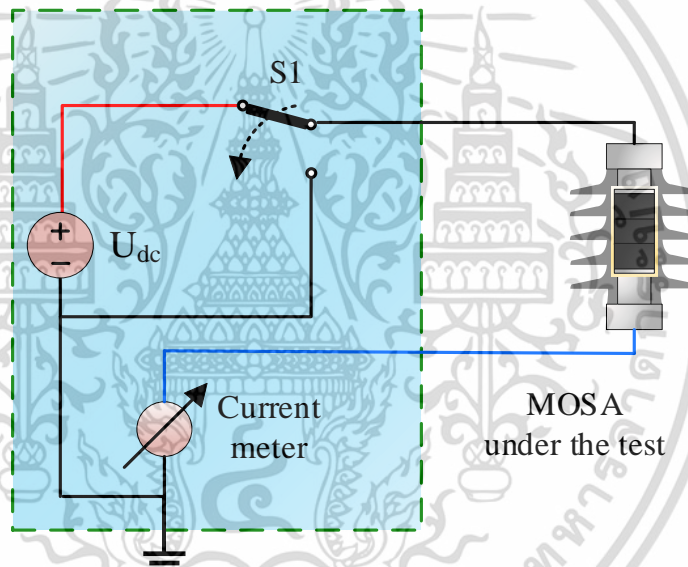
ขั้นตอนการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนมีดังนี้

1. จัดตั้งวงจรทดสอบและกราวด์อุปกรณ์ด้านไฟฟ้าแรงสูง
2. ติดตั้งตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์เข้ากับวงจรทดสอบ
3. ปลดกราวด์ออกจากอุปกรณ์ด้านไฟฟ้าแรงสูง
4. ทำการปรับเทียบการอ่านค่าประจุและค่าแรงดันทดสอบของเครื่องมือทดสอบดิสชาร์จบางส่วน เพื่อให้อ่านค่าประจุและแรงดันทดสอบจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้ถูกต้อง
5. ขึ้นแรงดันทดสอบแบบ ramp จนได้แรงดัน 19.7 kV จากนั้นบันทึกค่าดิสชาร์จบางส่วนเป็นเวลา 1 นาที และลงแรงดันทดสอบแบบ ramp
6. กราวด์อุปกรณ์ด้านไฟฟ้าแรงสูง เปลี่ยนชิ้นงานทดสอบและทำการทดสอบซ้ำในเงื่อนไขเดียวกันจนครบ 3 ครั้ง
7. ทำการทดสอบซ้ำในข้อ 3-7 สำหรับตัวอย่าง R1 S1 S2 และ S3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลองที่ 3 การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันได้ถูกดำเนินการโดยใช้วงจรในรูปที่ 3.3 แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกป้อนให้กับตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ กระแสการชาร์จจะผ่านตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ (เครื่องวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันจะบันทึกกระแสโพลาริเซชันในกระบวนการนี้) หลังจากนั้นแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกตัดการเชื่อมต่อจากตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ และวัดกระแสดีโพลาริเซชัน กระแสดิสชาร์จจากตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์จะไหลผ่านแอมมิเตอร์ในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสชาร์จ เครื่องวิเคราะห์จะบันทึกกระแสดีโพลาริเซชันในกระบวนการนี้ หลังจากนั้นกระแสดีโพลาริเซชันจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนกว่าจะเข้าสู่สถานะคงที่หรือเสิร์จสิ้นสุดกระบวนการโพลาริเซชัน การวัดนี้จะให้เส้นโค้งกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันซึ่งใช้อธิบายการตอบสนองของฉนวน



รูปที่ 3.3 วงจรทดสอบทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์

ในการทดสอบตัวอย่าง กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันจะต้องวัดด้วยเงื่อนไขเดียวกันในการศึกษานี้การวินิจฉัยฉนวนจะขึ้นอยู่กับแนวโน้มของกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่เกิดขึ้น ความต้านทานของฉนวนที่ความถี่ 50 Hz ความจุไฟฟ้าของฉนวนที่ความถี่ 50 Hz และดัชนีโพลาริเซชัน โดยขั้นตอนการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันดำเนินการขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. การวัดกระแสคงเหลือ ทำการคายพลังงานให้กับวัตถุทดสอบโดยเชื่อมต่อกับกราวด์ด้วยระยะเวลา นาน จากนั้นกระตุ้นทดสอบด้วยแรงดันไฟฟ้าต่ำสุดของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงและวัดกระแสที่คงเหลือ การวัดนี้จะให้เงื่อนไขเริ่มต้นของการทดสอบ
2. การวัดระยะเวลาสั้น การวัดนี้จะดำเนินการในช่วงเวลาสั้น ๆ เพื่อตรวจสอบการตรวจสอบการจัดเรียงวงจรและขนาดกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การวัดหลัก หลังจากยืนยันวงจรทดสอบและกระแสที่คงเหลือ การวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันจะดำเนินการจนกว่ากระแสดีโพลาริเซชันจะเท่ากับกระแสคงเหลือ

ขั้นตอนการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสรุปได้ดังนี้

1. จัดตั้งวงจรทดสอบ
2. ติดตั้งตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ในวงจรทดสอบ
3. ทำการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน โดยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้
 - ขั้นตอนที่ 1: ทำการวัดกระแสคงเหลือ
 - ขั้นตอนที่ 2: ป้อนแรงดันกระแสตรง 100 V ให้กับชิ้นงานทดสอบเป็นเวลา 4 วินาที เพื่อตรวจสอบว่ากระแสโพลาริเซชันมีค่าไม่เกิน ± 1 mA หรือไม่ เนื่องจากเครื่องมือทดสอบสามารถวัดกระแสได้สูงสุดไม่เกินค่าที่กล่าวไป หากค่ากระแสไม่เกิน ± 1 mA จะทำการวัดกระแสดีโพลาริเซชันต่อด้วยการลัดวงจรที่ชิ้นงานทดสอบเพื่อให้คายประจุจนกว่ากระแสดีโพลาริเซชันเข้าสู่ค่ากระแสคงเหลือในขั้นตอนที่ 1
 - ขั้นตอนที่ 3: ป้อนแรงดันกระแสตรง 100 V ให้กับชิ้นงานทดสอบเพื่อวัดกระแสโพลาริเซชันเป็นเวลา 1100 วินาที และลัดวงจรชิ้นงานทดสอบเพื่อวัดกระแสดีโพลาริเซชันเป็นเวลา 1100 วินาที
4. บันทึกค่ากระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน
5. เปลี่ยนชิ้นงานทดสอบและทำการทดสอบซ้ำในเงื่อนไขเดียวกันจนครบ 3 ครั้ง
6. ทำการทดสอบซ้ำในข้อ 2-5 จนครบจำนวนตัวอย่างทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

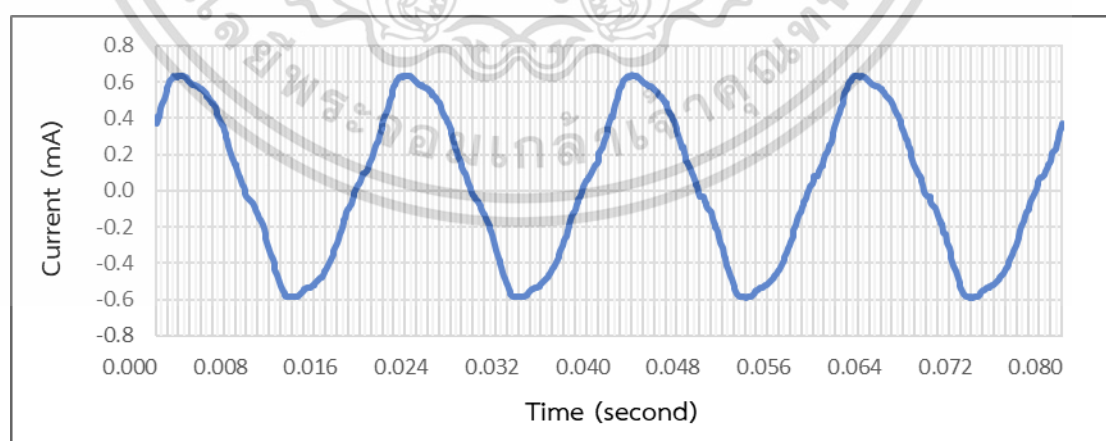
ในบทนี้แสดงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลของการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่ถูกแบ่งออกเป็น 3 การทดลองคือ 1. การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงเพื่อยืนยันรูปคลื่นกระแสรั่วไหล 2. การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนเพื่อศึกษารูปแบบ PRPD Pattern ของตัวอย่างกับดักเสิร์จ และ 3. การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันเพื่อวิเคราะห์ความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างกับดักเสิร์จ

