

การศึกษาจุดบกพร่องในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนโดยวิธีการวัดการดีสชาร์จบางส่วน

THE STUDY OF DEFECT IN INSULATION OF ROTATING MACHINES
BY PARTIAL DISCHARGES MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษาจุดบกพร่องในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน
โดยวิธีการวัดการดิสชาร์จบางส่วน

THE STUDY OF DEFECT IN INSULATION OF ROTATING MACHINES
BY PARTIAL DISCHARGES MEASUREMENT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในห้องเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ปีการศึกษา 2563

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

THE STUDY OF DEFECT IN INSULATION OF ROTATING MACHINES

BY PARTIAL DISCHARGES MEASUREMENT



THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF REQUIREMENT

FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
2020

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปีการศึกษา 2563

การศึกษาจุดบกพร่องในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน
โดยวิธีการวัดการดิสชาร์จบางส่วน

THE STUDY OF DEFECT IN INSULATION OF ROTATING MACHINES
BY PARTIAL DISCHARGES MEASUREMENT



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ผศ.ดร. ภาพ จันทร์เจริญสุข

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2563

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาจุดบกพร่องในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนโดยวิธีการวัด
การดิซซาร์จบางส่วน

ผู้จัดทำ

1. นาย ชิชณพวงศ์ ศรีนางแย้ม
2. นาย วีรนนท์ จงเจริญศรีศิริ
3. นาย ศิวกร จินเมือง
4. นาย สรวิชญ์ พนิตวงศ์



นรเศรษฐ พัฒนเดช

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช)

รศ.ภพ จันทร์เจริญสุข

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษาจุดบกพร่องในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน
โดยวิธีการวัดการดิสชาร์จบางส่วน

นาย ชิชณุพงศ์	ศรีนางแย้ม	
นาย วีรนนท์	จงเจริญศรีศิริ	
นาย ศิวกร	จินเมือง	
นาย สรวิชญ์	พนิตวงศ์	
รศ.ดร. นรเศรษฐ์	พัฒนเดช	อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร. ภาพ	จันทร์เจริญสุข	อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ปีการศึกษา 2563

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับจุดบกพร่องในฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส พิกัดกำลัง 96.6 MVA พิกัดแรงดัน 13.8 kV ด้วยวิธีการวัดการดิสชาร์จบางส่วน ในการศึกษาจะจำลองจุดบกพร่องในสเตเตอร์บาร์จำนวนทั้งหมด 12 กรณี สเตเตอร์บาร์ที่รอยขีดสีด้านข้าง สเตเตอร์บาร์ที่มีรอยตัดบนผิวเซมิคอนดักทีฟเทป สเตเตอร์บาร์ที่นำไปอบด้วยความร้อน สเตเตอร์บาร์ที่มีการเจาะรูที่เนื้อฉนวนบริเวณหน้าตัดและสอดเข็ม สเตเตอร์บาร์ที่นำไปอบด้วยความชื้น โดยแต่ละกรณีจะทำการศึกษา PRPD pattern ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) รวมถึงค่า PDIV และ PDEV จากการทดลองพบว่าสเตเตอร์บาร์ในทุกกรณีจะมีการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น โดยที่ค่าแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่ำกว่า U_0 นั้นหมายความว่า ที่แรงดันใช้งานนั้นจะมีการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นในสเตเตอร์ ซึ่งเป็นสิ่งปกติสำหรับฉนวนที่ใช้ในเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง เนื่องจากคุณสมบัติต่อต้านการดิสชาร์จบางส่วน ในกรณีที่น่าสเตเตอร์บาร์ไปอบด้วยความร้อน ผลการดิสชาร์จบางส่วนจะมีรูปแบบ PRPD pattern สอดคล้องกับมาตรฐานในกรณีดีบอนด์ดิสชาร์จ (Debonding discharge) นอกจากนี้ สเตเตอร์บาร์ในทุกกรณีจะมี PRPD pattern ที่เป็นรูปแบบของการดิสชาร์จภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

The Study of Defect in Insulation of Rotating Machines by Partial Discharges Measurement

