

การวิเคราะห์คุณลักษณะของดิสชาร์จบางส่วนสำหรับการบำรุงรักษา
เชิงป้องกันสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงสูง

THE ANALYSIS OF PARTIAL DISCHARGE CHARACTERISTICS FOR
PREVENTIVE MAINTENANCE OF HIGH-VOLTAGE ROTATING MACHINE



กฤษฎา ดอกไม้
KRITSADA DORKMAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ (หลักสูตรสหวิทยาการ)
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-M- 027-240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE ANALYSIS OF PARTIAL DISCHARGE CHARACTERISTICS FOR
PREVENTIVE MAINTENANCE OF HIGH-VOLTAGE ROTATING MACHINE



KRITSADA DORKMAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2024

KMITL-2024-EN-M- 027-240

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์คุณลักษณะของดิสซาร์จบางส่วนสำหรับการบำรุงรักษาเชิงป้องกันสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงสูง
นักศึกษา	นายกฤษดา ดอกไม้
รหัสประจำตัว	65016010
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.นรเศรษฐ วัฒนเดช
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.พิทยา ปานนิล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอเกี่ยวกับการทดสอบวัดดิสซาร์จบางส่วนเพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของการเกิดดิสซาร์จบางส่วนในระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนตั้งแต่ขดลวดถูกผลิตจากโรงงาน ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ขนาดพิกัดแรงดัน 11 kV พิกัดกำลัง 50 kW เพื่อศึกษาเกี่ยวกับจุดบกพร่องและคุณลักษณะของดิสซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ นอกจากนี้เพื่อเป็นการศึกษารูปแบบและสาเหตุของการแสดงอาการความผิดปกติของขดลวดด้วยการดิสซาร์จบางส่วนจึงได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ ด้วยขดลวดสเตเตอร์ตัวอย่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำ ขนาดพิกัดแรงดัน 13.8 kV พิกัดกำลัง 111 kW ซึ่งเคยติดตั้งใช้งาน ซึ่งถูกจำลองความเครียดเมื่อได้รับความร้อนเกิน ความเครียดทางกล ความเครียดเนื่องจากความชื้นและสิ่งปนเปื้อน แล้วจึงนำผลการทดสอบเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IEC60034-27-1 จากนั้นเป็นการนำข้อมูลที่รวบรวมและวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้การทดสอบดิสซาร์จบางส่วนเพื่อการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรมผลิตพลังงานไฟฟ้า ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงจำนวน 3 เครื่อง และมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงจำนวน 3 เครื่อง และท้ายที่สุดเป็นการประยุกต์การทดสอบดิสซาร์จบางส่วนเพื่อบำรุงรักษาเชิงป้องกันภายใต้ข้อจำกัดในทางปฏิบัติรูปแบบต่างๆ ซึ่งปรากฏว่าการทดสอบดิสซาร์จบางส่วนสามารถใช้ประเมินความผิดปกติของระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงจำนวน 1 เครื่องได้อย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ผลวิจัยพบว่า การต่อวงจรทดสอบซึ่งการจ่ายแรงดันและการติดตั้งตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ปลายขดลวดด้านตรงข้ามกันสามารถช่วยกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงเข้ามาในระบบวัดได้ อีกทั้งระยะเวลาที่ใช้สำหรับการทดสอบมีผลอย่างมากต่อการนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์และประเมิน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขนาดประจุดิสซาร์จบางส่วน รูปร่างพัลส์ ดังนั้นการปรับสภาพด้วยการจ่ายแรงดันที่แรงดันทดสอบค้างไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 5 นาที เพื่อให้การดิสซาร์จมีการปรับสภาพให้คงตัวเพื่อให้ผลการวัดมีความน่าเชื่อถือและลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นตามการดำเนินการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	The analysis of partial discharge characteristics for preventive maintenance of high-voltage rotating machine
Student	Mr. Kritsada Dorkmai
Student ID.	65016010
Degree	Master of Engineering
Program	Electrical and Computer Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Norasage Pattanadech
Co-thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Pittaya Pannil

ABSTRACT

This thesis presents a study on partial discharge (PD) testing to analyze the behavior of partial discharge phenomena in the insulation systems of stator windings in rotating machine. The investigation begins with stator windings produced at the factory for a combined cycle power plant generator with a rated voltage of 11 kV and a power rating of 50 kW. The objective is to examine the defects and characteristics of partial discharges occurring in the stator winding insulation. Additionally, to study the patterns and causes of abnormalities in the windings due to PD, laboratory experiments were conducted on sample stator windings from a hydroelectric generator with a rated voltage of 13.8 kV and a power rating of 111 kW. These stator windings had been previously installed and subjected to simulated stresses such as over-thermal stress, mechanical stress, and stress due to moisture and contaminants. The test results were then compared against the IEC60034-27-1 standard. The collected data were further analyzed and applied to the maintenance testing of PD in large rotating machines within the power generation industry. This included three high-voltage turbo generators and three high-voltage motors. Ultimately, the study applied PD testing for preventive maintenance under various practical constraints, demonstrating that PD testing can effectively assess the insulation system's abnormalities in a high-voltage motor. The research also found that the test circuit, including the application of voltage and the installation of overlapping capacitors at the opposite ends of the windings, helps filter high-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

frequency noise signals from the measurement system. Moreover, the duration of the test significantly impacts the analysis and evaluation of the results. Specifically, the PD magnitude and PD pulse shape are critical. Therefore, conditioning with a test voltage for at least 5 minutes allows the discharge to stabilize, enhancing the reliability of the measurement results and reducing errors in the analysis and evaluation.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.พิทยา ปานนิล และ อาจารย์รศ.ดร.นรเศรษฐ พัฒนเดช ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ และประการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า รวมถึงได้ชี้แนะในเรื่องของหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ ตลอดจนข้อ ชี้แนะจนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณธนศ วอทอง ที่ได้ให้โอกาสอันมีคุณค่ายิ่งแก่ข้าพเจ้าในการเข้าศึกษาการใช้ งานในสภาวะจริงรวมถึงการบำรุงรักษาฉนวนของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงในโรงไฟฟ้า ตลอดจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้แล้วเสร็จ

ขอขอบคุณ คุณสุริยะ มงคลสาธิตพงศ์ และคุณวรรณ อินวรรณ บริษัท พีดี โซลูชั่น จำกัด ที่ ให้การสนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือทดสอบ คอยให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือระหว่างการศึกษาวิจัย ในภาคสนามที่ดีเยี่ยมตลอดทั้งการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณศิวกร จินเมือง และน้อง ๆ ห้องปฏิบัติการวินิจฉัยระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง DikaLab ที่ให้การสนับสนุนและให้คำปรึกษาระหว่างทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ และการ เตรียมการทดลองแก่ข้าพเจ้าจนเสร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับ บิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้และถ่านทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

กฤษดา ดอกไม้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1_บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	3
บทที่ 2_ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน	4
2.2 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์	7
2.3 คุณสมบัติของระบบฉนวนขดลวดแบบฟอร์มวาร์น	9
2.4 การเสื่อมสภาพของฉนวนขดลวดสเตเตอร์ (Degradation of Stator Winding Insulation)	
.....	11
2.5 ดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์.....	14
2.6 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Testing).....	16
2.7 การแปลผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์	25
บทที่ 3 การศึกษาพฤติกรรมดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวน ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง	
.....	28
3.1 กล่าวนำ.....	28
3.2 วงจรการทดสอบ และการเตรียมการทดลอง.....	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

3.3 การศึกษาทดสอบวัตติสชาธิจบางส่วนของขดลวดสเดเตอรรีก่อนเริ่มใช้งาน	30
3.4 การศึกษาทดสอบวัตติสชาธิจบางส่วนของขดลวดสเดเตอรรีในห้องปฏิบัติการ	32
3.5 การศึกษาทดสอบวัตติสชาธิจบางส่วนของขดลวดสเดเตอรรีกาศสนาม	36
3.6 การทดสอบเพื่อบำรุงรักษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ด้วยการทดสอบติสชาธิจบางส่วน.....	40
บทที่ 4_การวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ	43
4.1 ผลการทดสอบวัตติสชาธิจบางส่วนขดลวดสเดเตอรรีแบบฟอร์มวาล์วหลังจากผลิต	43
4.2 ผลการทดสอบวัตติสชาธิจบางส่วนของขดลวดสเดเตอรรีในห้องปฏิบัติการ	51
4.3 ผลการทดสอบวัตติสชาธิจบางส่วนของขดลวดสเดเตอรรีกาศสนาม	56
4.4 ผลการทดสอบเพื่อบำรุงรักษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ด้วยการทดสอบติสชาธิจบางส่วน....	63
บทที่ 5_สรุปผลการทดลอง	70
5.1 สรุปผลการวิจัย	70
5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัย.....	71
เอกสารอ้างอิง	72
ประวัติผู้เขียน	74
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก	76
บทความวิชาการ	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของรูปแบบ PRPD ของเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้า ตามมาตรฐาน IEC60034-27-1.....	25
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ทดสอบ	31
ตารางที่ 3.2 การจำลองกรณีศึกษาสเตเตอร์บาร์สำหรับทดสอบวัตติสซาร์จบางส่วน	33
ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ทดสอบ	37
ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของวัตตุทดสอบวัตติสซาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนาม.....	37
ตารางที่ 3.5 แสดงวัตตุทดสอบและวิธีการทดสอบวัตติสซาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์	38
ตารางที่ 3.6 รายละเอียดของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ทดสอบมอเตอร์	42
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวัตติสซาร์จบางส่วนขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาล์วหลังจากผลิต	44
ตารางที่ 4.2 สัญญาณรบกวนพื้นหลังเมื่อมีการต่อวงจรทดสอบที่แตกต่างกัน	63
ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบวัตติสซาร์จบางส่วน เมื่อมีการต่อวงจรทดสอบที่แตกต่างกัน	65
ตารางที่ 4.4 ผลทดสอบวัตติสซาร์จบางส่วน รูปแบบแรงดันทดสอบ และรูปแบบ PRPD ของมอเตอร์ Primary Air Fan ที่แรงดันทดสอบ $U_0 = 4.0 \text{ kV}$	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ประเภทของเครื่องจักรกลหมุนกระแสสลับ	4
รูปที่ 2.2 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction) ของมอเตอร์แรงสูง	5
รูปที่ 2.3 มอเตอร์ซิงโครนัสในอุตสาหกรรมรีดเหล็ก	6
รูปที่ 2.4 โรเตอร์ชนิดทรงกระบอกในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โบ	6
รูปที่ 2.5 โรเตอร์ชนิดขั้วยื่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	7
รูปที่ 2.6 ขดลวดสเตเตอร์แบบสุมของมอเตอร์	8
รูปที่ 2.7 ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน้ของมอเตอร์ขนาด 5,400 kW	8
รูปที่ 2.8 (ก) ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน้ชนิดโรเบลล์บาร์, (ข) โรเบลล์บาร์	9
รูปที่ 2.9 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน้	9
รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน้ในร่องสลีต	11
รูปที่ 2.11 ภาพตัดขวางของสเตเตอร์บาร์ที่ทองแดงแยกออกจากฉนวนกราวด์วอลล์ เนื่องจากวัฏจักรความร้อน	12
รูปที่ 2.12 ส่วนคาบเกี่ยวระหว่างสารกึ่งตัวนำและสารเคลือบกึ่งตัวนำเสียหายเนื่องจากดิสชาร์จบางส่วนบนพื้นผิวของขดลวดสเตเตอร์	13
รูปที่ 2.13 บาร์ที่ถูกถอดออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งมีปัญหาคอยล์หลวมเกิดเป็นดิสชาร์จระหว่างร่องสลีต	13
รูปที่ 2.14 ประเภทของดิสชาร์จบางส่วนและรูปแบบสัญญาณการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่พบได้ในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้ากระแสสลับ	14
รูปที่ 2.15 ประเภทของดิสชาร์จบางส่วนที่แบ่งตามลักษณะของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น	17
รูปที่ 2.16 โครงสร้างของระบบฉนวนที่มีโพรงอากาศอยู่ภายใน	18
รูปที่ 2.17 วงจรการดิสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน	19
รูปที่ 2.18 วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนและอุปกรณ์ในวงจรทดสอบ	21
รูปที่ 2.19 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว	22
รูปที่ 2.20 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับวัสดุทดสอบ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 2.21	วงจรทดสอบสำหรับการวัดแบบบริดจ์อิมพีแดนซ์	23
รูปที่ 2.22	วงจรสมมูลสำหรับการสอบเทียบระบบวัดดิสชาร์จบางส่วน	24
รูปที่ 3.1	วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสำหรับขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน	29
รูปที่ 3.2	วงจรการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาล์วหลังจากผลิต	30
รูปที่ 3.3	อุปกรณ์และการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนกับขดลวดแต่ละคอยล์	32
รูปที่ 3.4	ขนาดของสเตเตอร์บาร์แบบฟอร์มวาว์นชนิดโรเบลล์บาร์สำหรับใช้ทดสอบ	32
รูปที่ 3.5	การติดตั้งสเตเตอร์บาร์ในร่องสล๊อตจำลอง	34
รูปที่ 3.6	วงจรการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ	35
รูปที่ 3.7	วงจรการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนาม	36
รูปที่ 3.8	การเตรียมวงจรการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนาม	40
รูปที่ 3.9	มอเตอร์เหนี่ยวนำและขดลวดสเตเตอร์ พิกัดกำลัง 2.8 MW พิกัดแรงดัน 6.9 kV	41
รูปที่ 3.10	วงจรการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของมอเตอร์ที่มีการต่อจุดร่วมสแตร์ต่างกัน	41
รูปที่ 3.11	การจัดเตรียมวงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสำหรับมอเตอร์	42
รูปที่ 4.1	รูปแบบ PRPD ของสเตเตอร์บาร์ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ...	51
รูปที่ 4.2	ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสเตเตอร์บาร์ได้รับความร้อน อุณหภูมิ 100 °C เป็น เวลา 48 ชั่วโมง	51
รูปที่ 4.3	รูปแบบ PRPD ของสเตเตอร์บาร์ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ...	52
รูปที่ 4.4	ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสเตเตอร์บาร์ได้รับความร้อน อุณหภูมิ 200 °C เป็น เวลา 96 ชั่วโมง	52
รูปที่ 4.5	รูปแบบ PRPD ของสเตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่ไม่นำไฟฟ้า	53
รูปที่ 4.6	ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสเตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่ไม่นำไฟฟ้า	53
รูปที่ 4.7	รูปแบบ PRPD ของสเตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่นำไฟฟ้า	54
รูปที่ 4.8	ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสเตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่นำไฟฟ้า	54
รูปที่ 4.9	รูปแบบ PRPD ของสเตเตอร์บาร์ได้รับความเสียหายทางกล	55
รูปที่ 4.10	ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสเตเตอร์บาร์ได้รับความเสียหายทางกล	55
รูปที่ 4.11	รูปแบบ PRPD ของสเตเตอร์บาร์ได้รับความชื้นภายนอก	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้า

รูปที่ 4.12 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสเตเตอร์บาร์ได้รับความชื้นภายนอก.....	56
รูปที่ 4.13 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Gen A.....	57
รูปที่ 4.14 ขนาดประจุดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ Gen A.....	57
รูปที่ 4.15 รูปร่างสัญญาณพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน Gen A.....	57
รูปที่ 4.16 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Gen B.....	58
รูปที่ 4.17 ขนาดประจุดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ Gen B.....	58
รูปที่ 4.18 รูปร่างสัญญาณพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน Gen B.....	58
รูปที่ 4.19 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Gen C.....	59
รูปที่ 4.20 ขนาดประจุดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ Gen C.....	59
รูปที่ 4.21 รูปร่างสัญญาณพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน Gen C.....	60
รูปที่ 4.22 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Motor A.....	60
รูปที่ 4.23 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วน Motor A.....	61
รูปที่ 4.24 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Motor B.....	61
รูปที่ 4.25 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วน Motor B.....	62
รูปที่ 4.26 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Motor C.....	62
รูปที่ 4.27 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วน Motor C.....	63
รูปที่ 4.28 ตำแหน่งดิสชาร์จบางส่วนตรวจจับด้วยกล้องสัญญาณเสียง.....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องจักรไฟฟ้าหมุนเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือมอเตอร์ (Motor) เป็นอุปกรณ์ที่มีใช้อย่างแพร่หลายในทุกอุตสาหกรรม ทำหน้าที่เป็นต้นกำลังเพื่อขับเครื่องจักรให้เกิดการเคลื่อนที่ เช่น อุตสาหกรรมการผลิต อุตสาหกรรมเหล็กกล้า และอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เป็นต้น เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนซึ่งเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) เป็นอุปกรณ์สำคัญในระบบไฟฟ้าที่ผลิตพลังงานไฟฟ้า ล้วนมีความสำคัญต่อระบบการผลิตและเสถียรภาพของอุตสาหกรรมอย่างมาก

จากสถิติความล้มเหลวของเครื่องจักรไฟฟ้าหมุนเมื่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานาน มักได้รับผลกระทบจากความเครียดต่างๆ ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนเป็นสาเหตุหลักต่อความล้มเหลวของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบการผลิต สูญเสียต้นทุน เวลา ค่าใช้จ่ายจากการสูญเสียการผลิตและการซ่อมแก้ไขแบบกระทันหัน ซึ่งปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเสื่อมสภาพของระบบฉนวนเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ซึ่งทำให้ได้แก่ ปัจจัยจากความเครียดทางความร้อน ทางไฟฟ้า ทางกล และการปนเปื้อนที่เกิดจากสภาพแวดล้อม นอกจากนี้จุดอ่อนส่วนใหญ่ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนที่นำไปสู่ความล้มเหลวเกิดขึ้นในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่รับภาระแรงดันไฟฟ้าสูงเป็นปัจจัยเสริมให้เกิดการพัฒนาปัญหาอันเกิดจากปัจจัยหลักดังกล่าวข้างต้น จนนำไปสู่ความล้มเหลวอย่างกระทันหันได้

ปัจจุบันนี้ เทคโนโลยีและความรู้เกี่ยวกับการบำรุงรักษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนมีความก้าวหน้ามากขึ้น ทั้งด้านของกระบวนการผลิตและการทดสอบเพื่อซ่อมบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) โดยมีการทดสอบที่แพร่หลายและเป็นที่ยอมรับหลากหลายหัวข้อ เช่น การทดสอบวัดความต้านทานขดลวด, การวัดกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน, การทดสอบเสิร์จ และที่ได้รับการยอมรับและยอมรับความนิยมอย่างมากในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาคือการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน ในรูปแบบออฟไลน์ตามมาตรฐาน IEC60034-27 หรือในรูปแบบของการตรวจติดตามแบบออนไลน์เพื่อต้องการประเมินความเสี่ยงอันเกิดจากความผิดปกติของระบบฉนวนซึ่งแสดงออกในลักษณะของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน สำหรับในประเทศไทยนั้นการทดสอบดังกล่าวยังคงมีความคลุมเครือในเชิงของรายละเอียดการทดสอบ การประเมินผลจากการทดสอบตามมาตรฐาน IEC60034-27 ร่วมกับเทคนิคสมัยใหม่เพื่อช่วยในการระบุสาเหตุและแก้ไขปัญหามีประสิทธิภาพ ด้วยเหตุนี้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาโครงสร้างของฉนวนขดลวดเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน การประเมินสภาพฉนวนจากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนตั้งแต่หลังจาก

กระบวนการผลิตเสร็จสิ้น ทั้งในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เกิดจากการใช้งานจริง เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลงเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเกิดปัญหาจากการเสื่อมสภาพภายใต้ปัจจัยการใช้งานที่เข้มงวด เพื่อนำเสนอแนวทางและวิธีการประเมินสภาพของฉนวนของอุปกรณ์ด้วยหลายเทคนิค เช่น IEC60034-27 แบบออนไลน์ รวมถึงการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาประยุกต์ใช้งานให้เหมาะสมกับการทำงานในภาคอุตสาหกรรม ลดระยะเวลาในการหยุดเดินเครื่องจักรเพื่อซ่อมบำรุงรักษาได้อย่างเหมาะสม แต่ยังสามารถได้ข้อมูลที่เพียงพอและแม่นยำต่อการประเมินสภาพของอุปกรณ์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาโครงสร้างและการเสื่อมสภาพระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน
- 2) เพื่อศึกษาการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิมในระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง จากกระบวนการผลิต, ภายในห้องปฏิบัติการ และภาคสนาม
- 3) เพื่อศึกษาผลของเวลาการคงแรงดันทดสอบต่อผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิมในระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง
- 4) เพื่อนำการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนประยุกต์ใช้กับการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน กับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนในระบบอุตสาหกรรม

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

- 1) การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิมในระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูงภายในห้องปฏิบัติการให้ผลการทดสอบที่สอดคล้องและสามารถนำไปปฏิบัติกับการทดสอบภาคสนามได้
- 2) เวลาการคงแรงดันทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิมในระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูงมีอิทธิพลต่อการประเมินผลการทดสอบ
- 3) การประเมินสภาพฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูงด้วยการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนขณะผลิตเสร็จสิ้นจากโรงงานมีความแตกต่างกับฉนวนที่ผ่านการใช้งานแล้ว ไม่สามารถใช้เกณฑ์ประเมินที่เหมือนกันได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1) ศึกษาโครงสร้างและระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง ซึ่งได้แก่ มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พิกัดแรงดัน 6.6 กิโลโวลต์ขึ้นไป
- 2) ศึกษาการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC60034-27 กับระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูงในห้องปฏิบัติการวินิจฉัยระบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง (DikaLab) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และการทดสอบภาคสนามในพื้นที่อุตสาหกรรมโรงไฟฟ้าจังหวัดระยอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เปรียบเทียบวิธีการตรวจวัดหรือวิธีการทดสอบดิสซาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิมกับแบบสมัยใหม่ด้วยกล้องอะคูสติก (Acoustic Camera)

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2565				ปีการศึกษา 2566			
	ส.ค.- ก.ย.	ต.ค.- พ.ย.	ม.ค.- ก.พ.	มี.ค.- ม.ย.	ส.ค.- ก.ย.	ต.ค.- พ.ย.	ม.ค.- ก.พ.	มี.ค.- ม.ย.
1) ศึกษาโครงสร้าง การทำงาน การเชื่อมสภาพของระบบนวนในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง	—							
2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง		—	—					
3) จัดเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือ และวัสดุทดสอบ			—					
4) ออกแบบการทดลองและทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ				—				
5) ทดสอบและเก็บข้อมูลภาคสนาม				—	—	—		
6) วิเคราะห์ผลการทดลอง ข้อมูลภาคสนาม และสรุปผลการทดลอง						—	—	
7) เขียนบทความวิชาการและตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการ						—	—	
8) จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์								—

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

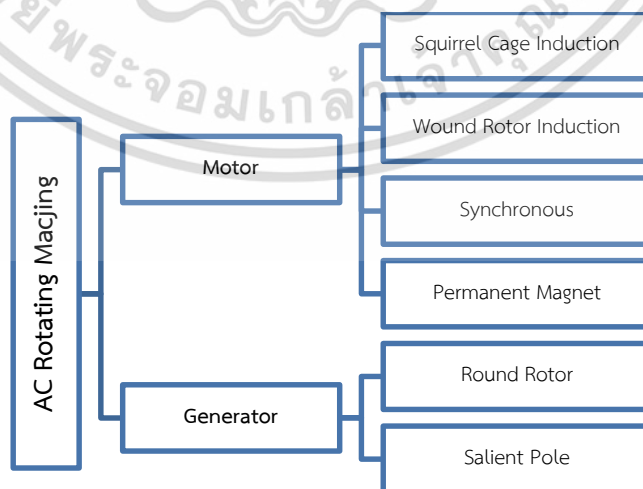
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน

อุปกรณ์ที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ กรณีเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยหลักการที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านวงจรรายนอก ซึ่งเกิดจากขดลวดเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กโดยอาศัยต้นกำลังที่มาจากแหล่งที่มาของพลังงานกลอาจจะเป็นลูกสูบเครื่องยนต์ กังหันไอน้ำ แรงน้ำตกผ่านกังหันน้ำ เครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือกังหันลม [1] โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ สเตเตอร์เรียกอีกอย่างว่าอาร์เมเจอร์ (Armature winding) สำหรับเจนเนอเรเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมักจะจำแนกตามประเภทของขดลวดโรเตอร์ซึ่งขดลวดโรเตอร์เรียกอีกอย่างว่าขดลวดสร้างสนาม (Field winding) เมื่อขดลวดตัดกับเส้นแรงแม่เหล็กหรือเส้นแรงแม่เหล็กหมุนตัดกับขดลวดตัวนำ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าในตัวนำ

ส่วนอุปกรณ์ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เรียกว่า มอเตอร์ สำหรับมอเตอร์กระแสตรง มีข้อได้เปรียบตรงที่สามารถเปลี่ยนความเร็วในการหมุนได้ง่าย ดังนั้นมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมในอดีต อย่างไรก็ตาม ด้วยมอเตอร์แบบปรับความเร็วได้ในปัจจุบันที่ทำได้ง่ายโดยการรวมมอเตอร์กระแสสลับเข้ากับอินเวอร์เตอร์ไครฟ์แบบอิเล็กทรอนิกส์ (Inverter-fed drive, IFD) [2] สำหรับมอเตอร์กระแสสลับนั้น สเตเตอร์เรียกขดลวดอาร์เมเจอร์ ทั้งนี้มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับมักจะจำแนกตามประเภทของขดลวดโรเตอร์ โดยในเครื่องจักรกลหมุนมีทั้งแบบซิงโครนัส และอะซิงโครนัส ซึ่งได้อธิบายเกี่ยวกับเครื่องจักรกลหมุนแต่ละประเภทไว้ดังนี้



รูปที่ 2.1 ประเภทของเครื่องจักรกลหมุนกระแสสลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 Squirrel Cage Induction (SCI) motor

โรเตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็กโดยการเหนี่ยวนำไฟฟ้ากระแสสลับที่มีลักษณะคล้ายหม้อแปลงไฟฟ้าจากการพันของขดลวดสเตเตอร์ นี่เป็นมอเตอร์กระแสสลับชนิดที่ใช้กันทั่วไปมากที่สุด ความโดดเด่นของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบกรงกระรอกนั้นมีโครงสร้างที่เรียบง่ายและทนทาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยที่ความเร็วของโรเตอร์ จะช้ากว่าความเร็วซิงโครนัสของสนามแม่เหล็กที่กำลังหมุนในช่องว่างอากาศที่เกิดจากขดลวดสเตเตอร์ มอเตอร์ประเภทนี้สามารถนำไปใช้งานเกือบทุกรูปแบบที่เป็นไปได้ เช่น การสูบของเหลว พัดลม ระบบสายพานลำเลียง การบิด การผสม เป็นต้น [2]



รูปที่ 2.2 โรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Induction) ของมอเตอร์แรงสูง

2.1.2 Wound Rotor Induction Motor

มอเตอร์ประเภทนี้ โรเตอร์จะถูกพันด้วยขดลวดหุ้มฉนวน และสายตัวนำจะถูกถอดออกจากโรเตอร์ผ่านแหวนสลิป (slip ring) ในการทำงานนั้นกระแสไฟฟ้าจากสเตเตอร์จะเหนี่ยวนำเข้าสู่โรเตอร์ เช่นเดียวกับมอเตอร์แบบกรงกระรอก แต่มอเตอร์แบบวาล์วโรเตอร์สามารถควบคุมหรือจำกัดกระแสในขดลวดโรเตอร์ได้โดยใช้ความต้านทานภายนอกผ่านแหวนสลิป มอเตอร์ประเภทนี้มีใช้ค่อนข้างน้อยเนื่องจากการต้องการบำรุงรักษาเพิ่มเติมสำหรับแหวนสลิป [2]

2.1.3 Synchronous Motor

มอเตอร์นี้มีกระแสตรงไหลผ่านขดลวดโรเตอร์ โดยใช้แปรงถ่าน เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กกระแสตรงซึ่งทำเกี่ยวกับคล็อกกับสนามแม่เหล็กที่กำลังหมุนจากสเตเตอร์ ทำให้โรเตอร์หมุนโดยความเร็วจะสัมพันธ์กับความถี่ของกระแสไฟฟ้ากระแสสลับที่ขดลวดสเตเตอร์ โดยที่ความเร็วของโรเตอร์ เท่ากับความเร็วซิงโครนัส และขึ้นอยู่กับจำนวนคู่ขั้วโรเตอร์และความถี่ไฟฟ้า มีสองวิธีหลักในการรับกระแสตรงในโรเตอร์ โดยข้อดีของมอเตอร์ซิงโครนัสคือเกิดกระแสชานน้อยขณะสตาร์ท

เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์แบบกรงกระรอก และความเร็วจะคงที่มากกว่า นอกจากนี้ ต้นทุนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ เมื่ออนุญาตให้เนาไปใช้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานในการทำงานยังต่ำกว่า เนื่องจากการปรับกระแสตรงของโรเตอร์ จะทำให้เราสามารถปรับปรุงตัวประกอบกำลังของมอเตอร์ได้ อุตสาหกรรมที่นิยมมากใช้ได้แก่ อุตสาหกรรมรีดเหล็ก อุตสาหกรรมซีเมนต์ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 มอเตอร์ซิงโครนัสในอุตสาหกรรมรีดเหล็ก

2.1.4 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดราวด์โรเตอร์ (Round Rotor Generators)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดราวด์โรเตอร์หรือชนิดทรงกระบอก เหมาะสำหรับใช้งานที่ความเร็วรอบสูงตั้งแต่ 1000 รอบต่อนาทีขึ้นไป เนื่องจากปืนโรเตอร์ที่มีผิวค่อนข้างเรียบซึ่งจะช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากแรงต้านลมบริเวณช่องว่างระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ โดยที่รูปทรงของโรเตอร์ที่เรียบยังช่วยให้มีโครงสร้างที่แข็งแรงมากยิ่งขึ้น เมื่ออยู่ภายใต้แรงเหวี่ยงหนี ศูนย์กลางสูงที่เกิดขึ้นขณะใช้งานที่ความเร็วสูง ซึ่งบางครั้งเรียกว่า "เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบเทอร์โบ" มักขับเคลื่อนด้วยกังหันแก๊สหรือกังหันไอน้ำ ที่พิกัดกำลังมากถึง 2000 MVA [2] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โรเตอร์ชนิดทรงกระบอกในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขั้วยื่น (Salient Pole Generators)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดโรเตอร์ชนิดขั้วยื่นมักจะติดตั้งขดลวดขั้วสนามแม่เหล็กแต่ละขั้วไว้บนแกนเหล็ก ซึ่งมีทั้งแบบแกนเหล็กตันและแบบลามิเนต โดยถูกติดตั้งรวมกันบริเวณโดยรอบเพลลาของโรเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยทั่วไปแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้จะทำงานที่ความเร็วรอบต่ำไม่เกิน 1800 รอบต่อนาที เนื่องจากลักษณะขั้วหรือขดลวดที่ยื่นออกมาจากเพลลาของโรเตอร์ ทำให้เกิดช่องว่างอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์ที่ไม่สม่ำเสมอ เกิดการสูญเสียเนื่องจากแรงต้านอากาศเกิดขึ้น ดังนั้นในการใช้งานเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดขั้วยื่นจะมีความเร็วรอบต่ำกว่าชนิดราวด์โรเตอร์ ซึ่งนิยมใช้กับไฮโดรเทอร์ไบน์ที่ทำงานด้วยความเร็วรอบต่ำ โดยมีพิกัดกำลังมากถึง 1000 MVA [2, 3]



รูปที่ 2.5 โรเตอร์ชนิดขั้วยื่นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.2 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์

โครงสร้างของขดลวดสเตเตอร์ ตั้งแต่พิกัด 1 kW ถึง 10,000 kW โดยพื้นฐานแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.2.1 ขดลวดสเตเตอร์ที่พันแบบสุ่ม

ขดลวดสเตเตอร์ที่พันแบบสุ่มประกอบด้วยตัวนำทองแดงหุ้มฉนวนที่พันอย่าง ต่อเนื่องผ่านช่องสลิตในแกนสเตเตอร์เพื่อสร้างขดลวด ดังรูปที่ 2.6 โดยหลักการแล้วแต่ละรอบของลวดตัวนำทองแดงสามารถวางแบบสุ่มกับลวดตัวนำทองแดงอื่น ๆ ใน ขดลวดโดยไม่ขึ้นกับระดับแรงดันไฟฟ้าของแต่ละรอบ ขดลวดสเตเตอร์ที่พันแบบสุ่มมักจะทำงานที่ระดับพิกัดแรงดันน้อยกว่า 1,000 V หรือ 3,300 V

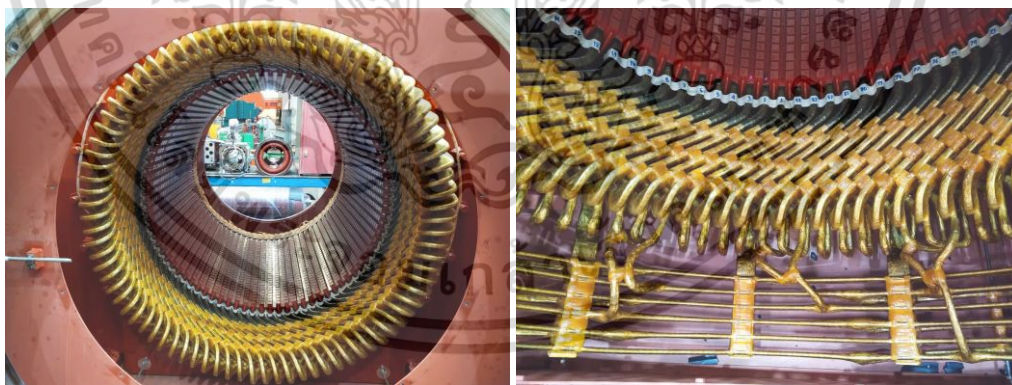
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ขดลวดสเตเตอร์แบบสุมของมอเตอร์

2.2.2 ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวนชนิดคอยล์

นิยมใช้สำหรับเครื่องจักรกลหมุนที่ทำงานที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 1,000 V หรือ 3,300 V ขึ้นไป ขดลวดดังกล่าวทำมาจากคอยล์หุ้มฉนวนที่ได้รับการขึ้นรูปก่อนใส่ลงในร่องสลิตของแกนเหล็ก สเตเตอร์ ขดลวดที่ได้รับการขึ้นรูปประกอบด้วยตัวนำทองแดงที่พันอย่างต่อเนื่องเป็นรูปสี่เหลี่ยม หรือเรียกว่ารูปทรงโดมอนด์ ดังรูปที่ 2.7 โดยมีฉนวนพันตลอดแนวของขดลวด โดยปกติแต่ละคอยล์สามารถมีได้ตั้งแต่ 2 ถึง 12 รอบ ในการออกแบบ ซึ่งการผลิตต้องให้แน่ใจว่าแต่ละรอบในคอยล์ที่อยู่ติดกับอีกคอยล์หนึ่งมีความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าน้อยที่สุด

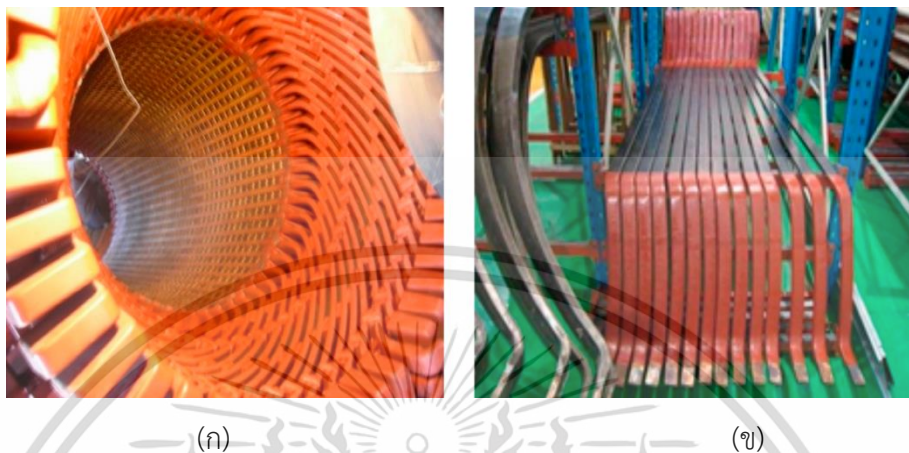


รูปที่ 2.7 ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวนของมอเตอร์ขนาด 5,400 kW

2.2.3 ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวนชนิดโรเบลล์บาร์

เครื่องจักรกลหมุนที่มีพิกัดกำลังสูงกว่าประมาณ 50 MVA ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวนนั้นจะมีขนาดใหญ่จึงยากที่จะใส่ขาทั้งสองของคอยล์ในช่องแคบ ๆ ในแกนสเตเตอร์โดยไม่เสี่ยงต่อความเสียหายทางกลที่จะเกิดขึ้นกับคอยล์ระหว่างการใส่ ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ในปัจจุบันทำมาจากคอยล์แบบครึ่งรอบ (half-turn) ซึ่งเรียกกันว่าโรเบลล์บาร์ โดยการใส่คอยล์เพียงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