4.1 การทดลองที่ 1 การทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

ผลการทดสอบแรงดันอ้างอิงของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์สามารถบันทึกรูปคลื่นกระแสรั่วไหลดังรูปที่ 4.1.1 ถึง 4.1.4 แรงดันทดสอบและค่ายอดกระแสรวมแสดงดังตารางที่ 4.1

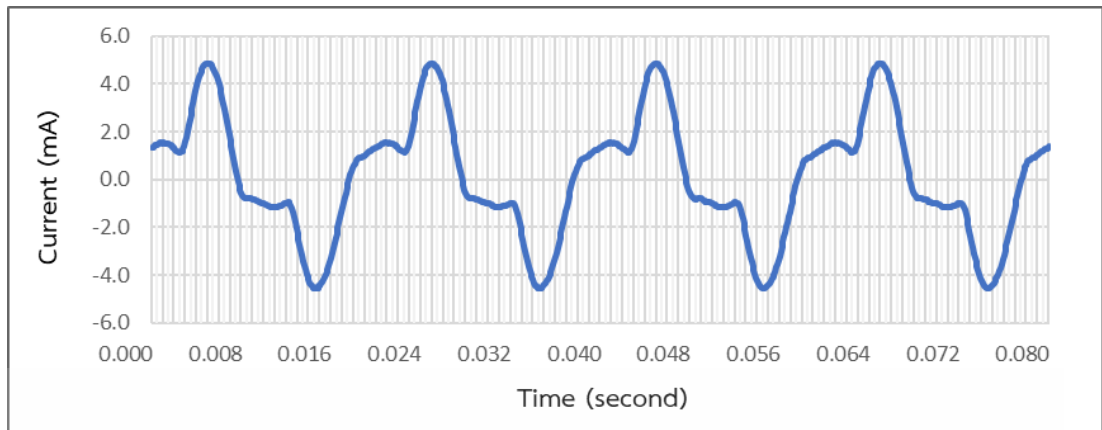
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบค่ายอดกระแสรวมของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงไม่ผ่านมาตรฐานการผลิต

ตัวอย่างทดสอบ	แรงดันทดสอบ (kV, rms)	ค่ายอดกระแสรวม (mA, peak)
R2	30.15	0.60
P1	30.32	5.35
P2	29.98	2.80
P3	29.08	3.45

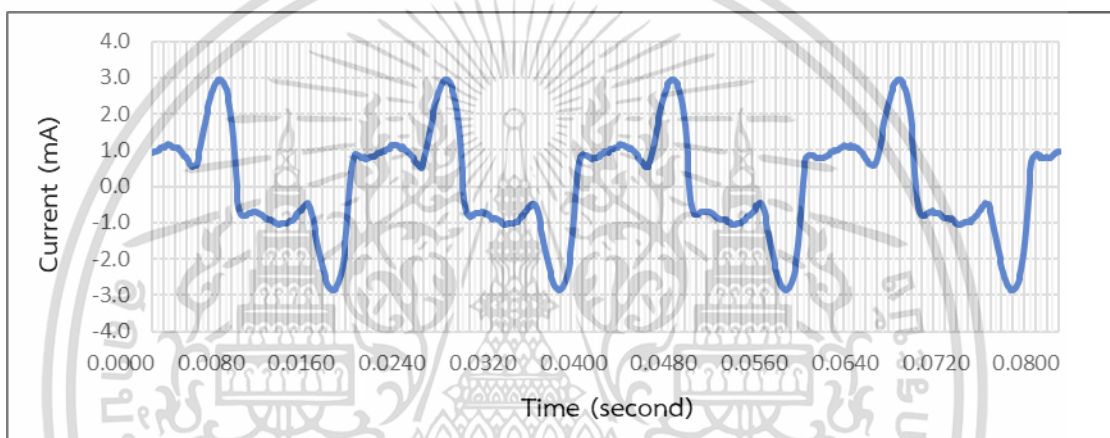


รูปที่ 4.1.1 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ R2 จากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

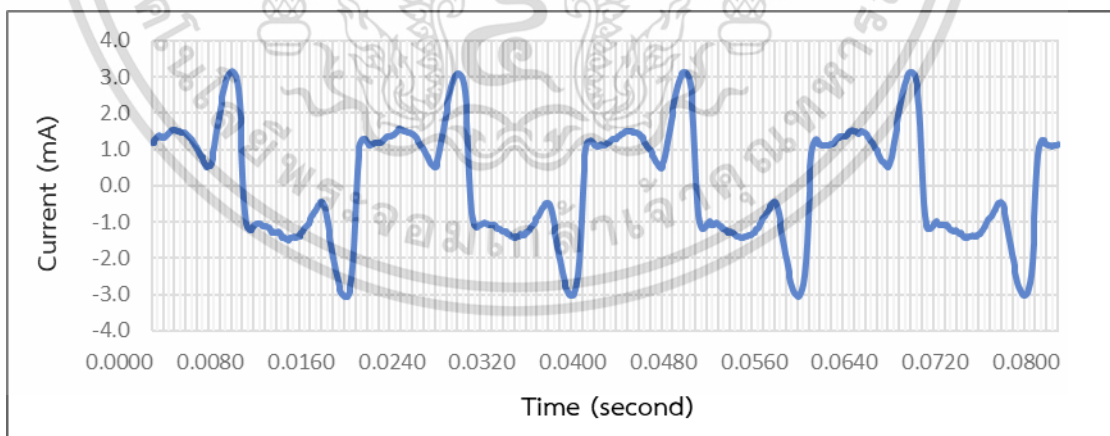
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1.2 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ P1 จากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง



รูปที่ 4.1.3 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ P2 จากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง



รูปที่ 4.1.4 รูปคลื่นกระแสรั่วไหลของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ P3 จากการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง

4.1.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

มีองค์ประกอบกระแสความต้านทานของตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงไม่ผ่านมาตรฐานซึ่งค่ายอดกระแสดังกล่าวในกรณีตัวอย่าง P1 มีค่ามากกว่าค่ายอดกระแสความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุไฟฟ้าเป็น 2.5 เท้า กรณีตัวอย่าง P2 เป็น 3 เท้าและกรณีตัวอย่าง P3 เป็น 2 เท้าตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบกระแสความต้านทานไม่เป็นไปตามสภาวะการทำงานของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ภายใต้แรงดันอ้างอิงตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ในขณะที่ตัวอย่าง R2 ไม่มีองค์ประกอบของกระแสความต้านทานและมีค่ายอดกระแสรวมไม่เกิน 1 mA

4.2 การทดลองที่ 2 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

ผล PRPD Pattern จากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC 60270 (2015) ของตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่มีค่ายอดประจุดิสชาร์จบางส่วนไม่ผ่านมาตรฐานแสดงดังรูปที่ 4.2.2 ถึง 4.2.4 และ

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน โดยที่ค่าประจุสูงสุดและแรงดันทดสอบของตัวอย่าง R1 อ้างอิงจากตารางที่ 3.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

ตัวอย่าง ทดสอบ	PDIV		PDEV		ค่าสูงสุด	
	V_{rms} (kV)	Q_{IEC} (pC)	V_{rms} (kV)	Q_{IEC} (pC)	V_{rms} (kV)	Q_{IEC} (pC)
R1	-	-	-	-	-	0.68
S1	11.61	3.48	8.79	2.42	19.81	11.42
S2	12.41	2.48	8.17	1.76	19.89	8.12
S3	13.10	3.62	8.15	1.72	19.66	6.68