Mr. Chissanupong Srinangyam

Mr. weeranon Chongcharoensrisiri

Mr. Siwakorn Jeenmuang

Mr. Sorawit Panitwong

Assoc. Prof. Dr. Norasage Pattanadech Advisor

Asst. Prof. Dr. Phop Chanchaoensook Co-Advisor

ABSTRACT

This project studies the defects of insulation used in the synchronous generator at rated 96.6 MVA, 13.8 kV by partial discharge (PD) measurement. In the study, the stator bars were simulated of 12 case studies which comprised of the stator bar with abraded semiconductive layers, the stator bar that was cut semiconductive layer, the stator bars that were heated, the stator bars with air-cavities, the stator bars that were perforated by needle and the stator bar that was steeped by moisture. In each case, the phase-resolved partial discharge (PRPD) pattern, the magnitude of partial discharge (Q_{IEC}) as well as the partial discharge inception voltage (PDIV) and the partial discharge extinction voltage (PDEV) values were studied. According to the experiment, partial discharge occurs in all cases of the simulated stator bars and the PDIV values are lower than U_0 for all cases. That means, in operation, the partial discharge will occur in the stator bars. However, this is normal for insulation used in high-voltage rotating machines due to PD resistance property. In the cases of the stator bar was heated, the partial discharge results will have a PRPD pattern consistent with the standard in the debonding discharge case. In addition, the stator bar in all cases will have the PRPD pattern of internal discharge.

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

กิติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยการช่วยเหลือจากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งต้องขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภพ จันท์เจริญสุข อาจารย์ที่ปรึกษารวมไปถึง ดร.ปยุตยวีร์ ฉายศิริ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำโครงการด้วยดีเสมอมาและได้กรุณาตรวจแก้ไขจนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณศักดิ์ดา มณีโรจน์ และ คุณสุวิทย์ ลิขิตสุภิน ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้เข้าศึกษาทำงานในสถานที่ภายนอกสถาบัน รวมทั้งคอยให้คำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณเพทาย นิมสนอง และ คุณกิตติศักดิ์ ถึงสุข รวมทั้ง พี่ญาณพล พี่ณัฐนรี และ พี่ๆ ป.โท ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทดสอบมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกคน ที่ช่วยแก้ปัญหาด้วยดีมาโดยตลอด รวมถึงให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ทั้งในระหว่างการวางแผนการดำเนินงานทดลองก็ดี ระหว่างการขนย้ายอุปกรณ์การทดลองก็ดี ระหว่างการเขียนบทความทางวิชาการก็ดี ขอกราบขอบพระคุณทุกคนจากใจจริง

ท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านซึ่งให้การสนับสนุนในด้านการเงินและกำลังใจ