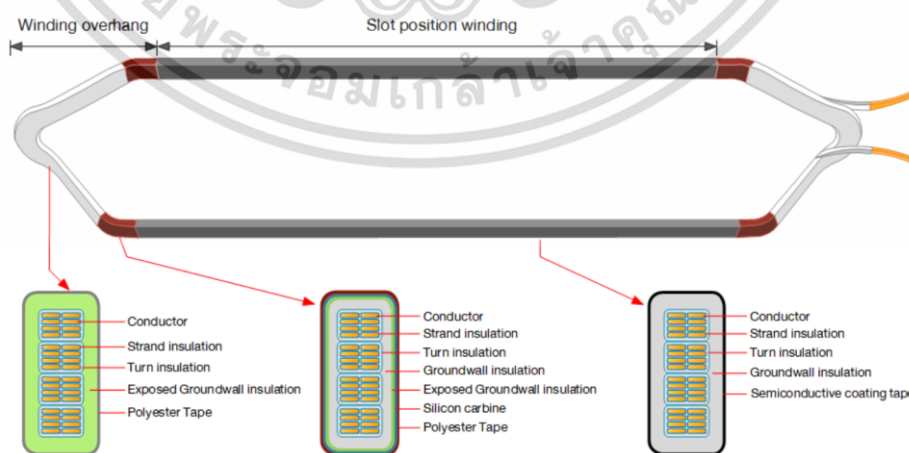
ครั้งเดียวลงในช่องสล็อตในแต่ละครั้ง ซึ่งง่ายกว่าการใส่คอยล์สองข้างใน สองช่องสล็อตพร้อมกันอย่างมาก วิธีจึงจำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าเพื่อสร้างคอยล์ที่ปลายทั้งสองของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวนชนิดโรเบลล์บาร์แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 (ก) ขดลวดสเตเตอร์แบบแบบฟอร์มวาวนชนิดโรเบลล์บาร์, (ข) โรเบลล์บาร์ [4]

2.3 คุณสมบัติของระบบฉนวนขดลวดแบบฟอร์มวาวน

ระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ประกอบด้วยส่วนประกอบและคุณสมบัติที่ต่างกักันซึ่งทำให้มั่นใจได้ว่าจะไม่เกิดไฟฟ้าลัดวงจร โดยความร้อนจากการสูญเสียของตัวนำ (I^2R) จะถูกระบายออกและตัวนำไม่สันสะเก็ดเหมือนจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า โดยรูปที่ 2.9 แสดงขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวนและส่วนหน้าตัดขวางของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวนของแต่ละตำแหน่งคอยล์ โดยปกติขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวนจะมีสองคอยล์ต่อหนึ่งสล็อตตอองค์ประกอบพื้นฐานระบบฉนวนของสเตเตอร์มีดังนี้



รูปที่ 2.9 โครงสร้างระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน [5, 6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ฉนวนสเตรนด์ (Strand Insulation)

ฉนวนสเตรนด์ใช้เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างตัวนำและป้องกันการผลกระทบที่ผิว (Skin effect) โดยฉนวนสเตรนด์จะได้รับความเสียหายระหว่างกระบวนการผลิตมากที่สุดจึงต้องมีคุณสมบัติทางกลที่ดีและเนื่องจากฉนวนสเตรนด์อยู่ติดกับตัวนำทองแดงที่นำกระแสสูง ฉนวนสเตรนด์จึงได้รับความร้อนสูงจากการสูญเสีย (I^2R) ดังนั้นฉนวนสเตรนด์จึงต้องมีคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีด้วย [7] ดังแสดงในรูปที่ 2.10

2.3.2 ฉนวนเทิร์น (Turn Insulation)

วัตถุประสงค์ของฉนวนเทิร์นในขดลวดสเตเตอร์ทั้งแบบสุมและแบบฟอร์มวาร์นคือ เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างรอบในคอยล์และเพื่อยืดอายุการใช้งานของขดลวดสเตเตอร์ โดยฉนวนเทิร์นจะได้รับความเครียดทางกลสูงสุดในกระบวนการผลิตคอยล์เนื่องจากการตัดให้โค้งงอ และมีความเครียดทางความร้อนเนื่องจากการสูญเสีย (I^2R) ในปัจจุบันผู้ผลิตสเตเตอร์จะนำฉนวน สเตรนด์ และฉนวนเทิร์นมารวมกันแล้วบ่มก่อนที่จะนำมาพันด้วยฉนวนกราว์วอลล์ [8] ซึ่งจะลดตอนการผลิตและเพิ่มพื้นที่เพื่อใส่ตัวนำทองแดงแต่ก็จะเกิดความล้มเหลวในการทำงานมากกว่า

2.3.3 ฉนวนกราว์วอลล์ (Groundwall Insulation)

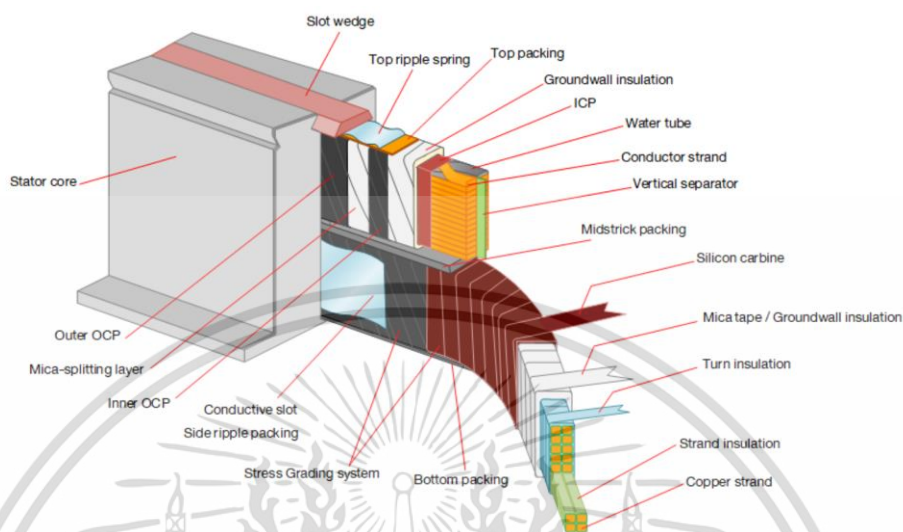
ฉนวนกราว์วอลล์เป็นส่วนประกอบที่แยกตัวนำทองแดงออกจากแกนสเตเตอร์ที่ต่อลงดินและเป็นองค์ประกอบที่ผู้ผลิตพยายามลดความหนา เพิ่มคงทนต่อการเบรคดาวน์ของฉนวนและปรับปรุงค่าการนำความร้อนเพื่อเพิ่มพื้นที่หน้าตัดของตัวนำทองแดงสำหรับพื้นที่ช่องสล็อตเดียวกัน [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.10

2.3.4 สารเคลือบเพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนกราว์วอลล์

สารเคลือบเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ ที่ใช้งานแรงดันไฟฟ้า 50 หรือ 60 Hz ที่พิกัดตั้งแต่ 6 KV ขึ้นไป และในสเตเตอร์ของมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วย IFD (Inverter-fed drives) โดยมีหน้าที่หลักคือการป้องกันไม่ให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของขดลวด, ในช่องว่างอากาศที่อาจเกิดขึ้นอยู่ในระหว่างพื้นผิวของขดลวดกับแกนสเตเตอร์ หรือที่บริเวณปลายขดลวดที่อยู่ใกล้ปลายแกนสเตเตอร์ โดยการเคลือบจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ [8]

2.3.4.1 สารเคลือบกึ่งตัวนำในร่องสล็อต เนื่องจากในกระบวนการผลิตและหุ้มฉนวนของขดลวดนี้จะทำขึ้นภายนอกร่องสล็อตก่อนจะนำไปใส่ไว้ในร่องสล็อต ทำให้ขนาดของขดลวดมีขนาดเล็กกว่าความกว้างของร่องสล็อตเล็กน้อย เพื่อให้สามารถสอดขดลวดเข้าไปในร่องสล็อตได้ เมื่อใส่ตัวขดลวดเข้าไปในร่องสล็อต จึงเกิดช่องว่างอากาศขึ้นระหว่างพื้นผิวของขดลวดและแกน สเตเตอร์ หากขดลวดในบริเวณดังกล่าวได้รับแรงดันไฟฟ้าที่สูงพอก็จะทำให้ช่องว่างอากาศที่เกิดขึ้นนี้ได้มี

ความเครียดสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงกว่า 3 kV/mm และส่งผลให้มีการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นนำไปสู่การเสื่อมสภาพและการเจาะทะลุชั้นฉนวนกราวนัวอลลิในที่สุด [7]



รูปที่ 2.10 ภาพตัดขวางของของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวในร่องสลิต [10]

2.3.4.2 สารเคลือบซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide Coating)

สารเคลือบกึ่งตัวนำนั้นจะยื่นออกมาจากปลายร่องสลิตไม่กี่เซนติเมตร และเป็นบริเวณที่สิ้นสุดการพันของสารเคลือบกึ่งตัวนำจะก่อให้เกิดขอบคมขึ้น ส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่บริเวณปลายแหลมของสารเคลือบกึ่งตัวนำมีความไม่สม่ำเสมอและมีความเครียดสูงซึ่งสามารถนำไปสู่การเกิดการดิสชาร์จบางส่วนได้ แก้ไขได้โดยนำสารเคลือบซิลิกอนคาร์ไบด์นี้มาใช้ในรูปแบบของสีหรือเทป [10] โดยพันทับเข้ามาจากรอยต่อในบริเวณปลายสารเคลือบกึ่งตัวนำนี้ 1 cm. และพันเลยออกไปด้านปลายขดลวด 10 - 20 cm. โดยคุณสมบัติของสารเคลือบซิลิกอนคาร์ไบด์นี้คือเมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น วัสดุนี้จะมีค่าความต้านทานต่ำลง เมื่อนำมาใช้ส่งผลให้ในบริเวณรอยต่อที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โดยส่วนมากแล้วจะใช้กับขดลวดสเตเตอร์ที่พิกัดแรงดัน 6.6 kV ขึ้นไป [11]

2.4 การเสื่อมสภาพของฉนวนขดลวดสเตเตอร์ (Degradation of Stator Winding Insulation)

ระบบฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนได้รับการออกแบบมาให้มีความแข็งแรงทางไฟฟ้าและทางกลในสภาวะการทำงานปกติ แต่เมื่อฉนวนได้รับความเครียดทางความร้อน ทางไฟฟ้า ทางกล และสภาพแวดล้อมที่ค่อย ๆ ลดความความแข็งแรงดังกล่าวเมื่ออายุการใช้งานของฉนวนนานขึ้น หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นผลจากการได้รับแรงดันเสิร์จในสถานะชั่วคราว เช่น แรงดันฟ้าผ่าหรือแรงดันสวิตซ์ ซึ่งอาจพัฒนาไปสู่การเบรคดาวน์ในฉนวนกราวด์วอลล์ และความผิดปกติระหว่างตัวนำกับแกนสเตเตอร์ [9]

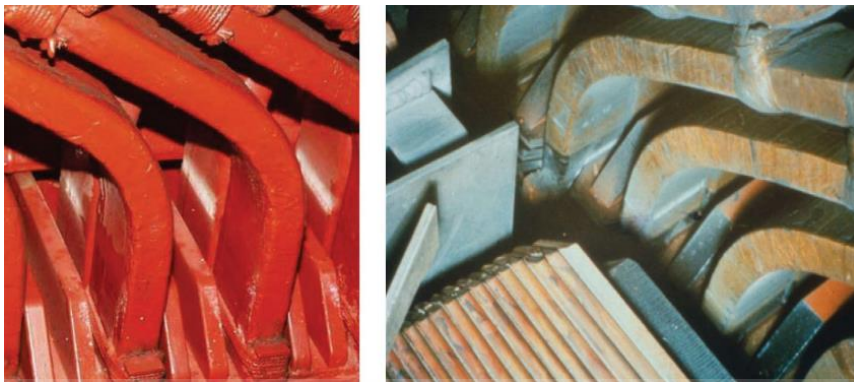
2.4.1 ทางความร้อน (Thermal): เนื่องจากฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนมีส่วนประกอบของวัสดุอินทรีย์ ดังนั้นปัจจัยด้านความร้อนจึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพ และเป็นตัวกำหนดอายุของฉนวนตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius คือ $Life(L) = A \cdot \exp(B/T)$ โดยที่ L คืออายุของฉนวน ในหน่วยชั่วโมง T คืออุณหภูมิ และ A, B คือค่าคงตัวของวัสดุฉนวน [10, 12] เช่น การเปิด-ปิดของเครื่องบ่อยครั้ง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างทันทีทันใด หรือการทำงานที่อุณหภูมิสูงเกินระดับของฉนวนเป็นเวลานาน อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือเกิดการขยายตัวของตัวนำทองแดงที่มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวสูงกว่าฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ส่งผลให้เพิ่มโอกาสเกิดความล้มเหลวขึ้นได้ [9, 13]



รูปที่ 2.11 ภาพตัดขวางของสเตเตอร์บาร์ที่ทองแดงแยกออกจากฉนวนกราวด์วอลล์ เนื่องจากวัฏจักรความร้อน [14]

2.4.2 ทางไฟฟ้า (Electrical): การเสื่อมสภาพทางไฟฟ้ามักเกิดจากการดิสชาร์จบางส่วน อันเนื่องการมีช่องว่างอากาศในฉนวนกราวด์วอลล์ที่ขึ้นระหว่างตัวนำกับแกนสเตเตอร์ [10, 15] ที่สภาวะการทำงานที่พิกัดแรงดันสูงเกิน 3 kV ขึ้นไปนั้นเพียงพอที่จะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนในช่องว่างอากาศในที่สุดก็จะเจาะทะลุผ่านฉนวนกราวด์วอลล์นำไปสู่ความล้มเหลว [9] นอกจากนี้ในบทความ [16] พบว่าขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีพิกัด 6 kV ขึ้นไปนั้นมักจะพบดิสชาร์จบางส่วนหาเครื่องทำงาน แต่วัสดุ เช่น ไมกาและใยแก้ว มีความทนทานต่อดิสชาร์จบางส่วนโดยธรรมชาติ แต่การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของดิสชาร์จบางส่วนนั้น อาจลดอายุการใช้งานของระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ได้เมื่อเวลาผ่านไป ดังแสดงในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ส่วนคาบเกี่ยวระหว่างสารกึ่งตัวนำและสารเคลือบกึ่งตัวนำเสียหายเนื่องจากดิสซาร์จบาง ส่วนบนพื้นผิวของขดลวดสเตเตอร์ [11]

2.4.3 สภาพแวดล้อม (Ambient): มอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามักเผชิญกับสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ความชื้น น้ำมัน และสิ่งสกปรก ซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาอย่างเช่น กรณีที่มีน้ำมันเข้าไปละลายวัสดุยึดประสานและนำไปสู่การพัฒนาของรอยแตกในฉนวนกราวด์หรือการที่น้ำมันรวมตัวกับสิ่งสกปรกทำให้ไปปิดกั้นระบายอากาศและอาจทำให้เกิดความร้อนสูง [8, 10]

2.4.4 ทางกล (Mechanical): ในสภาวะการทำงานปกติ ขดลวดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือมอเตอร์จะได้รับแรงทางไฟฟ้ากล (Electromechanical forces ที่เป็นสองเท่าของความถี่พลังงาน หรือประมาณ 100 – 120 Hz ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนกราวด์หรือฉนวนหาคตัวนำหลวมภายใต้สภาวะลัดวงจรที่มีแรงทางไฟฟ้ากลสูงนั้นจะนำไปสู่การแตกของส่วนปลายขดลวดสเตเตอร์ [10, 17] ซึ่งความเร็วของการเสื่อมสภาพขึ้นอยู่กับขนาดของแรงของแม่เหล็กไฟฟ้าและความหลวมของขดลวดในร่องสลิต ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ความล้มเหลวเกิดขึ้นในระหว่างใช้งานได้ทั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบไฮโดรเจนและเทอร์โบในเวลาเพียง 3 ปี [18]



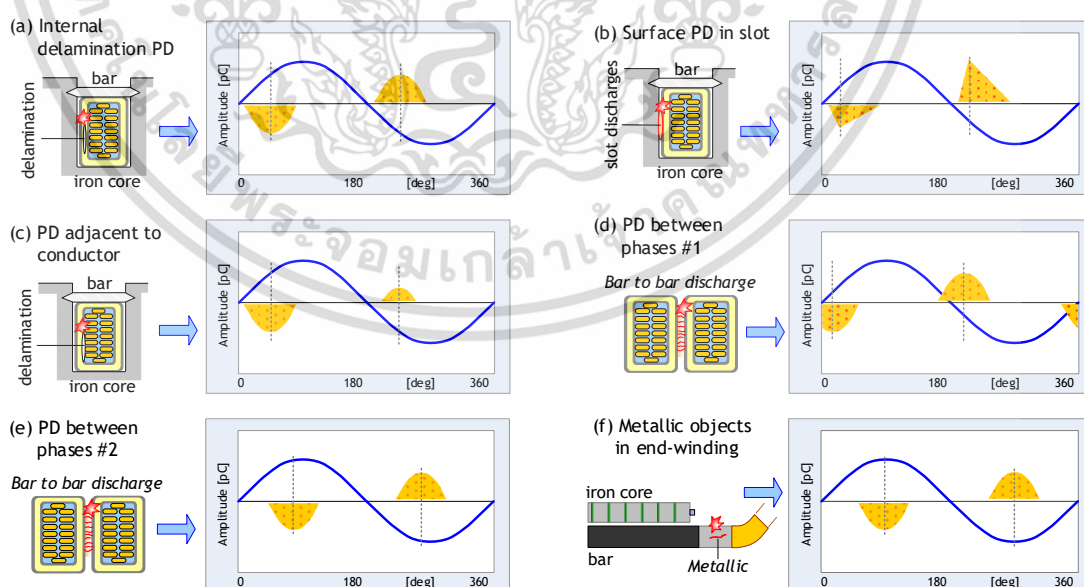
รูปที่ 2.13 บาร์ที่ถูกถอดออกจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบกังหันระบายความร้อนด้วยอากาศ ซึ่งมีปัญหาคอล์ยหลวมเกิดเป็นดิสซาร์จระหว่างร่องสลิต [18]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์

เครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้ากระแสสลับส่วนใหญ่ การดิสชาร์จเกิดขึ้นได้บ่อย ซึ่งอาจเป็นผลกระทบจากกระบวนการผลิต การใช้งาน การบำรุงรักษา เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งปริมาณ ตำแหน่ง และประเภทของการดิสชาร์จบางส่วนภายใน (Internal discharge) ขดลวดสเตเตอร์ สำหรับเครื่องจักรกลหมุนแล้วการเกิดดิสชาร์จภายในเป็นเหตุการณ์ที่เกิดอยู่ตลอดการใช้งาน และมีผลกระทบมากต่ออุปกรณ์ที่สำคัญ เพื่อลดความเสียหายและค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้อง เราควรรักษาแนวทางในการออกแบบและการบำรุงรักษาที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานและลดค่าใช้จ่ายกรณีการเกิดเบรกดาวน์ในระยะยาว [19]

ในกระบวนการใช้งานของเครื่องจักรกลหมุนทางไฟฟ้ากระแสสลับ การดิสชาร์จภายในเกิดขึ้นภายในโพรงอากาศของฉนวนกราวด์ การดิสชาร์จนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มต้นการใช้งานจนถึงสิ้นสุดอายุการใช้งานของเครื่องจักรกลหมุน ซึ่งเป็นเหตุผลที่สำคัญที่จะต้องให้ความสำคัญกับการแยกแยะระหว่างการดิสชาร์จที่พบเห็นอย่างปกติและการดิสชาร์จที่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ ซึ่งโดยธรรมชาติของระบบฉนวนในขดลวดสเตเตอร์มีความสามารถในการต้านทานต่อการเกิดดิสชาร์จบางส่วน แต่อาจมีการดิสชาร์จบางประเภทที่เกิดขึ้นเป็นการแสดงอาการ (Symptom) ที่บ่งชี้ถึงจุดบกพร่องของฉนวน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายในขณะการใช้งานได้ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะศึกษาและเข้าใจปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดดิสชาร์จเพื่อวางแผนและป้องกันการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ในอุตสาหกรรม [19, 20] โดยตามมาตรฐาน IEC 60034-27-1 ได้กล่าวถึงประเภทของดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดในระบบฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้ากระแสสลับได้ดังนี้



รูปที่ 2.14 ประเภทของดิสชาร์จบางส่วนและรูปแบบสัญญาณการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนที่พบได้ในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้ากระแสสลับ [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 ดิสชาร์จภายใน (Internal discharges)

การดิสชาร์จภายในฉนวนกราวนัวอลล์เป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดที่มักพบการดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์บ่อที่สุด การดิสชาร์จเหล่านี้เกิดขึ้นที่ช่องโพรงเล็กๆ ภายในฉนวนกราวนัวอลล์ ซึ่งเกิดขึ้นได้ตั้งแต่เริ่มต้นการใช้งานจนถึงจุดสิ้นสุดของอายุการใช้งาน โดยไม่มีการลดอายุการใช้งานที่คาดการณ์ไว้และการดิสชาร์จนี้ถือเป็นเรื่องปกติสำหรับเครื่องจักรกลหมุน จึงมีความสำคัญที่จะแยกแยะระหว่างการดิสชาร์จที่เป็นปกติแบบนี้กับการดิสชาร์จที่อาจเป็นอันตราย

2.5.1.1 โพรงอากาศภายใน (Internal voids)

ในกระบวนการผลิตปกติแล้วมักจะออกแบบเพื่อลดการเกิดโพรงภายในเนื้อฉนวนเท่าที่เป็นไปได้ แต่ยังมีโพรงภายในระบบฉนวนของไมก้าที่อิมเพิร์กเนตด้วยเรซินที่นิยมใช้ในเครื่องจักรหมุนที่มีแรงดันไฟฟ้าสูง เป็นปกติที่จะเกิดการดิสชาร์จภายในเกิดขึ้นได้ ซึ่งฉนวนไมก้าออกแบบให้มีอายุการใช้งานที่สามารถยอมรับได้ภายใต้เงื่อนไขการเสื่อมสภาพที่กำหนด

2.5.1.2 การแยกชั้นของฉนวนกราวนัวอลล์ (Internal delamination)

การแยกชั้นของฉนวนกราวนัวอลล์สาเหตุมาจากการอิมเพิร์กเนตเรซินไม่ถูกต้องหรือไม่เพียงพอระหว่างการผลิต หรือโดยการถูกกด-ขยายตัวทางกล หรือได้รับความเครียดทางความร้อนที่มากเกินไปในระหว่างการใช้งาน หรือแม้แต่การเสื่อมสภาพตามอายุของฉนวนเองด้วยระยะเวลาที่ยาวนาน ดังนั้น การแยกชั้นของฉนวนกราวนัวอลล์ของขดลวดที่ผ่านการใช้งานแล้วเป็นสัญญาณชัดเจนของการเสื่อมสภาพของฉนวน ซึ่งช่องโพรงขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นนั้นอาจทำให้เกิดการดิสชาร์จของพลังงานที่สูงส่งต่อการเสื่อมสภาพที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะค่าการนำความร้อนของฉนวนจะลดลงซึ่งอาจเร่งไปสู่การเสื่อมสภาพ

2.5.1.3 การแยกชั้นของฉนวนกราวนัวอลล์กับตัวนำหุ้มฉนวน (Debonding between insulated conductor and groundwall insulation)

การแยกชั้นของฉนวนกราวนัวอลล์กับตัวนำหุ้มฉนวน (Debonding) เกิดเป็นโพรงอากาศขึ้นระหว่างตัวนำและวัสดุฉนวน การดิสชาร์จจะเกิดขึ้นในโพรงอากาศภายในตามแนวยาว ซึ่งภายในจะมีอากาศหรือ ก๊าซ ผังตัวอยู่ระหว่างฉนวนกราวนัวอลล์และตัวนำหุ้มฉนวน โดยจะทำให้เกิดความร้อนหรือแรงทางกลที่สูงซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้จะนำไปสู่การแยกตัวระหว่างชั้นเป็นบริเวณกว้างมากยิ่งขึ้น

2.5.2 ดิสชาร์จระหว่างร่องสล็อต (Slot discharges)

ดิสชาร์จระหว่างร่องสล็อตของเครื่องจักรหมุนที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงอาจเกิดขึ้นเมื่อวัสดุสารเคลือบกึ่งตัวนำถูกทำลาย อาจเกิดจากเหตุการณ์ที่มีจุดหนึ่งจุดในมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงหรือการเคลื่อนไหวของบาร์/คอยล์ในร่องสล็อตหรือบาร์ที่อยู่นอกร่องสล็อต ซึ่งได้รับอิทธิพลจากการหลวมตัวของลิมที่กดบาร์ไว้ การกัดกร่อน หรือการขัดสีของวัสดุฉนวน การกัดกร่อนทางเคมี หรือข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต ส่งผลให้บาร์/คอยล์ที่เกิดการสั่นภายในร่องสล็อตขณะใช้งาน เกิดช่องว่างระหว่างหน้าสัมผัสของสารเคลือบกึ่งตัวนำและแกนเหล็กสเตเตอร์ มีความต้านทานที่ไม่สม่ำเสมอในบางบริเวณตามแนวของบาร์ เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการดิสชาร์จบางส่วนในบริเวณนั้น ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพที่ผิวของฉนวนถูกกัดกร่อน และมีประสิทธิภาพในการควบคุมสนามไฟฟ้าลดลงจนส่งผลให้เป็นจุดอ่อนของระบบฉนวนได้

2.5.3 ดิสชาร์จระหว่างช่องว่างของปลายขดลวดและพื้นผิวขดลวด (End-winding gap and surface discharges)

ดิสชาร์จระหว่างช่องว่างของปลายขดลวดและพื้นผิวขดลวดหรือระหว่างเฟส เนื่องจากสาเหตุหลายประการ ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบหรือผลิตที่มีระยะเคลียร์แรนซ์ (Clearance) ระหว่างส่วนที่มีความต่างศักย์ที่ไม่เหมาะสมเพียงพอ การออกแบบหรือการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์รองรับที่ส่วนที่ไม่ได้อยู่ในร่องสล็อต (Overhang support system) ส่งผลให้มีเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น หรือเนื่องจากการดิสชาร์จระหว่างเฟสที่เปรียบเทียบกับกราวนด์บนผิวของปลายขดลวด (End-winding surface)

2.5.4 การดิสชาร์จจากวัสดุตัวนำภายนอก (Foreign conductive materials discharges)

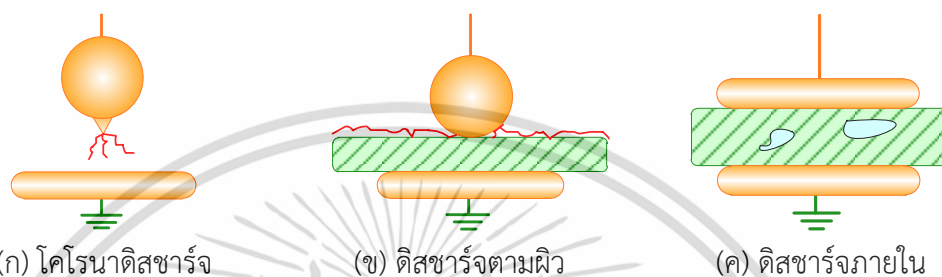
ความเสียหายบางตำแหน่งของระบบฉนวนอาจเกิดขึ้นเนื่องจากมีวัสดุนำไฟฟ้าปนเปื้อนในส่วนหนึ่งของขดลวดสเตเตอร์ ซึ่งอาจทำให้เกิดการรวมตัวของดิสชาร์จบางส่วนที่เข้มข้นในตำแหน่งดังกล่าว เป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายของฉนวนได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อนุภาคเหล็กขนาดใหญ่ เช่น สลักเกลียวหรือสกรูที่แตก หรืออุปกรณ์ที่ถูกลิมไว้ นอกจากจะเกิดดิสชาร์จบางส่วนแล้ว ยังส่งผลให้เกิดการเบรกดาว์ของอุปกรณ์ได้อย่างทันทีทันใด

2.6 การทดสอบดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Testing)

2.6.1 การดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิสชาร์จบางส่วนเป็นปรากฏการณ์เบรกดาวน์ที่เกิดซ้ำไปซ้ำมาหลายพันครั้งต่อวินาที แต่เกิดขึ้น ในบางส่วนของฉนวนเท่านั้น ฉนวนทั้งหมดจึงยังทนแรงดันของระบบได้และทำงานได้โดยปกติ อย่างไรก็ตาม ดิสชาร์จบางส่วนอาจทำให้เกิดรบกวนสัญญาณวิทยุหรือทำลายฉนวนที่ละเอียดอ่อนๆ เสมอ ดิสชาร์จบางส่วนจึงแบ่งตามลักษณะของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเป็น 3 ประเภท [22] ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ประเภทของดิสชาร์จบางส่วนที่แบ่งตามลักษณะของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น [21]

2.6.1.1 โคโรนาดิสชาร์จ (Corona Discharge)

โคโรนาเป็นดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงเกินค่าแรงดันเบรกดาวน์ของฉนวนที่คืนสภาพเองได้ เช่น อากาศ หรือ SF₆ ดังนั้นแม้ว่าโมเลกุลของก๊าซจะเปลี่ยนไป แต่ในที่สุดก็จะคืนสภาพเดิมจึงไม่มีผลต่อความคงทนแรงดันไฟฟ้าของก๊าซ อย่างไรก็ตามการเกิด ไอออนในก๊าซจะทำให้มีประจุเคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้า จึงเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปรบกวนสัญญาณวิทยุ ดังนั้นจึงวัดผลกระทบด้วยความแรงของสัญญาณรบกวนในหน่วย V หรือ dBmV ($\text{dBmV} = 10 \log[\text{mV}/(1 \text{ mV})]$) นอกจากนั้นยังทำให้เกิด กำลังสูญเสียโคโรนา (corona loss) ซึ่งเป็นปัญหาหลักของตัวนำ หรือสายส่งไฟฟ้า [22, 23]

2.6.1.2 ดิสชาร์จตามผิว (Surface Discharge)

ดิสชาร์จตามผิวเกิดที่จุดสามประสานทำให้เกิดโคโรนาในก๊าซหรือฉนวนเหลวที่ล้อมรอบฉนวนแข็ง ผิวของฉนวนแข็งที่ทำจากสารออร์แกนิกจึงเสียหายเนื่องจากความร้อนและเกิดรอยไหม้ที่ผิวที่ยาวมากขึ้นๆ จนเกิดวาบไฟตามผิวในที่สุด ดังนั้นจึงวัดผลกระทบด้วยความแรงของสัญญาณ รบกวนในหน่วย mV เช่นเดียวกับโคโรนา หรือตำแหน่งปลายของขดลวดที่ยื่นออกจากสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่าย เพราะอาจสัมผัสสิ่งเปราะเปรี๊นได้ง่าย [22, 23]

2.6.1.3 ดิสชาร์จภายใน (Internal Discharge)

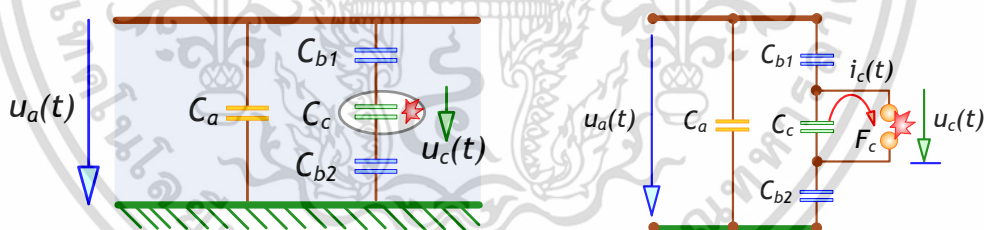
ดิสชาร์จภายในเกิดขึ้นเพราะมีสารแปลกปลอมภายในฉนวนหลัก (สารแปลกปลอมมีค่าเปอร์มิตติวิตีไม่เท่ากับฉนวนหลัก) ซึ่งอาจเป็น ฟองอากาศหรือสุญญากาศ, เศษโลหะหรือเศษฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในฉนวนแข็งและเหลว การดิสชาร์จทุกกรณีจะทำลายฉนวนหลักเพราะเมื่อเกิดไอออน อิเล็กตรอน และไอออนต่างๆ จะเปลี่ยนพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าไปเป็นพลังงานจลน์ เมื่อไปชนฉนวนหลัก พลังงานจลน์ ดังกล่าวจะแปรไปเป็นความร้อนที่ทำลายฉนวนที่ละน้อยๆ ความหนาของฉนวนหลักจึงลดลงจนท้ายที่สุดก็เกิดเบรกดาวน [22, 23]

2.6.2 วงจรสมมูลและกระแสพัลส์เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วน

เนื่องจากดิสชาร์จบางส่วนภายในที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน หรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา เพื่อให้สามารถตรวจจับหรือทำการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียน วงจรสมมูลของฉนวนที่มีดิสชาร์จบางส่วนขึ้น เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนภายใน [23] ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่ 2.16 (ก) แสดงวัสดุฉนวนที่มีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด โพรงอากาศจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ C_{b1} เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_{b2} ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้ จะรวมกันได้เป็น C_b ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ที่อยู่โดยรอบของ C_c จะให้ ค่าเป็น C_a ดังรูปที่ 2.16 (ข) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมี ค่าโดยประมาณเท่า ๆ กับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มากๆ นั่นคือ $C_t \approx C_a \gg C_c > C_b$



(ก) วัสดุฉนวนที่มีการดิสชาร์จในโพรงอากาศ

(ข) วงจรสมมูลแบบคาปาซิทีฟ

รูปที่ 2.16 โครงสร้างของระบบฉนวนที่มีโพรงอากาศอยู่ภายใน [21, 24]

ถ้าป้อนแรงดัน U_t ที่ขั้วอิเล็กโทรด ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาวนของโพรงอากาศซึ่งแทนด้วย C_c ก็จะเกิดการเบรกดาวนในโพรงอากาศ ซึ่งเขียนแทนด้วยแกป F_c (แล้วปลดแรงดันออก) จะมีความต้านทาน R ค่าหนึ่งต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสพัลส์ดิสชาร์จ $i_c(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ช่วงกว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก $U_c(t)$ ที่โพรงอากาศเกิดการดิสชาร์จ ซึ่งจะเกิดประจุขึ้นในโพรงอากาศ Δq_1 ดังสมการที่ 1

$$\Delta q_1 = \delta U_c(t) C_c \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ กระแส $i_c(t)$ นี้ไหลอยู่ภายในที่ไม่สามารถวัดได้ แต่การดิสชาร์จของ C_c ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ C_b และ C_a ในวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วเท่ากับ $\delta U_c(t)$ ซึ่งหาได้จากประจุใน C_c ดังสมการที่ 2

$$\delta U_i(t) = \frac{C_b \delta U_c(t)}{C_b + C_a} \quad (2)$$

ค่าแรงดันตกคร่อมนี้ไม่ให้ข้อมูลอะไรเกี่ยวกับ Δq_1 แต่เป็นสัดส่วนกับ $C_b \delta U_c(t)$ ค่า $\delta U_c(t)$ นี้วัดได้เป็นพัลส์รูปขั้น ซึ่งขึ้นอยู่กับ $i_c(t)$

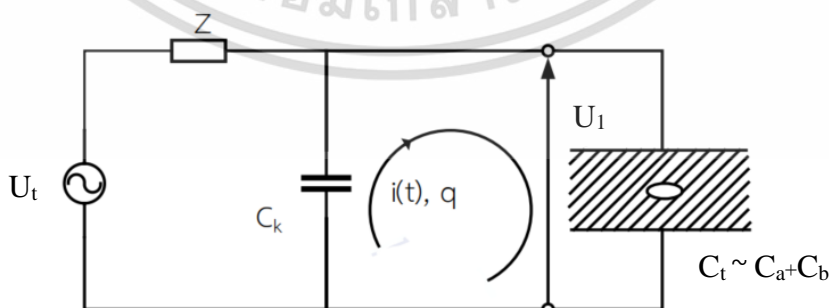
เมื่อแทนค่า
$$\delta U_c(t) = \frac{\Delta q_1}{C_c}$$

จะได้
$$\delta U_i(t) = \frac{C_b \Delta q_1}{C_c (C_b + C_a)} \quad (3)$$

ค่าของ $\delta U_i(t)$ มีค่าเพียงเป็นมิลลิโวลต์ถึงโวลต์ ในขณะที่ $\delta U_c(t)$ มีค่าเป็นกิโลโวลต์ แต่โดยที่ไม่ทราบค่า C_c และ C_b จึงไม่อาจหาความสัมพันธ์ของ $\delta U_i(t)$ กับ $\delta U_c(t)$ และ Δq_1 ได้ อย่างไรก็ตาม การดิสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทประจุหรือกระแสในวงจรภายนอกที่สามารถตรวจวัดได้

2.6.3 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้

จากที่กล่าวมา การดิสชาร์จบางส่วนภายในเกิดขึ้นภายในฉนวนหรือภายในอุปกรณ์ที่หุ้มห่อมิดชิด ดังนั้นประจุหรือกระแสที่เกิดจากการดิสชาร์จในโพรงก๊าซนั้นไม่สามารถวัดได้ แต่การดิสชาร์จในโพรงก๊าซ C_c นั้น มีผลให้เกิดการถ่ายเทประจุเป็นผลให้เกิดแรงดันตก $\delta U_i(t)$ ที่ขั้วป้อนแรงดันภายนอก และการเคลื่อนที่ของประจุ หรือเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องจากแรงดันตก เป็นค่ากระแสชดเชยที่วัดได้ (Measurable current, $i(t)$) ดังรูปที่ 2.17 แต่ไม่ใช่กระแสหรือประจุที่เกิดขึ้นจริงภายในโพรงก๊าซ [23]