หมายเหตุ

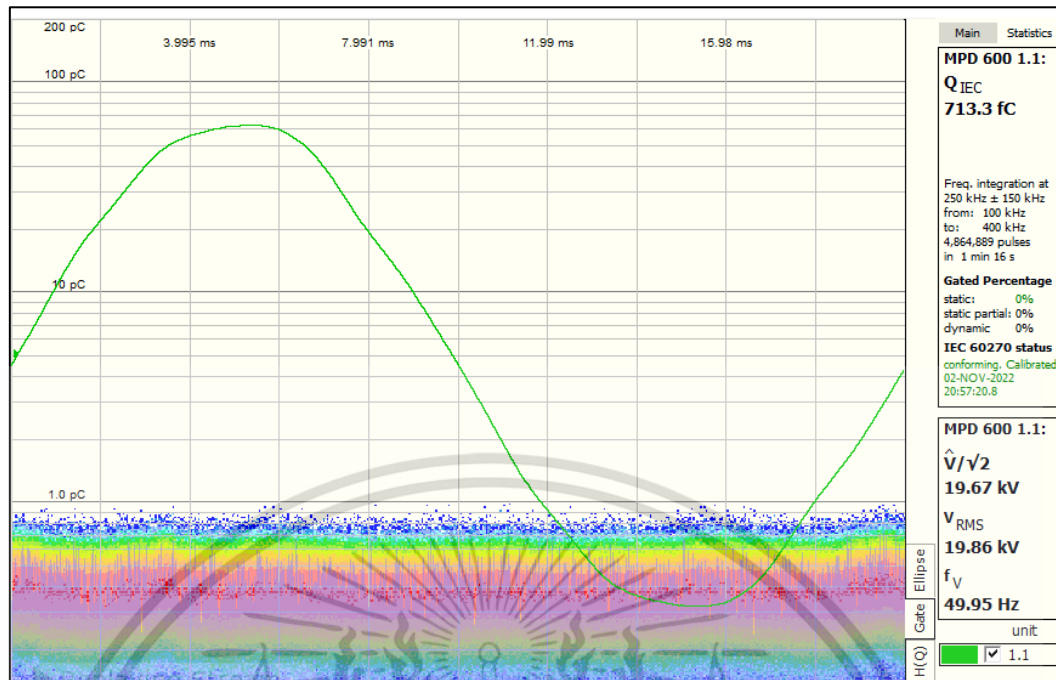
PDIV

คือ แรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วน

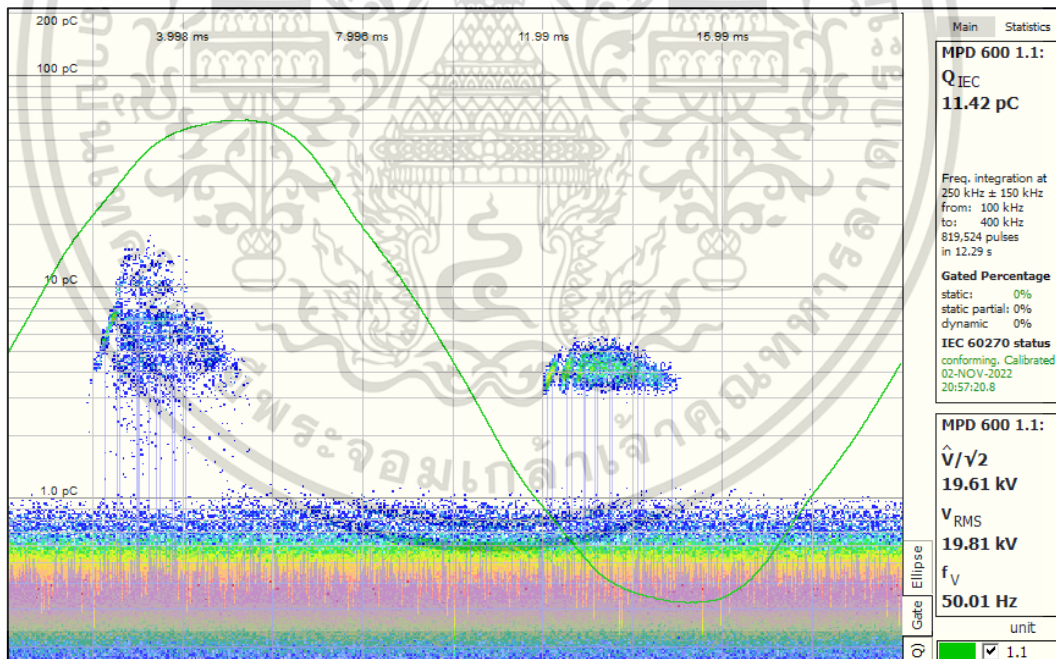
PDEV

คือ แรงดันหยุดเกิดดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

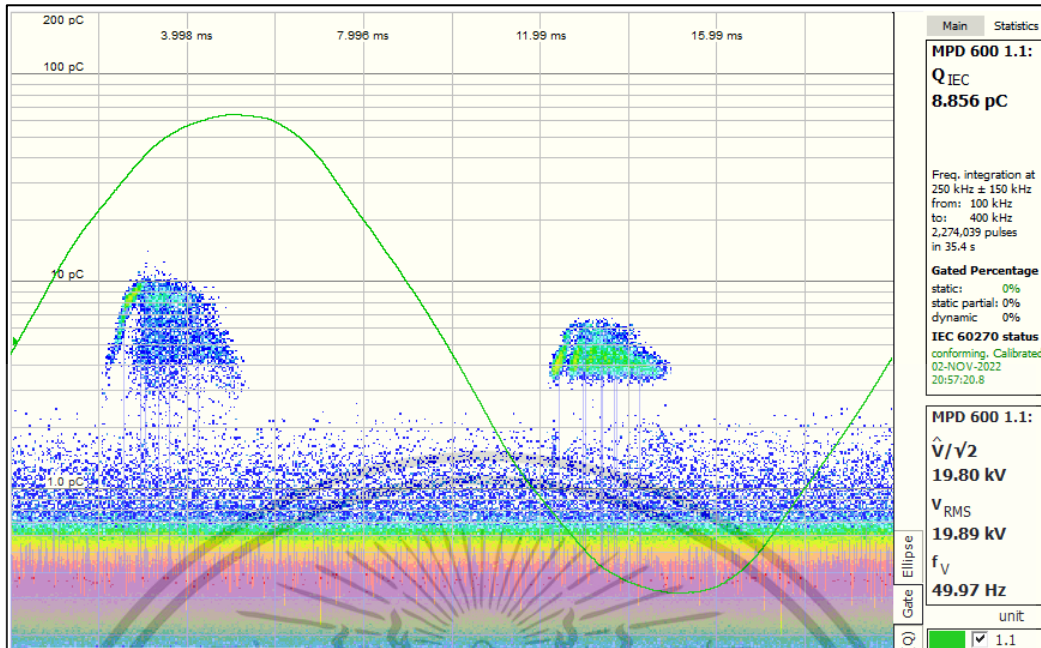


รูปที่ 4.2.1 Background noise ก่อนทำการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