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IIIV
สารบัญรูปภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัส.....	4
2.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบรวานโรเตอร์.....	4
2.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเชิงโครนัสแบบโรเตอร์ขั้วยื่น.....	5
2.2 โครงสร้างของระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์.....	5
2.2.1 ขดลวดสเตเตอร์.....	5
2.2.2 ระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาร์น.....	8
2.2.3 การเคลือบเพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนกราวนัวอลล์.....	10
2.2.4 ระดับชั้นของฉนวน.....	11
2.2.5 กระบวนการผลิต.....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 การดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge).....	13
2.3.1 วงจรสมมูลของดีสชาร์จบางส่วน	14
2.3.2 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้.....	15
2.3.3 วงจรทดสอบและระบบวัดการดีสชาร์จบางส่วน	18
2.3.4 ระบบวัดสำหรับการวัดประจุปรากฏ (apparent charge).....	20
2.3.5 ข้อกำหนดสำหรับการวัดด้วยเครื่องมือวัดดีสชาร์จบางส่วนแบบดิจิทัล	23
2.3.6 การเปรียบเทียบระบบวัดในวงจรทดสอบ	24
2.4 การดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องจักรกลหมุน.....	26
2.4.1 ดีสชาร์จภายใน (Internal discharges).....	27
2.4.2 สล็อตดีสชาร์จ (Slot discharges).....	28
2.4.3 การดีสชาร์จที่ช่องว่างระหว่างปลายขดลวดและบริเวณผิว	28
2.4.4 การดีสชาร์จเนื่องจากวัสดุอื่นที่มีความนำไฟฟ้า	28
2.5 ตัวอย่างของ PRPD patterns ที่ถูกบันทึกในห้องปฏิบัติการ.....	29
2.5.1 การดีสชาร์จภายใน	29
2.5.2 สล็อตดีสชาร์จ (Slot partial discharges).....	32
2.5.3 การดีสชาร์จบริเวณขดลวดปลาย (Discharges in the end-winding).....	33
บทที่ 3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและการออกแบบการทดลอง.....	36
3.1 วัตต์ทดสอบ.....	36
3.2 การจำลองจุดบกพร่องในวัตต์ทดสอบ.....	36
3.2.1 วัตต์ทดสอบกรณีที่ 1.....	38
3.2.2 วัตต์ทดสอบกรณีที่ 2.....	38
3.2.3 วัตต์ทดสอบกรณีที่ 3.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่ให้มีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.4 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 4.....	39
3.2.5 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 5.....	39
3.2.6 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 6.....	40
3.2.7 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 7.....	40
3.2.8 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 8.....	41
3.2.9 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 9.....	41
3.2.10 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 10.....	41
3.2.11 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 11.....	42
3.2.12 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 12.....	42
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	43
3.4 การต่อวงจรทดสอบ.....	44
3.5 การเตรียมการทดสอบ.....	45
3.6 การดำเนินการทดสอบ.....	46
บทที่ 4 ผลการทดสอบ.....	50
4.1 ผลการทดสอบดีสซาร์จบางส่วน.....	50
4.1.1 ผลการทดสอบกรณีที่ 1.....	50
4.1.2 ผลการทดสอบกรณีที่ 2.....	52
4.1.3 ผลการทดสอบกรณีที่ 3.....	54
4.1.4 ผลการทดสอบกรณีที่ 4.....	56
4.1.5 ผลการทดสอบกรณีที่ 5.....	58
4.1.6 ผลการทดสอบกรณีที่ 6.....	60
4.1.7 ผลการทดสอบกรณีที่ 7.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.8 ผลการทดสอบกรณีที่ 8.....	64
4.1.9 ผลการทดสอบกรณีที่ 9.....	66
4.1.10 ผลการทดสอบกรณีที่ 10	68
4.1.11 ผลการทดสอบกรณีที่ 11	70
4.1.12 ผลการทดสอบกรณีที่ 12	72
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	75
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ.....	75
5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก.....	79
ประวัติผู้เขียน.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบร่ววนโรเตอร์	2
2.2 โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบโรเตอร์ขั้วยื่น	5
2.3 ขดลวดสเตเตอร์ที่พันแบบสุ่ม	6
2.4 ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน์แบบคอยล์	7
2.5 ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน์แบบโรเบลล์บาร์	7
2.6 ภาพหน้าตัดของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน์แบบคอยล์	8
2.7 ภาพหน้าตัดของขดลวดสเตเตอร์แสดงแต่ระดับชั้นของฉนวน	12
2.8 โครงสร้างของฉนวนที่มีโพรงอากาศอยู่ใน	14
2.9 การดิสซาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน	16
2.10 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ต่อความไวการวัด	18
2.11 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยการต่ออุปกรณ์คัปปลิงอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว	18
2.12 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยการต่ออุปกรณ์คัปปลิงอนุกรมกับวัตถุทดสอบ	19
2.13 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยการต่อวงจรแบบสมมูล	19
2.14 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยการต่อวงจรแบบแยกขั้ว	19
2.15 Tolerance band ของผลตอบสนองขบวนการพัลส์ของการดิสซาร์จบางส่วน	22
2.16 การต่อเครื่องปรับเทียบในวงจรวัดที่อุปกรณ์คัปปลิงต่ออนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว ..	24
2.17 การต่อเครื่องปรับเทียบในวงจรวัดที่อุปกรณ์คัปปลิงต่ออนุกรมอยู่กับวัตถุทดสอบ	25
2.18 ตัวอย่าง PRPD ในโพรงอากาศ	29
2.19 ตัวอย่าง PRPD ในรอยแยกช่องว่างอากาศ	30
2.20 ตัวอย่าง PRPD ในรอยแยกระหว่างตัวนำและฉนวน	31
2.21 ตัวอย่าง PRPD ของสล็อตดิสซาร์จ	32
2.22 ตัวอย่าง PRPD โครนาบริเวณสารเคลือบกึ่งตัวนำและสารเคลือบลดความเครียด	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูปรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 ตัวอย่าง PRPD ของการดิสชาร์จแตร็คกิ้งตามแนวขดลวดปลาย.....	34
2.24 ตัวอย่าง PRPD ของแก๊ปดิสชาร์จ ถูกบันทึกขณะจำลองในห้องปฏิบัติการ.....	35
3.1 สเตเตอร์บาร์ที่ใช้เป็นวัตถุทดสอบ.....	38
3.2 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 1.....	38
3.3 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 2.....	38
3.4 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 3.....	38
3.5 ตู้อบที่ใช้ในการอบสเตเตอร์บาร์.....	39
3.6 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 4.....	39
3.7 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 5.....	39
3.8 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 6.....	40
3.9 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 7.....	40
3.10 กระโจมที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกในภาชนะที่มีการใส่น้ำด้านล่าง.....	40
3.11 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 8.....	41
3.12 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 9.....	41
3.13 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 10.....	41
3.14 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 11.....	42
3.15 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 12.....	42
3.16 ร่องสลีตจำลอง.....	43
3.17 มิติของร่องสลีตจำลอง.....	43
3.18 วงจรสมมูลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์.....	44
3.19 วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์.....	44
3.20 สเตเตอร์บาร์ที่ถูกเจาะรูที่หน้าตัดตรงตัวนำของสเตเตอร์.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ยกเว้นที่มิได้ระบุเป็นอย่างอื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21 สเตเตอร์บาร์ที่ถูกทาด้วย copper paint.....	45
3.22 การป้องกันการดิสชาร์จบางส่วนบริเวณขอบของเซมิคอนดักทีฟเทป.....	45
3.23 การป้อนแรงดันให้กับสเตเตอร์บาร์ที่แทรกอยู่ในร่องสล๊อตที่ต่อลงกราวนด์.....	46
3.24 การต่อวงจรทดสอบ	46
3.25 เครื่องปรับเทียบประจุ.....	47
3.26 การแสดงผลสัญญาณรบกวนพื้นหลังขณะทำการจ่ายไฟให้แก่ระบบ.....	48
3.27 การแสดงผลการวัดการดิสชาร์จบางส่วน.....	49
4.1 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 1.....	53
4.2 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 2.....	52
4.3 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 3.....	54
4.4 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 4.....	56
4.5 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 5.....	58
4.6 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 6.....	60
4.7 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 7.....	62
4.8 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 8.....	64
4.9 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 9.....	66
4.10 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 10.....	68
4.11 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 11.....	70
4.12 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 12.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