รูปที่ 2.17 วงจรการดิสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน

เมื่อ U_i คือ ตัวจ่ายแรงดันป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุทดสอบ C_t เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว
 C_t คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบประกอบด้วย C_a , C_b และ C_c
 $i(t)$ คือ กระแสพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนที่ถ่ายเทระหว่าง C_k กับ C_t เพื่อชดเชยแรงดันตก

ค่ากระแสไหลวน $i(t)$ ที่วัดได้นี้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนค่าเก็บประจุ C_k/C_t เพราะประจุจะเคลื่อนที่จากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ที่ชดเชยแรงดันตก $\delta U_t(t)$ (คร่อม $c_t \sim c_a + c_b$ ในกรณีอุดมคติ $C_k \gg C_t$ และ $c_t \sim c_a + c_b$ ประจุ q จะมีค่ามากที่สุด ค่า $C_k \gg C_t$ ค่า $\delta U_t(t)$ จะถูกชดเชยสมบูรณ์ และประจุที่ถ่ายเทคือ กระแส $i(t)$ ซึ่งหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [21, 23]

$$q = \int i(t) dt = \left(C_a + \frac{C_c C_b}{C_c + C_b} \right) \delta U_t \quad (4)$$

เนื่องจาก $C_b < C_c$ จะได้ว่า

$$q = (C_a + C_b) \delta U_t \quad (5)$$

แทนสมการ (4) ในสมการที่ (3) จะได้ว่า

$$q = \left(\frac{C_b}{C_c} \right) \delta q_1 \quad (6)$$

ประจุ q นี้ เรียกว่า ประจุที่ปรากฏของพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน (Appearance charge) ซึ่งไม่เท่ากับ ประจุที่เกิดจริงในโพรงก๊าซ C_c แต่สัมพันธ์กับ δq_1 ด้วยอัตราส่วนของ C_b/C_c และเป็นพื้นฐานของการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่มีความเป็นจริงมากกว่า δU_t ในสมการ (2) โดยที่ C_a เป็นค่าเก็บประจุหลักของ C_t ซึ่งไม่มีผลเกี่ยวกับค่าดิสชาร์จบางส่วน

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทประจุระหว่าง C_k กับ C_t จะได้ว่า

$$q = C_t \cdot \delta U_t \quad \text{โดยที่ } c_t \sim c_a + c_b \quad (7)$$

จะได้

$$q = (C_t + C_k) \delta U_t' \quad (8)$$

เมื่อ $\delta U_t'$ คือ แรงดันที่ชั่ว หลังจากสิ้นสุดการถ่ายเทประจุ โดยที่ประจุจากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ที่สามารถวัดได้ เรียกว่า ประจุที่วัดได้ q_m (Measurable charge)

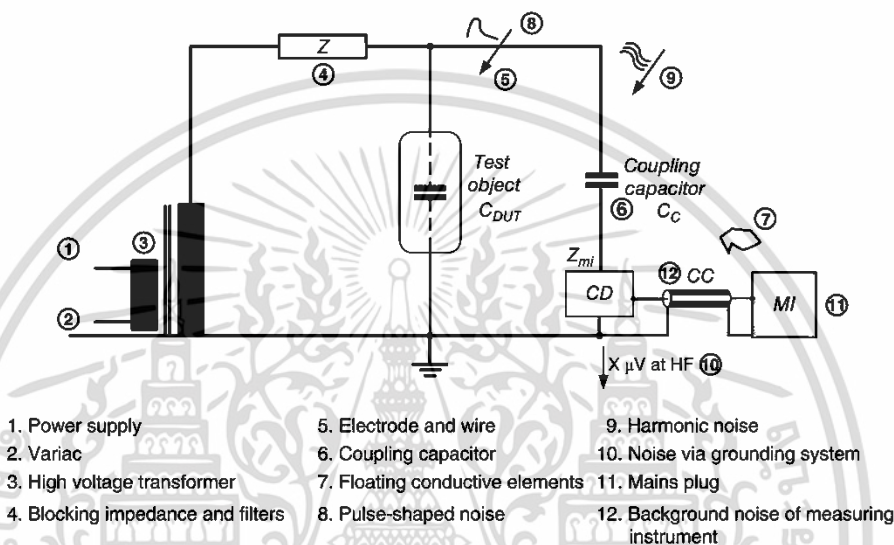
$$q_m = C_k \delta U_t' \quad (9)$$

ดังนั้น อัตราส่วนของประจุที่วัดได้ต่อประจุปรากฏ คือ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{(C_t + C_k)} \quad (10)$$

2.6.4 วงจรการทดสอบและระบบวัดดิสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานการทดสอบและการวัดดิสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐาน IEC60270 โดยได้รับอิทธิพลจากสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่สามารถเหนี่ยวนำมายังวงจรทดสอบได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนและอุปกรณ์ในวงจรทดสอบ [21]

อุปกรณ์หลักในวงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

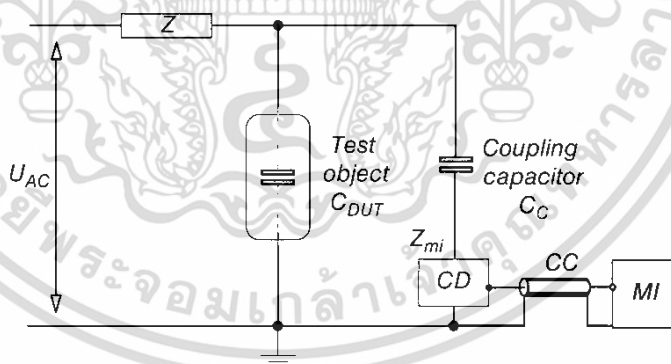
- 1) Power supply คือแหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับที่ใช้ในการป้อนแรงดันให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและ วัตถุทดสอบ
- 2) Z คือ ตัวกรองความถี่ ซึ่งจะมีคุณสมบัติแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันไม่ให้เข้าไปรบกวนวงจร ทดสอบ โดยยอมให้กระแสทดสอบที่ความถี่ต่ำผ่านไปได้ หน้าที่อีกอย่างก็คือ ป้องกัน สัญญาณพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนจากวัตถุทดสอบไหลออกจากลูปของวงจรวัด
- 3) C_{DUT} คือ วัตถุทดสอบ โดยมีค่าความจุไฟฟ้าค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นภาระ (Load) ส่วนหนึ่งของวงจร
- 4) C_c คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวในวงจรทดสอบมักมีค่าความจุไฟฟ้าสูงกว่าความจุทดสอบเป็นบางครั้ง โดยทั่วไปมักใช้ตัวเก็บประจุที่มีความจุประมาณ 1 nF เพื่อชดเชยประจุหรือกระแสให้กับวัตถุทดสอบในขณะที่มีการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น ตัวเก็บประจุนี้มักมีบทบาทสำคัญในการรักษาความสมดุลในวงจรทดสอบและป้องกันการเสียหายของอุปกรณ์ในวงจร อย่างไรก็ตาม จำเป็นต้องให้ความสำคัญกับคุณสมบัติของตัวเก็บประจุที่ไม่มีกริดดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นภายในตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวด้วย เพื่อประสิทธิภาพในการทดสอบที่เหมาะสมและป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นในวงจรทดสอบ

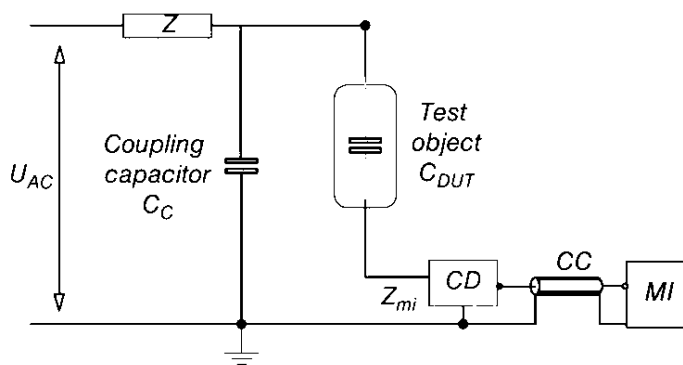
- 5) CD คือ อุปกรณ์คัปปลิ่ง (Coupling device) ทำหน้าที่วัดพัลส์กระแสที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วน
- 6) CC คือ สายโคแอกเชียลเคเบิล (Coaxial cable) เป็นสายเคเบิลที่ใช้ส่งสัญญาณจากอุปกรณ์คัปปลิ่งในวงจรทดสอบไปยังระบบวัด แต่ในปัจจุบันมีการใช้งานสายใยแก้วนำแสง (Fiber optic) ซึ่งสามารถส่งสัญญาณได้ในระยะที่ไกลกว่าและมีการลดทอนของสัญญาณที่น้อยกว่ามาก เพื่อป้องกันอุปกรณ์วัดไม่เกิดความเสียหายในกรณีที่วัตถุทดสอบเกิดการเบรคดาวนในขณะทดสอบ แต่ต้องใช้อุปกรณ์แปลงระหว่างสัญญาณทั้งทางไฟฟ้าและแสงให้สอดคล้องกัน
- 7) MI คือ เครื่องมือวัด (Measuring instrument) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดและแสดงผล อาจเป็นออสซิลอโคปหรือเครื่องวิเคราะห์การดิสชาร์จบางส่วนที่สามารถประมวลผลสัญญาณและแสดงผลในหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้

วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วน สามารถเลือกต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งในวงจรทดสอบได้หลักๆ สามรูปแบบ คือ ต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว, ต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับวัสดุทดสอบ และการต่อแบบแบบบริดจ์อิมพีแดนซ์หรือวงจรแบบแยกขั้ว [21, 24] ดังแสดงในรูปที่ 2.19 – 2.21

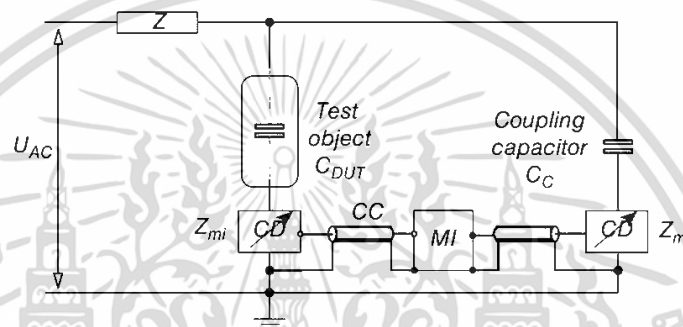


รูปที่ 2.19 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับวัสดุทดสอบ [21]



รูปที่ 2.21 วงจรทดสอบสำหรับการวัดแบบบริดจ์อิมพีแดนซ์ [21]

การต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวนั้นมีข้อดีคือสามารถป้องกันอุปกรณ์ภาคแรงต่ำในกรณีที่เกิดเบรกดาวน์ขณะทดสอบได้ และวัสดุทดสอบไม่จำเป็นต้องปลดการต่อลงดินของอุปกรณ์ อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบความไวของระบบวัดแล้ว การต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวนั้นมีความไวน้อยกว่าการวัดโดยต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับวัสดุทดสอบ ซึ่งเป็นการวัดกระแสผ่านวัสดุทดสอบ ดังรูปที่ 2.20 แต่การต่อวงจรทดสอบลักษณะนี้ได้รับความนิยมน้อยกว่าต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว เนื่องจากมีความเสี่ยงที่อุปกรณ์ภาคแรงต่ำจะได้รับความเสียหายขณะทดสอบและจำเป็นต้องปลดการต่อลงดินของอุปกรณ์ ทั้งนี้ การต่อวงจรแบบบริดจ์อิมพีแดนซ์ มีความไวของระบบวัดที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการต่ออีกสองแบบ แต่ยังมีความเสี่ยงด้านความปลอดภัยเช่นเดียวกัน

2.6.5 การเปรียบเทียบระบบวัดดิสชาร์จบางส่วน

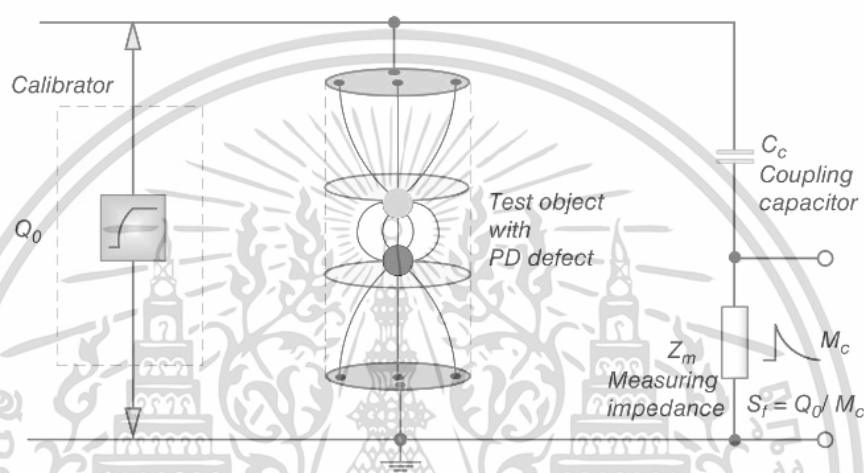
การเปรียบเทียบระบบวัดในวงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบวัดในการวัดขนาดของดิสชาร์จบางส่วนที่ต้องการ โดยการเปรียบเทียบระบบวัดจะช่วยให้หาค่าสเกลแฟคเตอร์ (Scale factor, S_f) เพื่อให้การวัดค่าประจุปรากฏ (Apparent charge, q_a) เป็นไปอย่างถูกต้อง เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ (C_{DUT}) มีผลต่อคุณลักษณะของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ซึ่งในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบวัด จึงจำเป็นต้องทำการปรับเทียบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงวัสดุทดสอบ ยกเว้นการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ ไม่เกิน 10% ของค่าเฉลี่ย

การปรับเทียบระบบวัดจะดำเนินการโดยการฉีดพัลส์แรงดันสแต็ป U_0 ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุ C_0 ที่มีช่วงเวลาสั้นๆ ไปยังตัวชี้ของวัสดุทดสอบ ดังรูปที่ 2.22 นั้นแสดงให้เห็นลักษณะของกระแสที่ถูกฉีดเข้าไปในวงจรทดสอบ

$$q_0 = U_0 C_0 \quad (11)$$



รูปที่ 2.22 วงจรสมมูลสำหรับการสอบเทียบระบบวัดดิสชาร์จบางส่วน [21]

การหาสเกลแฟกเตอร์ (S_f) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าของประจุที่ปรากฏ (q_a) และค่าอ่านได้จากเครื่องมือวัด (M_c) เพื่อนำไปหาสเกลแฟกเตอร์ (S_f) คำนวณจากสิ่งนี้เป็น:

$$S_f = \frac{q_0}{M_c} \quad (12)$$

สำหรับการทดสอบ PD ในทางปฏิบัติ การหาประจุปรากฏ (q_a) เกิดจากค่าพัลส์ที่วัดได้จะถูกระบุโดยเครื่องมือวัด (M_p) คูณด้วยด้วยค่าสเกลแฟกเตอร์ (S_f)

$$q_a = S_f \times M_p \quad (12)$$


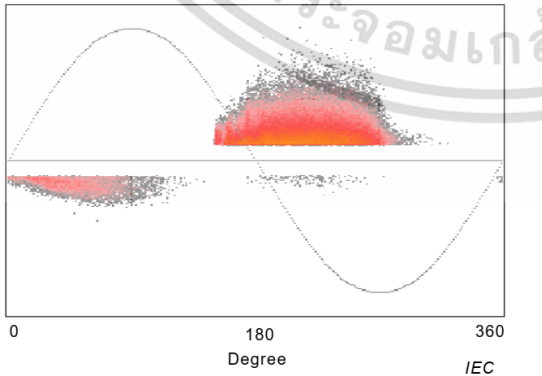
การปรับเทียบวงจรทดสอบจึงต้องดำเนินการในวัสดุทดสอบที่ไม่มีการจ่ายไฟ สำหรับตัวเก็บประจุในการปรับเทียบ C_0 ควรมีค่าความจุมากกว่าค่าความจุของวัสดุทดสอบ 10 เท่า หลังจากการปรับเทียบ เครื่องปรับเทียบจะต้องถูกนำออกจากวงจรทดสอบก่อนที่จะทำการเริ่มการทดสอบ

2.7 การแปลผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์

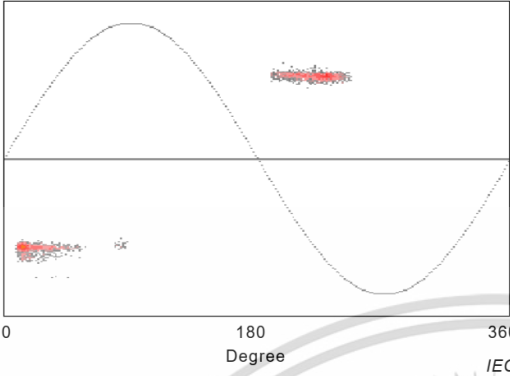

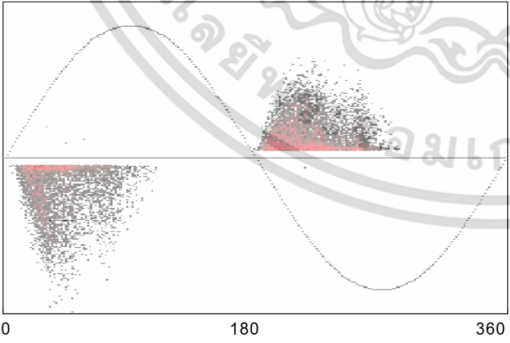
จากการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวงจรการทดสอบที่ได้กล่าวมาข้างต้น ภายในสภาพแวดล้อมที่สามารถควบคุมเงื่อนไขต่างๆ ได้ในห้องปฏิบัติการ ทำให้ได้รูปแบบของ Phase Resolved PD (PRPD) โดยจะแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ของมุมเฟสของแรงดันทดสอบกับขนาดของประจุดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งจะสามารถบันทึกพัลส์หรือประจุที่เกิดขึ้นซ้ำๆ ณ ตำแหน่งมุมเฟสต่างๆ เกิดเป็นรูปร่างเฉพาะตัว ที่สามารถบ่งชี้ถึงลักษณะแหล่งกำเนิดของดิสชาร์จบางส่วนแต่ละประเภท

ตามมาตรฐาน IEC60034-27-1 ได้กำหนดรูปแบบ PRPD ไว้จำนวน 7 ลักษณะ ซึ่งสามารถระบุประเภทของแหล่งกำเนิดดิสชาร์จบางส่วนภายในเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้าได้ โดยการใช้อุปกรณ์คัปปลิ่งต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว ดังแสดงในตารางที่ 2.1

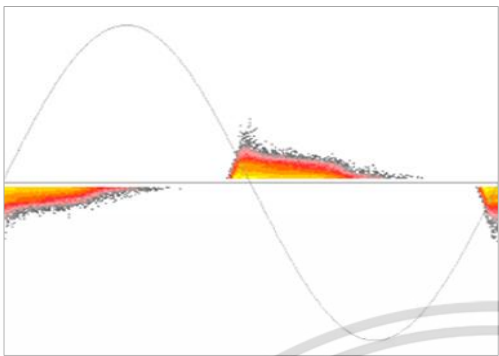
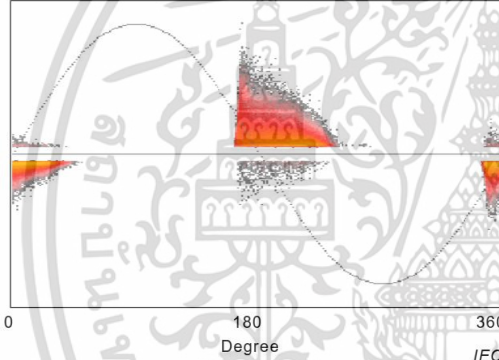
ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของรูปแบบ PRPD ของเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEC60034-27-1 [20, 25]

Phase Resolved PD (PRPD) patterns	PD source
	<p>1. Surface tracking Discharge การดิสชาร์จบริเวณพื้นผิว/การเกิดรอยตามแนวแนวส่วนที่ยื่นของขดลวด (Overhang) เนื่องจากการปนเปื้อนที่ส่วนต่อประสานของอากาศ/ฉนวน เช่น คาร์บอน, น้ำมัน, ฝุ่น หรือการเสียดสีบริเวณผิว อิทธิต่อการเสื่อมสภาพ : ระดับปานกลาง</p>
	<p>2. End-winding corona การดิสชาร์จที่จุดเชื่อมต่อของสารเคลือบกึ่งตัวนำกับสารเคลือบควบคุมความเครียดเนื่องจากคุณสมบัติของส่วนต่อประสานระหว่างวัสดุที่แตกต่างกันไม่เพียงพอ อิทธิต่อการเสื่อมสภาพ : ระดับปานกลาง</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phase Resolved PD (PRPD) patterns	PD source
 <p data-bbox="304 680 815 734">0 180 360 Degree IEC</p>	<p data-bbox="871 277 1310 309">3. End-winding phase discharge</p> <p data-bbox="871 331 1374 757">การดีสชาร์จในช่องว่างอากาศระหว่างบาร์ในส่วนที่ยื่นของขดลวด หรือระหว่างบาร์กับโครงกดยึดแกนเหล็ก (Press finger) ซึ่งส่วนมากแล้วเกิดจากปัจจัยภายนอกซึ่งไม่ถือว่าเป็นสาเหตุหลักสำหรับการเสื่อมสภาพของระบบฉนวน เว้นแต่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีไอโซนปริมาณมาก ซึ่งจะเป็นตัวเร่งการเสื่อมสภาพให้เร็วยิ่งขึ้น</p> <p data-bbox="871 779 1342 810">อิทธิต่อการเสื่อมสภาพ : ระดับปานกลาง</p>
 <p data-bbox="304 1196 815 1249">0 180 360 Degree IEC</p>	<p data-bbox="871 913 1238 945">4. Internal void discharges</p> <p data-bbox="871 967 1374 1169">การดีสชาร์จจากภายในโพรงอากาศซึ่งอยู่ภายในของฉนวนกราวนัวล์ ซึ่งเกิดขึ้นได้จากกระบวนการผลิต ซึ่งไม่ถือว่าเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพตามอายุของฉนวน</p> <p data-bbox="871 1191 1262 1223">อิทธิต่อการเสื่อมสภาพ : ระดับต่ำ</p>
 <p data-bbox="304 1677 815 1731">0 180 360 Degree IEC</p>	<p data-bbox="871 1377 1214 1408">5. Debonding discharges</p> <p data-bbox="871 1431 1374 1632">การดีสชาร์จการแยกชั้นระหว่างฉนวนกราวนัวล์และตัวนำทองแดง เกิดเป็นช่องว่างอากาศเกิดขึ้น เป็นผลมาจากได้รับความร้อนสูงเป็นเวลานาน เกิดการแยกชั้นขนาดใหญ่</p> <p data-bbox="871 1655 1310 1686">อิทธิต่อการเสื่อมสภาพ : ระดับรุนแรง</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Phase Resolved PD (PRPD) patterns	PD source
	<p>6. Internal delamination discharges การดีสชาร์จภายในช่องว่างอากาศที่เกิดจากการแยกชั้นของฉนวนกราวนัวอลล์ ซึ่งเป็นผลมาจากได้รับความร้อนสูงเกิน เกิดการแยกชั้นซึ่งรูปแบบ PRPD จะคล้ายกับการดีสชาร์จในโพรงอากาศภายใน แต่ขนาดของประจุมากกว่า และมีความสมมาตรคล้ายสามเหลี่ยม</p> <p>อิทธิต่อการเสื่อมสภาพ : ระดับรุนแรง</p>
	<p>7. Slot discharges การดีสชาร์จที่สล็อตในช่องว่างอากาศระหว่างแกนเหล็กสเตเตอร์และบริเวณด้านข้างของสเตเตอร์บาร์ เนื่องจากการหลวมของบาร์ในสล็อต จนเกิดความต้านทานที่สูงในบางจุดระหว่างสารเคลือบกึ่งตัวนำกับแกนเหล็ก หรือจากการสั่นสะเทือนระหว่างการใช้งาน</p> <p>อิทธิต่อการเสื่อมสภาพ : ระดับรุนแรง</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การศึกษาพฤติกรรมดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวน ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง

3.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาพฤติกรรมดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงดันสูง โดยแบ่งลักษณะการทดสอบวัตดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาล์ว ในเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้าแรงสูง โดยเลือกที่จะศึกษาพฤติกรรมของดิสชาร์จบางส่วนตั้งแต่ขดลวดถูกผลิตจากโรงงานด้วยวิธีเรซินริช ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ขนาดพิกัดแรงดัน 11 kV พิกัดกำลัง 50 kW นอกจากนี้ การดิสชาร์จบางส่วนมีรูปแบบและสาเหตุที่หลากหลาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้มีศึกษาและทดลองวัตดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ โดยใช้ขดลวดสเตเตอร์ตัวอย่างของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานน้ำ ขนาดพิกัดแรงดัน 13.8 kV พิกัดกำลัง 111 kW ซึ่งเคยติดตั้งใช้งาน ณ เขื่อนศรีนครินทร์ เพื่อใช้จำลองปัญหาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในรูปแบบต่างๆ ที่มีโอกาสเกิดขึ้นในระหว่างการใช้งานจริงของเครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้าแรงสูงที่มีขนาดพิกัดแรงดันตั้งแต่ 6 kV ขึ้นไป ซึ่งโดยส่วนใหญ่โครงสร้างฉนวนของขดลวดสเตเตอร์จะเป็นแบบฟอร์มวาล์วและโรเบลบาร์ กล่าวได้ว่าขดลวดตัวอย่างที่นำมาศึกษานี้เป็นตัวแทนของฉนวนขดลวดสเตเตอร์เครื่องจักรกลหมุนไฟฟ้าแรงสูง

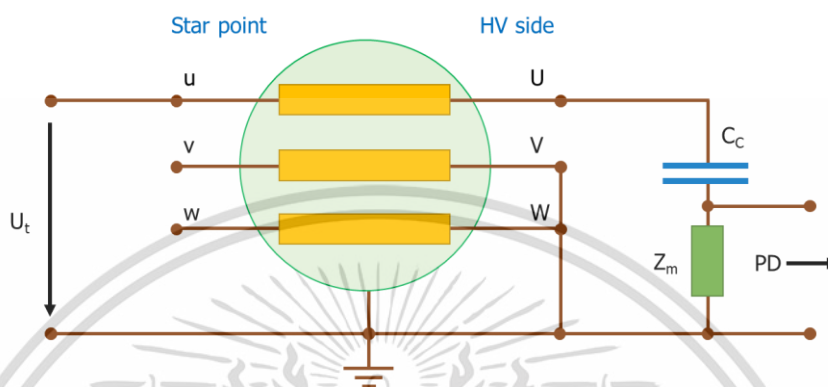
เมื่อมีฐานข้อมูลจากการทดลองโดยการจำลองปัญหาดิสชาร์จบางส่วนในรูปแบบต่างๆ จากห้องปฏิบัติการแล้ว จำเป็นต้องสามารถประยุกต์ใช้งานกับการทดสอบภาคสนามซึ่งมีปัจจัยที่ไม่อาจควบคุมได้ที่หลากหลายต่างจากห้องปฏิบัติการ การวิเคราะห์การแปลผลการทดสอบย่อมมีความแตกต่างกัน ซึ่งส่วนหนึ่งของบทนี้จะได้กล่าวถึงผลการทดสอบวัตดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ในภาคสนาม และการประยุกต์ใช้การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนเพื่อการซ่อมบำรุงรักษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนขนาดใหญ่ในอุตสาหกรรมผลิตพลังงานไฟฟ้าแบบความร้อนร่วม และแบบถ่านหินในพื้นที่จังหวัดระยอง ของประเทศไทย

เนื่องจากความแตกต่างในด้านปัจจัย สภาพแวดล้อม อุปสรรคของการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างห้องปฏิบัติการและภาคสนาม ซึ่งจากประสบการณ์ยังคงมีความคลุมเครือและข้อจำกัดในการทดสอบ การวิเคราะห์และแปลความหมายผลการทดสอบ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการตัดสินใจหยุดเดินระบบเพื่อนำเครื่องจักรเข้าสู่กระบวนการซ่อมบำรุงหรือการวิเคราะห์สาเหตุของความผิดปกติเพื่อให้สามารถแก้ไขและป้องกันก่อนที่เครื่องจักรเกิดการล้มเหลว ด้วยวิธีการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิมและแบบทางเลือกสมัยใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วงจรการทดสอบ และการเตรียมการทดลอง

สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะดำเนินการตามมาตรฐาน IEC60034-27-1 สำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแรงสูง โดยอ้างอิงหลักการเปรียบเทียบและวงจรพื้นฐานจากมาตรฐาน IEC60270 ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสำหรับขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน [20]

U_t คือ แหล่งจ่ายแรงดันทดสอบ

Z_m คือ อิมพีแดนซ์การวัด หรืออุปกรณ์คัปปลิ่ง

C_c คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนตามวงจรการทดสอบรูปที่ 3.1 นั้นในทางปฏิบัติสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีคุณลักษณะจำเพาะที่แตกต่างกันออกไปได้เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน เช่น การทดสอบในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถควบคุมปัจจัยสภาพแวดล้อมได้เป็นอย่างดี รวมถึงจากประสบการณ์โดยส่วนมากแล้ว วัสดุทดสอบเป็นกลุ่มที่มีค่าความจุไฟฟ้าไม่สูงมาก (10 ถึง 1,000 pF) จึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายที่มีกระแสทดสอบสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนภาคสนามกับวัสดุทดสอบที่ส่วนใหญ่เป็นเครื่องจักรที่สมบูรณ์ เช่น มอเตอร์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งมีความความจุไฟฟ้าสูง (มากกว่า 100 nF) จึงจำเป็นต้องมีการติดตั้งชุดแหล่งจ่ายเสริมที่จะช่วยชดเชยกระแสทดสอบให้สามารถจ่ายแรงดันทดสอบได้โดยที่กระแสของแหล่งจ่ายไม่สูงเกินพิกัดของแหล่งจ่ายแรงดัน

จากวงจรทดสอบตามรูปที่ 3.1 หม้อแปลงทดสอบที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันทดสอบให้กับวงจรจะถูกติดตั้งและเชื่อมต่อเข้ากับขดลวดสเตเตอร์ที่ด้านปลายขด (Star point) แล้วติดตั้งตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวไว้ที่ด้านต้นขด (HV side) ซึ่งด้านที่ได้รับความเครียดทางไฟฟ้าและอุณหภูมิสูงกว่าด้านปลายขด จึงถือว่าเป็นจุดอ่อนของระบบฉนวน อีกทั้งการจ่ายแรงดันและติดตั้งตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ด้านตรงข้ามของขดลวดลักษณะนี้ ยังช่วยลดทอนสัญญาณรบกวนที่จะส่งผลกระทบต่อระบบวัดได้ด้วย

คุณสมบัติของขดลวดที่มีค่าความเหนี่ยวนำอยู่โดยปกติ แล้วจึงใช้อุปกรณ์คัปปลิ่งสำหรับเชื่อมต่อสัญญาณไปที่ระบบวัดและแสดงผลต่อไป

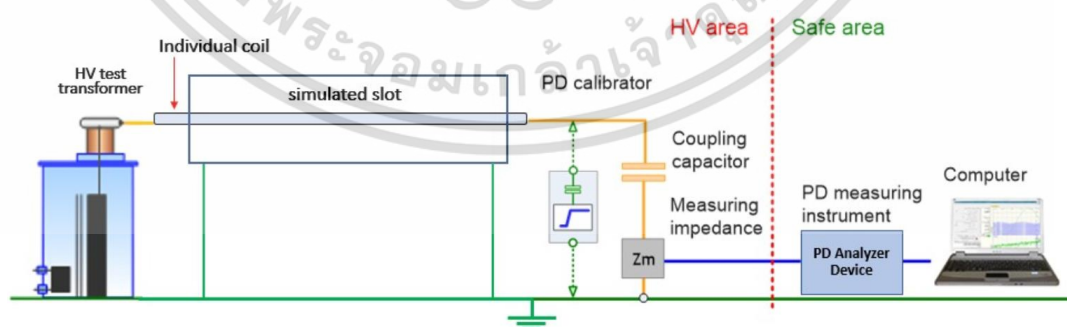
โดยผลจากการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนนั้น โดยทั่วไปจะวิเคราะห์ประเภทของดิสชาร์จบางส่วนจากรูปแบบ PRPD และวิเคราะห์ความรุนแรงจากขนาดของประจุดิสชาร์จบางส่วน (PD Magnitude) นอกจากนี้ เพื่อให้สามารถจำแนกสัญญาณรบกวนออกจากดิสชาร์จบางส่วนด้วยการวิเคราะห์ลักษณะของพัลส์ (PD pulses shape)

เพื่อเป็นการศึกษาลักษณะของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แรงสูงที่สภาพเงื่อนไขที่แตกต่างกัน จึงแบ่งการทดลองออกเป็น 3 หัวข้อ คือ การศึกษาทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ก่อนเริ่มใช้งาน, การศึกษาทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ, การศึกษาทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนาม และการทดสอบเพื่อบำรุงรักษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ด้วยการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

3.3 การศึกษาทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ก่อนเริ่มใช้งาน

การทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาล์ว (Individual coils) ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนรวมแบบซิงโครนัส ขนาดพิกัดแรงดัน 11 kV พิกัดกำลัง 50 kW ตั้งแต่ขดลวดถูกผลิตจากโรงงานด้วยวิธีเรซินริช โดยมีวงจรทดสอบตามรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นการทดสอบขดลวดในแต่ละคอลลอยโดยยังไม่ประกอบลงร่องสลอต

3.3.1 วงจรการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาล์วก่อนเริ่มใช้งาน



รูปที่ 3.2 วงจรการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาล์วหลังจากผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

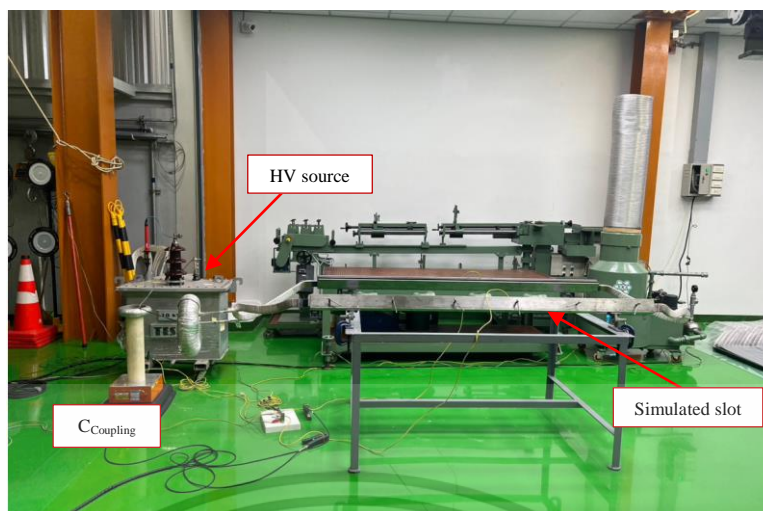
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ทดสอบ

No.	Test Instrument	Parameter
1.	HV test transformer	20kV, 10kVA
2.	Coupling capacitor	1 nF
3.	PD calibrator	IEC 60270
4.	PD Measuring Instrument	PD analyzer
5.	Measuring sensitivity	20 – 100,000 pC
6.	Measuring frequency range	500 kHz - 30 MHz
7.	Test Voltage	6.35 kV
8.	Ambient humidity	62 %RH
9.	Ambient temperature	33.6 °C

3.3.2 ขั้นตอนการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาล์วก่อนเริ่มใช้งาน

แรงดันทดสอบจะถูกจ่ายโดยหม้อแปลงทดสอบด้วยแรงดันทดสอบ 6.35 kV หรือที่แรงดันเฟส U_0 ซึ่งถูกติดตั้งที่ปลายของขดลวดตำแหน่งเดียวกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวติดตั้งอยู่ โดยที่ขดลวดทดสอบถูกติดตั้งภายในร่องสล๊อตจำลอง รวมทั้งหมด 20 ขดลวด ดังรูปที่ 3.3

ก่อนเริ่มทำการทดสอบแต่ละขดลวดได้ดำเนินการปรับเทียบด้วยประจุที่ทราบค่าที่จุดติดตั้งตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว จากนั้นก็สัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ก่อนเริ่มจ่ายแรงดันแบบต่อเนื่องจนถึงแรงดันทดสอบ แล้วคงแรงดันเพื่อปรับสภาพเป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงทำการบันทึกผลรูปแบบ PRPD, ขนาดของประจุ (PD magnitude) และสัญญาณรูปคลื่นดิสชาร์จบางส่วน (PD Pulses Shape) แล้วลดระดับแรงดันทดสอบเท่ากับศูนย์

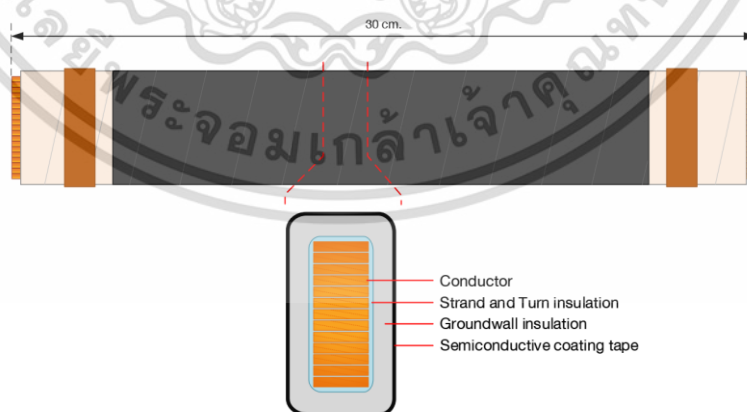


รูปที่ 3.3 อุปกรณ์และการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนกับขดลวดแต่ละคอยล์