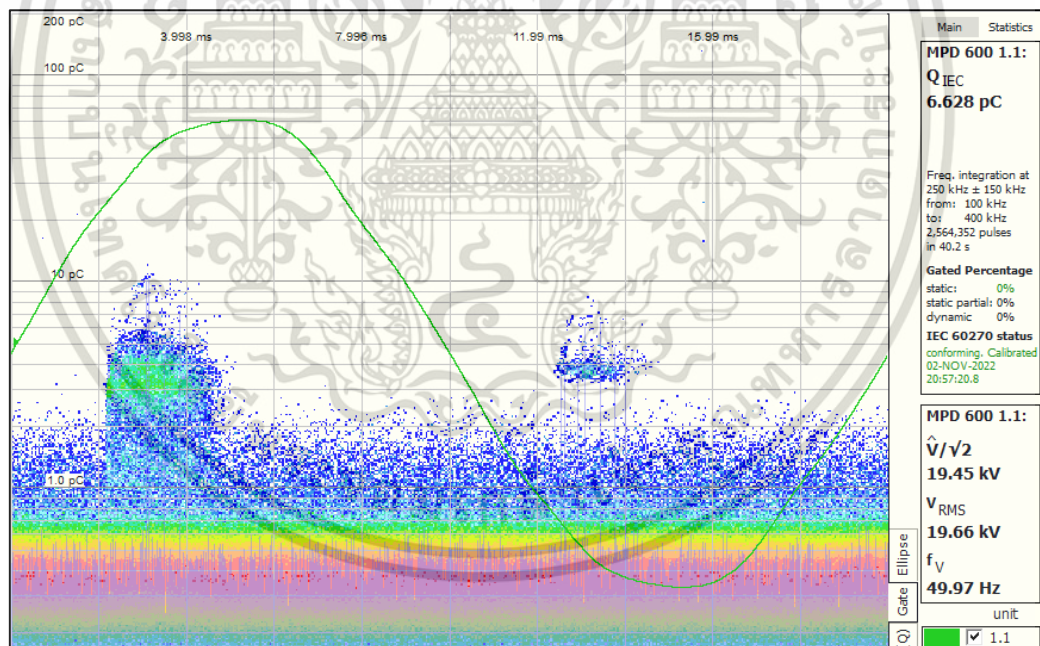


รูปที่ 4.2.2 PRPD Pattern จากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่าง S1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2.3 PRPD Pattern จากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่าง S2



รูปที่ 4.2.4 PRPD Pattern จากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของตัวอย่าง S3

4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

PRPD Pattern ของตัวอย่างกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ S1 S2 และ S3 มีลักษณะและมุมที่เกิดเทียบกับสัญญาณแรงดันใกล้เคียงกัน โดยลักษณะ PRPD Pattern ที่บันทึกเป็นประเภทการดิสชาร์จเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายใน โดยสังเกตจากมุมเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนจากโปรแกรมวิเคราะห์สัญญาณ นอกจากนี้ค่า PDIV และ PDEV ของตัวอย่างทดสอบทั้งหมดมีค่าใกล้เคียงกันทำให้สามารถยืนยันคุณสมบัติของฉนวนโลหะออกไซด์รวมถึงการเสริมโครงสร้างภายในด้วยไฟเบอร์กลาสในการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ณ แรงดันทำงานต่อเนื่องของตัวอย่างทดสอบ สำหรับ PRPD Pattern ที่เกิดขึ้นช่วยให้สามารถอธิบายได้ว่าความไม่สมบูรณ์ของตัวอย่างทดสอบอาจอยู่ในรูปของช่องว่างระหว่างฉนวนหรือมีโพรงอากาศอยู่ภายในฉนวน ความไม่สมบูรณ์ดังกล่าวมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดจากไฟเบอร์กลาสที่พันบล็อกโลหะออกไซด์ เนื่องจากรีวิธีการผลิตที่เหมือนกันทำให้สันนิษฐานได้ว่าค่ายอดประจุดิสชาร์จบางส่วนจากผลการทดสอบมีค่ามากหรือน้อยอาจขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของการพันไฟเบอร์กลาสในการผลิต ซึ่งอาจมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องเช่น ส่วนผสมทางเคมี หรือวิธีการอัดอิเล็กโตรดที่ทำให้เกิดช่องว่างอากาศระหว่างชั้นไฟเบอร์กลาส

4.3 การทดลองที่ 3 การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่วัดได้ถูกพล็อตในมาตราส่วนล็อก-ล็อกโดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 100 V เพื่อทำการโพลาริเซชัน 1100 วินาที และดีโพลาริเซชัน 1100 วินาที ตัวอย่างแต่ละตัวจะถูกคายพลังงาน 60 วินาที (เชื่อมต่ออิเล็กโตรดด้านล่างกับการวัด) และวัดกระแสคงเหลือ โดยผลการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันถูกระบุในตารางในตารางที่ 4.3.1 และ 4.3.2 ความต้านทานของฉนวน ความจุไฟฟ้าและดัชนีโพลาริเซชันจะถูกคำนวณโดยขึ้นอยู่กับกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่วัดได้จากการทดสอบ

ตารางที่ 4.3.1 ผลการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกับดักเล็กรังโลหะออกไซด์ขนาด 21 kV 5 kA

หมายเลขตัวอย่าง	ตัวแปร			
	ความต้านทาน (Ω)		ความจุไฟฟ้า (F)	ดัชนีโพลาริเซชัน
	Pol	Depol		
R1	1.49e+11	1.44e+11	2.60e-12	1.06
S1	4.87e+11	4.00e+11	3.72e-12	1.20
S2	4.76e+11	4.08e+11	3.64e-12	1.13
S3	5.06e+11	4.86e+11	4.29e-12	1.01

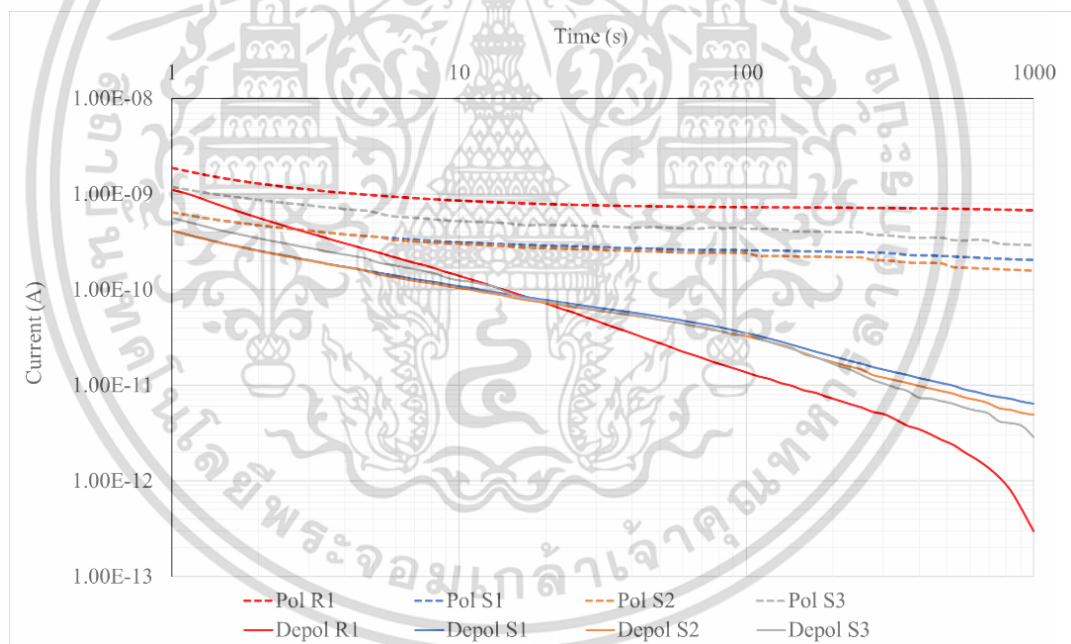
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3.2 ผลการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกัปกัดเสิร์จโลหะออกไซด์ ขนาด 24 kV 5 kA

หมายเลข ตัวอย่าง	ตัวแปร			
	ความต้านทาน (Ω)		ความจุไฟฟ้า (F)	ดัชนีโพลาริเซชัน
	Pol	Depol		
R1	5.59e+11	4.80e+11	3.00e-12	1.08
P1	2.16e+11	2.04e+11	1.60e-11	1.18
P2	2.38e+11	2.34e+11	1.88e-11	1.03
P3	2.21e+11	2.11e+11	7.58e-11	1.03