X

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 การวางแผนจัดลำดับขั้นตอนของการดำเนินงาน	3
2.1 ผลตอบสนองขบวนพัลส์ (Pulse train) ของเครื่องมือวัดการดิสชาร์จบางส่วน	21
3.1 การจำลองจุดบกพร่องของสเตเตอร์บาร์	37
4.1 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 1	51
4.2 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 2	53
4.3 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 3	55
4.4 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 4	57
4.5 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 5	59
4.6 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 6	61
4.7 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 7	63
4.8 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 8	65
4.9 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 9	67
4.10 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 10	69
4.11 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 11	71
4.12 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 12	73
4.13 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์จากการวัดของวัตถุทดสอบทุกกรณีศึกษา	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เครื่องจักรกลหมุน (Rotating machine) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมรวมถึงโรงไฟฟ้าซึ่งเป็นต้นกำลังหลักในการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังเข้าระบบไฟฟ้าเพื่อการใช้งาน สำหรับในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีการใช้งานเครื่องจักรกลหมุนอย่างมากในรูปแบบของมอเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานทางไฟฟ้าให้ออกมาในรูปแบบพลังงานทางกลโดยมีการประยุกต์ใช้อย่างหลากหลาย ได้แก่ มอเตอร์สำหรับสูบน้ำ มอเตอร์สำหรับสายพานลำเลียง และมอเตอร์สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ เป็นต้น สำหรับในการผลิตกำลังไฟฟ้านั้นจะมีการใช้งานเครื่องจักรกลหมุนในรูปแบบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานทางกลให้ออกมาในรูปแบบพลังงานทางไฟฟ้า โดยต้นกำลังทางกลที่ใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีอยู่หลากหลาย ได้แก่ การใช้ก๊าซร้อน การใช้ไอน้ำ ซึ่งได้มาจากการต้มน้ำ การใช้น้ำเป็นต้นกำลังสำหรับโรงไฟฟ้าที่เขื่อน และการใช้ลมมาขับเคลื่อนกังหันสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากังหันลมซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกในยุคปัจจุบัน เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นนั้น เครื่องจักรกลหมุนจึงเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีความสำคัญอย่างมาก หากเครื่องจักรกลหมุนมีความบกพร่อง ชำรุด หรือเสียหายก็จะส่งผลอย่างมากทั้งในโรงงานอุตสาหกรรม และรวมถึงโรงไฟฟ้าซึ่งอาจถึงขั้นเกิดไฟฟ้าดับทั่วทั้งเมืองซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายเป็นวงกว้าง ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกัน หรือเฝ้าระวังมิให้เกิดความเสียหายขึ้นต่อเครื่องจักรกลหมุน