3.4 การศึกษาทดสอบวัตต์ดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

3.4.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ

สำหรับวัสดุทดสอบที่ใช้ในการทดลองเป็นสเตเตอร์บาร์แบบฟอร์มวาร์นชนิดโรเบิ้ลล์บาร์ ซึ่งเป็นของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดซิงโครนัสขนาด 13.8 kV 111 MVA ที่ผ่านการใช้งานมาเป็นเวลา 30 ปี โดยทำการตัดแบ่งสเตเตอร์บาร์ออกเป็นชิ้นตัวอย่างทดสอบขนาดความยาวชิ้นละ 30 เซนติเมตร จำนวน 6 แท่ง ดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 หลังจากเสร็จสิ้นขั้นตอนการเตรียมขนาดของวัสดุทดสอบ วัสดุทดสอบทั้งหมดจะถูกนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อยู่ในเนื้อฉนวน โดยอบด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาการอบไล่ความชื้น



รูปที่ 3.4 ขนาดของสเตเตอร์บาร์แบบฟอร์มวาร์นชนิดโรเบิ้ลล์บาร์สำหรับใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การเตรียมวัสดุทดสอบ

วัสดุทดสอบดังกล่าวจะถูกนำไปจำลองกรณีศึกษา ซึ่งมีทั้งหมด 6 กรณีศึกษา ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ก่อนถูกนำไปทดสอบวัดดิสซาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 3.2 การจำลองกรณีศึกษาสเตเตอร์บาร์สำหรับทดสอบวัดดิสซาร์จบางส่วน

Case No.	Case Study	Descriptions
1	<p>อุณหภูมิ 100 °C</p> 	นำสเตเตอร์บาร์อบที่เตาอบอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อศึกษาสภาพฉนวนที่ได้รับผลจากอุณหภูมิที่สภาวะการทำงานปกติของเครื่องจักรกล
2	<p>อุณหภูมิ 220 °C</p> 	นำสเตเตอร์บาร์อบที่เตาอบอุณหภูมิ 220 °C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง เพื่อศึกษาสภาพฉนวนที่ได้รับผลจากอุณหภูมิที่สภาวะการทำงานเกินพิกัดของเครื่องจักรกล
3	<p>สิ่งปนเปื้อนที่ไม่นำไฟฟ้า</p> 	นำดินทรายโรยบริเวณผิวของฉนวน เพื่อศึกษาสภาพฉนวนของเครื่องจักรที่มีการสะสมของสิ่งปนเปื้อนไม่นำไฟฟ้าที่ผิวฉนวน
4	<p>สิ่งปนเปื้อนที่นำไฟฟ้า</p> 	นำผงเหล็กโรยบริเวณผิวของฉนวน เพื่อศึกษาสภาพฉนวนของเครื่องจักรที่มีการสะสมของสิ่งแปลกปลอมที่นำไฟฟ้าที่ผิวของฉนวน
5	<p>ความเสียหายทางกล</p> 	นำกระดาษทรายเบอร์ 240 ขูดบริเวณ Semi-conductive coating ที่ได้รับความเสียหายทางกล

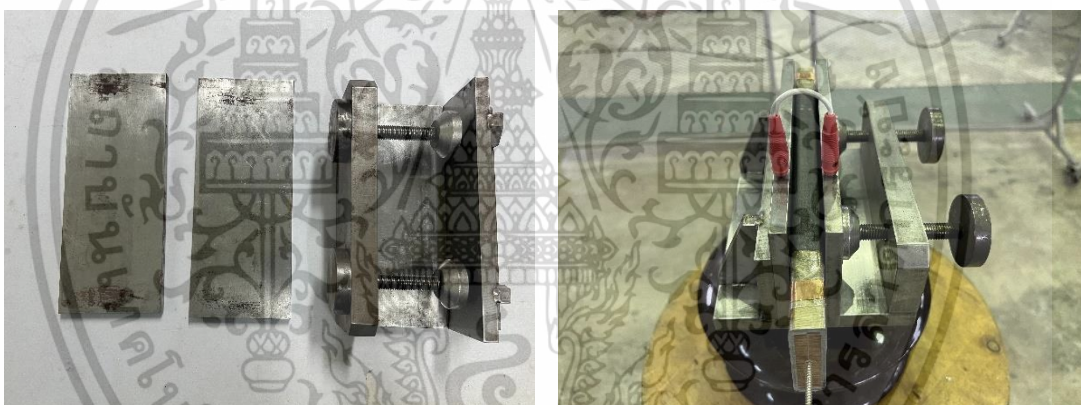
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Case No.	Case Study	Descriptions
6	<p>ความชื้นภายนอก</p> 	นำเครื่องพ่นไอน้ำฉีดไปที่บริเวณผิวของฉนวน เพื่อศึกษาสภาพฉนวนเครื่องจักรที่มีความชื้นสะสมอยู่ที่ผิวฉนวน

3.4.3 ขั้นตอนการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ใน

ห้องปฏิบัติการ

สำหรับการทดสอบกรณีศึกษาทั้ง 6 กรณี สเตเตอร์บาร์จะถูกติดตั้งในร่องสลีตจำลองดังที่แสดงในรูปที่ 3.5 โดยสเตเตอร์บาร์จะถูกติดตั้งคั่นกลางอยู่ระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 2 แผ่น เพื่อจำลองสภาพการใช้งานของขดลวดในร่องสลีตขณะได้รับแรงดัน

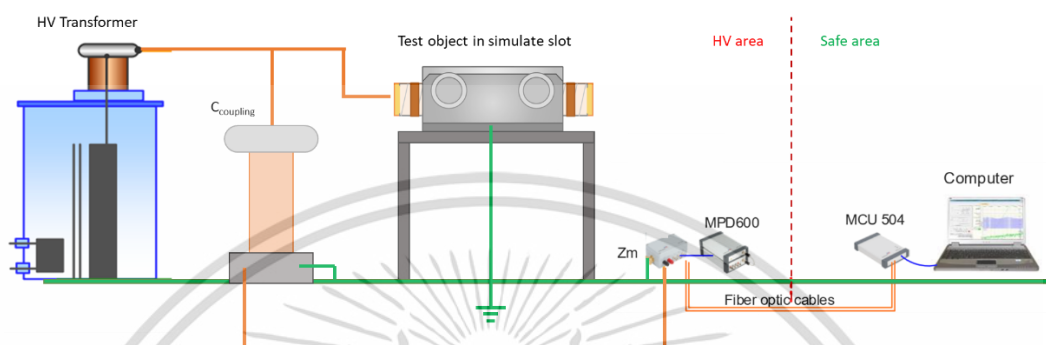


รูปที่ 3.5 การติดตั้งสเตเตอร์บาร์ในร่องสลีตจำลอง

นำวัตถุทดสอบที่ถูกติดตั้งลงในร่องสลีตจำลอง จัดวางในวงจรทดสอบวันดิสชาร์จบางส่วน ภายในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดังแสดงในรูปที่ 3.6 โดยใช้หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงจ่ายแรงดันทดสอบให้กับวัตถุทดสอบโดยมีตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวขนาด 1 nF เชื่อมต่ออยู่ที่ด้านแรงสูงของวัตถุทดสอบ โดยที่ร่องสลีตจำลองถูกต่อลงดินร่วมที่จุดเดียวของวงจรทดสอบ ในส่วนของภาคแรงดันต่ำใช้เครื่องมือวัดและอุปกรณ์คาบเกี่ยว (CPL504, MPD600 และ MCU504) เพื่ออ่านค่าและบันทึกสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านการส่งสัญญาณด้วยสายใยแก้วนำแสง

ก่อนเริ่มการทดสอบไฟฟ้าแรงสูงกับวัตถุทดสอบหรืออุปกรณ์ใดๆ ควรดำเนินการทดสอบวัดค่าความต้านทานของฉนวนก่อนทุกครั้งเพื่อเป็นการตรวจสอบและความปลอดภัยต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบวัดภาคแรงต่ำก่อนดำเนินการจ่ายแรงดันสูงให้กับวัตถุทดสอบ ซึ่งค่าควรมากกว่า 500 MOhm นอกจากนี้ วัตถุทดสอบซึ่งเป็นสแตเตอร์บาร์ขนาด 30 ซม. มีค่าความเก็บประจุอยู่ประมาณ 300 – 400 pF ซึ่งถือถือว่ามีค่าต่ำไม่ส่งผลทำให้หม้อแปลงทดสอบต้องรับภาระมากจนเกินพิกัด ณ แรงดันทดสอบ



รูปที่ 3.6 วงจรการทดสอบวัตถุฉนวนบางส่วนของขดลวดสแตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

การทดสอบวัตถุฉนวนบางส่วนของขดลวดสแตเตอร์ในห้องปฏิบัติการนั้น ได้มีเตรียมวงจรทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC60270 และ IEC60034-27-1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) จัดเตรียมวงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC60270 ดังแสดงในรูปที่ 3.6
- 2) บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศบริเวณที่ดำเนินการทดสอบ
- 3) ปรับช่วงความถี่ที่ต้องการวัด ในที่นี้ใช้ช่วงความถี่ต่ำ แบนด์วิดท์ 100 – 400 kHz
- 4) ดำเนินการปรับเทียบด้วยประจุที่ทราบค่าผ่านปลายขดลวดด้านแรงสูงซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการวัดฉนวนบางส่วน
- 5) บันทึกสัญญาณรบกวนพื้นหลัง
- 6) เริ่มจ่ายแรงดันทดสอบซึ่งตามมาตรฐาน IEC60034-27-1 แบบขั้น ขั้นละ $0.2U_0$ หรือ 1.6 kV ไปยังแรงดันที่ต้องการทดสอบ (U_0) เท่ากับ 8 kV
- 7) ขณะจ่ายแรงดันทดสอบ ทำการบันทึกค่า PDIV
- 8) เมื่อจ่ายแรงดันทดสอบที่ U_0 แล้ว คงแรงดันไว้เป็นเวลาประมาณ 5 – 10 นาที
- 9) บันทึกผลการทดสอบ ได้แก่ รูปแบบ PRPD, ขนาดของ PD, รูปร่างพัลส์ PD
- 10) ลดระดับแรงดันบันทึกค่า PDEV จนกระทั่งเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

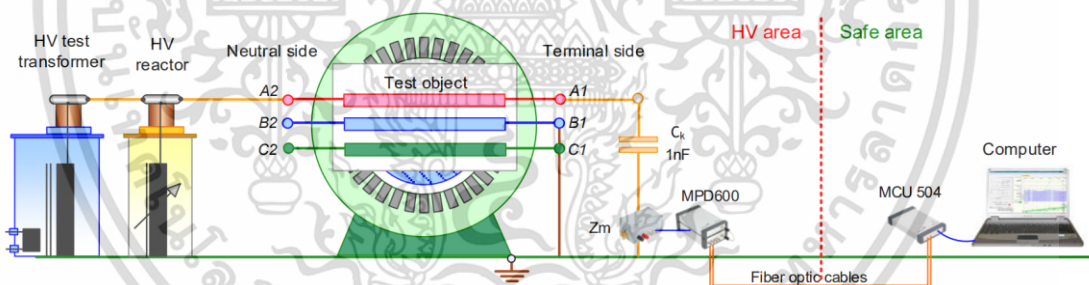
3.5 การศึกษาทดสอบวัตติสารจางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนาม

3.5.1 อุปกรณ์และวงจรการทดสอบวัตติสารจางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนาม

ภาคสนาม

การเตรียมการทดสอบสำหรับการวัดติสารจางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนามนั้น ได้ดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 60034-27-1 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะพบว่า มีการใช้หม้อแปลงทดสอบแรงดันสูงทำหน้าที่จ่ายแรงดันให้กับวัตตุทดสอบ ซึ่งเป็นขดลวดสเตเตอร์ด้านจุดร่วมสตาร์และติดตั้งตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวขนาด 1 nF ที่ขดลวดด้านแรงสูงของวัตตุทดสอบ เพื่อทำการวัดระบบฉนวนด้านที่ได้รับแรงดันสูงขณะใช้งานเป็นเวลานาน ซึ่งถือว่าเป็นจุดอ่อนของระบบ

ในกรณีนี้ วัตตุทดสอบมีค่าความเก็บประจุกว่า 100 - 400 nF ซึ่งจะเป็อุปสรรคต่อการจัดหาแหล่งจ่ายที่สามารถจ่ายแรงดันทดสอบ (4 – 6 kV) ซึ่งจะส่งผลให้หม้อแปลงต้องรับภาระกระแสสูงได้ ดังนั้น ในกรณีนี้จึงแก้ปัญหาโดยการนำความเหนี่ยวนำต่อขานานกับหม้อแปลงทดสอบเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับภาระแบบคาปาซิทีฟสูง โดยชดเชยด้วยกระแสเหนี่ยวนำส่งผลให้สามารถใช้แหล่งจ่ายแรงดันสูงที่พิกัดกระแสต่ำได้ ทำให้วงจรทดสอบนี้มีความสามารถทดสอบภาระแบบคาปาซิทีฟสูงถึง 1 uF ที่แรงดันทดสอบ 10 kV หรือสูงกว่านั้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีในเรื่องของการลดขนาดพิกัดของอุปกรณ์ในวงจรทดสอบและความสูญเสียจากกระแสสูงได้อีกด้วย



รูปที่ 3.7 วงจรการทดสอบวัตติสารจางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนาม

สายเคเบิลตัวนำที่เป็นแบบหุ้มฉนวนความยาว 50 เมตร ถูกใช้เชื่อมต่อระหว่างตัวเหนี่ยวนำแรงสูงไปยังวัตตุทดสอบที่อยู่ในระยะไกลหรือเข้าถึงได้ยาก แรงดันทดสอบจะเชื่อมต่อเข้าด้านจุดร่วมสตาร์และติสารจางส่วนจะถูกวัดที่ปลายขดลวดอีกด้าน การต่อวงจรในลักษณะนี้ เป็นการใช้ความเหนี่ยวนำของขดลวดวัตตุทดสอบเพื่อช่วยลดทอนสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายไปยังเครื่องมือวัด ส่งผลให้สัญญาณรบกวนพื้นหลังที่ระบบบันทึกได้มีค่าต่ำเทียบเท่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ทดสอบ

No.	Test Instrument	Parameter
1	HV test transformer	20kV, 10kVA
2	HV reactor	50 kvar
3	Coupling capacitor	1 nF
4	PD calibrator	100 – 20,000 pF
5	PD Measuring Instrument	PD Spot Tester, MPD600
6	Measuring frequency range	100 kHz - 30 MHz

3.5.2 วัดทดสอบ






สำหรับหัวข้อนี้เป็นการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนามกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงและมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงซึ่งถูกใช้งานในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมและพลังงานความร้อนถ่านหิน เพื่อศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์สภาพระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์จากตัวอย่างเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูงและมอเตอร์ไฟฟ้าแรงสูงจำนวน 6 เครื่อง รายละเอียดดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของวัตถุทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนาม


Case	Details of test objects				
	Power	Voltage (kV)	Year	Ins. manufacturing	Type of cooling
Gen A	211.75 MVA	15.75	1997	Class F, Global VPI	Hydrogen Cooled
Gen B	50.8 MVA	11.5	1999	Class F, Global VPI	Air to water Heat exchanger
Gen C	50.8 MVA	11.5	1999	Class F, Global VPI	Air to water Heat exchanger
Motor A	2,470 kW	6.9	2008	Class F, Global VPI	Air to air heat exchanger
Motor B	875 kW	6.9	2008	Class F, Global VPI	Air to air heat exchanger
Motor C	2,050 kW	6.9	2008	Class F, Global VPI	Air to air heat exchanger

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 แสดงวัตถุทดสอบและวิธีการทดสอบวัตติสารจางส่วนของขดลวดสเตเตอร์

Case	Test objects	PD Measurements
Gen A		<p>Test voltage: 9.1 kV</p> <p>Measurement point: HV terminal</p> <p>Phase of winding: A-G</p> <p>Test time: 5 min</p> <p>PD Instrument: PD Spot Tester</p>
Gen B		<p>Test voltage: 6.6 kV</p> <p>Measurement point: HV terminal</p> <p>Phase of winding: A-G</p> <p>Test time: 5 min</p> <p>PD Instrument: PD Spot Tester</p>
Gen C		<p>Test voltage: 8.0 kV</p> <p>Measurement point: HV terminal</p> <p>Phase of winding: A-G</p> <p>Test time: 5 min</p> <p>PD Instrument: PD Spot Tester</p>
Motor A		<p>Test voltage: 4.0 kV</p> <p>Measurement point: HV terminal</p> <p>Phase of winding: A-G</p> <p>Test time: 10 min</p> <p>PD Instrument: MPD600</p>
Motor B		<p>Test voltage: 4.0 kV</p> <p>Measurement point: HV terminal</p> <p>Phase of winding: B-G</p> <p>Test time: 10 min</p> <p>PD Instrument: MPD600</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

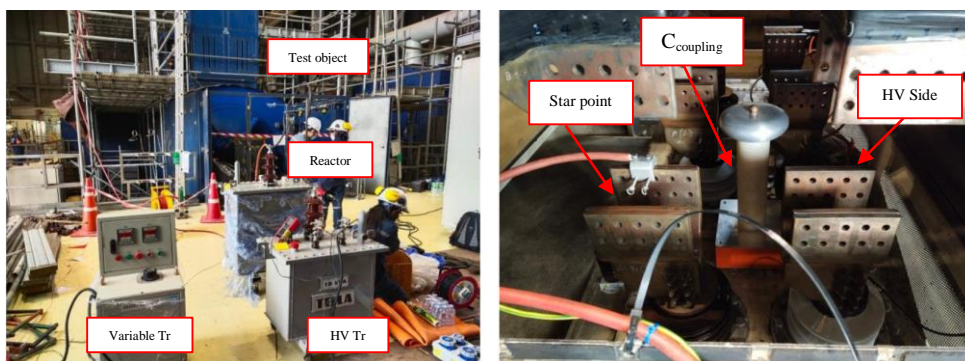
Case	Test objects	PD Measurements
Motor C		Test voltage: 4.0 kV Measurement point: HV terminal Phase of winding: B-G Test time: 10 min PD Instrument: MPD600

3.5.3 ขั้นตอนการทดสอบ

สำหรับขั้นตอนการทดสอบวัตติสซาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนามนั้น มีข้อจำกัดและความแตกต่างจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการในเชิงปฏิบัติ แต่ยังคงดำเนินการตามมาตรฐาน IEC60270 และ IEC60034-27-1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) จัดเตรียมวงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC60034-27-1 และ IEC60270 ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และรูปที่ 3.8
- 2) บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศบริเวณที่ดำเนินการทดสอบ
- 3) ปรับช่วงความถี่ที่ต้องการวัด ในที่นี้ใช้ช่วงความถี่ต่ำ แบนด์วิดท์ 100 – 400 kHz
- 4) ดำเนินการปรับเทียบด้วยประจุที่ทราบค่าผ่านปลายขดลวดด้านแรงสูงซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการวัดวัตติสซาร์จบางส่วน
- 5) บันทึกสัญญาณรบกวนพื้นหลัง
- 6) เริ่มจ่ายแรงดันทดสอบซึ่งตามมาตรฐาน IEC60034-27-1 สามารถจ่ายได้ 2 รูปแบบ คือ แบบต่อเนื่องและแบบขึ้น ไปยังแรงดันที่ต้องการทดสอบ (U_0)
- 7) ขณะจ่ายแรงดันทดสอบ ทำการบันทึกค่า PDIV
- 8) เมื่อจ่ายแรงดันทดสอบที่ U_0 แล้ว คงแรงดันไว้เป็นเวลาประมาณ 5 – 10 นาที
- 9) บันทึกผลการทดสอบ ได้แก่ รูปแบบ PRPD, ขนาดของ PD, รูปร่างพัลส์ PD
- 10) ลดระดับแรงดันบันทึกค่า PDEV จนกระทั่งเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การเตรียมวงจรการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนาม

3.6 การทดสอบเพื่อบำรุงรักษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ด้วยการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

จากประสบการณ์ของผู้เขียน เครื่องจักรไฟฟ้าหมุนที่มีขดลวดแบบฟอร์มวาลคอยล์ เมื่อมีความต้องการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบดั้งเดิมตามมาตรฐาน IEC60034-27-1 มีสองรูปแบบคือ รูปแบบที่สามารถปลดจุดรวมสตาร์เพื่อแยกขดลวดแต่ละเฟสออกจากกันได้และกลุ่มที่ไม่สามารถปลดจุดรวมสตาร์ออกได้ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะพบในมอเตอร์แรงสูงขนาดไม่ใหญ่มาก ข้อจำกัดนี้ส่งผลต่อการทดสอบและการวิเคราะห์ปัญหาได้

ในหัวข้อนี้จึงเป็นการแสดงให้เห็นถึงการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในเชิงการบำรุงรักษาป้องกันในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งมีข้อจำกัดและแนวทางการแก้ไขปัญหาที่หลากหลาย การทดสอบในหัวข้อนี้ต้องการเปรียบเทียบผลของการปรับสภาพต่อขนาดของดิสชาร์จบางส่วนในช่วงเวลาทดสอบ รวมถึงรูปแบบการต่อวงจรทดสอบสำหรับมอเตอร์ที่มีรูปแบบการต่อจุดรวมสตาร์ที่แตกต่างกัน และการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาประยุกต์ใช้ในการซ่อมบำรุงเพื่อแก้ปัญหา

3.6.1 วัตถุประสงค์

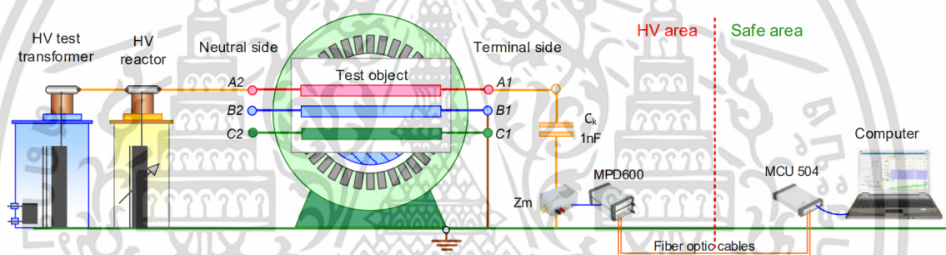
วัตถุประสงค์ในหัวข้อนี้เป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ แบบกรงกระรอก พิกัดกำลัง 2.8 MW พิกัดแรงดัน 6.9 kV ถูกใช้งานเป็น Primary Fan ในโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนถ่านหิน โดยมีระบบระบายความร้อนแบบ air-to-air heat exchanger ซึ่งถูกนำออกจากระบบเพื่อบำรุงรักษาป้องกันตามรอบเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.9 หนึ่งในหัวข้อที่ทดสอบเพื่อตรวจสอบสภาพความผิดปกติของระบบฉนวนที่เลือกใช้คือการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วน



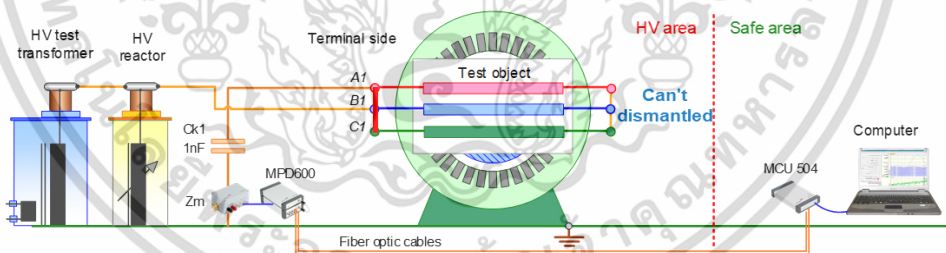
รูปที่ 3.9 มอเตอร์เหนี่ยวนำและขดลวดสเตเตอร์ พิกัดกำลัง 2.8 MW พิกัดแรงดัน 6.9 kV

3.6.2 อุปกรณ์และวงจรการทดสอบ

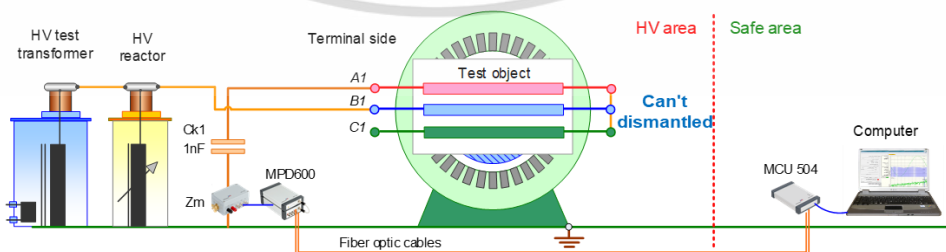
การเตรียมการทดสอบสำหรับการวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์เพื่อการบำรุงรักษาหัวข้อนี้ได้ดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 60034-27-1 โดยแบ่งรูปแบบการต่อวงจรการวัดเป็น 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



(ก) วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบแยกเฟสขดลวด



(ข) วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบรวมเฟสขดลวด มาสามารถปลดจุดร่วมสตาร์ได้



(ค) วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบแยกเฟสขดลวด มาสามารถปลดจุดร่วมสตาร์ได้

รูปที่ 3.10 วงจรการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของมอเตอร์ที่มีการต่อจุดร่วมสตาร์ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ทดสอบมอเตอร์

No.	Test Instrument	Parameter
1	HV test transformer	20kV, 10kVA
2	HV reactor	50 kvar
3	Coupling capacitor	1 nF
4	PD calibrator	100 – 20,000 pF
5	PD Measuring Instrument	MPD600
6	Measuring frequency range	100 kHz - 400 kHz



(ก) ตัวเก็บประจุคัปเปิล (ข) ขดลวดที่เชื่อมต่อแรงดันทดสอบ (ค) แหล่งจ่ายแรงดันแบบเคลื่อนที่

รูปที่ 3.11 การจัดเตรียมวงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนสำหรับมอเตอร์

3.6.3 ขั้นตอนการทดสอบ

- 1) จัดเตรียมวงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC60034-27-1 และ IEC60270 แสดงในรูปที่ 3.11
- 2) บันทึกค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศบริเวณที่ดำเนินการทดสอบ
- 3) ปรับช่วงความถี่ที่ต้องการวัด ในที่นี้ใช้ช่วงความถี่ต่ำ แบบดีวิทท์ 100 – 400 kHz
- 4) ดำเนินการปรับเทียบด้วยประจุที่ทราบค่าผ่านปลายขดลวดด้านแรงสูงซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการวัดดิสชาร์จบางส่วน
- 5) บันทึกสัญญาณรบกวนพื้นหลัง
- 6) เริ่มจ่ายแรงดันทดสอบซึ่งตามมาตรฐาน IEC60034-27-1 แบบขั้น ขั้นละ $0.2U_0$ ไปยังแรงดันที่ต้องการทดสอบ (U_0) เท่ากับ 4 kV
- 7) ขณะจ่ายแรงดันทดสอบ ทำการบันทึกค่า PDIV
- 8) เมื่อจ่ายแรงดันทดสอบที่ U_0 แล้ว คงแรงดันไว้เป็นเวลาประมาณ 5 – 10 นาที
- 9) บันทึกผลการทดสอบ ได้แก่ รูปแบบ PRPD, ขนาดของ PD, รูปร่างพัลส์ PD
- 10) ลดระดับแรงดันบันทึกค่า PDEV จนกระทั่งเป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ

จากการทดสอบวัตต์ดิสชาร์จบางส่วนเพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนตั้งแต่กระบวนการผลิต การศึกษาโดยการทดสอบในห้องปฏิบัติการ การทดสอบในภาคสนามโดยใช้วัตถุทดสอบเป็นมอเตอร์ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจริงในอุตสาหกรรม และการทดสอบเพื่อบำรุงรักษาด้วยข้อจำกัดในทางปฏิบัติ รูปแบบต่างๆ สามารถแสดงผลการทดสอบและผลการวิเคราะห์ได้ ดังต่อไปนี้

4.1 ผลการทดสอบวัตต์ดิสชาร์จบางส่วนขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาล์วหลังจากผลิต

การทดสอบวัตต์ดิสชาร์จบางส่วนขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาล์วหลังจากผลิตเป็นการทดสอบเพื่อศึกษาเกี่ยวกับจุดบกพร่องและคุณลักษณะของดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในฉนวนขดลวดสเตเตอร์หลังจากกระบวนการผลิตเสร็จสิ้น โดยผลการทดสอบฉนวนขดลวดทั้งหมด 20 ขดลวด ได้แสดงข้อมูลรูปแบบ PRPD, ประเภทของดิสชาร์จบางส่วน, รูปร่างพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน และขนาดของประจุดิสชาร์จบางส่วน (Q_m) เนื่องจากการวัดด้วยแบนวิดท์ช่วงความถี่สูง (500 – 10,000 kHz) จึงไม่สามารถวัดขนาดดิสชาร์จบางส่วนเป็นค่า Q_{IEC} ได้ตามมาตรฐาน IEC60270 ในตารางที่ 4.1 โดยสามารถจำแนกตามประเภทของดิสชาร์จบางส่วนได้ดังนี้

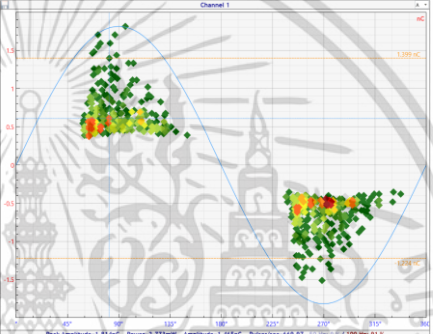
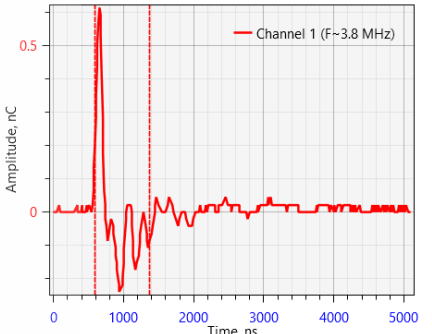
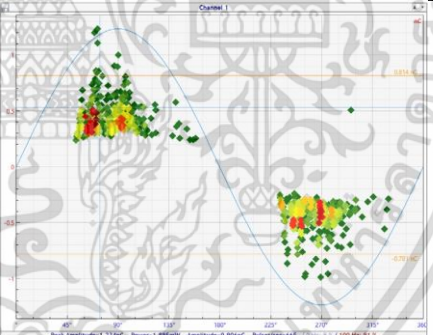
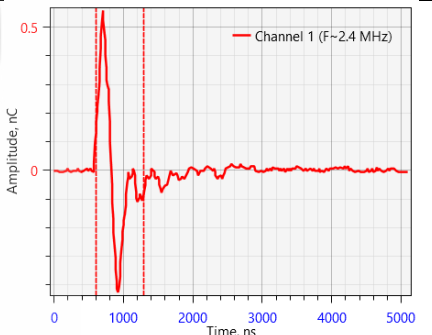
- 1) ดิสชาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวน จำนวน 16 ขดลวด โดยขนาดของดิสชาร์จบางส่วนอยู่ในช่วง 200 – 1,600 pC
- 2) ดิสชาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวนร่วมกับที่ผิวปลายขดลวด จำนวน 4 ขดลวด โดยขนาดของดิสชาร์จบางส่วนอยู่ในช่วง 600 – 1,600 pC

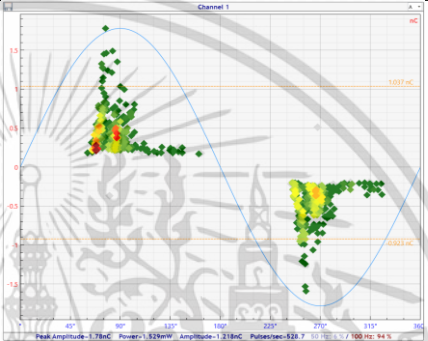
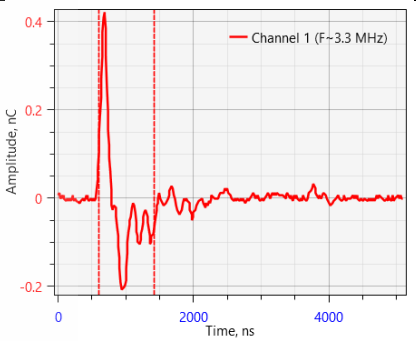
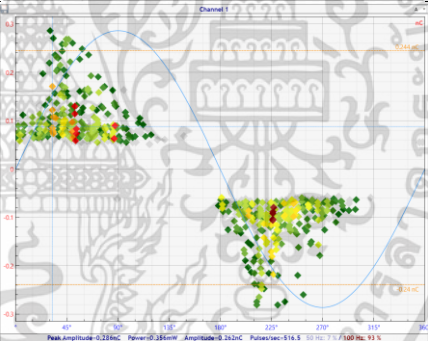
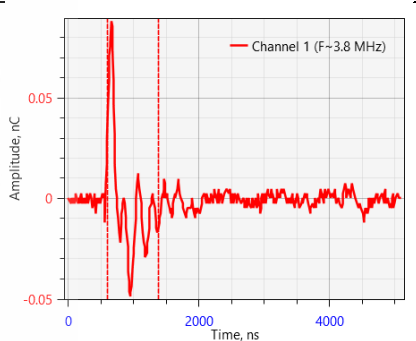
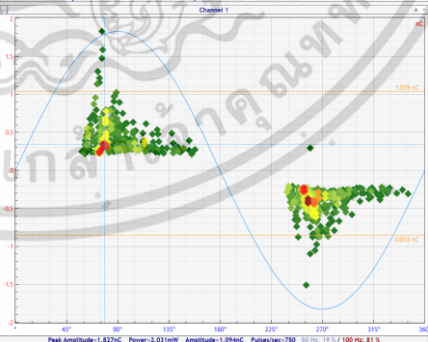
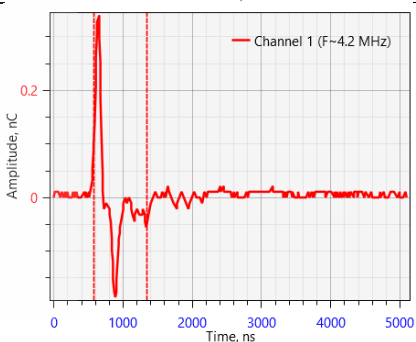
กล่าวได้ว่า จากการทดลองครั้งนี้โอกาสที่จะพบการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวนประมาณร้อยละ 80 และเป็นการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวนร่วมกับที่ผิวปลายขดลวดอีกร้อยละ 20 การโดยที่ขดลวดที่มีขนาดดิสชาร์จบางส่วนสูงที่สุด 1,864 pC คือขดลวดที่ 19 ซึ่งเป็นการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวน

จากผลการทดลองในหัวข้อนี้มีความสอดคล้องกับข้อมูลในมาตรฐาน IEC 60034-27-1 ที่กล่าวว่าดิสชาร์จประเภทภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวนสามารถเกิดขึ้นนั้นเป็นลักษณะของการดิสชาร์จที่เกิดขึ้นที่ช่องโพรงเล็กๆ ภายในฉนวนกราวนัวอลล์ ซึ่งเกิดขึ้นได้ตั้งแต่เริ่มต้นการใช้งานจนถึงจุดสิ้นสุดของอายุการใช้งาน โดยไม่มีการลดอายุการใช้งานที่คาดการณ์ไว้และการดิสชาร์จนี้ถือเป็นเรื่องปกติสำหรับเครื่องจักรกลหมุน ซึ่งไม่ถือว่าเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพตามอายุของฉนวน

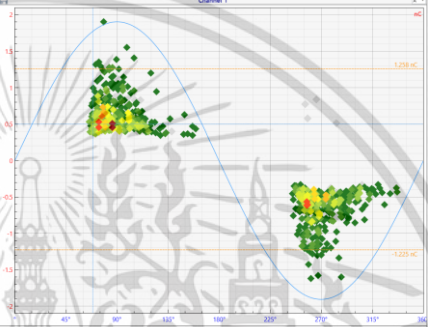
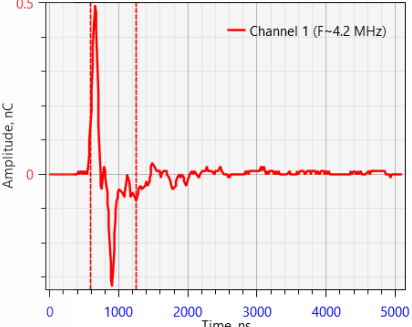
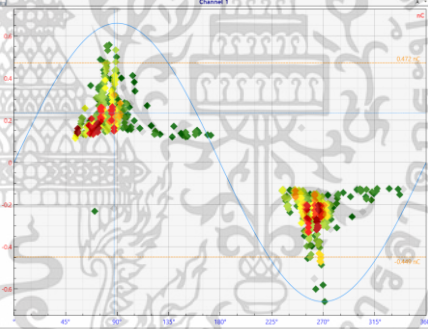
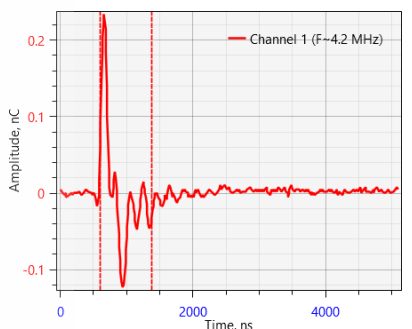
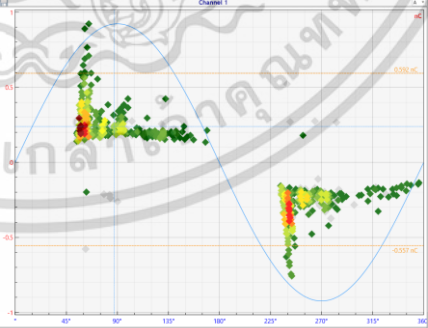
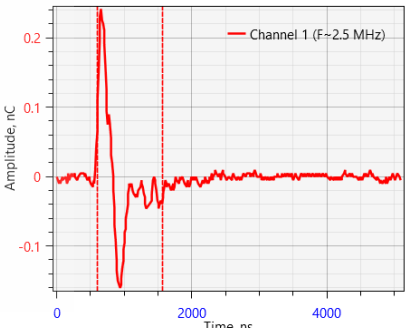
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