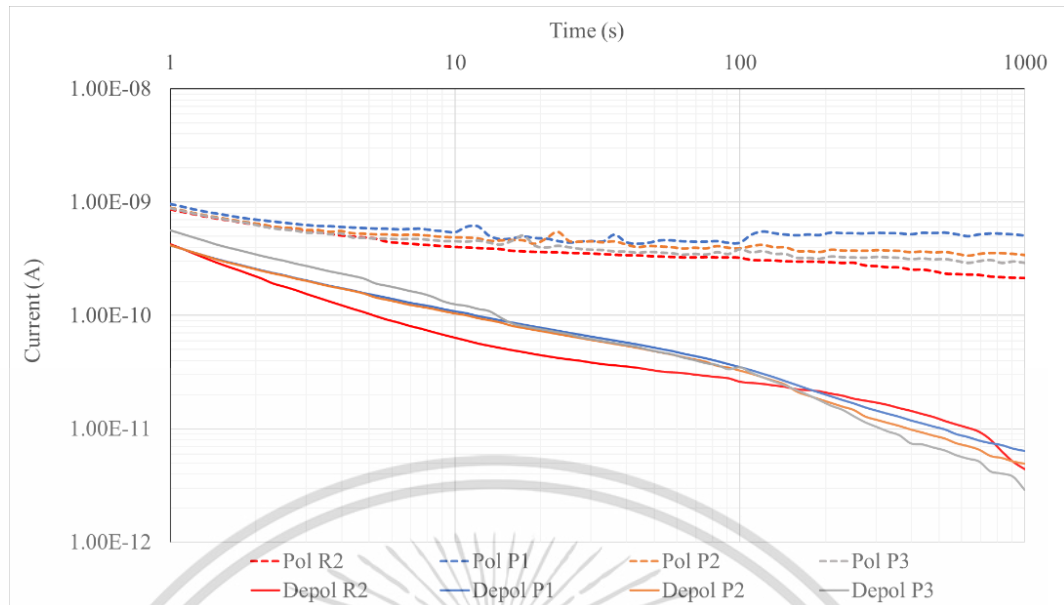
หมายเหตุ

Pol คือ โพลาริเซชัน
Depol คือ ดีโพลาริเซชัน



รูปที่ 4.3.1 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกัปกัดเสิร์จโลหะออกไซด์ R1 S1 S2 และ S3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3.2 กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ R2 P1 P2 และ P3

4.3.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากกระแสโพลาริเซชันของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ R1 S1 S2 และ S3 แสดงถึงความแตกต่างของค่าความต้านทาน โดยที่ตัวอย่าง R1 มีค่าความต้านทานน้อยที่สุด จากกระแสดีโพลาริเซชันแสดงถึงระยะเวลาสิ้นสุดกระบวนการดีโพลาริเซชันของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ S1 S2 และ S3 ที่ใช้เวลานานกว่าตัวอย่าง R1 สัมพันธ์กับดัชนีโพลาริเซชัน ในขณะที่ค่าความจุไฟฟ้าของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ R1 S1 S2 และ S3 มีค่าใกล้เคียงกันแสดงถึงความเป็นฉนวนที่ไม่แตกต่างกัน

บทที่ 5

สรุปผลการทดสอบ

จากการทดสอบกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ทั้ง 3 หัวข้อการทดลองโดยใช้วิธีการทดสอบที่แตกต่างกันสำหรับกรณีการทดสอบแรงดันอ้างอิงและดิสชาร์จบางส่วน สามารถสรุปผลวิเคราะห์การทดสอบเป็น 2 กรณีได้แก่ 1. ผลการทดสอบกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่มีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงไม่ผ่านมาตรฐานเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน และ 2. ผลการทดสอบกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่มีค่ายอดประจุดิสชาร์จบางส่วนไม่ผ่านมาตรฐานเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

5.1 สรุปผลการทดสอบ

5.1.1 ผลการทดสอบกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่มีแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงไม่ผ่านมาตรฐานเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

จากผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของตัวอย่างกับดักเสิร์จ ค่ายอดของกระแสรวมจากตัวอย่างทดสอบนั้นมีความสอดคล้องกับค่าความต้านทานและความจุไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบทางโพลาริเซชันรวมถึงลักษณะกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน โดยสังเกตจากกระแสโพลาริเซชันที่มีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงค่ายอดในช่วงระหว่าง 10 – 100 วินาทีของการทดสอบแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบความต้านทานภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสตรง ในขณะที่เดียวกันค่ากระแสดีโพลาริเซชันในช่วงต้นกระบวนการดีโพลาริเซชันนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่ากระแสโพลาริเซชันมาก เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างอ้างอิงของกับดักเสิร์จชุดนี้ ซึ่งการวิเคราะห์เปรียบเทียบนี้แสดงให้เห็นถึงความไม่มีเสถียรภาพขององค์ประกอบความต้านทานเมื่อกับดักเสิร์จทำงานในช่วงสภาวะปกติทั้งในกรณีสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบกระแสรั่วไหลสูง และในกรณีสนามไฟฟ้ากระแสตรงที่มีกระบวนการโพลาริเซชันเปลี่ยนแปลงแบบชั่วขณะ

5.1.2 ผลการทดสอบกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่มีค่าประจุดิสชาร์จบางส่วนไม่ผ่านมาตรฐานเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน

จากค่าความจุไฟฟ้าที่แสดงถึงความเป็นฉนวนจากตัวอย่างทดสอบทุกตัวไม่แตกต่างกันมีความสอดคล้องถึงพฤติกรรมของดิสชาร์จบางส่วนภายในฉนวนเนื่องจากแรงดันทดสอบที่ใช้มีค่าไม่มากพอให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนจากการวิเคราะห์ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนเปรียบเทียบกับกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน สำหรับกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่มีการเสริมความแข็งแรงภายในด้วยไฟเบอร์กลาส การใช้ค่าความต้านทานและลักษณะกระแสดีโพลาริเซชันจึงสามารถใช้เป็นข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับการวิเคราะห์ความไม่สมบูรณ์ของกับดักเสิร์จโลหะออกไซด์ได้ โดยตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบที่มีค่ายอดประจุดีสชาร์จบางส่วนสูงมีความสอดคล้องกับค่าดัชนีโพลาริเซชัน ลักษณะกระแสดีโพลาริเซชันของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่มีค่ายอดประจุดีสชาร์จบางส่วนสูงจะแสดงช่วงสิ้นสุดกระบวนการดีโพลาริเซชันในช่วงเวลาที่นานกว่ากัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ปกติ