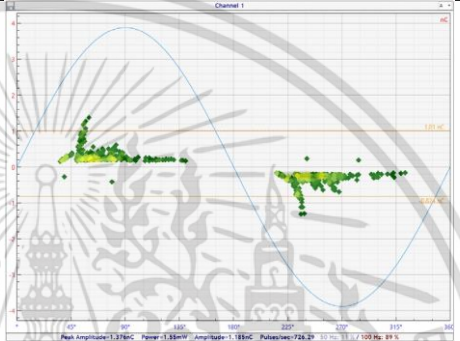
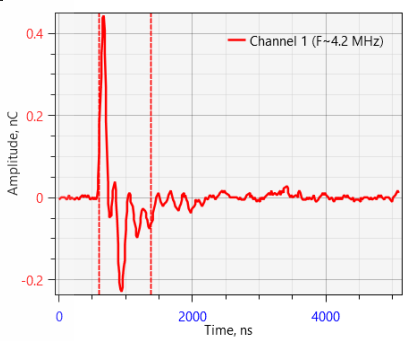
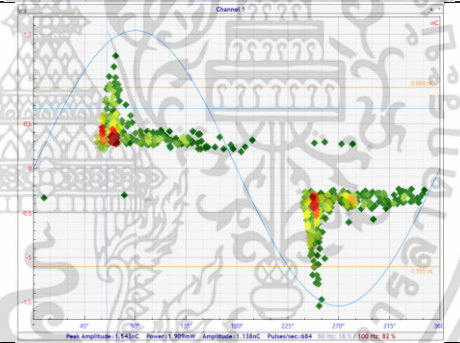
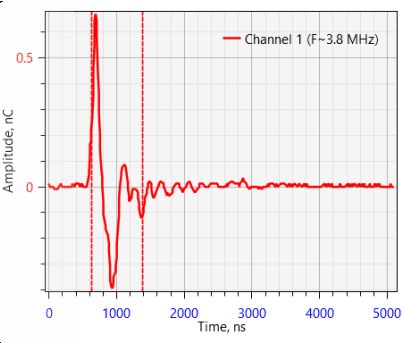
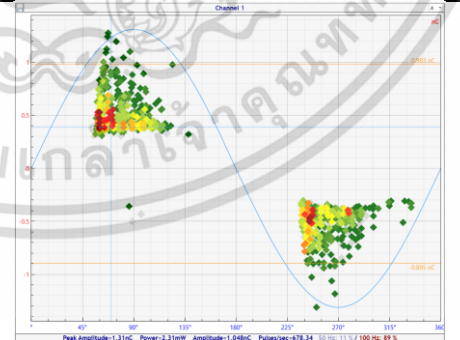
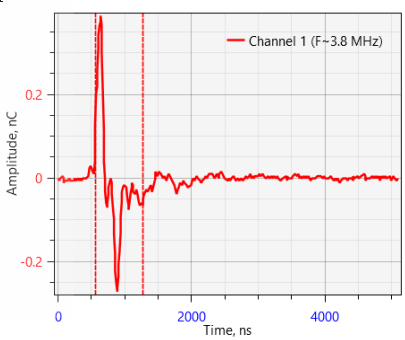
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาล์วหลังจากผลิต

Coil No.	PD Magnitude	PD Type	PRPD Pattern	PD Pulse
1	1,465 pC 669.97 pulse/sec	Internal void discharges		
2	906 pC 665 pulse/sec	Internal void discharges		

Coil No.	PD Magnitude	PD Type	PRPD Pattern	PD Pulse
3	1,218 pC 528.6 pulse/sec	Internal void discharges		
4	262 pC 516.5 pulse/sec	Internal void discharges		
5	1,094 pC 750 pulse/sec	Internal void discharges		

Coil No.	PD Magnitude	PD Type	PRPD Pattern	PD Pulse
6	753 pC 656 pulse/sec	Internal void discharges		
7	1,436 pC 666.35 pulse/sec	Internal void discharges and Surface discharges in the end-arm		
8	1,043 pC 771.25 pulse/sec	Internal void discharges		

Coil No.	PD Magnitude	PD Type	PRPD Pattern	PD Pulse
9	1,335 pC 707 pulse/sec	Internal void discharges		
10	489 pC 615 pulse/sec	Internal void discharges		
11	682 pC 632.38 pulse/sec	Internal void discharges and Surface discharges in the end-arm		

Coil No.	PD Magnitude	PD Type	PRPD Pattern	PD Pulse
12	1,185 pC 726.29 pulse/sec	Internal void discharges		
13	1,138 pC 584 pulse/sec	Internal void discharges and Surface discharges in the end-arm		
14	1,048 pC 678.34 pulse/sec	Internal void discharges		

Coil No.	PD Magnitude	PD Type	PRPD Pattern	PD Pulse
15	1,021 pC 671 pulse/sec	Internal void discharges		
16	577 pC 667.35 pulse/sec	Internal void discharges		
17	1,631pC 470 pulse/sec	Internal void discharges and Surface discharges in the end-arm		

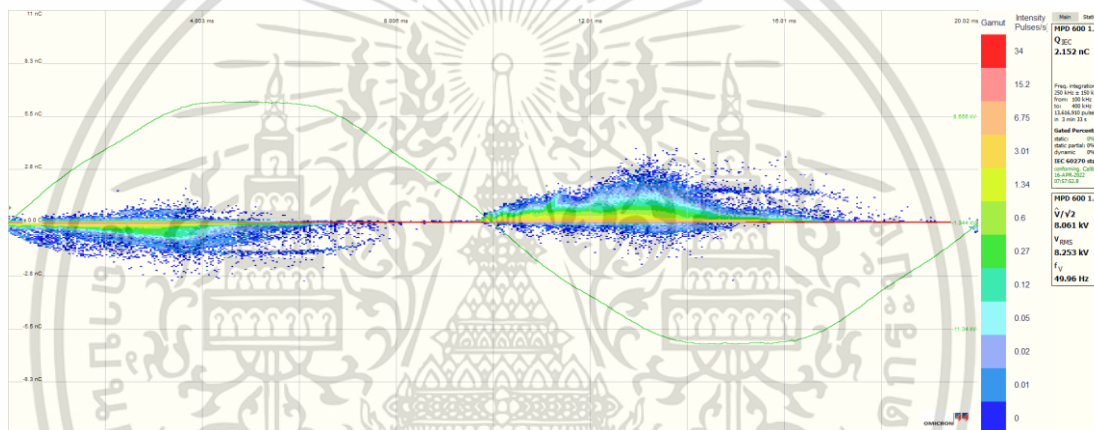
Coil No.	PD Magnitude	PD Type	PRPD Pattern	PD Pulse
18	603 pC 653 pulse/sec	Internal void discharges		
19	1,864 pC 716 pulse/sec	Internal void discharges		
20	1,403 pC 608.2 pulse/sec	Internal void discharges		

4.2 ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ในห้องปฏิบัติการ

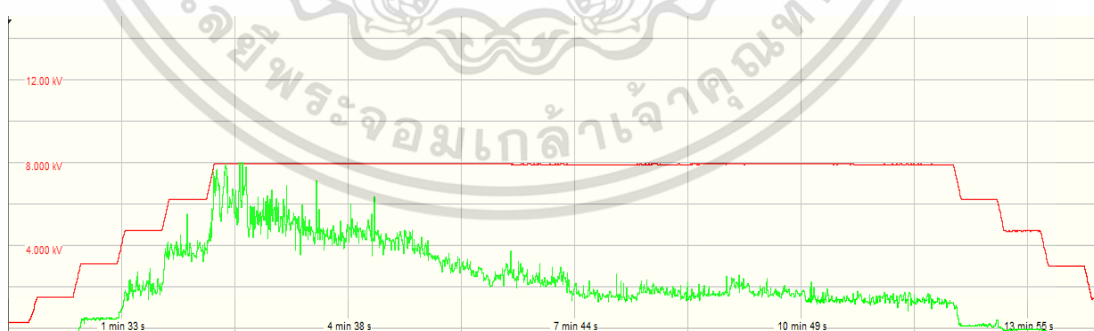
4.2.1 กรณีสเตเตอร์บาร์ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนสเตเตอร์บาร์ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่แรงดันทดสอบ 8.0 kV พบว่า PDIV = 3.2 kV, PDEV = 4.8 kV, PD magnitude (Q_{IEC}) = 2.152 nC รูปแบบดิสชาร์จบางส่วนเป็นการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เนื่องจากฉนวนได้รับความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิใช้งานปกติ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปแบบขนาดแรงดันทดสอบและขนาดของดิสชาร์จบางส่วนในรูปที่ 4.2 พบว่า ในช่วงเวลา 5 นาทีแรกของการทดสอบที่แรงดันทดสอบ ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนมีค่าแกว่งตัวค่อนข้างมากแล้วจึงมีแนวโน้มขนาดที่ลดลงและคงที่



รูปที่ 4.1 รูปแบบ PRPD ของสเตเตอร์บาร์ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง



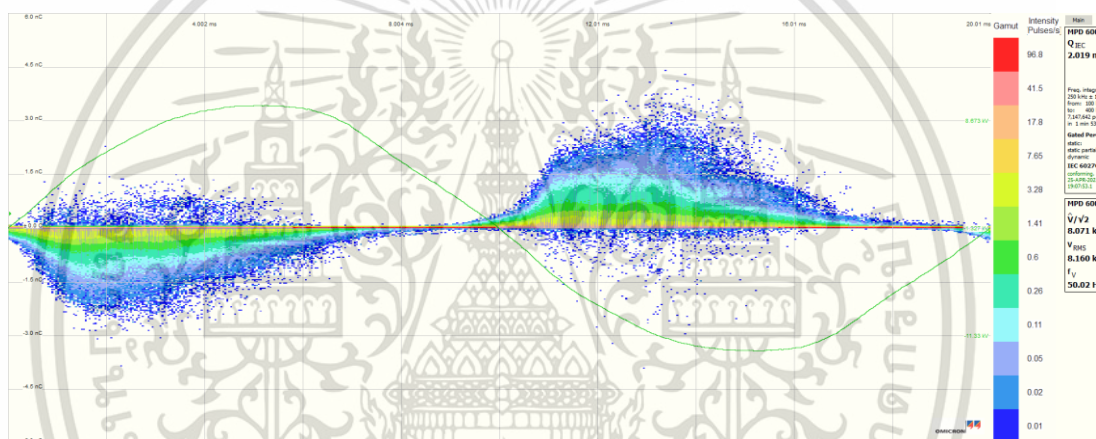
รูปที่ 4.2 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสเตเตอร์บาร์ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

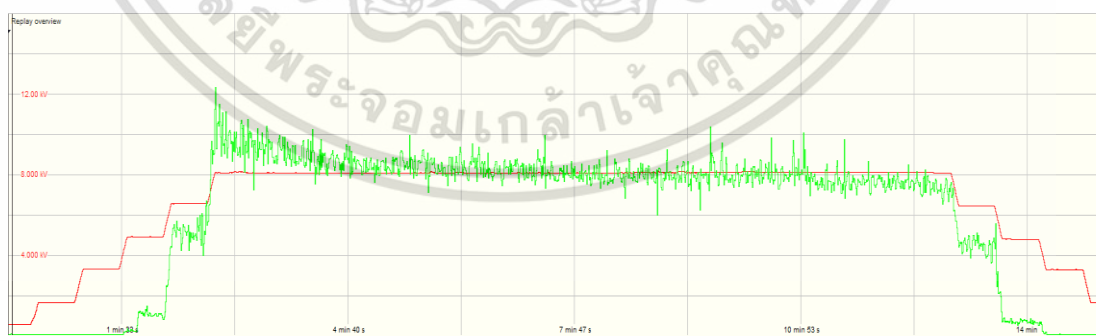
4.2.2 กรณีสแตเตอร์บาร์ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนสแตเตอร์บาร์ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง ที่แรงดันทดสอบ 8.0 kV พบว่า PDIV = 4.8 kV, PDEV = 3.2 kV, PD magnitude (Q_{IEC}) = 2.019 nC รูปแบบดิสชาร์จบางส่วนเป็นการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากฉนวนได้รับความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิใช้งานปกติ

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปแบบขนาดแรงดันทดสอบและขนาดของดิสชาร์จบางส่วนในรูปที่ 4.4 พบว่า ในช่วงเวลา 3 นาทีแรกของการทดสอบที่แรงดันทดสอบ ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนมีค่าแกว่งตัวเล็กน้อยแล้วจึงมีแนวโน้มขนาดที่ลดลงและคงที่มากกว่ากรณีได้รับความร้อนอุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง



รูปที่ 4.3 รูปแบบ PRPD ของสแตเตอร์บาร์ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง



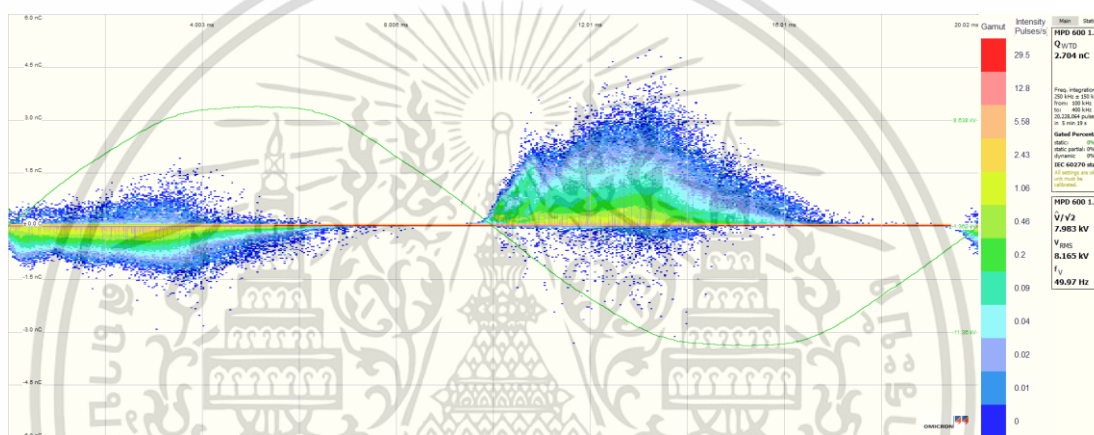
รูปที่ 4.4 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสแตเตอร์บาร์ได้รับความร้อนอุณหภูมิ 200 °C เป็นเวลา 96 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

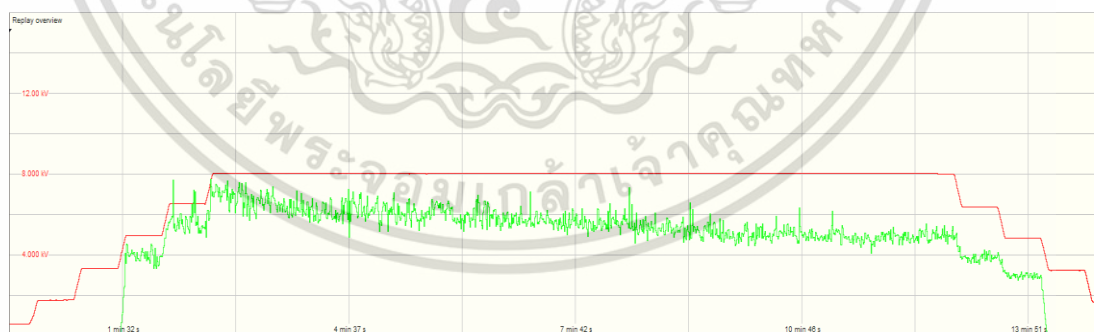
4.2.3 กรณีสแตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่ไม่นำไฟฟ้า

ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนสแตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่ไม่นำไฟฟ้าที่แรงดันทดสอบ 8.0 kV พบว่า PDIV = 4.8 kV, PDEV = 3.2 kV, PD magnitude (Q_{IEC}) = 2.704 nC รูปแบบดิสชาร์จที่จุดเชื่อมต่อของสารเคลือบกึ่งตัวนำกับสารเคลือบควบคุมความเครียดดังแสดงในรูปที่ 4.5 เนื่องจากผิวของฉนวนมีความสกปรก

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปแบบขนาดแรงดันทดสอบและขนาดของดิสชาร์จบางส่วนในรูปที่ 4.6 พบว่า ในช่วงเวลา 8 นาทีแรกของการทดสอบที่แรงดันทดสอบ ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนมีค่าแกว่งตัวเล็กน้อยแล้วจึงมีแนวโน้มขนาดที่ลดลงและคงที่



รูปที่ 4.5 รูปแบบ PRPD ของสแตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่ไม่นำไฟฟ้า



รูปที่ 4.6 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสแตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่ไม่นำไฟฟ้า

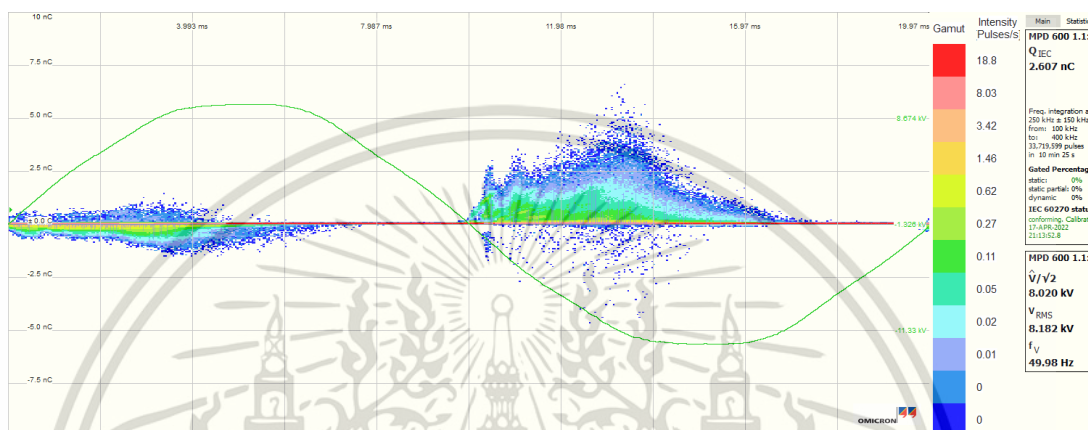
4.2.4 กรณีสแตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่นำไฟฟ้า

ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนสแตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่นำไฟฟ้าที่แรงดันทดสอบ 8.0 kV พบว่า PDIV = 4.8 kV, PDEV = 3.2 kV, PD magnitude (Q_{IEC}) = 2.607 nC

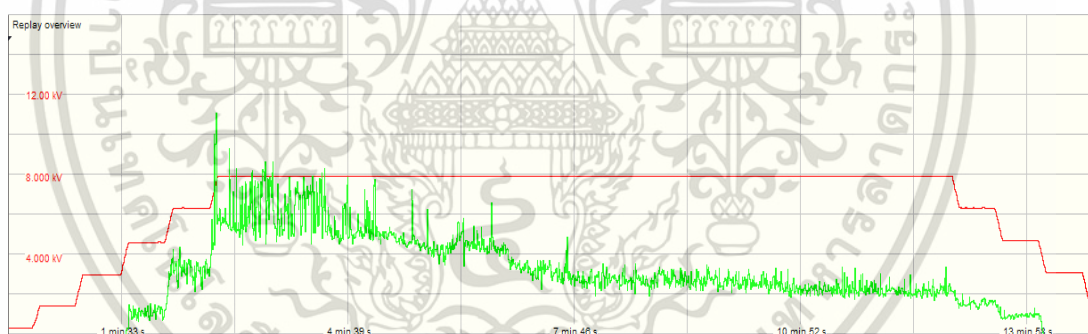
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบดิสชาร์จที่จุดเชื่อมต่อของสารเคลือบกึ่งตัวนำกับสารเคลือบควบคุมความเครียด ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากผิวของฉนวนมีความสกปรก

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปแบบขนาดแรงดันทดสอบและขนาดของดิสชาร์จบางส่วนในรูปที่ 4.8 พบว่า ในช่วงเวลา 2 นาทีแรกของการทดสอบที่แรงดันทดสอบ ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนมีค่าแกว่งตัวค่อนข้างมากแล้วจึงมีแนวโน้มขนาดที่ลดลงและคงที่



รูปที่ 4.7 รูปแบบ PRPD ของสเตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่นำไฟฟ้า



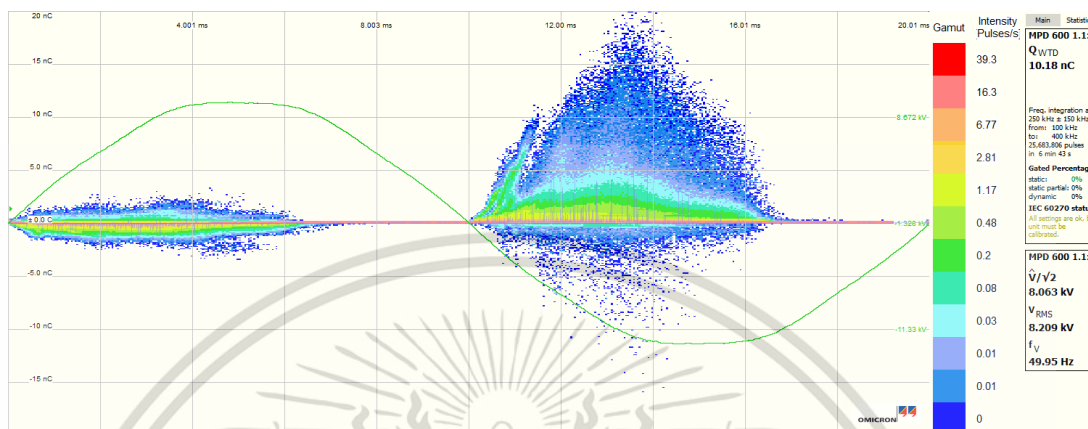
รูปที่ 4.8 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสเตเตอร์บาร์ได้รับสิ่งปนเปื้อนที่นำไฟฟ้า

4.2.5 กรณีสเตเตอร์บาร์ได้รับความเสียหายทางกล

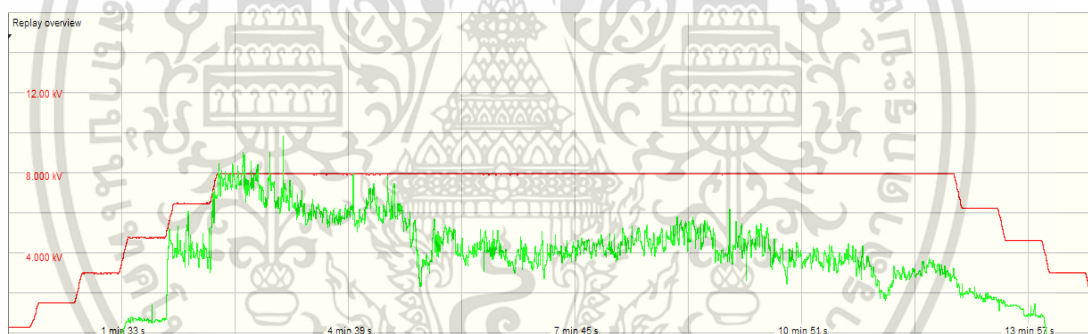
ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนสเตเตอร์บาร์ได้รับความเสียหายทางกลที่แรงดันทดสอบ 8.0 kV พบว่า PDIV = 3.2 kV, PDEV = 3.2 kV, PD magnitude (Q_{IEC}) = 10.18 nC รูปแบบดิสชาร์จจากภายในโพรงอากาศซึ่งอยู่ภายในของฉนวนกราวด์วอล์ร์ร่วมกับการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวนดังแสดงในรูปที่ 4.9 เนื่องจากฉนวนได้รับความเสียหายทางกลที่บริเวณผิวภายนอกของฉนวนหรือบริเวณเทพฉนวนกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปแบบขนาดแรงดันทดสอบและขนาดของดิสชาร์จบางส่วน ในรูปที่ 4.10 พบว่า ในช่วงเวลา 6 นาทีแรกของการทดสอบที่แรงดันทดสอบ ขนาดของดิสชาร์จ บางส่วนมีค่าแอมพลิจูดค่อนข้างมาก เมื่อเวลาผ่านไปแอมพลิจูดไม่คงที่ โดยมีแอมพลิจูดลดลง



รูปที่ 4.9 รูปแบบ PRPD ของสเตเตอร์บาร์ได้รับความเสียหายทางกล



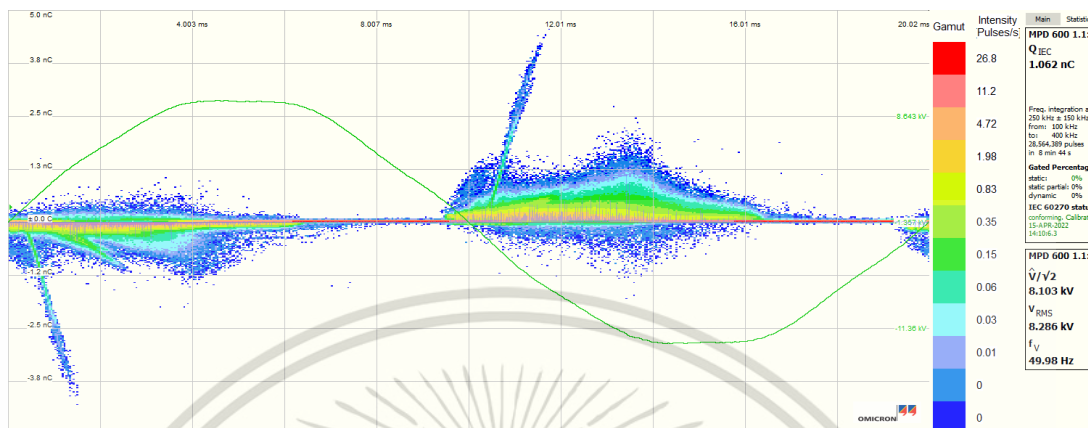
รูปที่ 4.10 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสเตเตอร์บาร์ได้รับความเสียหายทางกล

4.2.6 กรณีสเตเตอร์บาร์ได้รับความชื้นภายนอก

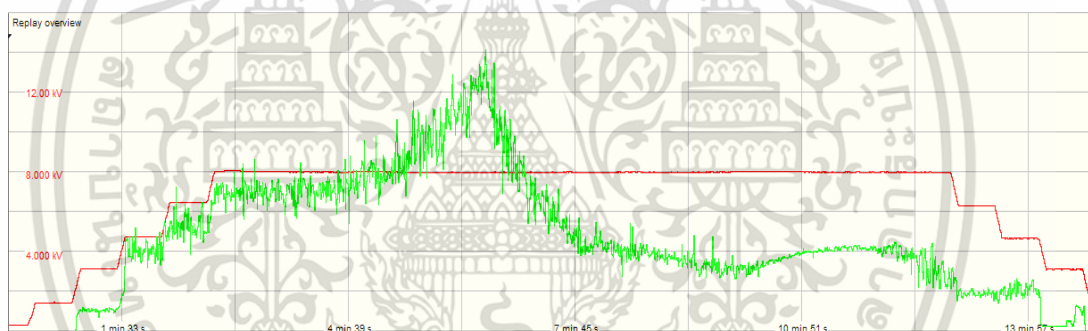
ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนสเตเตอร์บาร์ได้รับความเสียหายทางกลที่แรงดันทดสอบ 8.0 kV พบว่า PDIV = 3.2 kV, PDEV = 1.6 kV, PD magnitude (Q_{IEC}) = 1.062 nC รูปแบบดิสชาร์จบริเวณพื้นผิว/การเกิดรอยตามแนวแฉกส่วนที่ยื่นของขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เนื่องจากฉนวนได้รับความชื้นภายนอกส่งผลให้เกิดความนำไฟฟ้าบริเวณผิวของขดลวด ทั้งในส่วนที่อยู่ในร่องสล๊อตจำลองและส่วนที่ยื่นออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปแบบขนาดแรงดันทดสอบและขนาดของดิสชาร์จบางส่วนในรูปที่ 4.12 พบว่า ในช่วงเวลา 8 นาทีแรกของการทดสอบที่แรงดันทดสอบ ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนมีค่าแกว่งตัวมากแล้วจึงมีแนวโน้มขนาดที่ลดลงและคงที่



รูปที่ 4.11 รูปแบบ PRPD ของสเตรเตอร์บาร์ได้รับความชื้นภายนอก



รูปที่ 4.12 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วนของสเตรเตอร์บาร์ได้รับความชื้นภายนอก

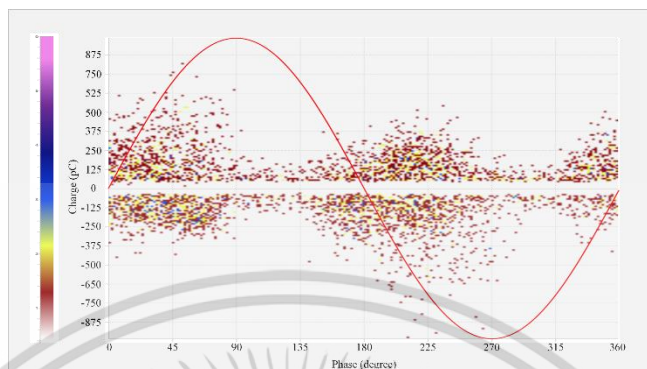
4.3 ผลการทดสอบวัตดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตรเตอร์ภาคสนาม

4.3.1 ผลการทดสอบวัตดิสชาร์จบางส่วนกรณี Gen A

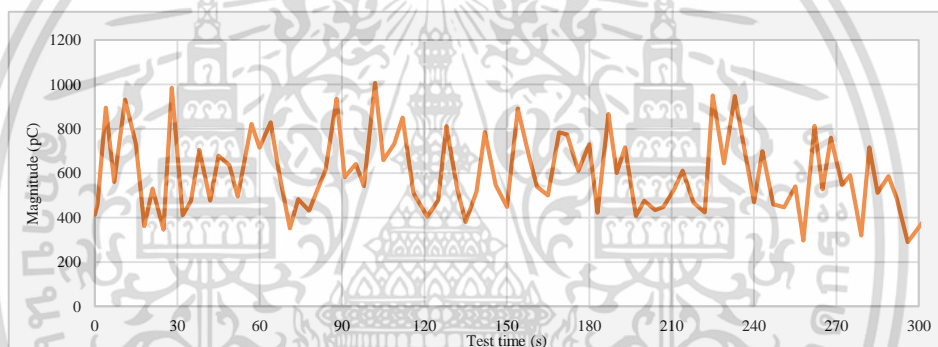
ผลการทดสอบวัตดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตรเตอร์ภาคสนามกรณี Gen A พบว่า รูปแบบ PRPD แสดงถึงการดิสชาร์จบางส่วนภายในโพรงอากาศซึ่งอยู่ภายในของฉนวนกราวนด์วอลล์ซึ่งถือเป็นปกติสำหรับฉนวนขดลวดสเตรเตอร์ที่ถูกใช้งานมาแล้วกว่า 20 ปี โดยมีขนาดดิสชาร์จบางส่วนประมาณ $Q_{avg} = 600$ pC ดังแสดงในรูปที่ 4.13

เมื่อพิจารณาขนาดประจุดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตรเตอร์ในรูปที่ 4.14 พบว่าที่แรงดันทดสอบขนาดของดิสชาร์จบางส่วนมีความผันผวนอย่างมากตลอดช่วงเวลาทดสอบ 5 นาที ซึ่งมีแกว่งตัวของค่าต่ำสุดและค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 700 pC โดยที่มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

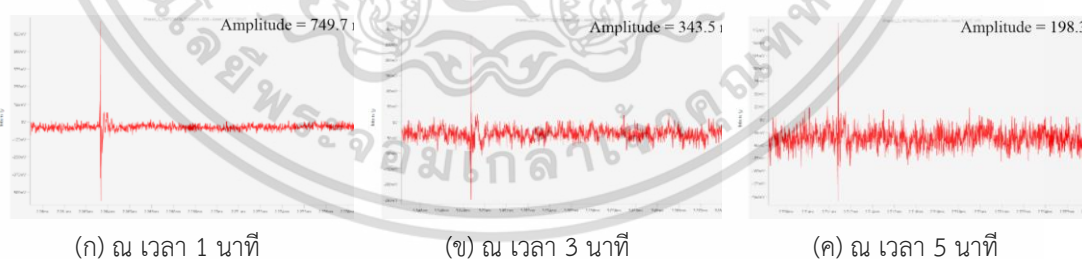
สำหรับรูปร่างสัญญาณพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนที่เวลา 1, 3 และ 5 นาทีที่มีแอมพลิจูดของขนาดประจุที่ลดลง คือ 749.7, 343.5, และ 198.3 mV ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Gen A



รูปที่ 4.14 ขนาดประจุดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ Gen A



รูปที่ 4.15 รูปร่างสัญญาณพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน Gen A

4.3.2 ผลการทดสอบวัตดิสชาร์จบางส่วนกรณี Gen B

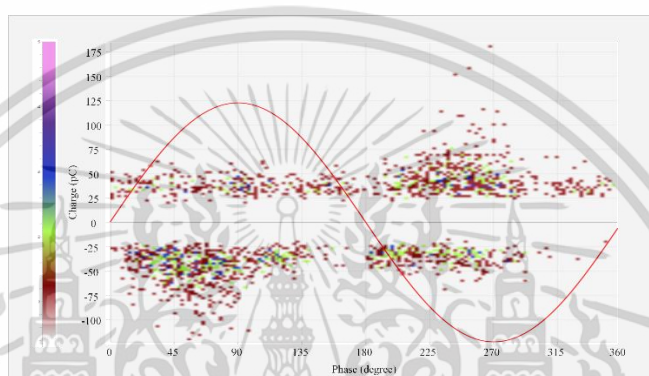
ผลการทดสอบวัตดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนามกรณี Gen B พบว่า รูปแบบ PRPD แสดงถึงการดิสชาร์จบางส่วนภายในโพรงอากาศซึ่งอยู่ภายในของฉนวนกราวนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

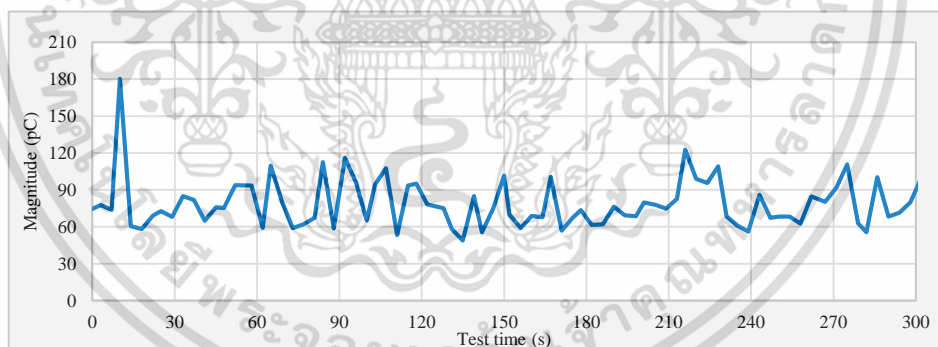
วอลต์ซึ่งถือเป็นปกติสำหรับฉนวนขดลวดสเตเตอร์ที่ถูกใช้งานมานาน โดยมีขนาดดิสชาร์จบางส่วน ประมาณ $Q_{avg} = 100$ pC ดังแสดงในรูปที่ 4.16

เมื่อพิจารณาขนาดประจุดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ในรูปที่ 4.17 พบว่าที่ แรงดันทดสอบขนาดของดิสชาร์จบางส่วนมีความผันผวนอย่างมากตลอดช่วงเวลาทดสอบ 30 วินาที แรก ก่อนที่จะเริ่มคงที่ในช่วงเวลาที่ 2 ถึง 5 นาทีต่อมาโดยที่มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

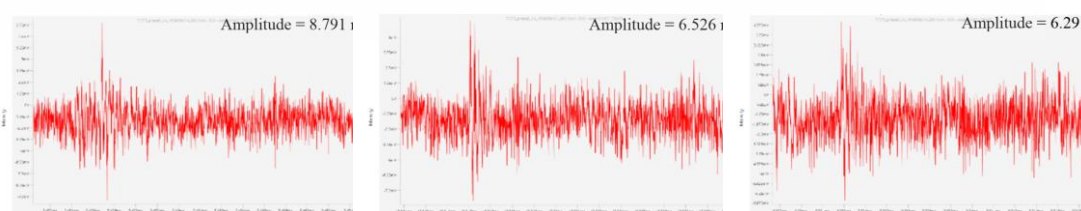
สำหรับรูปร่างสัญญาณพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนที่เวลา 1, 3 และ 5 นาทีที่มีแนวโน้ม ของขนาดประจุที่ลดลง คือ 8.791, 6.526 และ 6.291 mV ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.16 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Gen B



รูปที่ 4.17 ขนาดประจุดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ Gen B



(ก) ณ เวลา 1 นาที

(ข) ณ เวลา 3 นาที

(ค) ณ เวลา 5 นาที

รูปที่ 4.18 รูปร่างสัญญาณพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน Gen B

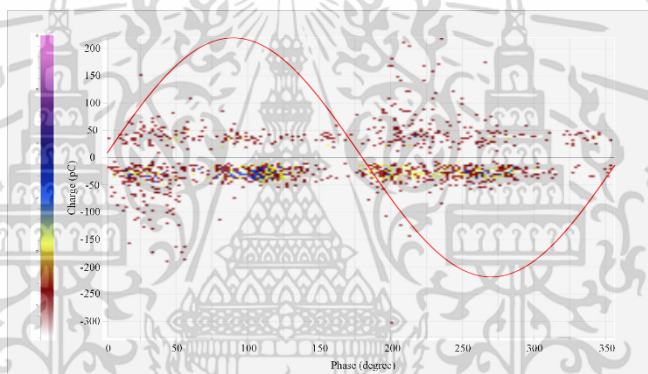
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนกรณี Gen C

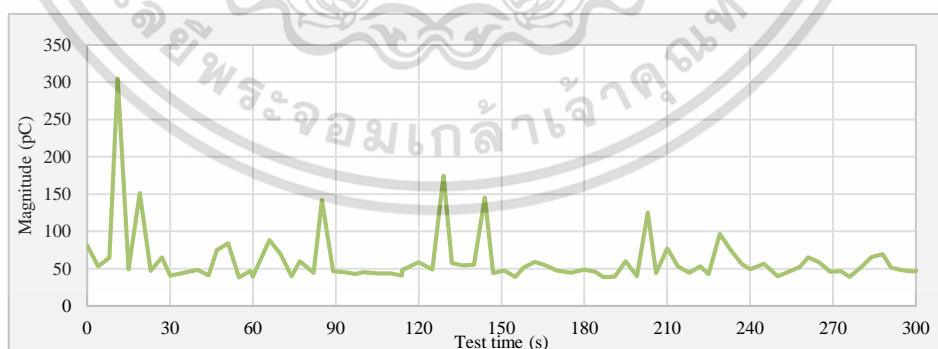
ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์ภาคสนามกรณี Gen C พบว่า รูปแบบ PRPD แสดงถึงการดิสชาร์จบางส่วนภายในโพรงอากาศซึ่งอยู่ภายในของฉนวนกราวด์วอลล์และแสดงถึงการแยกชั้นของฉนวนกราวด์วอลล์ค่อนข้างชัดเจน โดยมีขนาดดิสชาร์จบางส่วนประมาณ $Q_{avg} = 150$ pC ดังแสดงในรูปที่ 4.19

เมื่อพิจารณาขนาดประจุดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ในรูปที่ 4.20 พบว่าที่แรงดันทดสอบขนาดของดิสชาร์จบางส่วนมีความผันผวนอย่างมากตลอดช่วงเวลาทดสอบ 30 วินาทีแรก ก่อนที่จะเริ่มคงที่ในช่วงเวลาที่ 1 ถึง 5 นาทีต่อมา

สำหรับรูปร่างสัญญาณพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนที่เวลา 1, 3 และ 5 นาทีที่มีแอมพลิจูดของขนาดประจุที่ลดลง คือ 41.1, 8.12 และ 6.73 mV ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.21

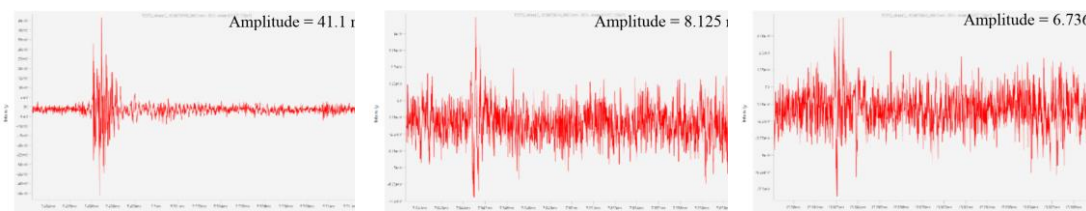


รูปที่ 4.19 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Gen C



รูปที่ 4.20 ขนาดประจุดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ Gen C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ณ เวลา 1 นาที

(ข) ณ เวลา 3 นาที

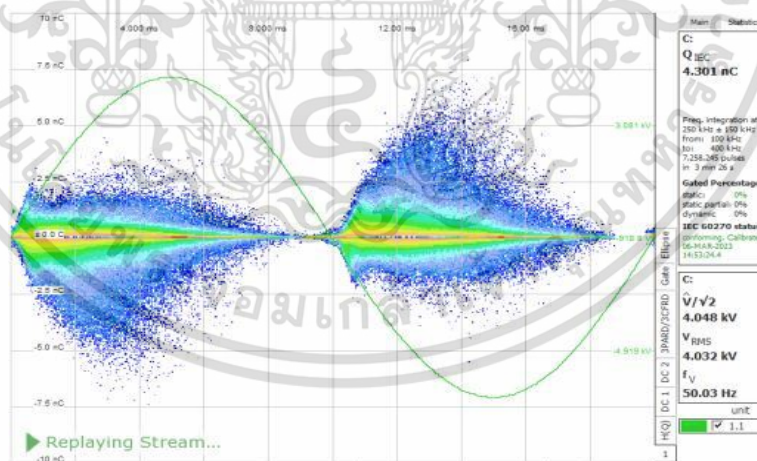
(ค) ณ เวลา 5 นาที

รูปที่ 4.21 รูปร่างสัญญาณพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วน Gen C

4.3.4 ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนกรณี Motor A

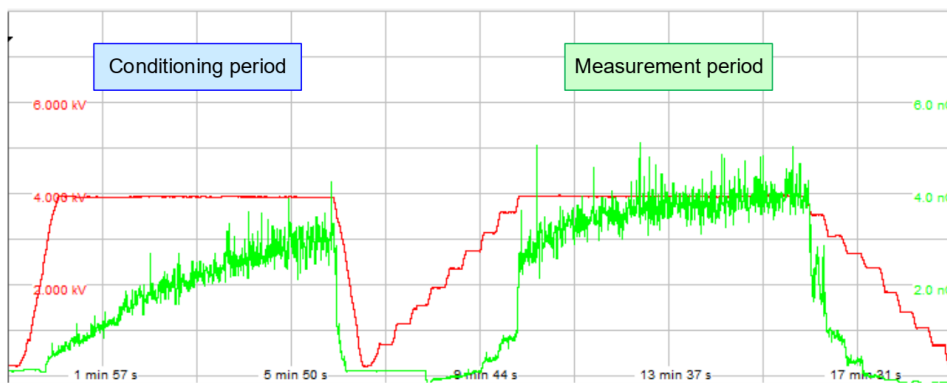
ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนสเตเตอร์บาร์ภาคสนามกรณี Motor A ที่แรงดันทดสอบ 4.0 kV พบว่า PDIV = 2.04 kV, PDEV = 1.95 kV, PD magnitude (Q_{EC}) = 4.301 nC รูปแบบดิสชาร์จบางส่วนเป็นการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 เนื่องจากฉนวนได้รับความร้อนสูงซึ่งถือเป็นรูปแบบที่สามารถเกิดขึ้นได้กับฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ และมีขนาดที่ไม่สูงมาก สามารถยอมรับได้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปแบบขนาดแรงดันทดสอบและขนาดของดิสชาร์จบางส่วนในรูปที่ 4.23 พบว่า ในช่วงเวลา 5 นาทีแรกของการทดสอบที่แรงดันทดสอบ ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และคงที่ในเวลา 10 ของการทดสอบ



รูปที่ 4.22 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Motor A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



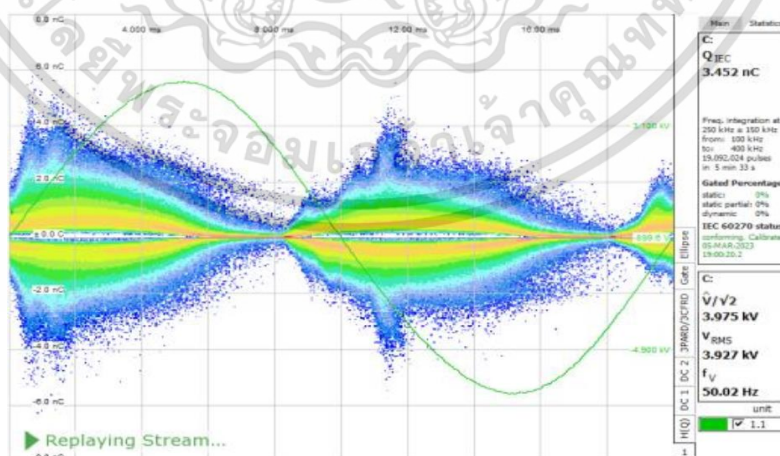
$Q_{IEC} @U_0$: 1 min = 3.65 nC, 5 min = 4.34 nC, 10 min = 4.301 nC

รูปที่ 4.23 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วน Motor A

4.3.5 ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนกรณี Motor B

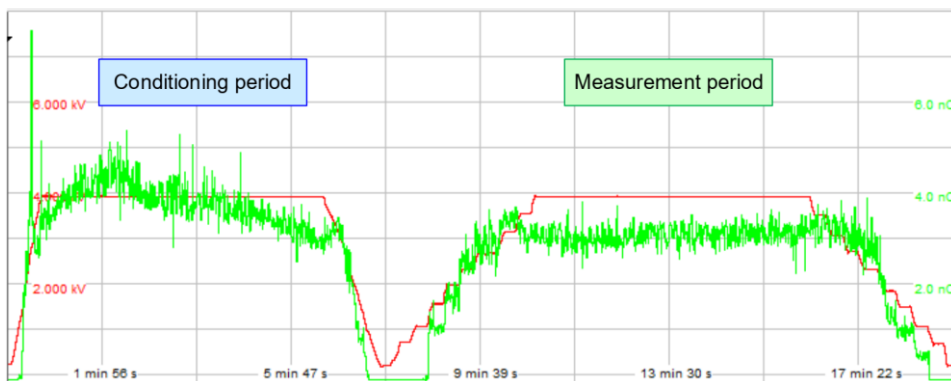
ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนสเตเตอร์บาร์ภาคสนามกรณี Motor B ที่แรงดันทดสอบ 4.0 kV พบว่า PDIV = 1.37 kV, PDEV = 1.14 kV, PD magnitude (Q_{IEC}) = 3.452 nC รูปแบบดิสชาร์จบางส่วนเป็นการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวนร่วมกับการดิสชาร์จเนื่องจากการแยกชั้นของฉนวนกราวด์วอลล์ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 เนื่องจากฉนวนได้รับความร้อนสูง แต่เนื่องด้วยมีขนาดที่ไม่สูงมาก สามารถยอมรับได้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปแบบขนาดแรงดันทดสอบและขนาดของดิสชาร์จบางส่วนในรูปที่ 4.25 พบว่า ในช่วงเวลา 5 นาทีแรกของการทดสอบที่แรงดันทดสอบ ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนมีค่าสูงสุดและมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งคงที่ในเวลา 10 ของการทดสอบ



รูปที่ 4.24 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Motor B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



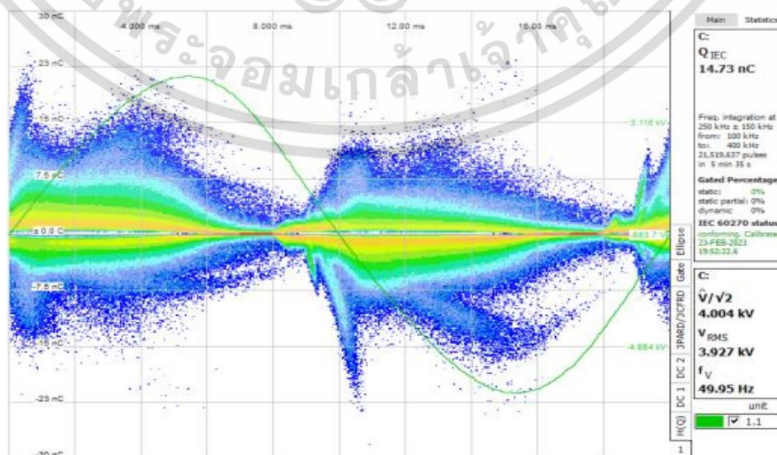
$Q_{IEC} @U_0$: 1 min = 3.12 nC, 5 min = 3.20 nC, 10 min = 3.45 nC

รูปที่ 4.25 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วน Motor B

4.3.6 ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนกรณี Motor C

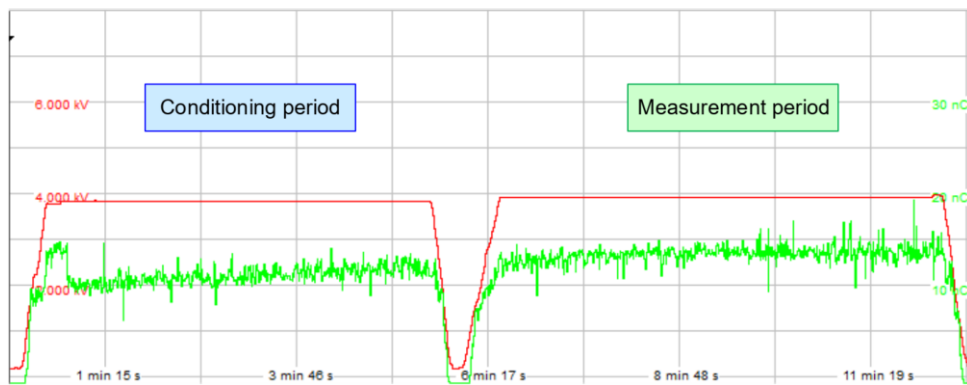
ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนสเตเตอร์บาร์ภาคสนามกรณี Motor C ที่แรงดันทดสอบ 4.0 kV พบว่า PDIV = 1.06 kV, PDEV = 0.82 kV, PD magnitude (Q_{IEC}) = 14.73 nC รูปแบบดิสชาร์จบางส่วนเป็นการดิสชาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวนร่วมกับการดิสชาร์จบริเวณผิวส่วนปลายของขดลวด ดังแสดงในรูปที่ 4.26 เนื่องจากฉนวนมีความสกปรกบริเวณปลายขดลวดหรืออาจจะเกิดจากความชื้นประกอบกับระยะห่างระหว่างปลายขดลวดกับวัตถุนำไฟฟ้าอื่น แต่เนื่องด้วยมีขนาดที่ไม่สูงมาก สามารถยอมรับได้

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณารูปแบบขนาดแรงดันทดสอบและขนาดของดิสชาร์จบางส่วนในรูปที่ 4.27 พบว่า ในช่วงเวลา 5 นาทีแรกของการทดสอบที่แรงดันทดสอบ ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนมีต่ำและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งคงที่ในเวลา 6 ของการทดสอบ



รูปที่ 4.26 รูปแบบ PRPD ในขดลวดสเตเตอร์ Motor C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$Q_{IEC} @ U_0$: 1 min = 13.88 nC, 5 min = 13.98 nC, 10 min = 14.73 nC

รูปที่ 4.27 ขนาดแรงดันและดิสชาร์จบางส่วน Motor C

4.4 ผลการทดสอบเพื่อบำรุงรักษาเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ด้วยการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

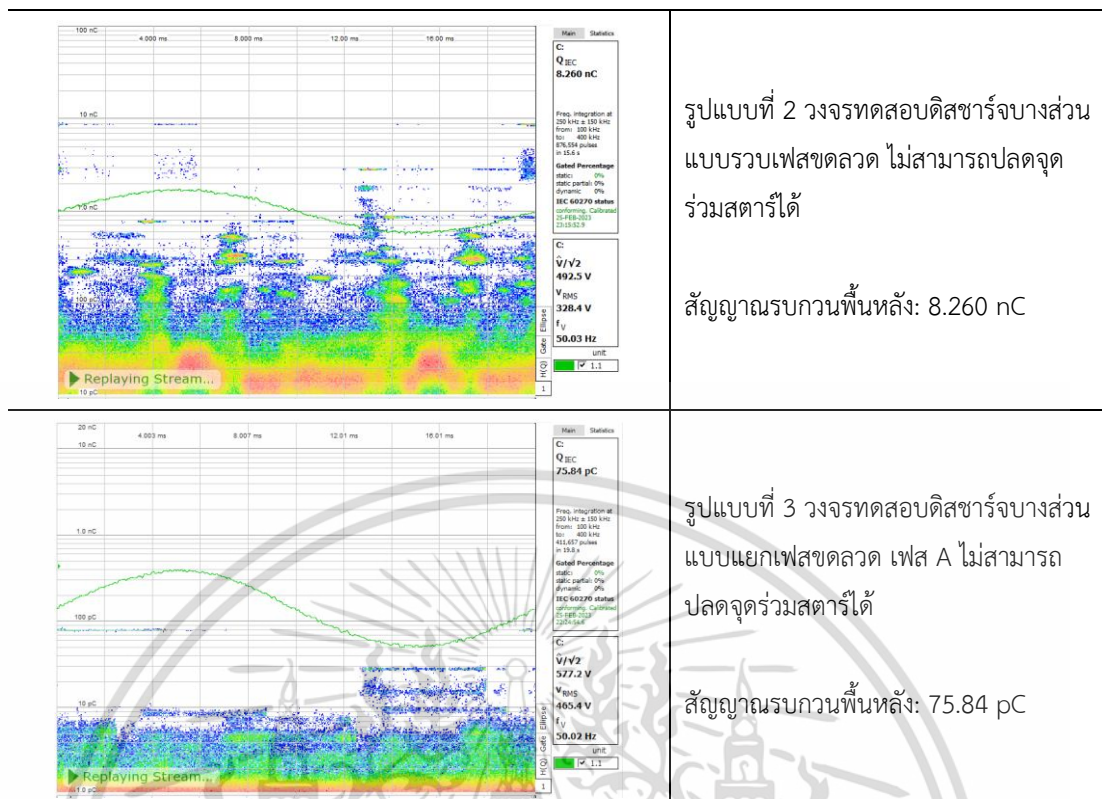
4.4.1 ผลของสัญญาณรบกวน เมื่อมีการต่อวงจรทดสอบที่แตกต่างกัน

จากผลการบันทึกสัญญาณรบกวนพื้นหลัง ของการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ Primary Air Fan ซึ่งมีการทดลองต่อวงจรที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ที่เฟส A ได้ผลตามตารางที่ 4.2 ซึ่งจะพบว่า การต่อวงจรรูปแบบที่ 1 สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนพื้นหลังจากแหล่งจ่ายแรงดันไปยังระบบวัดได้ดีที่สุด มีค่าเพียง $Q_{IEC} = 11.57 \text{ pC}$ ซึ่งต่ำเทียบเท่ากับสัญญาณรบกวนพื้นหลังในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากผลของค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดซึ่งทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงออกก่อนที่เครื่องมือวัดจะตรวจวัดสัญญาณที่ตำแหน่งปลายขดลวดอีกด้าน

ตารางที่ 4.2 สัญญาณรบกวนพื้นหลังเมื่อมีการต่อวงจรทดสอบที่แตกต่างกัน

รูปแบบ PRPD	ผลสัญญาณรบกวนพื้นหลัง
	<p>รูปแบบที่ 1 วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบแยกเฟสขดลวด เฟส A</p> <p>สัญญาณรบกวนพื้นหลัง: 11.57 pC</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาสัญญาณรบกวนพื้นหลังของวงจรรูปแบบที่ 2 ซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมใช้ในกรณีที่ไม่สามารถแยกจุดร่วมสตาร์ได้ จะพบว่ามีค่าสูงมากกว่า $Q_{IEC} = 8 \text{ nC}$ ซึ่งถือว่าเป็นระดับที่ส่งผลให้ผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนมีความน่าเชื่อถือที่ลดลง เนื่องจากสัญญาณรบกวนอาจทับซ้อนสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนซึ่งอาจมีขนาดที่ต่ำกว่าจนส่งผลให้การนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์หรือตัดสินใจต่อไปได้ยากและขาดความน่าเชื่อถือหรือเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้น กรณีที่ไม่สามารถแยกจุดร่วมสตาร์ออกจากกันทั้งสามเฟสได้นั้น การต่อวงจรทดสอบรูปแบบที่ 3 เป็นวิธีที่นอกจากจะช่วยลดทอนสัญญาณรบกวนผ่านความเหนียวของขดลวดในลักษณะเดียวกับรูปแบบที่ 1 แล้วยังสามารถวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบแยกเฟสได้อีกด้วย

4.4.2 ผลทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วน เมื่อมีการต่อวงจรทดสอบที่แตกต่างกัน

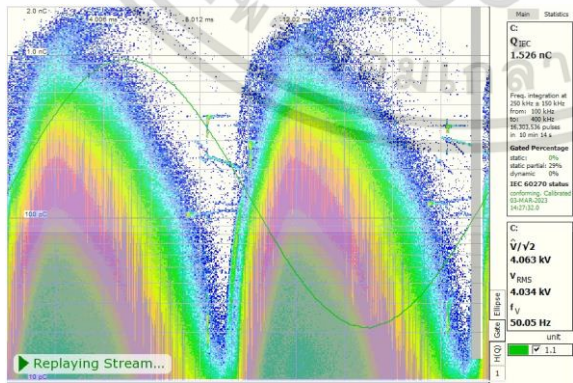
จากผลการบันทึกสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์ของมอเตอร์ Primary Air Fan ซึ่งมีการทดลองต่อวงจรที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ด้วยการทดสอบวัดที่ขดลวดเฟส A ด้วยแรงดันทดสอบ 4.0 kV พบว่า รูปแบบ PRPD ของวงจรทดสอบแต่ละแบบมีผลไม่แตกต่างกัน ซึ่งปรากฏการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการแยกชั้นหรือมีโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวนกราวด์วอลล์ (Internal delamination) นอกจากนี้ PDIV และ PDEV ของการทดลองต่อวงจรที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ มีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 2.40 kV และ 2.30 kV ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

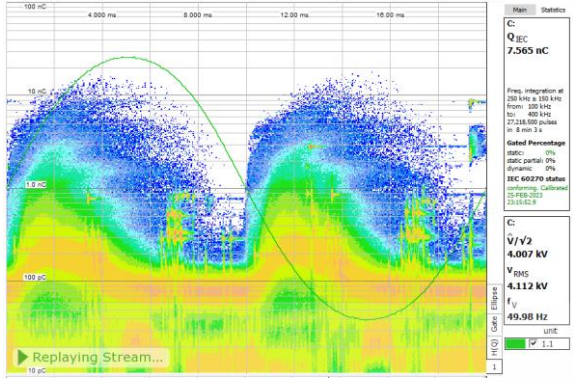
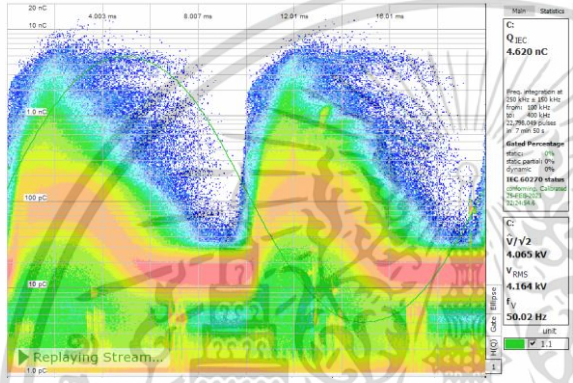
เมื่อพิจารณาขนาดของดิสชาร์จบางส่วน พบว่า การทดลองด้วยวงจรรูปแบบที่ 1 มีขนาดของ PD (Q_{IEC}) เท่ากับ 1.526 nC, วงจรรูปแบบที่ 3 มีขนาดของ PD เท่ากับ 4.620 nC และวงจรรูปแบบที่ 2 มีขนาดของ PD เท่ากับ 7.565 nC เมื่อเรียงลำดับจากน้อยไปมาก ซึ่งอาจเกิดจากวงจรรูปแบบที่ 1 นั้นเป็นผลการดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากการทดสอบขดลวดเฟส A อย่างแท้จริง โดยที่ไม่เกี่ยวข้องกัขดลวดเฟสอื่นๆ ในทางกลับกันการต่อวงจรรูปแบบที่ 3 ผลของดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้ย่อมได้รับผลที่เกิดจากขดลวดเฟส B ซึ่งเป็นขดลวดที่รับแรงดันทดสอบและวัดที่ปลายของขดลวดเฟส A ในทำนองเดียวกันนั้น ผลของดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดของแต่ละเฟสจะถูกวัดรวมกับเมื่อมีการต่อวงจรรูปแบบที่ 2 ด้วยการจ่ายแรงดันทดสอบ และติดตั้งตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ตำแหน่งปลายขดลวดพร้อมกันทั้งสามเฟส ส่งผลให้ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากวงจรรูปแบบที่ 2 มีค่าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอีกสองรูปแบบ

ดังนั้น การต่อวงจรรูปแบบที่ 1 กรณีที่วงจรทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแบบแยกเฟสขดลวดได้เป็นรูปแบบที่น่าเชื่อถือที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบที่ 3 และรูปแบบที่ 2 ตามลำดับ ทั้งความสามารถในการกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูง และขนาดของประจุดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้มีความน่าเชื่อถือเมื่อพิจารณาด้วยหลักความเป็นเหตุเป็นผล อีกทั้งการต่อวงจรในรูปแบบที่ 1 ยังเป็นไปตามที่มาตรฐาน IEC60034-27-1 ระบุไว้ แต่ในกรณีที่วัตถุทดสอบไม่สามารถแยกจตุรร่วมสตาร์ได้ การเลือกต่อวงจรทดสอบรูปแบบที่ 3 เป็นวิธีที่น่าเชื่อถือและมีประสิทธิภาพกว่ารูปแบบที่ 2 ซึ่งจากประสบการณ์ของผู้เขียน การทดสอบด้วยวงจรรูปแบบที่ 2 นั้นได้รับความนิยมในทางปฏิบัติอย่างมาก ในกรณีที่ไม่สามารถปลดแยกจตุรร่วมสตาร์ได้

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วน เมื่อมีการต่อวงจรทดสอบที่แตกต่างกัน

รูปแบบ PRPD	สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน
	<p>รูปแบบที่ 1</p> <p>ขดลวดสเตเตอร์: เฟส A</p> <p>แรงดันทดสอบ: 4.0363 kV</p> <p>ขนาดของ PD: 1.526 nC</p> <p>PDIV: 2.44 kV</p> <p>PDEV: 2.39 kV</p> <p>รูปแบบของ PD: Internal delamination</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบ PRPD	สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน
	<p>รูปแบบที่ 2</p> <p>ขดลวดสเตเตอร์: เฟส A</p> <p>แรงดันทดสอบ: 4.007 kV</p> <p>ขนาดของ PD: 7.565 nC</p> <p>PDIV: 2.40 kV</p> <p>PDEV: 2.04 kV</p> <p>รูปแบบของ PD: Internal delamination</p>
	<p>รูปแบบที่ 3</p> <p>ขดลวดสเตเตอร์: เฟส A</p> <p>แรงดันทดสอบ: 4.065 kV</p> <p>ขนาดของ PD: 4.620 nC</p> <p>PDIV: 2.44 kV</p> <p>PDEV: 2.44 kV</p> <p>รูปแบบของ PD: Internal delamination</p>

4.4.3 ผลทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนขดลวดแต่ละเฟส

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของแรงดันทดสอบเทียบกับขนาดของดิสชาร์จบางส่วน ในตารางที่ 4.4 พบว่า ช่วงปรับสภาพ (conditioning period) มีการแกว่งตัวของขนาดดิสชาร์จบางส่วนอย่างชัดเจน และเริ่มคงที่ในช่วงการวัด (measurement period) หรือช่วงเวลาหลังจาก 5 – 10 นาทีเป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการบันทึกผลการทดสอบ ส่วนรูปแบบ PRPD ของขดลวดเฟส A และ B เป็นการดิสชาร์จเกิดจากการแยกชั้นหรือมีโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวนกราวด์วอลล์ ซึ่งเป็นการดิสชาร์จภายในฉนวนของขดลวดเมื่อพิจารณาประกอบกับขนาดของประจุดิสชาร์จบางส่วนอยู่ในระดับที่ค่อนข้างต่ำ ถือได้ว่าเป็นสภาพปกติของระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ ที่ปรากฏรูปแบบการดิสชาร์จประเภทนี้ตั้งแต่หลังจากกระบวนการผลิต หรือก่อนเริ่มใช้งาน ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1 จึงสามารถประเมินได้ว่าระบบฉนวนของขดลวดเฟส A และ B มีความปกติตามอายุการใช้งาน

เมื่อพิจารณารูปแบบ PRPD ของขดลวดเฟส C พบว่าเป็นการดิสชาร์จที่เกิดจากการแยกชั้นหรือมีโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวนกราวด์วอลล์ร่วมกับการดิสชาร์จที่ผิวภายนอกของฉนวนขดลวดสเตเตอร์ เมื่อพิจารณาขนาดประจุดิสชาร์จบางส่วนที่มีค่าสูงกว่า 30 nC และมีแนวโน้มที่คงที่ ณ ช่วงเวลาการวัด ถึงแม้ว่าในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานหรือเกณฑ์ที่ระบุระดับความรุนแรงหรือการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

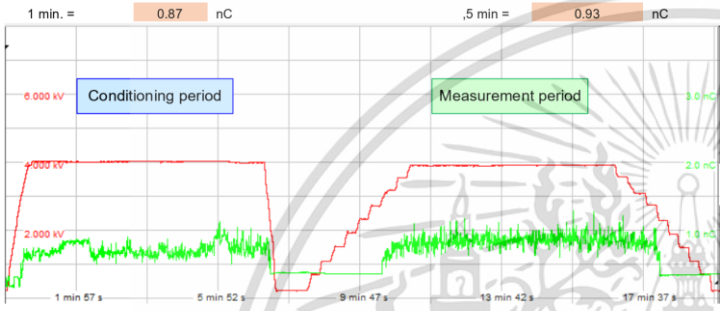
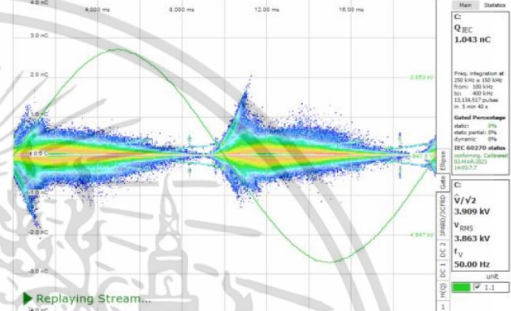
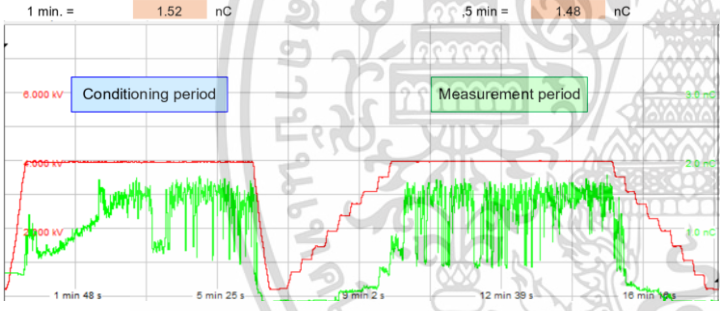
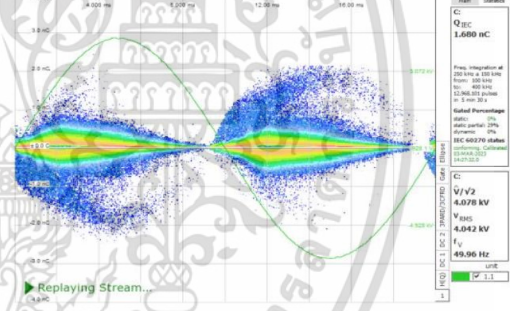
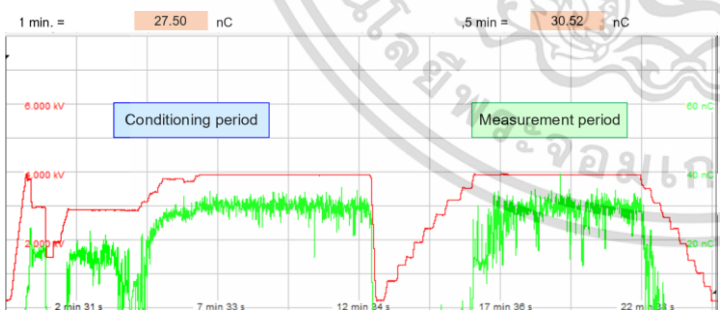
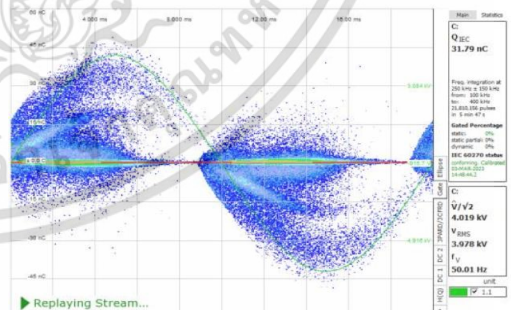
ยอมรับได้ของขนาดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์อย่างเป็นทางการ ในทางปฏิบัตินั้น จำเป็นต้องตัดสินใจจากข้อมูลผลการทดสอบด้วยหลักวิศวกรรม เพื่อให้ป้องกันการเกิดความล้มเหลวหรือข้อผิดพลาดของเครื่องจักรเมื่อถูกนำเข้าสู่ระบบกระบวนการผลิต

ระบบฉนวนของขดลวดเฟส C นี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของขดลวดเฟส A และ B มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด จึงสามารถประเมินได้ว่า มีความผิดปกติและไม่สามารถยอมรับได้ จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขปัญหาหรือการซ่อมบำรุงก่อนนำเครื่องจักรเข้าระบบใช้งาน ทั้งนี้มีหลายปัจจัยที่จำเป็นต้องพิจารณาร่วมถึงความจำเป็นหรือความเป็นไปได้ของการซ่อมบำรุง เช่น ระยะเวลาที่สามารถนำเครื่องจักรออกจากระบบจนกระทั่งนำกลับเข้าติดตั้งเพื่อใช้งาน ปัจจัยเรื่องของอะไหล่หรือแรงงานที่สามารถซ่อมบำรุงแก้ไขปัญหาดังกล่าว วิธีการค้นหาและระบุสาเหตุความผิดปกติที่เกิดขึ้นซึ่งมีความยากซับซ้อนที่แตกต่างกัน และปัจจัยด้านงบประมาณค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการแก้ไข ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ผู้ใช้งานจำเป็นต้องรับความเสี่ยงที่เกิดขึ้น

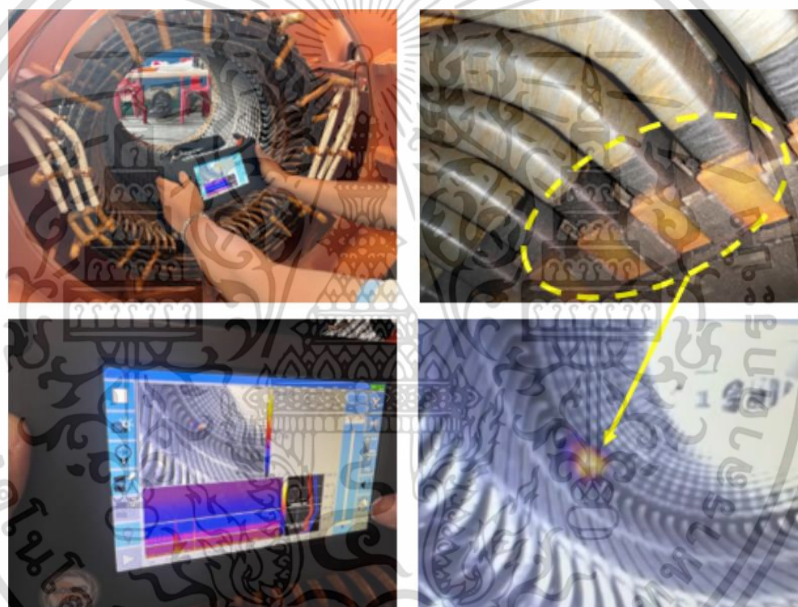
4.4.4 การซ่อมบำรุงจากการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนของขดลวดสเตเตอร์

หลังพบว่ามีความผิดปกติเกิดขึ้นที่ระบบฉนวนของขดลวดเฟส C จากผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนตามตารางที่ 4.4 เมื่อพิจารณาจากรูปแบบของ PRPD แล้วพบว่าเป็นการดิสชาร์จที่เกิดจากการแยกชั้นหรือมีโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวนกราวด์วอล์ร์ร่วมกับการดิสชาร์จที่ผิวภายนอกของฉนวนขดลวดสเตเตอร์ ด้วยขนาดของประจุดิสชาร์จบางส่วนที่สูงกว่า 30 nC เมื่อเปรียบเทียบกับเฟสอื่นๆ ถือว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น จำเป็นต้องระบุตำแหน่งของความผิดปกติที่เกิดขึ้นต่อไป

ตารางที่ 4.4 ผลทดสอบวัตติสชาร์จบางส่วน รูปแบบแรงดันทดสอบ และรูปแบบ PRPD ของมอเตอร์ Primary Air Fan ที่แรงดันทดสอบ $U_0 = 4.0$ kV