จากการวิเคราะห์ทั้ง 2 กรณีทำให้สรุปได้ว่าเทคนิคการใช้กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันสามารถช่วยในการวิเคราะห์เพื่อยืนยันความไม่สมบูรณ์ของฉนวนแข็งโลหะออกไซด์ รวมถึงระบบการฉนวนของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ในกรณีที่ใช้ไฟเบอร์กลาสเป็นวัสดุเสริมความแข็งแรงของบล็อกโลหะออกไซด์ นอกจากนี้รูปแบบการทดสอบความคงทนพลังงานตามมาตรฐานการทดสอบอาจเป็นอีกสาเหตุหลักของความเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้น เนื่องจากการทดสอบดังกล่าวเป็นการทดสอบที่ใช้พลังงานสูง ซึ่งอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นฉนวนของกัปดักเสิร์จ เทคนิคการใช้กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันเป็นการทดสอบฉนวนแบบไม่ทำลาย ทำให้สามารถดำเนินการกับตัวอย่างทดสอบได้โดยที่ฉนวนไม่เสื่อมสภาพจากการทดสอบ เทคนิคดังกล่าวจะช่วยให้มูลที่เป็นประโยชน์ของการทดสอบโดยโรงงานผลิตกัปดักเสิร์จ รวมถึงการออกแบบวัสดุฉนวนของกัปดักเสิร์จได้จนนำไปสู่การลดจำนวนของกัปดักเสิร์จที่ไม่ผ่านมาตรฐานการผลิตจากโรงงาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการทดสอบกระแสอิมพัลส์พลังงานสูงมากขึ้นเพื่อศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสามารถในการทนพลังงานของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่นำมาศึกษา
2. ควรมีเครื่องวิเคราะห์กระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่มีขีดจำกัดความสามารถในการวัดมากขึ้นเพื่อให้ได้ระยะเวลาในการทดสอบกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่เหมาะสม นำไปสู่ลักษณะของผลการวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชันที่วัดได้มีความสมบูรณ์มากขึ้น
3. ควรมีการจำลองการนำไปใช้งานของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่นำมาศึกษา เพื่อให้สามารถศึกษาพฤติกรรมการทำงานในแต่ละช่วงของโคงค์คุณสมบัติความสัมพันธ์ของแรงดันกับกระแสของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ไม่สมบูรณ์
4. ควรมีการศึกษากลไกการเสื่อมสภาพของคุณสมบัติของฉนวนโลหะออกไซด์ เพื่อให้เข้าใจผลการเปลี่ยนแปลงทางเคมีฟิสิกส์ของกัปดักเสิร์จโลหะออกไซด์ที่ไม่สมบูรณ์ในกรณีของแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงผิดปกติและดีสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] "IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)," in IEEE Std C62.11-2020 (Revision of IEEE Std C62.11-2012), vol., no., pp.1-120, 24 Sept. 2020.
- [2] IEC Standard 60099-4. "Metal-oxide surge arresters without gaps for AC systems", 2006.
- [3] Kobayashi, M. (2016). Development of gapless surge arresters and application of them to power system facilities. 2016 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). doi:10.1109/iclp.2016.7791351
- [4] Smeets, R., der Sluis, L. van, Kapetanović, M., Peelo, D. F., & Janssen, A. (2014). Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems.
- [5] L. Montanes, M. Garcia-Gracia, M. Sanz and M. A. Garcia, "An improvement for the selection of surge arresters based on the evaluation of the failure probability," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no. 1, pp. 123-128, Jan. 2002, doi: 10.1109/61.974198.
- [6] Tuczek, Maximilian & Hinrichsen, Volker. (2014). Recent Experimental Findings on the Single and Multi-Impulse Energy Handling Capability of Metal–Oxide Varistors for Use in High-Voltage Surge Arresters. Power Delivery, IEEE Transactions on. 29. 2197-2205. 10.1109/TPWRD.2013.2283911.
- [7] Hinrichsen, Reinhard, Richter (on behalf of Cigré WG A3.17), Energy Handling Capability of High-voltage Metal-oxide Surge Arresters Part 1: A critical review of the standards, Cigré SC A3 Technical Colloquium, Rio de Janeiro, September 12/13, 2007.
- [8] D. A. Silva et al., "Polymer surge arresters: Degradation versus electrical performance," 2012 IEEE Electrical Power and Energy Conference, London, ON, Canada, 2012, pp. 63-68, doi: 10.1109/EPEC.2012.6474981.
- [9] Raidl, N., Supancic, P., Danzer, R., & Hofstätter, M. (2015). Piezotronically Modified Double Schottky Barriers in ZnO Varistors. Advanced Materials, 27(12), 2031–2035.
- [10] Q. Wang et al., "Study on the Difference of Fault Detection Effect of AC Leakage Current Live Test Technology Under Operating Voltage on Different Insulating Parts

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


- of MOA," 18th International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2022), Online Conference, China, 2022, pp. 412-417, doi: 10.1049/icp.2022.1224.
- [11] Jinliang, He & Hu, Jun & Lin, Yuanhua. (2008). ZnO Varistors with High Voltage Gradient and Low Leakage Current by Doping Rare-Earth Oxide. *Science in China Series E: Technological Sciences*. 51. 693-701. 10.1007/s11431-008-0085-x.
- [12] D. A. da Silva, R. C. de Jesus, J. Pissolato and K. Lahti, "Partial Discharge Activity in Distribution MOSAs due to Internal Moisture," 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), 2015, pp. 94-98.
- [13] IEC Standard 60270 (2000), "High-voltage test techniques – Partial discharge measurements".
- [14] K. P. Mardira, T. K. Saha, and R. A. Sutton, "Investigation of Modern Diagnostic Techniques for Metal Oxide Surge Arresters", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 12, pp. 50-59, 2005.
- [15] T. K. Saha and K. P. Mardira, "Modeling Metal Oxide Surge Arrester for the Modern Polarization Based Diagnostics," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 6, pp. 1249-1258, Dec. 2005.
- [16] S. Lixiong, Q. Kun, C. Daming, T. Jiayu and D. Lin, "A New model of Metal Oxide Arresters and the Recognition of Model Parameters," 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642005.
- [17] C. Chuayin, M. Zinck, A. Kunakorn and N. Pattanadech, "The Effect of Electrical and Moisture Degradation of Metal Oxide Varistor with Insulation Diagnosis," 2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Phuket, Thailand, 2020, pp. 110-113, doi: 10.1109/CMD48350.2020.9287298.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 
1. S. Turatham, P. Pannil, S. Maneeroj, W. Methavithit, M. Zinck and N. Pattanadech, "Insulation Diagnosis of Distribution Class Metal Oxide Surge Arrester Using Polarization and Depolarization Techniques," 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, pp. 396-399, doi: 10.23919/CMD54214.2022.9991557.

Insulation Diagnosis of Distribution Class Metal Oxide Surge Arrester Using Polarization and Depolarization Techniques

S. Turatham^{1*}, P. Pannil², S. Maneeroj³, W. Methavithit⁴, M. Zinck⁵ and N. Pattanadech¹

¹ Department of Electrical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

² Department of Instrumentation and Control Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

³ Tesla Power Co., Ltd, Samut Sakhon, Thailand

⁴ Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand

⁵ Paralec Energy Co., Ltd, Bangkok, Thailand

*E-mail: 64601137@kmitl.ac.th

Abstract – Imperfection of metal oxide surge arrester (MOSA) becomes a factor that affects the power supply quality on medium and high voltage networks. Understanding the coordination of MOSA insulation systems helps describe their failure. This paper presents the analysis of the dielectric response of imperfect MOSA from the factory using polarization and depolarization techniques. The experiments were taken on 21 kV and 24 kV MOSA samples which were validated by testing topics, i.e., the reference voltage, voltage-current characteristic curves, and partial discharge (PD). Polarization and Depolarization Current (PDC) was measured after 21 kV MOSA samples had taken PD testing and 24 kV MOSA samples had taken reference voltage testing. Resistivity, capacitance, and polarization index were interpreted for insulation diagnosis. The importance of non-destructive electrical diagnostics based on polarization methods is validated by PDC test results and is highlighted in detail in this paper. Finally, the results of different PDC were compared and discussed.

Keywords: metal oxide, polarization and depolarization current, insulation diagnosis, reference voltage, partial discharge

I. INTRODUCTION

Nowadays, high voltage equipment can be damaged from unexpected faults in the high voltage system. Metal oxide surge arrester (MOSA) becomes necessary for high voltage equipment (widely used to protect transformers and transmission lines). It prevents the high voltage equipment from the electrical stress from the transients, lightning strikes, or overvoltage. In addition, it can prevent the worker or engineer from maintenance. The imperfection of protective equipment such as MOSA leads to the failure of the high voltage system. Many factors cause the imperfect in the insulation system. Normally, it is affected by apparent thermal, electrical, ambient, and mechanical stress in each distribution and transmission system. MOSA can be damaged from lightning strikes or temporary overvoltage with higher energy. Thus, condition monitoring or insulation diagnosis for MOSA should be applied with the high voltage system. Since a MOSA is an insulator at normal conditions below its rated voltage, the effect of polarization and depolarization of its dipole within the insulation can be monitored by any of these polarization-based diagnostics [1-3]. Resistivity, capacitance, and polarization index will be used to analyze and describe the insulation system of the MOSA.

In this paper, the types of imperfection will advert to the Irregular reference voltage (U_{ref}), voltage-current (V-I) curve and partial discharge (PD) cases [4]. The reference voltage is the lowest peak value independent of the polarity of power-

frequency voltage, divided by the square root of 2, required to produce a resistive component of current equal to the reference current of the arrester or arrester element. The reference voltage of a multi-unit arrester is the sum of the reference [5]. On the test, reference current (e.g. 5kA) will applied to the MOSA. The reference voltage, capacitive current, resistive current and total current will be recorded as the V-I curve as shown in the Fig. 1.