Phase	รูปแบบแรงดันทดสอบและขนาดของ PD	รูปแบบ PRPD	
Phase A	 <p>1 min. = 0.87 nC, 5 min. = 0.93 nC</p> <p>Conditioning period: 0.000 kV, 2.000 kV</p> <p>Measurement period: 2.0 nC, 1.0 nC</p>	 <p>Q_{IEC}: 1.043 nC</p> <p>PDIV: 2.44 kV</p> <p>PDEV: 2.44 kV</p> <p>รูปแบบ PRPD: Internal delamination</p>	<p>ขนาดของ PD (Q_{IEC}): 0.93 nC</p> <p>PDIV: 2.44 kV</p> <p>PDEV: 2.44 kV</p> <p>รูปแบบ PRPD: Internal delamination</p>
Phase B	 <p>1 min. = 1.52 nC, 5 min. = 1.48 nC</p> <p>Conditioning period: 0.000 kV, 2.000 kV</p> <p>Measurement period: 2.0 nC, 1.0 nC</p>	 <p>Q_{IEC}: 1.680 nC</p> <p>PDIV: 2.40 kV</p> <p>PDEV: 2.11 kV</p> <p>รูปแบบ PRPD: Internal delamination</p>	<p>ขนาดของ PD (Q_{IEC}): 1.48 nC</p> <p>PDIV: 2.40 kV</p> <p>PDEV: 2.11 kV</p> <p>รูปแบบ PRPD: Internal delamination</p>
Phase C	 <p>1 min. = 27.50 nC, 5 min. = 30.52 nC</p> <p>Conditioning period: 0.000 kV, 2.000 kV</p> <p>Measurement period: 40 nC, 20 nC</p>	 <p>Q_{IEC}: 31.79 nC</p> <p>PDIV: 2.41 kV</p> <p>PDEV: 2.39 kV</p> <p>รูปแบบ PRPD: Internal delamination discharge at silicon carbide junction</p>	<p>ขนาดของ PD (Q_{IEC}): 30.5 nC</p> <p>PDIV: 2.41 kV</p> <p>PDEV: 2.39 kV</p> <p>รูปแบบ PRPD: Internal delamination discharge at silicon carbide junction</p>

การระบุตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์นั้นมีความยากกว่าการระบุตำแหน่งดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์อื่นๆ เช่น สายเคเบิล, หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นต้น เนื่องจากขดลวดในหนึ่งเฟสของขดลวดสเตเตอร์มีความยาวและการจัดเรียงภายในร่องสลีตที่ซับซ้อนมาก โดยทั่วไปแล้วในทางปฏิบัติมักใช้การตรวจสอบด้านกายภาพด้วยสายตาหรือการตรวจสอบลิ้มในแต่ละร่องสลีต หรือแม้แต่การค้นหาร่องรอยการดิสชาร์จที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นวิธีที่ยากใช้เวลานานและมีประสิทธิภาพต่ำ ส่งผลให้การแก้ไขปัญหาเป็นไปได้ล่าช้าและอาจไม่ตรงประเด็น ในการทดลองครั้งนี้จึงได้นำเทคโนโลยีสมัยใหม่ คือ กล้องสัญญาณเสียง (Acoustic Camera) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ดังแสดงในรูปที่ 4.28 โดยอาศัยกล้องถ่ายภาพเสียงที่มีความสามารถรับคลื่นเสียงที่มีความต่ำจนถึงอัลตราซาวด์ จากนั้นประมวลผลจากเสียงในรูปแบบต่างๆ ให้อยู่ในของภาพ



รูปที่ 4.28 ตำแหน่งดิสชาร์จบางส่วนตรวจจับด้วยกล้องสัญญาณเสียง

เมื่อสามารถระบุตำแหน่ง สาเหตุ และความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้แล้ว ผู้ใช้งานสามารถนำข้อมูลเหล่านี้เพื่อประเมินและวางแผนการซ่อมบำรุงต่อไปได้ ในกรณีนี้ ด้วยระดับความรุนแรงของขนาดดิสชาร์จบางส่วนที่สูงประกอบกับระยะเวลาในการหยุดระบบผลิต จึงสามารถตัดสินใจนำมอเตอร์เข้าดำเนินการแก้ไขด้วยการพันฉนวนหรือเทปฉนวนกึ่งตัวนำบริเวณที่ปลายของร่องสลีตซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงได้ง่าย เนื่องจากเป็นบริเวณซ้อนทับของวัสดุฉนวนต่างชนิด คือ เทปฉนวนกึ่งตัวนำกับซิลิโคนคาร์ไบด์ หากวัสดุทั้งสองชนิดนี้เสียหายหรือมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ย่อมส่งผลต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ไม่สามารถควบคุมได้เกิดเป็นจุดอ่อนของระบบฉนวน เมื่อได้รับแรงดันสูงขณะใช้งานจะแสดงอาการความผิดปกติในรูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนและพัฒนาเกิดเป็นการเบรกดาวนได้在最

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบวัตติสซาร์จบางส่วนเพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของการเกิดดิสซาร์จบางส่วนในระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุน ตั้งแต่หลังเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตจากโรงงานเพื่อศึกษาเกี่ยวกับจุดบกพร่องและคุณลักษณะของดิสซาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์โดยส่วนใหญ่เป็นการดิสซาร์จภายในโพรงอากาศระหว่างเนื้อฉนวน อันเนื่องจากฉนวนยังไม่สามารถปรับสภาพอยู่ตัวได้หลังจากผ่านกระบวนการเรซินริช โดยที่น้ำยายังไม่สามารถเข้าไปแทนที่โพรงอากาศภายในเนื้อฉนวนได้อย่างสมบูรณ์ซึ่งเกิดขึ้นได้ตั้งแต่เริ่มต้นการใช้งานจนถึงจุดสิ้นสุดของอายุการใช้งานซึ่งไม่ถือว่าเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพตามอายุของฉนวน เพื่อศึกษารูปแบบและสาเหตุของการแสดงอาการความผิดปกติของขดลวดด้วยการดิสซาร์จบางส่วนจึงได้ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อเปรียบเทียบผลการทดสอบกับมาตรฐาน IEC60034-27-1 พบว่ามีรูปแบบ PRPD ที่สอดคล้องกัน แล้วจึงนำผลการทดสอบที่ได้รวบรวมและวิเคราะห์ไปประยุกต์ใช้กับการทดสอบในภาคสนามโดยใช้วัตต์ทดสอบเป็นมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจริงในอุตสาหกรรม และการทดสอบเพื่อบำรุงรักษาด้วยข้อจำกัดในทางปฏิบัติรูปแบบต่างๆ ซึ่งสามารถใช้ประเมินความผิดปกติของระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ได้ค่อนข้างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากการทดสอบและวิเคราะห์จำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจและประสบการณ์ค่อนข้างสูง

ปัจจัยที่ส่งผลต่อผลการทดสอบวัตติสซาร์จบางส่วนของระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์นั้นมีหลากหลายปัจจัย ซึ่งสามารถสรุปจากผลการทดลองของงานวิจัยฉบับนี้ ได้แก่ การเข้าใจในโครงสร้างของระบบฉนวนขดลวดสเตเตอร์ในรูปแบบต่างๆ การจัดเตรียมและการต่อวงจรทดสอบซึ่งการจ่ายแรงดันและการติดตั้งตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวกับปลายขดลวดด้านตรงข้ามกันสามารถช่วยกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงเข้ามาในระบบวัดได้ โดยที่รูปแบบของ PRPD และขนาดของประจุดิสซาร์จบางส่วนไม่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมีนัยสำคัญต่อการวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ นอกจากนี้ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการทดสอบมีผลอย่างมากต่อการนำผลการทดสอบไปวิเคราะห์และประเมินถึงแม้ว่าในระยะเวลาการทดสอบที่แตกต่างกันจะให้ผลรูปแบบ PRPD ที่เหมือนกัน แต่พารามิเตอร์อื่น เช่น ขนาดประจุดิสซาร์จบางส่วนที่ไม่คงที่ในช่วง 5 – 10 นาทีแรกของการทดสอบและจะคงที่หลังจากนั้น รวมถึงรูปร่างพัลส์ของสัญญาณดิสซาร์จบางส่วนที่มีค่ายอดลดลงเมื่อเวลาผ่านไปแต่อาจมีความผันผวนเกิดขึ้นได้ในบางกรณี ดังนั้น การปรับสภาพด้วยการจ่ายแรงดันที่แรงดันทดสอบค้างไว้เป็นเวลาอย่างน้อย 5 นาที เพื่อให้การดิสซาร์จมีการปรับสภาพให้คงตัว แล้วจึงเลือกบันทึกผลการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบหลังจากช่วงการปรับสภาพเสร็จสิ้น เพื่อให้ผลการวัดมีความน่าเชื่อถือและลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ

นอกจากนี้ งานวิจัยฉบับนี้แสดงให้เห็นแล้วว่าการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดสเตเตอร์เพื่อบำรุงรักษาเชิงป้องกันสำหรับเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนในภาคอุตสาหกรรมจริงนั้นสามารถช่วยตรวจสอบความผิดปกติของระบบฉนวนได้ ถึงแม้ว่าในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานหรือเกณฑ์ที่ระบุระดับความรุนแรงหรือการยอมรับได้ของขนาดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์อย่างเป็นทางการ ในทางปฏิบัตินั้น จำเป็นต้องตัดสินใจจากข้อมูลผลการทดสอบด้วยหลักวิศวกรรม การเก็บฐานข้อมูลและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการตัดสินใจ พร้อมกับพิจารณาถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องที่จำเป็นต้องพิจารณาร่วมถึงความจำเป็นหรือความเป็นไปได้ของการซ่อมบำรุง เช่น ระยะเวลาที่สามารถนำเครื่องจักรออกจากระบบจนกระทั่งนำกลับเข้าติดตั้งเพื่อใช้งาน ปัจจัยเรื่องของอะไหล่หรือแรงงานที่สามารถซ่อมบำรุงแก้ไขปัญหาดังกล่าว วิธีการค้นหาและระบุสาเหตุความผิดปกติที่เกิดขึ้นซึ่งมีความยากซับซ้อนที่แตกต่างกัน และปัจจัยด้านงบประมาณค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นจากกระบวนการแก้ไข ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ผู้ใช้งานจำเป็นต้องรับความเสี่ยงที่เกิดขึ้น ซึ่งการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่อย่างกล้องสัญญาณเสียงสามารถช่วยลดระยะเวลาและความยุ่งยากในการระบุตำแหน่งหรือสาเหตุของปัญหาบางประการที่เกิดความผิดปกติได้

5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัย

จากประสบการณ์ของผู้เขียน การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ทั้งแบบที่เป็นขดลวดแต่ละขดรวมไปถึงขดลวดที่ถูกติดตั้งเป็นเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนแล้วนั้น ปัจจุบันนี้ยังไม่มีเกณฑ์หรือระดับความรุนแรงที่ใช้สำหรับการประเมินหรือตัดสินผลการทดสอบอย่างเป็นทางการ เนื่องด้วยความต้องการใช้งบประมาณลงทุนเพื่อเก็บข้อมูลและทดสอบขดลวดด้วยการจำลองความผิดปกติที่หลากหลายและทดสอบจนกระทั่งขดลวดได้รับความเสียหาย จึงส่งผลให้การทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าหมุนในปัจจุบันมีความยุ่งยากและความน่าเชื่อถือในการประเมินผลการทดสอบที่ขึ้นกับประสบการณ์ของผู้ทดสอบและผู้ใช้งานแต่ละราย อีกทั้งค่าใช้จ่ายสำหรับการทดสอบหากมีราคาที่สูงย่อมส่งผลให้ความนิยมหรือความต้องการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนลดลงได้

งานวิจัยฉบับนี้ได้รวบรวมผลการทดสอบวัดดิสชาร์จบางส่วนในระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ที่หลากหลายเพื่อเป็นแนวทางในการทดสอบและวิเคราะห์ผลต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. Goudarzi, N. and W.D. Zhu, "A review on the development of wind turbine generators across the world." *International Journal of Dynamics and Control*, 2013. 1(2): p. 192-202.
2. Stone, G., E. Boulter, and I. Culbert, "Electrical Insulation for Rotating Machines : Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair." 2004.
3. Company, E.M., "Synchronous Motor Handbook." 2021: WEG Group USA. 13.
4. Hu, H., et al., "Optimization of the Electric Field Distribution at the End of the Stator in a Large Generator." *Energies*, 2018. 11(10): p. 2510.
5. Boonsathitthavorn, S., et al., "Dielectric Properties of Resin Rich Stator Coil of High Voltage Motor during Processing." 2018. 1-4.
6. Pattanadech, N., P. Nimsanong, and T. Worthong, "Application of Polarization and Depolarization Current Measurement for Rotating Machine Insulation Analysis." 2021. 034-038.
7. Rehder, R.H., R.E. Draper, and B.J. Moore, "How good is your motor insulation systems. *IEEE Electrical Insulation Magazine*," 1996. 12(4): p. 8-14.
8. McDermid, W., "Insulation systems and monitoring for stator windings of large rotating machines." *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1993. 9(4): p. 7-15.
9. A1.17, W., "552 Guide of methods for determining the condition of stator winding insulation and their effectiveness in large motors." 2013: CIGRE. 36.
10. Helgeson, A. "Analysis of dielectric response measurement methods and dielectric properties of resin-rich insulation during processing." 2000.
11. Dehlinger, N. and G. Stone, "Surface partial discharge in hydrogenerator stator windings: Causes, symptoms, and remedies." *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2020. 36: p. 7-18.
12. Stone, G.C., "The statistics of aging models and practical reality." *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1993. 28(5): p. 716-728.
13. Sumislawska, M., et al. "The impact of thermal degradation on electrical machine winding insulation." in *2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. 2015.
14. Griffith, G., et al., "Problems with modern air-cooled generator stator winding insulation. *IEEE Electrical Insulation Magazine*," 2000. 16(6): p. 6-10.


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. Audoli, A. and J.L. Drommi. "Analysis of partial discharges measurements and generator technology evolution." in [1991] *Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. 1991.
16. Stone, G.C., M.K.W. Stranges, and D.G. Dunn, "Common Questions on Partial Discharge Testing: A Review of Recent Developments in IEEE and IEC Standards for Offline and Online Testing of Motor and Generator Stator Windings." *IEEE Industry Applications Magazine*, 2016. 22(1): p. 14-19.
17. Kimura, K., "Progress of insulation ageing and diagnostics of high voltage rotating machine windings in Japan." *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 1993. 9(3): p. 13-20.
18. Stone, G.C., et al., "Impact of Slot Discharges and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators." *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2008. 24(5): p. 14-21.
19. "IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery." *IEEE Std 1434-2014 (Revision of IEEE Std 1434-2000)*, 2014: p. 1-89.
20. 60034-27-1, I., "Rotating electrical machines - Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation." 2017, International Electrotechnical Commission.
21. Pattanadech, N., et al., "Partial Discharges (PD): Detection, Identification, and Localization." 2023.
22. Petcharaks, A.D.K., "High Voltage Cable Design and installation of high voltage electrical cable systems." Vol. 3000. 2022, Bangkok: BANGKOK CABLE CO., LTD. 379.
23. สังข์สะอาด, ส., *วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง*, ed. 4. 2018, กรุงเทพมหานคร.
24. 60270, I., "High-voltage test techniques - partial discharge measurements." 2023, International Electrotechnical Commission.
25. Luo, Y., Z. Li, and H. Wang, "A Review of Online Partial Discharge Measurement of Large Generators." *Energies*, 2017. 10(11): p. 1694.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายกฤษดา ดอกไม้	
วัน เดือน ปีเกิด	20 พฤษภาคม 2542 ที่จังหวัดอุตรดิตถ์	
ที่อยู่	39 หมู่ที่ 9 บ้านนาदारอด ตำบลหาดงิ้ว อำเภอเมืองอุตรดิตถ์ จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000 โทร. 082-160-9812 E-Mail: kritsadadorkmai@gmail.com	
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2564 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยม อันดับ 2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) การทดสอบระบบฉนวนมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง 2) การประเมินความเสื่อมสภาพระบบฉนวนด้วยการทดสอบดิสชาร์จ บางส่วน, PDC, FDS ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง	
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	พ.ศ.2565 - 2567 ตำแหน่งนักวิจัย Dielectric Analytika Laboratory สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง <ul style="list-style-type: none"> - ผลงานการทดสอบเพื่อประเมินระบบฉนวนมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแรงสูง - ผลงานวิจัยเรื่อง The Characteristics of Stator Insulation for Hydro Generators with Deterioration from Humidity and Thermal Stress - ผลงานวิจัยเรื่อง Analysis and Comparison of Characteristics for Offline PD Measurements in Turbo-Generators at Different Test Time Intervals - ผลงานวิจัยเรื่อง Partial Discharge Testing on MV Motor – Case Study - ผลงานวิจัยเรื่อง The Dielectric Properties in Frequency Domain of the 22 kV Underground Cables with Defective Joint 	
พ.ศ.2565 - ปัจจุบัน	ตำแหน่งวิศวกร บริษัท เหล็กสยามยามาโตะ จำกัด - วิศวกรซ่อมบำรุงระบบไฟฟ้าแรงสูง โรงผลิตเหล็กแห่ง ด้วยเตาหลอมไฟฟ้า อุตสาหกรรม และระบบสาธารณูปโภคโรงงาน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



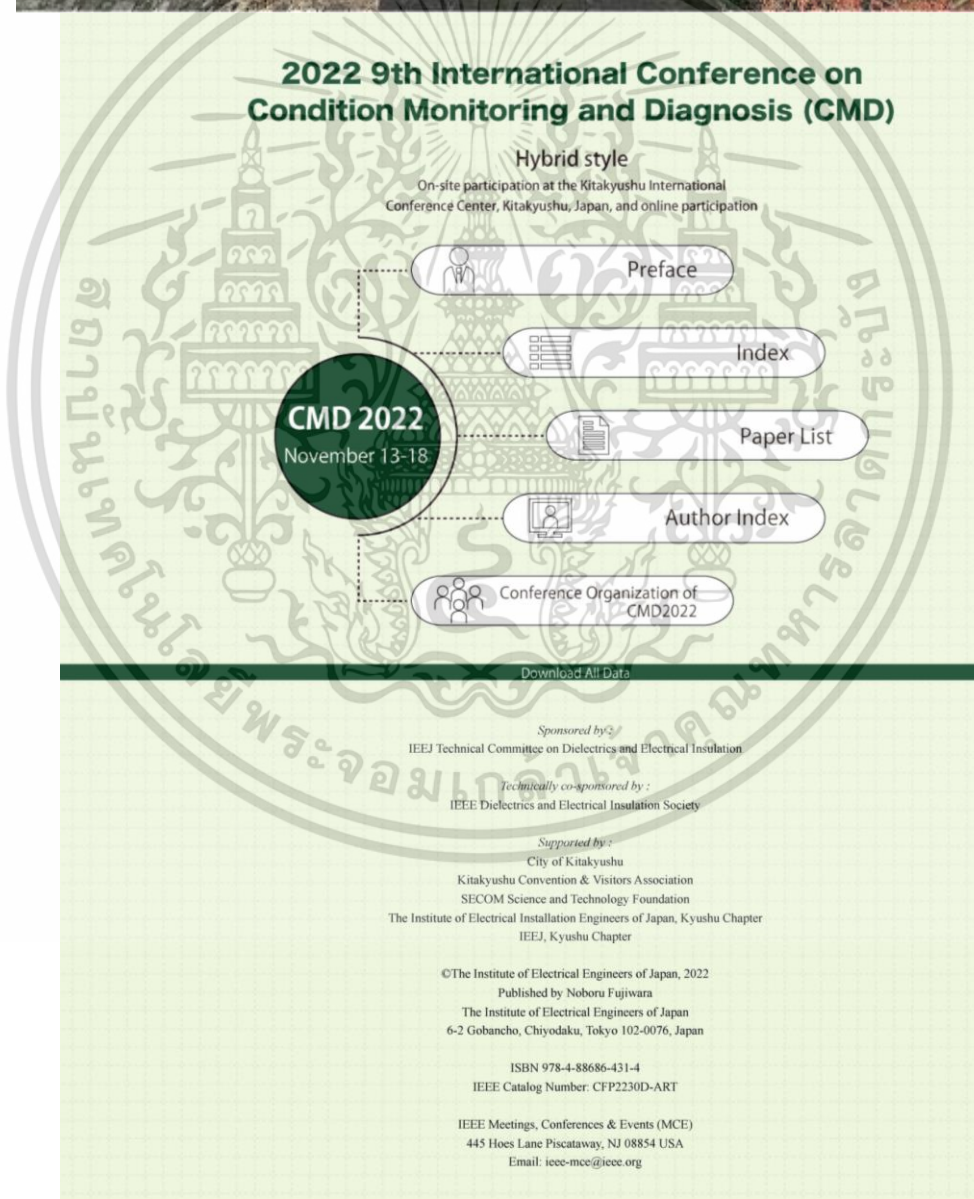
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 
1. K. Dorkmaj; P. Pannil; K. Tattiwong; S. Maneerot; D. Suksawat; N. Pattanadech, “Analysis and Comparison of Characteristics for Offline PD Measurements in Turbo-Generators at Different Test Time Intervals,” 2022 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Kitakyushu, Japan, 2022, B1-2 , pp. 102-107.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis and Comparison of Characteristics for Offline PD Measurements in Turbo-Generators at Different Test Time Intervals

K. Dorkmai^{1*}, P. Pannil², K. Tattiwong³, S. Maneerot⁴, D. Suksawat¹ and N. Pattanadech¹

¹Department of Electrical Engineering, School of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

²Department of Instrumentation and Control Engineering, School of Engineering,

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

³Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep Bangkok, Thailand

⁴TESLA Power Co., Ltd., Om Noi, Samut Sakhon, Thailand

*E-mail: kritsadorkmai@gmail.com

Abstract – Partial discharge (PD) measurement is widely used for the condition assessment of high voltage equipments. It is a tool to detect the localized discharges occurring in the weakness point sites, which causes deterioration that can lead to failure. Hence, it is essential to diagnose the PD behavior to prevent the consequent failure which maybe takes place. This paper presents an analysis of the offline PD measurements performed on the stator winding insulation system of three turbo-generators which consist of a hydrogen-cooled generator rate of 211.75 MVA, 15.75 kV, and two air-to-water heat-cooled generators which the same rate of 50.8 MVA, 11.5 kV, which were located in the power plant. Firstly, the offline PD measurements of these generators have been energized to the star point side and the high voltage coupling capacitor is installed on the high voltage terminal side, according to IEC 60034-27-1. Additionally, the test voltages were applied to the test object with a step voltage profile. To analyze the PD behaviors of the stator winding insulation, the PD characteristics such as the PD pulses, PD magnitude, and phase-resolved PD (PRPD) patterns were monitored and recorded. Besides, the effect of applied test voltage-time, i.e., 1, 3, and 5 minutes, on such characteristics were reported and compared. Finally, the PD behavior of the stator winding insulation of these generators showed clearly different results for PD measured at different recording times. The highly fluctuating PD magnitude and PD pulse shape at the initial duration of the measurement, and then gradually decreases to convergence to a stable charge magnitude as the test-time increases.

Keywords: PD in rotating machine, PD test time interval, Partial discharge, Turbo-generators, Different test time

I. INTRODUCTION

The generator is important equipment in the power system that produces electrical energy. In long operation, it is often affected by various stresses which cause the insulating properties of the equipment to have deteriorated, such as thermal stress, electrical stress, mechanical stress, and contamination caused by ambient. Furthermore, the most weakness leading to failure occurs in the stator winding insulation [1,2].

Thermal stress is a factor that affects the inevitable deterioration and determines the life of the insulation. This is caused by frequent switching on and off of the machine or operating at temperatures above the insulation level for a long time. Electrical stress is usually caused by partial discharge. This is due to the presence of an air gap in the groundwall

insulation at the step between the conductor and the stator core at operating conditions of rated voltage above 3 kV. In addition, mechanical stress, in normal operating conditions, the stator winding is subjected to electromechanical stress. Electromechanical force that is twice the power frequency can cause loosening and vibration during operation. Another factor, Ambient stress, is often exposed to harsh environments such as humidity, oil, and dirt, which will cause poor cooling problems [3,4].

Partial discharge (PD) measurements have been the method of choice for generator risk assessment for over 70 years [5]. At present, it is a widely used tool for the effective identification of problems and discharge locations that occur in stator bar insulation systems [6]. According to the IEC 60270 definition, PD is localized electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors and which can or cannot occur adjacent to a conductor [7].

Although the PD measurement is one of the important tools for diagnosing generators. However, it takes a great deal of expertise and abstruse understanding to get the right results. In particular, on-site testing of generators is often governed by many limitations. One of them is the time spent on testing.

In this paper, it is desirable to study the effect of time intervals for test voltage applied for offline PD testing in generators at different test time intervals. It was analyzed and compared the PD behavior of the stator winding insulation, the PD characteristics such as the PD pulses, PD magnitude, and phase-resolved PD (PRPD) patterns were monitored and recorded, which is the effect of applying test voltage at different time intervals.

II. THEORY

PD is a local electrical discharge that only partially bridges the insulation between conductors [7]. It can occur both near the conductor and away from the conductor. which is the specific location where it is subjected to high electric field stress and the insulator is inhomogeneous. This could ultimately lead to a complete breakdown. PDs can be classified into three types: Internal discharges, Slot discharges, and surface discharges that occur outside of the slot, also known as end-winding discharges [8].

Internal discharges are PDs that occur within the insulation between the conductor and the elements attached to the iron core. This includes discharging caused by air pockets within

the main insulation layer as a result of a manufacturing process that cannot completely eliminate these air gaps even with new stator bars [8]. However, the present epoxy-mica insulator is designed to withstand higher discharge loads and uses a global vacuum pressure impregnation technique that reduces air pockets that can occur both within the main insulation and the interface between the stator bar and the iron core. In addition, internal delamination is another type of discharge. Internal discharges occur in the groundwall insulation as a result of impaired impregnation. Furthermore, the separation that occurs between the groundwall insulation and the conductors due to the presence of longitudinal air pockets is considered a debonding discharge, which is caused by exposure to extreme temperatures coupled with mechanical force stress until eventually can cause separation [9].

Slot discharges in generators are caused by a malfunction of the semi-conductive slot coating, which can be caused by a loose bar or slot wedge [7]. Therefore creating a gap between the semi-conductive slot coating to the steel core. Then, the bar is scratched or abrasion on the surface of the semi-conductive slot coating. The cause of this damage is partly due to the looseness of the bar due to electromagnetic force causing it to vibrate and scratch the bar. The result of this event affects a potential difference between the bar and the iron core. Uneven electric field stresses lead to the development of PD, which is a danger to the insulation system and requires immediate maintenance [8,9].

Another type of PD is surface discharges, which refer to discharges that occur in the overhang or end-winding region of the stator windings [8]. They occur in areas subject to high electric field stress, such as the interface between slot grading and overhang, the gap between the bar outside the slot and the press finger, and the end-winding surface between each phase due to the clearance of the overhang with poor support elements [9].

III. EXPERIMENTAL INVESTIGATION

A. Test Objects

The on-site offline PD measurements were performed on three generators: a hydrogen-cooled generator rate of 211.75 MVA, 15.75 kV, and two air-to-water heat cooled generators which the same rate of 50.8 MVA, 11.5 kV, which were located in the coal power plant as described in TABLE I, including on-site operating conditions are illustrated in Fig.1.

TABLE I. DETAILS OF THE INVESTIGATED TURBO-GENERATORS

Generators	Details of The Generator				
	MVA	kV	Year	Ins. Class	Types of cooling
Gen 1	211.75	15.75	1997	Class F	Hydrogen Cooled
Gen 2	50.8	11.5	1999	Class F	Air-to-Water Heat
Gen 3	50.8	11.5	1999	Class F	Air-to-Water Heat

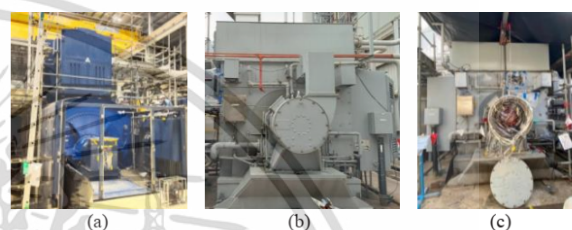


Figure 1. The investigated turbo-generators: (a) Gen 1, (b) Gen 2, (c) Gen 3.

B. Off-line PD Measurement Test Setup

The test setup for offline PD measurements of these generators according to IEC 60034-27-1 is depicted in the diagram in Fig. 2 [8]. It can be seen that the 1 nF high voltage coupling capacitor is installed on the high voltage terminal side inside the busbar terminal box and the test voltage is applied to the star point side of the generator.

C. Off-line PD Measurement Procedure

After that, the desired frequency band was adjusted in the range of 100 kHz – 50 MHz, following the capabilities of the PD measuring instrument used to measure. For normalization of the measuring circuit, it must be calibrated with a known standard charge via the high voltage terminal side of the test object. Subsequently, background noise recording is started before applying a step test voltage of 0.2 times the maximum applied test voltage (U_{max}) to each stator winding. At each step of the application, the voltage is held for approximately 1 minute and increases to the test voltage, which means the operating line-to-ground voltage of the insulation system (U_0). While one phase winding is being measured, the other phase windings are grounded. Then, start recording the measurement results via the HVPD Kronos® Spot Tester and computer.

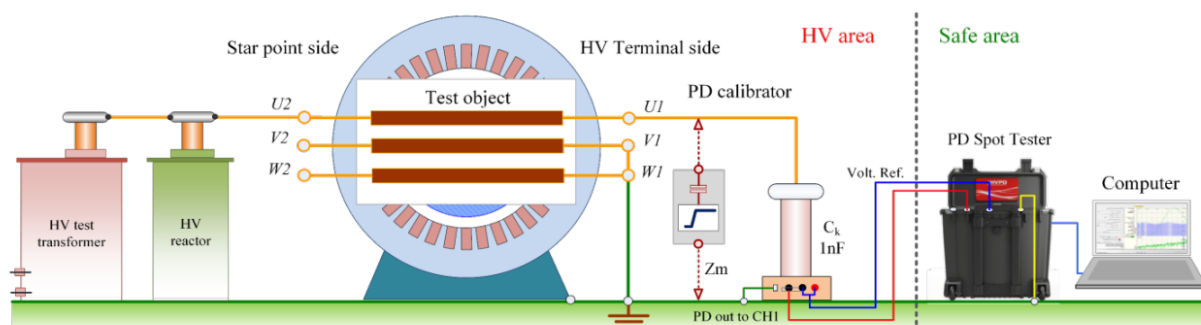


Figure 2. Diagram of the off-line PD measurement test circuit for the stator windings of the turbo-generator.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

While the stator windings were energized at test voltage, the PD pulses, PD magnitude (Q_{\max}), and phase-resolved PD (PRPD) patterns were monitored and recorded to observe results at different test voltage-time, i.e., 1, 3, and 5 minutes. The PD activity was measured at a wide band frequency (1-30 MHz). Finally, step down the test voltage in the same manner as when supplying voltage until the PD is not measured. Perform the measurements as described above on the other two-phase windings.

As this is an on-site test, it is normal to be disturbed by an uncontrolled environment. Ambient temperature during measurement is in the range of 30-37 °C and ambient humidity is about 50-70 %.

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

This section presents the results of offline PD measurements for all three stator windings of the turbo-generators. To make it easier to understand, this paper reports the most definitive results of PD measurements of individual turbo-generators.

A. PRPD Patterns

Based on offline PD measurements with all three turbo-generators over 20 years of age, it is common for PD to be detected. From the observation of the PRPD patterns shown in Fig. 3-5, it can be seen that the patterns are internal discharge. This is a characteristic that indicates the presence of PD in the mica insulation, known as delamination. However, when the test voltage was considered at 1, 3, and 5 minutes, the observed PRPD patterns were not significantly different.

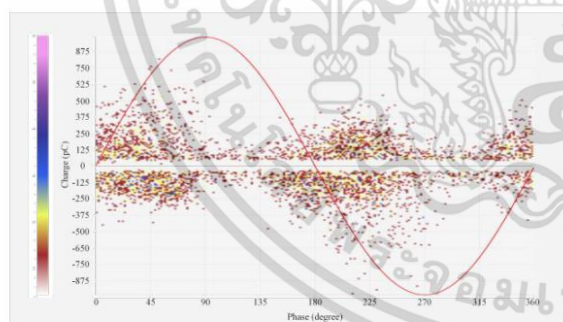


Figure 3. PRPD Pattern of the Gen 1.

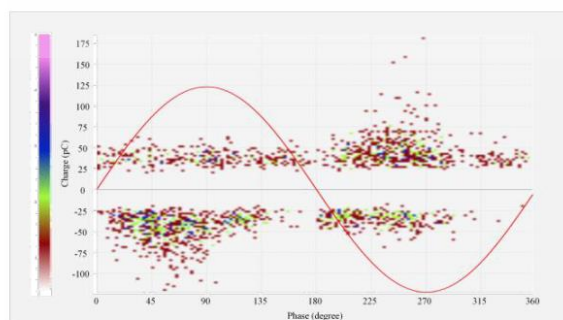


Figure 4. PRPD Pattern of the Gen 2.

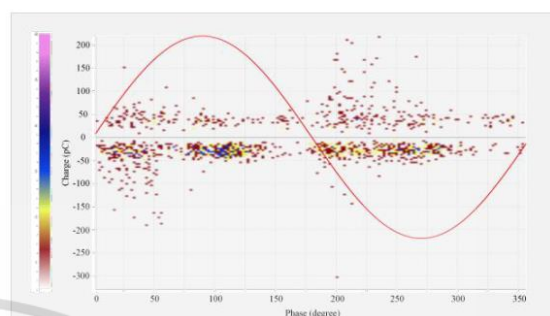


Figure 5. PRPD Pattern of the Gen 3.

B. PD Pulses Shape

At the time of the three test-time positions was interested. The PD pulses measured across all generators showed that the pulse magnitude was very high during the initial test voltage step. But after 1 minute, the magnitude of the detected pulses decreases. The detections at 3 and 5 minutes have a pulse magnitude that decreases as well as a longer duration. As the results are presented in TABLE II.

However, the PD signal is measured over a wide band frequency range. So, noise has a large influence on the signal detection of the measuring instrument, which affects PD pulses that occur at the long test-time and may have a pulse shape that was difficult to detect as a true PD signal.

C. PD Magnitude

When considering the magnitude of the maximum PD charge that can be measured at a maximum test voltage, the line-to-ground rated voltage (U_0), for 5 minutes.

For Gen 1, the measurement results are illustrated in Fig.6. Notice that from the beginning of the recording until the end, Q_{\max} has very high volatility. Although the peak of Q_{\max} at 1, 3, and 5 minutes were compared, which were similar. However, when looking at the highest and lowest values, the difference was about 700 pC. Overall, the coulomb trend is not a very noticeable downward trend.

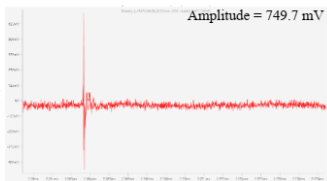
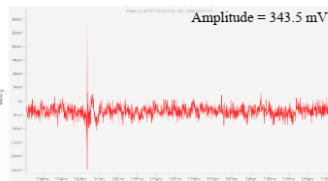
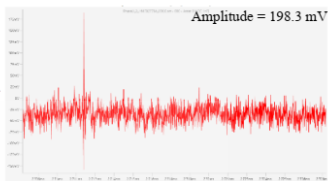
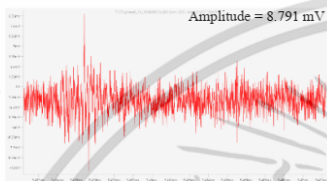
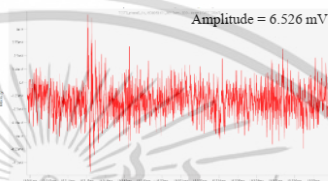
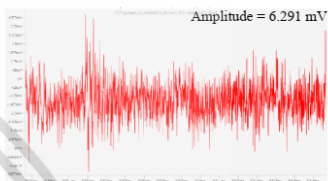
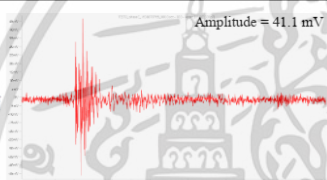
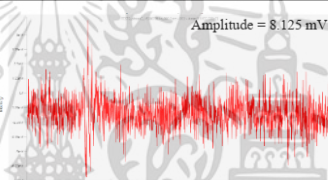
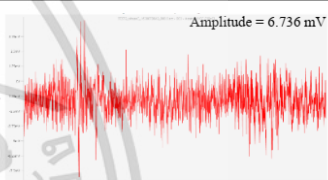
When contemplating Fig. 7, shows the trend of Q_{\max} for Gen 2. It can be observed clearly that in the first 30 s, the PD charge was twice the magnitude of the average charge (Q_{ave}). Additionally, the Q_{\max} at positions 1, 3, and 5 minutes were similar. But, from the start to the end of the recording, the Q_{\max} was unpredictable. In addition, the trend of the peak magnitude decreased with the duration of the test.

The Q_{\max} measured from Gen 3 was obviously evident very high at the start of the measurement. It then dropped markedly over the increased test time. To converge closer to the stable charge line as indicated in Fig. 8. In this case, the trend converges towards a charge of about 50 pC.

However, the similarity of the three generators observed was the highly fluctuating Q_{\max} at the initial duration of the measurement. This can be a result of the voids within the groundwall insulation being subjected to high electric field stress when initially stimulated, leading to strong discharges.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE II. COMPARISON OF PD PULSES SHAPE MEASURED AT 1, 3, AND 5 MINUTES OF THE TEST TIMES

Generators	PD Pulses Shape		
	1 minute	3 minutes	5 minutes
Gen 1			
Gen 2			
Gen 3			

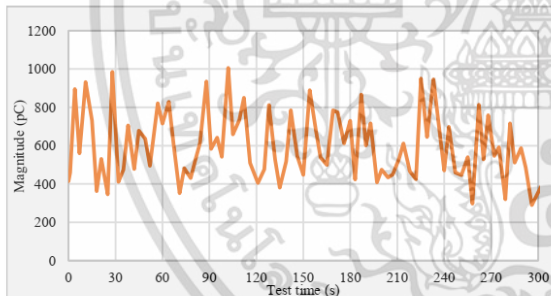


Figure 6. PD Magnitude of Gen 1.