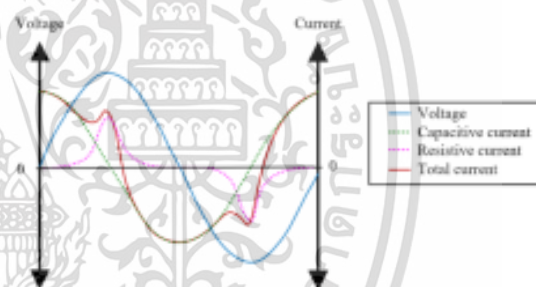


Figure 1. MOSA V-I curve.

PD is localized electric discharge resulting from ionization in an insulation system when the voltage stress exceeds the critical value [5]. This discharge partially bridges the insulation between electrodes as show in the Fig. 2. This discharge occurs by the failure of the insulation in term of cavity, surface, or sharp edge.

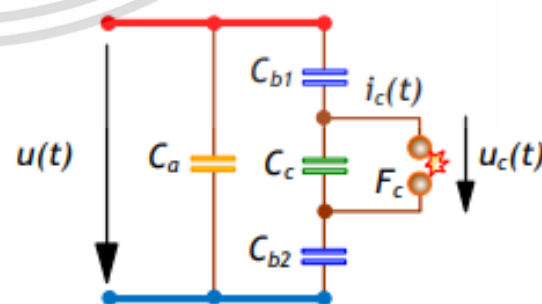


Figure 2. PD equivalent circuit

These imperfections need to be validated in the production of MOSA. The routine test shall be performed to verify if the MOSA has the properly U_{ref} and has no source of PD.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Regarding the IEEE C62.11-2020 standard [5], reference voltage at the manufacturer's specified reference current shall be tested. The reference voltage of MOSA shall not decrease by more than 5% from initial measurements. PD shall be measured with MOSA and general methods that are following IEEE Std C37.301. The measured PD shall not exceed 10 pC.

Distribution class MOSA which was rejected from the factory will be used to test the polarization and depolarization current (PDC). Classify MOSA samples to 2 types of imperfection 1) higher than 20 pC PD amplitude and 2) unacceptable reference voltage and voltage-current characteristic curves. All MOSA samples will be listed in Table 1. MOSA samples from the factory were reported with unacceptable PD amplitude and the reference voltage. These samples will be compared with the reference MOSA (R1 for 21 kV MOSA and R2 for 24 kV MOSA) which verified test results in Tables 2 and 3 when PD testing was performed at the maximum continuous operating voltage (MCOV) of each MOSA sample rating.

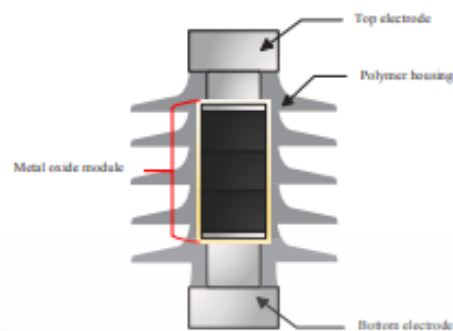


Figure 3. Studied distribution class MOSA structure

II. EXPERIMENT

A. PDC technique

PDC measurement was performed by using the circuit in Fig. 4. The DC voltage will be applied to the MOSA sample. The charging current will pass through the MOSA sample (the PDC analyzer will record the polarization current in this process). After that, the DC voltage source will be disconnected from the MOSA samples and measure the discharging current. Discharging current from the MOSA sample will pass through the ammeter in the opposite direction as the charging current. PDC analyzer will record the depolarization current in this process. After that, the depolarization current will continuously decrease until the steady-state or finish the polarization process [1]. This measurement will give the PDC curve which describes the insulation response as shown in the Fig. 5.

In the polarization process (applying DC voltage to the MOSA), the metal oxide blocks inside the fiberglass module will get stressed. The polarization model of MOSA [2] can identify by the resistance and capacitance as shown in the Fig. 6. The conduction current in the insulation depends on the leakage or internal resistance while the displacement current passes through the geometric capacitance, internal resistance, and the pairs of R-C branches of the insulation system of metal oxide blocks.

TABLE I. LIST OF MOSA SAMPLES UNDER TEST

Sample Number	Rate	Failure
S1	21 kV, 5kA	PD amplitude > 10 pC
S2		
S3		
P1	24 kV, 5 kA	Irregular V-I curve and U_{ref}
P2		
P3		

TABLE II. TEST VERIFICATION RESULTS OF SAMPLE R1

Reference voltage test		PD test	
Maximum U_{ref} (kV)	25.00	MCOV (kV, rms)	17.00
Minimum U_{ref} (kV)	22.00	PD (pC)	< 10.00
Measured U_{ref} (kV)	22.91	Measured PD (pC)	0.61

TABLE III. TEST VERIFICATION RESULTS OF SAMPLE R2

Reference voltage test		PD test	
Maximum U_{ref} (kV)	29.00	MCOV (kV, rms)	19.50
Minimum U_{ref} (kV)	25.00	PD (pC)	< 10.00
Measured U_{ref} (kV)	28.62	Measured PD (pC)	4.58

The studied MOSA mainly consist of the metal oxide module, polymer insulation, electrodes, and terminals as shown in Fig. 3. Metal oxide blocks in the module (taped with fiberglass) act as nonlinear resistance. These blocks have not conducted the current during their operating voltage of them. The current conduction of these metal oxide blocks will proceed after the metal oxide blocks take the overvoltage from the system or the lightning strikes. The metal oxide blocks inside the fiberglass module will discharge the current from the over energy from the system to the ground. To diagnose the imperfections of MOSA samples. PDC measurement shall be performed in each sample. Resistivity, capacitance, and polarization index were compared and presented in this paper.

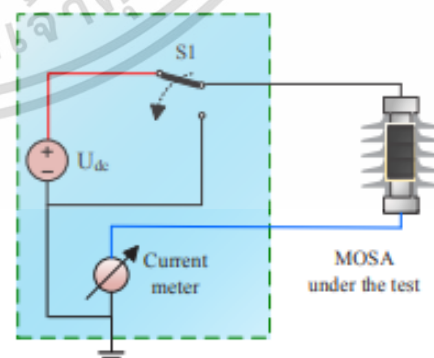


Figure 4. PDC circuit

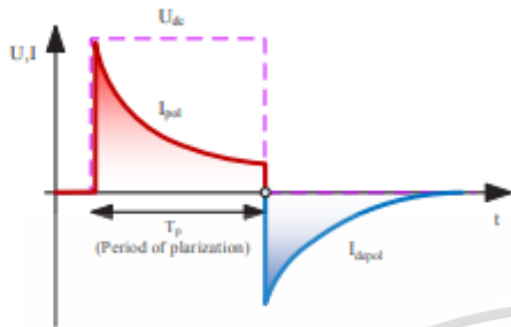


Figure 5. Polarization and depolarization current

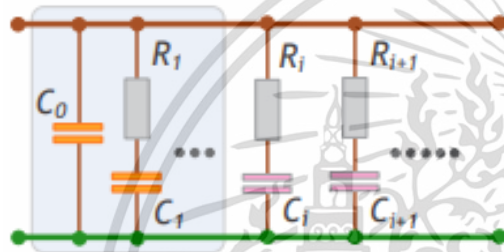


Figure 6. MOSA polarization model

a. Test procedure

To diagnose the samples, PDC shall be measured with the same conditions. In this study, insulation diagnosis will be based on apparent PDC trend, insulation resistance at 50 Hz frequency, insulation capacitance at 50 Hz frequency and polarization index. The PDC measurement performing steps are performed by

- Remaining current measurement: De-energize the test object by connect to the ground with long period of time. Then energize the test object with the lowest voltage of DC voltage source and measure the remaining current. This measurement will give the initial condition of the test.
- Short period measurement: This measurement will perform with the short period of time. To verify the verify the circuit arrangement and the current magnitude.
- Main measurement: After confirming the test circuit and remaining current, PDC measurement will be perform until the depolarization current is equal to the remaining current level.