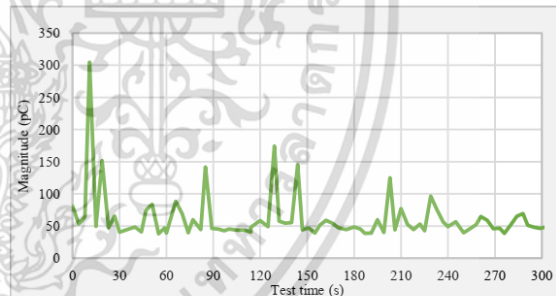


Figure 8. PD Magnitude of Gen 3.

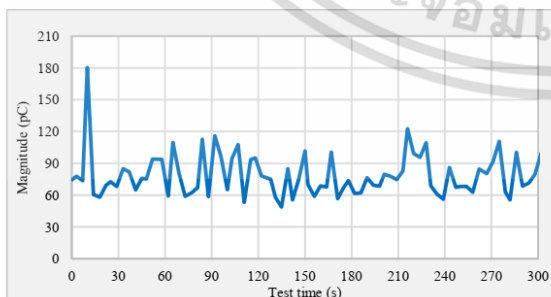


Figure 7. PD Magnitude of Gen 2.

Over time, the electric field stresses formed within those voids tended to be more uniform or charge transfer more difficult. As a result, the magnitude of the PD tended to decrease and was relatively stable towards the end of the measurement.

V. CONCLUSION

Expensive and difficult offline PD measurement tests are operated on-site in the power plant area. This paper showed clearly different results for PD measured at different recording times. Although the PRPD pattern at different intervals gave results of a similar pattern, this was reasonable because the PRPD pattern can indicate the type and region of the PD source. However, noticeable differences were observed in the pulse shapes and the magnitudes of the PD occurring. During the first few minutes of testing at the U_{max} , the resulting PD behavior fluctuates unpredictably.

Therefore, it can be said that if the PD data are recorded immediately once the test voltage is applied, the data are highly erroneous, and no stable PD behavior is detected. In particular, the magnitude of the instantaneous recording or duration of the first few minutes is not the same magnitude that occurs due to signal instability.

For this reason, the implementation of conditioning as recommended by the IEC 60034-27-1 standard is highly necessary [8]. When analyzing the trend in PD magnitude, it is

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเผยแพร่

B1-2

Conference Proceedings of CMD 2022

possible after 5 minutes; the measured magnitude may not be stable. Therefore, it would be great to perform conditioning before recording the PD data if it can be done for more than 5 minutes so that the recorded data are the most stable PD behavior. But, with many limitations inherent in this experiment and the practical test, long conditioning is not feasible.

This is because practicality requires control of factors such as time constraints and costly budgets for PD measurement. Also, excessive conditioning may damage the dielectric properties of the stator windings. Most importantly, conditioning needs to be performed at least according to the guidelines of the standard.

ACKNOWLEDGMENT

The experiment within this paper will never be possible. If not for the great support which the author would greatly appreciate. In particular, PD Solutions company limited has supported excellent equipment and PD measuring equipment. For use in Offline PD testing onsite. This includes transferring knowledge about testing and facilitating field operations. Most importantly, We would like to thank you Mr. Thanet Worthong Maintenance Electrical Section Manager, Global Power Synergy Public Co., Ltd. staff for facilitating the whole period of field testing.

REFERENCES

- [1] Andreas Küchler, *High Voltage Engineering Fundamentals Technology Applications*, 1st Ed., Germany, Springer, 2017.
- [2] G. C. Stone: "The Statistics of Aging Models and Practical Reality," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 28, No. 5, 1993, pp. 716-728.
- [3] Anders Helgeson, "Analysis of Dielectric Response Measurement Methods and Dielectric Properties of Resin-Rich Insulation During Processing," Ph.D thesis, Department of Electric Power Engineering, KTH Royal Institute of Technology, 2000.
- [4] W. McDermid, Manitoba Hydro, "Insulation Systems and Monitoring for Stator Windings of Large Rotating Machines," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 9, No. 4, 1993, pp. 7-12.
- [5] J. S. Johnson, "Slot Discharge Detection Between Coil Surfaces and Core of High-Voltage Stator Windings," *Trans. Amer. Inst. Electr. Eng.* Vol. 70, pp. 1993-1997, 1951.
- [6] Pemen, A. J. M. (2000). Detection of partial discharges in stator windings of turbine generators. Technische Universiteit Eindhoven.
- [7] IEC 60270:2000/AMD1:2015, Amendment 1, 2015. High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements. International Electrotechnical Commission, Switzerland.
- [8] IEC 60034-27-1:2017, Rotating electrical machines - Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation. International Electrotechnical Commission, Switzerland.
- [9] HUDON, C.; BÉLEC, M.: "Partial Discharge Signal Interpretation for Generator Diagnostics," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 12, No. 2, pp. 297-319, 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 
2. Siwakorn Jeenmuang; Warisanan Rojanasunan; Kritsada Dorkmai; Komin Chumpiboon; Patt Udomluksananon; Norasage Pattanadech, “Partial Discharge Testing on MV Motor – Case Study,” 2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Shimane, Japan, 2023, G2 , pp. 100-102.



**Proceedings of
2023 International Symposium on
Electrical Insulating Materials
(ISEIM 2023)**

September 24-28, 2023
Matsue City, Japan

Sponsored by

IEEJ Technical Committee on Dielectrics and Electrical Insulation

Technically Co-sponsored by

IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society
IEEE DEIS Japan Chapter

2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM) | 978-4-88686-437-6/23/531.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.23919/ISEIM60444.2023.10329220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Partial Discharge Testing on MV Motor – Case Study

Siwakorn Jeenuang
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
66016093@kmitl.ac.th

Warisanan Rojanasunan
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
warisanan2070@gmail.com

Kritsada Dorkmai
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
65016010@kmitl.ac.th

Komin Chumpiboon
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
65016014@kmitl.ac.th

Patt Udomluksananon
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
Udomluksananon.p@gmail.com

Norasage Pattanadach
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang,
Bangkok, Thailand
norasage.pa@kmitl.ac.th

Abstract— A failure of a medium voltage (MV) motor during its operation could force an outage of the power plant and also lead to a loss of cost. Hence, the method to ensure the insulation quality of such a motor is needed. Partial discharge (PD) testing is one of the effective methods used to determine the defect and evaluate the integrity of the machine insulation. This paper presents the application of off-line PD testing on MV motors. In the experiment, the PD test instrument conforming to standard IEC 60270 was used as a charge-based measurement. Moreover, during the PD testing, an acoustic imaging camera was employed as an alternative technique for locating the PD sources in the stator winding part. Once PD takes place, it can generate the pressure acoustic wave that propagates surrounding the PD source. Thus, the PD source in the area of endwinding can be located by this technique. From the charge-based PD test results, the phase-resolved PD (PRPD) pattern was considered to identify the type of PD source. It was found that almost MV motors tested have delamination in the bulk insulation. In some cases, the PRPD pattern exhibits the discharge in the area of the overlap region between the semiconductive and stress grading coating in the slot exit, which confirms by using the acoustic technique.

Keywords—partial discharge, MV motor, stator winding, PRPD pattern

I. INTRODUCTION

Partial discharge (PD) test is an effective tool to diagnose the insulation of high voltage equipment for decades [1]. In the case of rotating machine insulation, PDs are symptoms of several problems that can be detected in both off-line and on-line schemes [2]. Unlike the other insulation system, e.g., polymeric material in cable insulation, oil-paper in power transformers, which such organic material ultimately defeated by PD,

Typically, rotating machine insulation normally undergoes several stresses, so-called TEAM stresses, during its service lifetime [2]. As thermal stress, the insulation could be delaminated by separating mica layers due to such thermal stress. Furthermore, due to load cycling, thermal cycling could lead to debonding between copper conductors and insulation. Moreover, if stator coils/bars in the slot portion have loosed,

this could lead to slot vibration, leading to abrasion of semiconductive coating yielding slot discharges type. Those PD problems could be classified using pulse height analysis (PHA) by considering the symmetrical of PD pulses of different polarities [1].

Several sensors and techniques of PD measurement on rotating machines in both off-line and on-line measurement are stated in [3]. Besides, there was found that using an acoustic camera (sound cam) is capable of locating the PD sources in the endwinding area as in [4].

II. METHODOLOGY

A. Motors under test

In this paper, an induction motor with a rate of 2.8 MW, 6.9 kV ($U_0=4$ kV) is investigated. This motor has been brought to the workshop for overhaul as maintenance planning. This motor with accessible star point terminal and is able to isolate each phase. Thus, there was allowed to test the stator winding at its phase separately.

B. Off-line PD measurement system

For off-line PD measurement of MV motors, the test system is schematically shown in Fig. 1. The AC test system with a parallel high voltage inductor was utilized to gain the ability with a high capacitive load, especially in the generator and motor. With this system, there is the capability to test high capacitive load up to μ F range at ten kV or even higher (for instance, in the case of a hydro generator). The insulated cable (length up to 50 m) was used to connect between high voltage inductor to the motor, which enabled to test in remote area. Besides, the high voltage lead from test transformer was connected to neutral side of the machine stator winding. Since the inductive nature of winding, noises generated from sources side were almost attenuated offering the higher signal-to-noise ratio (SNR) and thus gaining sensitivity of the measurement.

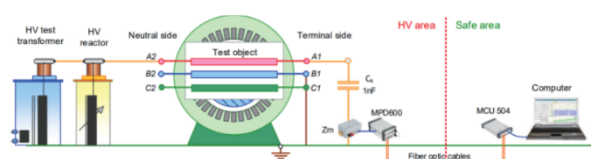


Fig. 1. PD test arrangement on MV motor with accessible and dismantle neutral point.

For PD measuring system, a coupling capacitor (1 nF) with a coupling device was used to decouple PD from the insulation under the test as a charge-based PD measurement. A coupling capacitor was connected to the high voltage terminal side, while the remaining two phases were shorted to the ground.

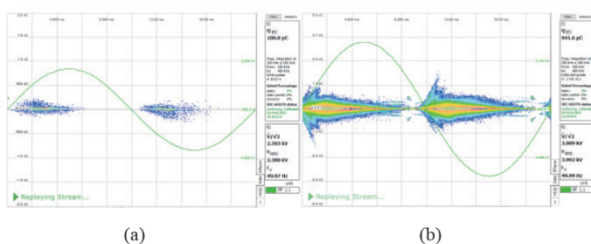
In addition, the acoustic camera was used as an alternative technique to examine the PD characteristic, which has the ability to locate the PD at the endwinding area. From this, the corona discharge at the junction between semiconductive and stress grading coating, surface tracking discharge, and discharge between phases could be detected.

C. Test procedure

After the test circuit was set, the normalization (calibration) was performed by injecting a known charge value by pulse calibrator into the machine's terminal. In this experiment, PD at low frequency (LF) is used with a bandwidth of 100-400 kHz. LF range for off-line PD measurement is recommended as there was the capability to see PD in over wide area [5, 6]. Next, before acquiring the real recording PD characteristics, the condition at a test voltage of U_0 was done for 5-10 mins, as recommended in [7], for conditioning the winding insulation since the PD magnitude might be high at first. After the conditioning period, the voltage was thus re-applied with a stepped voltage increase (voltage increment of $0.2U_0$) and monitored the PD behavior at each test voltage level up to a maximum test voltage of about 6.6 kV ($1.7U_0$). The PD inception voltage (PDIV) and PD magnitude (Q_{IEC}) at specified test voltage were reported.

III. TEST RESULTS

The PD testing was conducted on each phase of the stator winding insulation. The PRPD patterns of phase U at different voltage levels are illustrated in Fig. 2. The PDIV was about 2.4 kV ($0.6U_0$). The PRPD patterns exhibited internal delamination with a PD magnitude of about 1 nC until the voltage of 4.8 kV was reached. With a gradual increase in the test voltage, another PD pattern was observed with increasing in the PD magnitude up to about 3 nC at a maximum test voltage of $1.7U_0$, or about line voltage.



(a) (b)

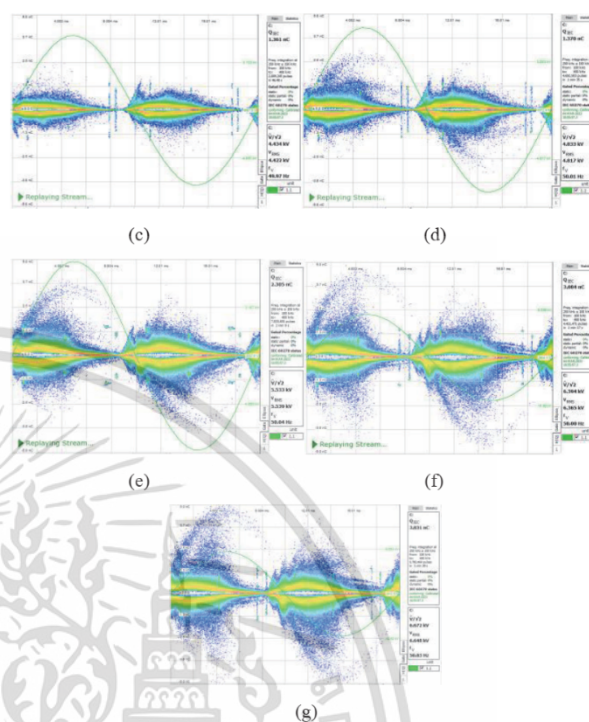


Fig. 2. PRPD patterns of phase U at different voltage levels (a) $0.6U_0$ (PDIV) (b) $1U_0$ (c) $1.1U_0$ (d) $1.2U_0$ (e) $1.4U_0$ (f) $1.6U_0$ (g) $1.7U_0$.

The PRPD patterns of phase U at different voltage levels are illustrated in Fig. 3. The PDIV was about 2.5 kV ($0.6U_0$). The PRPD patterns exhibited internal delamination with a PD magnitude of about 1 nC, and increased to about 5-6 nC with increasing test voltage.

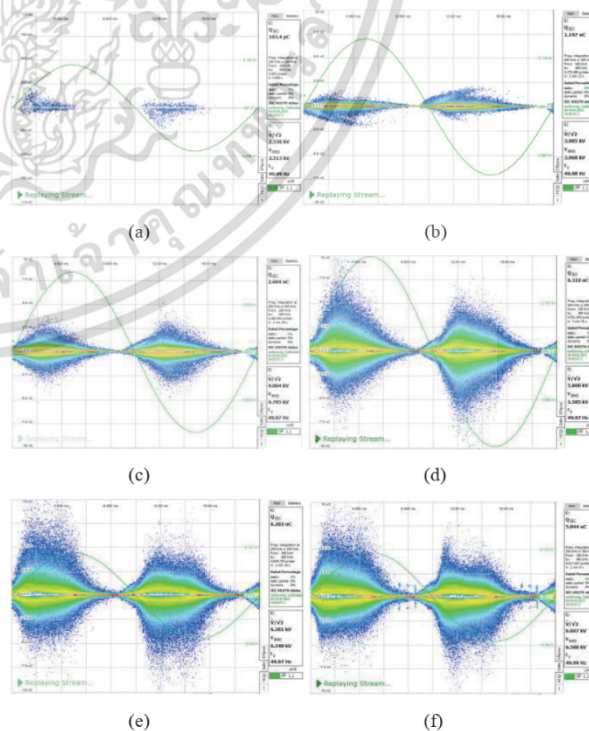


Fig. 3. PRPD patterns of phase V at different voltage levels (a) $1U_0$ (b) $1U_0$ (c) $1.2U_0$ (d) $1.5U_0$ (e) $1.6U_0$ (f) $1.7U_0$ (recording time 3 min).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PRPD patterns of phase W at different voltage levels are illustrated in Fig. 4. The PDIV level was about 3.2 kV ($0.8U_0$). It was evidenced that the PRPD pattern changed with increasing voltage but with an unchanged PD magnitude (Q_{IEC}).

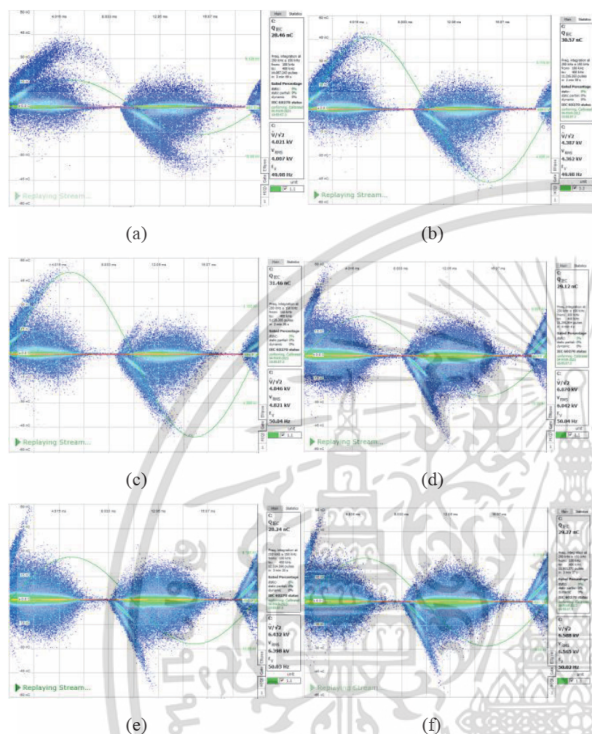


Fig. 4. PRPD patterns of phase W at different voltage levels (a) $1U_0$ (b) $1.1U_0$ (c) $1.2U_0$ (d) $1.5U_0$ (e) $1.6U_0$ (f) $1.7U_0$ (recording time 3 mins).

Using an acoustic sensor allows us to pinpoint the PD source, as shown in Fig. 5. In Fig. 5, the visible PD source, as observed from the acoustic camera of phase C, starts to be found at a test voltage of 3.2 kV (or at PDIV level). While phases U and V were found at higher voltage, about $1.2U_0$. Besides, It was found that the PD source was located at an overlap region between the semiconductive/stress grading at the slot exit. Besides, the location was the coil near the HV terminal side. It is not surprising since, in operation, that part was subjected to higher voltage stress than other parts as voltage distribution along the winding. From this, the higher stress, the higher rate of degradation will be. Therefore, the assumption was that the PD patterns were likely to be semiconductive and stress control grading overlap failure as the overlap region became nonconductive, resulting in the electric field enhancement at that area [2]. Thus, the internal PD under the stress control grading was likely to occur.

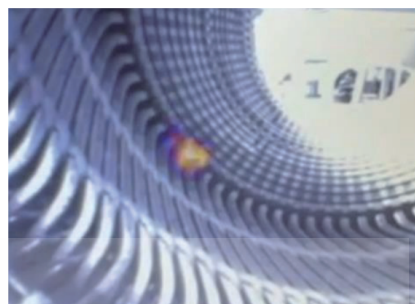


Fig. 5. PD detected with an acoustic sensor of phase W.

IV. CONCLUSION

This paper presents the investigation of PD testing on the motor stator winding insulation. Off-line PD testing with charged-based techniques was performed. Besides, the acoustic camera was also employed as an alternative technique to examine the PD that occurs in the stator winding insulation as it was capable of locating the PD sources at endwinding region. The test results revealed that the highest PD magnitude of about 30 nC was detected, and the PD location observed from the acoustic camera was at the semiconductive and stress control grading overlap region. Besides, even though the PRPD patterns were changed with increasing the test voltage, the PD magnitude was still unchanged up to the maximum test voltage.


ACKNOWLEDGMENT

The authors thank all staff in Dielectric Analytika laboratory (Dika Lab), King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, for helping in the PD experiment.

REFERENCES

- [1] C. Hudon and M. Belec, "Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 297-319, April 2005.
- [2] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, and H. Dhirani, "Electrical Insulation for Rotating Machines," 1st Ed., Wiley-IEEE Press, 2004.
- [3] IEEE Std 1434-2014 (Revision of IEEE Std 1434-2000), "IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery," 2014.
- [4] V. Grabs, "Do Fast-Switching-Inverters endanger the Motor-Insulation System? Laboratory Tests," *IKMT 2022*, 13. GMM/ETG-Symposium, Linz, Austria, 2022, pp. 1-5.
- [5] G. C. Stone, H. G. Sedding, C. Chan and C. Wendel, "Comparison of Low Frequency and High Frequency PD Measurements on Rotating Machine Stator Windings," 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), San Antonio, TX, USA, pp. 349-352, 2018.
- [6] M. Lachance, "The Use of Absolute Limits for PD Measurements on Stator Windings," *CIGRE Canada Conference*, Toronto, Ontario, October 19-22, 2022.
- [7] IEC 60034-27-1:2017 Rotating electrical machines - Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 
3. Patt Udomluksananon; Siwakorn Jeenmuang; Komin Chumpiboon; Kritsada Dorkmai; Warisanan Rojanasunan; Norasage Pattanadech, “ The Dielectric Properties in Frequency Domain of the 22 kV Underground Cables with Defective Joint,” 2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Shimane, Japan, 2023, D3 , pp. 61-64.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Proceedings of
2023 International Symposium on
Electrical Insulating Materials
(ISEIM 2023)**

September 24-28, 2023
Matsue City, Japan

Sponsored by

IEEJ Technical Committee on Dielectrics and Electrical Insulation

Technically Co-sponsored by

IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society
IEEE DEIS Japan Chapter

2023 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM) | 978-4-88686-437-6/23/531.00 ©2023 IEEE | DOI: 10.23919/ISEIM60444.2023.10329220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The Dielectric Properties in Frequency Domain of the 22 kV Underground Cables with Defective Joint

Patt Udomluksananon
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang
Bangkok, Thailand
udomluksananon.p@gmail.com

Siwakorn Jeenuang
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang
Bangkok, Thailand
66016093@kmitl.ac.th

Komin Chumpiboon
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang
Bangkok, Thailand
65016014@kmitl.ac.th

Kritsada Dorkmai
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang
Bangkok, Thailand
65016010@kmitl.ac.th

Warisanan Rojanasunan
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang
Bangkok, Thailand
warisanan2070@gmail.com

Norasage Pattanadech
Department of Electrical Engineering,
School of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang
Bangkok, Thailand
norasage.pa@kmitl.ac.th

Abstract— The failure that occurs in the underground cable systems leads to losses in many aspects, not only in the power system but also in the commercial and business. The most failure location in medium voltage underground cable systems is cable joint and cable termination, where the defects occur from poor workmanship. This paper represents the mean to investigate the dielectric properties of the 22 kV XLPE underground cable system to assess the insulation's integrity of the underground cable system. In the experiments, the underground cable system specimens were prepared by simulating the defects in cable joints, i.e., the iron powder on the XLPE surface and the incision on the XLPE surface; moreover, the underground cable system with the healthy condition joint was prepared to represent the new (or unused) underground cable system. To compare the dielectric properties in the frequency domain of the 22 kV underground cable systems with defective joints and the healthy condition joint, the frequency domain spectroscopy (FDS), the off-line non-destructive test, was performed in this research. From the test results, the dielectric dissipation factor shows a significantly different value in the case of iron powder when compared with the healthy condition joint. It reveals the loss peak on the curve at a frequency of 1 Hz. However, the case of incision on the XLPE surface is almost similar to the healthy condition case. The real part of the complex capacitance of all three cases has a constant value in the measured frequency ranges using the log-log scale. However, the imaginary part capacitance shows the distinct value of all three cases, of which the trends are the same as the dielectric dissipation factor curve.

Keywords—underground cable system, defective joint, frequency domain spectroscopy, dissipation factor

I. INTRODUCTION

Nowadays, electrical energy is essential for personal daily life or business utility. Therefore, high-voltage equipment's reliability and long-term performance are a considerable concern for electrical utilities [1]. So, the electrical power system must confidently assure all users that it is reliable to operate and be able to avoid electrical power transmission or distribution system interruption [2]. The insulation system of the underground cable systems, the equipment for transmitting and distributing the electrical energy, must be high performance to withstand the stresses, i.e., thermal stress,

electrical stress, mechanical stress, and environmental effect, which the underground cable system or other high voltage equipment must be affected throughout operating time [3]. These stresses can degrade the insulation systems. Moreover, the cable accessories, i.e., cable joint and cable termination, are sensitive and can be the underground cable system's weak point which may lead to a failure event [4]. The failure of the underground cable systems leads to a loss in many aspects, not only in the power system but also in the commercial and business. The most problem with cable accessories is poor workmanship in the installation or maintenance processes [4, 5]. These processes require good and clean ambient conditions at the installation site and a sufficiently experienced joiner. The caution of cable accessories must avoid an improper installation, including material selection, dimension and position of completely assembled components, etc. It tends to enhance the local electric field stress and deteriorate the insulation system. So, a failure prediction, or insulation condition assessment, is the method to enhance the system's reliability and prevent an unexpected failure event that may occur in service [5].

This research studies the dielectric properties in the frequency domain of the 22 kV underground cable systems with defective joints to simulate the problems that may occur by poor workmanship. The joint sections were simulated by making the defects, i.e., the incision on the XLPE surface and the iron powder on the XLPE surface, in the joint. Another is the healthy condition joint for comparing the test results with the unhealthy specimens. The dielectric response analysis of the underground cable system test specimens was carried out by frequency domain spectroscopy (FDS), an off-line non-destructive test. This technique is an advanced tool for assessing the insulation's integrity in the frequency domain. The change of the insulation's integrity, the dielectric response is changed [6]. The FDS technique was measured at the frequency range of 1 mHz to 1 kHz. The dielectric properties used to interpret the underground cable insulation condition in this research comprise the dielectric dissipation factor (or $\tan\delta$) and the complex capacitance as a function with a frequency range.

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

II. RELATED THEORY

A. Frequency Domain Spectroscopy (FDS) Technique

Frequency domain spectroscopy (FDS) is an advanced technique to assess the insulation condition by characterizing the dielectric properties of the insulation, i.e., dielectric dissipation factor ($\tan\delta$) and complex capacitance, at different frequencies. The principle of the FDS technique is the measurement of voltage across the test object $U(\omega)$ and the current that flows through the test object $I(\omega)$. The phase difference between the measured voltage and measured current is taken into account. Moreover, the test object's impedance $Z(\omega)$ can be calculated from (1).

$$\bar{Z}(\omega) = Z'(\omega) + jZ''(\omega) = \bar{U}(\omega) / \bar{I}(\omega) \quad (1)$$

The relationship between the voltage and current can determine the complex capacitance $C(\omega)$ that can be rewritten in (2). Furthermore, the complex capacitance correlates with the complex permittivity $\varepsilon_r(\omega)$ as expressed in (3).

$$\bar{I}(\omega) = j\omega\bar{C}(\omega)\bar{U}(\omega) \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega) = \frac{\bar{C}(\omega)}{C_0} \quad (3)$$

Where C_0 is the test object's geometric capacitance.

Equation (3) determines the complex permittivity consisting of the real and imaginary parts. The real part of the complex permittivity ε_r' represents the standard (or relative) permittivity that relates to the capacitance of the test object, and the imaginary part permittivity ε_r'' is correlated to the dielectric (polarization) losses in the test object [7, 8]. The dielectric dissipation factor ($\tan\delta_p$), which represents the losses in the insulation system, can be written in the function of frequency as (4).

$$\tan \delta_P = \frac{\varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)} = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (4)$$

From Fig. 1, The total current density that flows through the insulation consists of displacement current density, which is a combination of purely capacitive part, polarization part, and conduction current density. So, the dielectric dissipation factor, which comprises polarization loss and conduction loss $\tan\delta_c$, is expressed in (5) [8].

$$\tan \delta = \tan \delta_C + \tan \delta_P = \frac{\kappa}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_r'} + \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (5)$$

Where κ is a conductivity value.

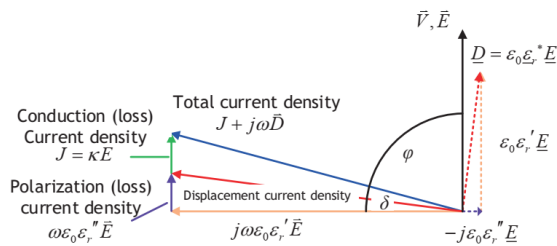


Fig. 1. Dielectric losses with polarization loss and conduction loss by means of the phase difference between electric field (or voltage) and current density in a complex plane phasor diagram [8].

III. EXPERIMENTAL SETUP

A. Test Specimens Preparation

The test specimens are the underground cable systems that simulate the poor workmanship condition of the joint installation process. Three test specimens were prepared. For each test specimen, two three meters 22 kV underground cables were used and connected with the simulated joint. Also, the heat-shrinkable cable terminations are on both ends of all test specimens. Two test specimens were prepared by making the defects inside the cable joint. In the first case, the incision made by a cutter blade was cut into the insulation for three millimeters in depth, that shown in Fig. 2. Second case, The XLPE surface was daubed with the twenty-micron iron powder, that seen in Fig. 3. And, another case is the test specimen with a healthy condition joint, as shown in Fig. 4, to be the comparative reference values.



Fig. 2. Case of cable joint with an incision on the XLPE surface.

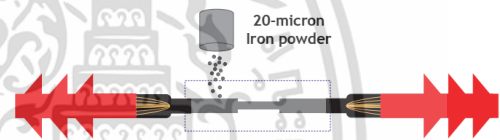


Fig. 3. Case of cable joint with iron powder on the XLPE surface.



Fig. 4. Case of a healthy condition cable joint.

B. FDS Measurement Techniques

Frequency domain spectroscopy (FDS) is an off-line non-destructive test for analyzing dielectric response in the frequency domain. This technique was carried out by OMICRON DIRANA. The test circuit was set up by applying AC test voltage at the cable terminal and measured at the ground wire. Moreover, to reduce the influence of leakage current on the cable termination surface [9], copper tape was used as a guard electrode on both sides of the cable termination. It was bypassed to the guard connection on the test device. The schematic diagram of the test circuit is shown in Fig. 5.

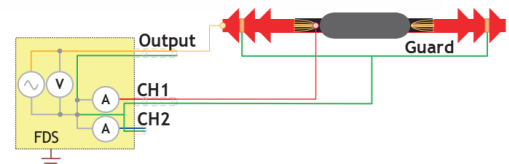


Fig. 5. A schematic diagram of the FDS test circuit.

After the test circuit had been set up, the test voltage used in all cases was the AC peak test voltage of 200 V_p. The tests performed the FDS measurement in the frequency ranges of 1 mHz to 1 kHz. Before the test began, the ambient conditions, i.e., ambient temperature and relative humidity, had been collected.

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IV. TEST RESULTS AND INTERPRETATION

From FDS measurement, the test results analyzed the insulation condition of the underground cable systems, which are the test specimens in this research. The dielectric response parameters obtained from FDS measurement consist of the dielectric dissipation factor (or $\tan\delta$), and the complex capacitance, both of the real part capacitance and the imaginary part capacitance. Fig. 6 shows the comparative curves of the dielectric dissipation factor from three cases. This graph reveals the significantly different values of the case of iron powder on the XLPE surface at the frequency range of 0.1 Hz to 100 Hz. It is possible that an iron powder that was daubed between the XLPE insulation and cable joint increased the conductivity of the insulation system. Consequently, the $\tan\delta$ is increased. Moreover, the $\tan\delta$ curve of the test specimen, in which the joint has an iron powder on the XLPE surface, shows the loss peak at the frequency of 1 Hz. This phenomenon may be the effect of the conductive contaminant between the interface in the insulation system of this test specimen. Another case is the incision on the XLPE surface in the cable joint. The curve does not show the difference in the $\tan\delta$ curve compared to the normal joint case. That means the incision on the XLPE surface does not influence the dielectric response measurement in the frequency domain.

The complex capacitance obtained from the FDS measurement consists of the real part capacitance and the imaginary part capacitance. The complex capacitance parameter is divided into two graphs. Fig. 7 and 8 show the real part capacitance curves and the imaginary part capacitance curves, respectively. Fig. 7 shows the real part capacitance, which represents the capacitance of the test object, of all three cases have a similar trend, and the capacitance value at the power frequency of all three cases is approximately 1.5 nF. So, the real part capacitance does not show the difference between the underground cable systems that cable joints have the defects, which are both of an iron powder on the XLPE insulation and the incision on the XLPE insulation, and another without defect. Another part of the complex capacitance is the imaginary part capacitance, which represents the losses in the insulation system. Fig. 8 reveals the result of this parameter that the imaginary part capacitance values from three cases are distinct. Furthermore, this parameter has a similar trend to the dielectric dissipation factor.

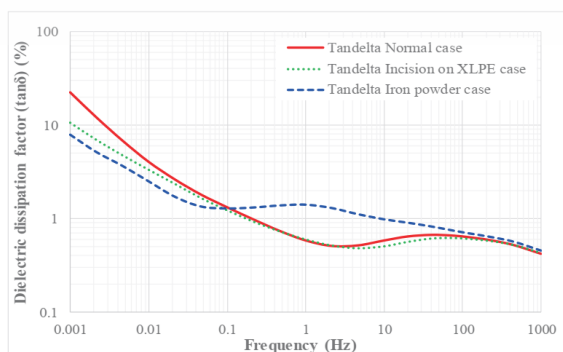


Fig. 6. The comparative curves of $\tan\delta$ from three cases.

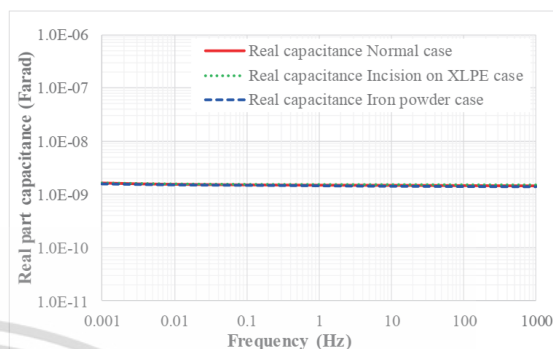


Fig. 7. The comparative curves of real part capacitance from three cases.

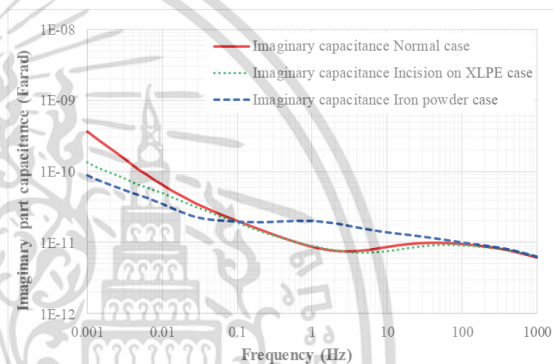


Fig. 8. The comparative curves of imaginary part capacitance from three cases.

V. CONCLUSION

This research represents the FDS technique to assess the insulation's integrity of the underground cable systems, which simulated the defects in the cable joint. The FDS technique was carried out by OMICRON DIRANA. The AC test voltage used in this research is 200 V_p, and the measuring frequency range is 1 mHz to 1 kHz. The parameters obtained from this technique are the dielectric dissipation factor and the complex capacitance. From the test results, the dielectric dissipation factor parameter graph reveals the significantly different values of the case of iron powder on the XLPE surface at the frequency range of 0.1 Hz to 100 Hz. In addition, it shows the loss peak at 1 Hz. It may interpret that the presence of conductive contaminant increases the conductivity of the insulation system, and the dielectric response reveals this effect in this frequency range. Nevertheless, the case of the incision on the XLPE surface does not show a noticeable difference from the case of the healthy condition joint. Another parameter is complex capacitance, divided into the real part capacitance and the imaginary part capacitance. From the real part capacitance of three cases almost has a constant value in the log-log scale. This parameter does not reveal the different results between the underground cable systems with normal and abnormal joints. On the contrary, the imaginary part capacitance shows the distinct value of three cases, and the curve of this parameter tends to be similar to the dielectric dissipation factor parameter curve.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully thank the staff of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang's High Voltage Engineering Laboratory and Dielectric Analytika and High Voltage Engineering Laboratory (DIKA Lab) for their recommendations and continuous assistance during our testing processes.

REFERENCES

- [1] N. Amyot, E. David, D. Fournier, D. Jean and D. Lalancette, "Dielectric response of cable accessories and its influence on cable diagnostics," Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, Mexico, 2002, pp. 434-437.
- [2] A. N. Jahromi, P. K. Pattabi, S. Lo and J. Densley, "Approaches to the forensic failure investigation of medium voltage polymeric cables," 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Knoxville, TN, USA, 2020, pp. 85-89.
- [3] E. Ildstad, "Challenging Defects of High Voltage Insulation Systems," 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Richland, WA, USA, 2019, pp. 1-13.
- [4] Maanen B., Van, Plet, C., Van Der Wielen, P., et al.: 'Failures in underground power cables – return of experience'. JICABLE'15, 9th Int. Conf. Insulated Power Cables, Versailles, France, 21–25 June 2015, vol.2, pp. 265–269.
- [5] Zhou, C., Yi, H. and Dong, X., Review of recent research towards power cable life cycle management. High voltage, 2: pp. 179-187, 2017.
- [6] B. Oyegoke, P. Hyvonen, M. Aro and Ning Gao, "Application of dielectric response measurement on power cable systems," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 10, no. 5, pp. 862-873, Oct. 2003.
- [7] S. Chakravorti, D. Dey and B. Chatterjee, "Frequency Domain Spectroscopy" in Recent Trends in the Condition Monitoring of Transformers - Theory Implementation and Analysis, London, U.K.:Springer, pp. 193–225, 2013.
- [8] A. Küchler, High Voltage Engineering Fundamentals-Technology-Applications. Germany : Springer-Verlag GmbH. 2018.
- [9] P. Werelius, P. Tharning, R. Eriksson, B. Holmgren and U. Gavret, "Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 8, no. 1, pp. 27-42, Feb 2001.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้