III. EXPERIMENT RESULTS

The measured polarization and depolarization currents were plotted in a log-log scale by applying DC voltage of 100 V for polarization 1100 seconds and depolarization 1100 seconds. Each sample are de-energized by 60 seconds (connect the bottom electrode to the ground) and measured the remaining current. The PDC test results are tabulated in Tables 4 and 5. The insulation resistance, capacitance and polarization index were calculated based on measured polarization and depolarization current from the test.

TABLE IV. PDC TEST RESULTS OF 21 KV 5 KA MOSA

Sample Number	Parameter			
	Resistance (Ω)		Capacitance (F)	Pol Index
	Pol	Depol		
R1	1.49e+11	1.44e+11	2.60e-12	1.06
S1	4.87e+11	4.00e+11	3.72e-12	1.20
S2	4.76e+11	4.08e+11	3.64e-12	1.13
S3	5.06e+11	4.86e+11	4.29e-12	1.01

TABLE V. PDC TEST RESULTS OF 24 KV 5 KA MOSA

Sample Number	Parameter			
	Resistance (Ω)		Capacitance (F)	Pol Index
	Pol	Depol		
B2	5.59e+11	4.80e+11	3.00e-12	1.08
P1	2.16e+11	2.04e+11	1.60e-11	1.18
P2	2.38e+11	2.34e+11	1.88e-11	1.03
P3	2.21e+11	2.11e+11	7.58e-11	1.03

The polarization and depolarization from the PDC analyzer were recorded. PDC curve results of MOSA R1 and S1 were plotted in a logarithm scale in Fig. 7 and 8. And PDC curve results of MOSA R2 and P1 were plotted on a logarithm scale in the Fig. 9 and 10.

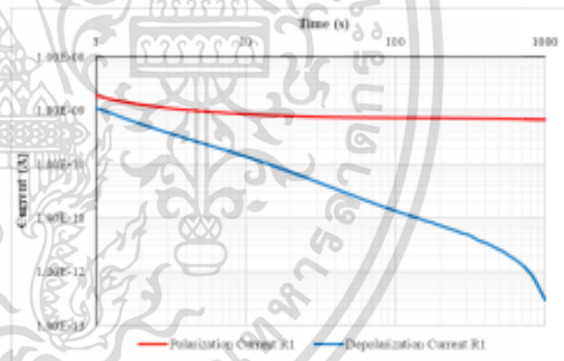


Figure 7. Polarization and depolarization current of MOSA R1

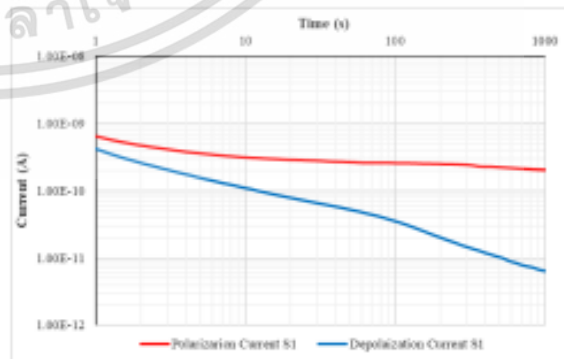


Figure 8. Polarization and depolarization current of MOSA S1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

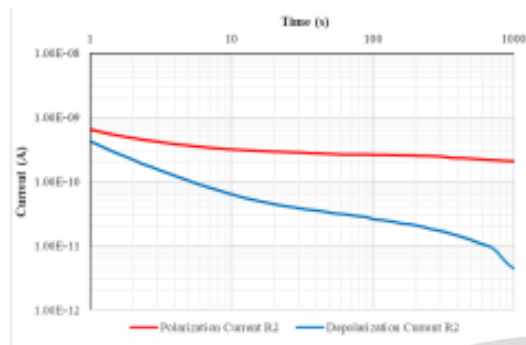


Figure 9. Polarization and depolarization current of MOSA R2

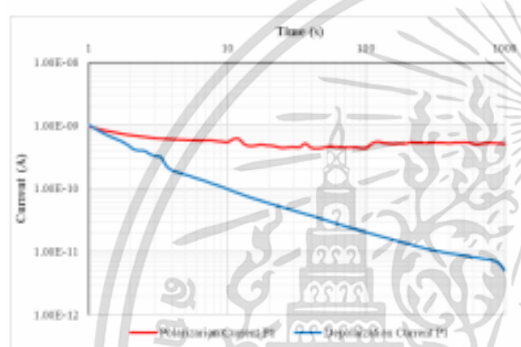


Figure 10. Polarization and depolarization current of MOSA P1

IV. CONCLUSIONS

PDC trend of MOSA results describes the difference of discharging in the depolarization process in the metal oxide blocks in the MOSA. For MOSA with PD failure, the

measured depolarization current has longer depolarizing time than the reference sample (based on the remaining current level of reference sample). The slower depolarization process affected from an unknown defect (PD source) in the MOSA. There are not highly change the resistance and capacitance in the R-C branch in the insulation system. In the other hand, the polarization index of S1 and S2 shows the imperfection of the insulation system in each sample. For the MOSA with an Irregular V-I curve and U_{ref} , the measured depolarization current show that there is a highly difference in resistance and capacitance from the reference sample. This highly difference in polarization and depolarization current amplitude is related to the difference V-I curve from the reference MOSA. From this case, it needs to study the defected MOSA functionality would be better or get worse.

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge Summit power system Co., Ltd for providing the MOSA samples with the necessary data.

REFERENCES

- [1] K. P. Mardira, T. K. Saha and R. A. Sutton, "Investigation of diagnostic techniques for metal oxide surge arresters," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 1, pp. 50-59, Feb. 2005.
- [2] T. K. Saha and K. P. Mardira, "Modeling metal oxide surge arrester for the modern polarization based diagnostics," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 6, pp. 1249-1258, Dec. 2005.
- [3] C. Chuayin, M. Zinck, A. Kunakorn and N. Pattanadech, "The Effect of Electrical and Moisture Degradation of Metal Oxide Varistor with Insulation Diagnosis," 2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2020, pp. 110-113.
- [4] D. A. da Silva, R. C. de Jesus, J. Pissolato and K. Lahri, "Partial discharge activity in distribution MOSAs due to internal moisture," 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), 2015, pp. 94-98.
- [5] "IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)," in *IEEE Std C62.11-2020 (Revision of IEEE Std C62.11-2012)*, vol. no., pp.1-120, 24 Sept. 2020.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายศักรินทร์ ตระธรรม
วัน เดือน ปีเกิด	16 เมษายน 2542 ที่อุดรธานี
ที่อยู่	36/332 หมู่ 3 ตำบลคลองสาม อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120
ประวัติการศึกษา	2564 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง 2.) การทดสอบและวิเคราะห์อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
พ.ศ. 2563	ร่วมเป็นเจ้าหน้าที่งานประชุมวิชาการ CMD 2020 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ
พ.ศ. 2563	มีส่วนร่วมการทดสอบและวินิจฉัย - Root Cause Analysis of the Cable Termination Explosion
พ.ศ. 2564	ทุนการศึกษาวิจัยภายใต้หัวข้อการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ บริษัท พาราเล็ก เอ็นเนอร์จี จำกัด และมีโอกาสร่วมงานโปรเจกต์กับบริษัท - ออกแบบวงจรทดสอบกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 4/10 μ s และ 8/20 μ s - ออกแบบอุปกรณ์ Surge Monitoring - การจำลองสัญญาณกระแสผิดพ้องในระบบสายส่ง - การวัด Partial Discharge ของอุปกรณ์สายส่งใต้ดิน
พ.ศ. 2565-ปัจจุบัน	มีส่วนร่วมการทดสอบและวินิจฉัย - Water Tree Examination of 6.6 kV Cable Terminations - Root Cause Analysis of the 115 kV Dry Type Plug-in GIS Cable Termination Explosion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้