หนึ่งในปัญหาที่สำคัญที่จะทำให้เครื่องจักรกลหมุนล้มเหลวคือ การมีความบกพร่องในระบบฉนวนของเครื่องจักรกลหมุน เนื่องจากในการใช้งานนั้นเครื่องจักรกลหมุนจะได้รับความเครียดในหลายรูปแบบ ได้แก่ ความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียดทางความร้อน ความเครียดทางกล และความเครียดที่อยู่ในรูปแบบของสิ่งแวดล้อมที่สภาวะใช้งาน เช่น ฝุ่น ผง น้ำมัน และกรด เป็นต้น ซึ่งทำให้ระบบฉนวนมีการเสื่อมสภาพนับตั้งแต่เริ่มทำงาน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องประเมินสภาพของฉนวนอยู่เป็นประจำ และจำเป็นต้องมีการบำรุงรักษารวมถึงมีการวางแผนซ่อมบำรุงเพื่อที่จะยืดอายุการใช้งานและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในปัจจุบันนี้มีวิธีการประเมินสภาพของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนหลายวิธี เช่น การทดสอบค่าความต้านทานฉนวน (Insulation resistance Test) การทดสอบหาค่าดัชนีการมีขั้ว (Polarization index test) การทดสอบกระแสโพลาริเซชันและกระแสดีโพลาริเซชัน (Polarization and depolarization current test) และการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge test) เป็นต้น ซึ่งวิธีที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับและมีการใช้งานมาอย่างยาวนาน ในส่วนของโครงการฉบับนี้จะใช้วิธีการประเมินสภาพของฉนวนด้วยวิธีการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge test) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้วินิจฉัยจุดบกพร่องของฉนวนซึ่งเมื่อฉนวนมีการเสื่อมสภาพก็อาจจะมีการเกิดโพรงอากาศ หรือมีรอยแตกขึ้นภายในเนื้อฉนวน ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ได้รับความเครียดสูง ซึ่งถ้ามีค่าความเครียดสูงเกินกว่าค่าวิกฤติในขณะใช้งานก็จะทำให้เกิดการดิสชาร์จขึ้น ซึ่งการดิสชาร์จนี้จะส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพเพิ่มขึ้นต่อฉนวนจนอาจถึงขั้นทำให้เกิดล้มเหลวของฉนวนในที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาโครงสร้างของระบบฉนวนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทซิงโครนัส
2. เพื่อศึกษาการฉนวนในขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
3. เพื่อศึกษาทฤษฎีและวิธีการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge test)
4. เพื่อศึกษาพฤติกรรมการดิสชาร์จเมื่อเกิดจุดบกพร่องในสเตเตอร์บาร์

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาโครงสร้างและการฉนวนในเครื่องจักรกลหมุน
2. ศึกษาฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ (Stator bar) ที่ใช้ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส
3. ทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) ของขดลวดสเตเตอร์ด้วยระบบวัดการดิสชาร์จบางส่วนของ Omicron

1.4 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ทำการจำลองจุดบกพร่องในสเตเตอร์บาร์ (Stator bar) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ 3. วิเคราะห์ผลการทดสอบ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

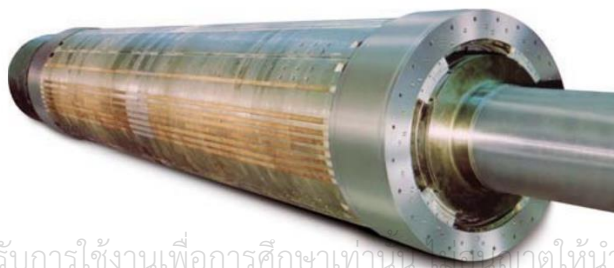
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีการใช้งานเป็นหลักในระบบการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยโครงสร้างจะประกอบด้วยโรเตอร์ซึ่งเป็นส่วนที่หมุนโดยมีขดลวดโรเตอร์ที่จะมีไฟฟ้ากระแสตรงไหลผ่านเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นบนโรเตอร์ โดยโรเตอร์จะมีแกนเพลลาที่คาบเกี่ยวอยู่กับแหล่งกำเนิดพลังงานทางกล เช่น ไอน้ำ ก๊าซ หรือน้ำ เป็นต้น เพื่อให้โรเตอร์หมุน เมื่อโรเตอร์หมุนสนามแม่เหล็กที่โรเตอร์จะเหนี่ยวนำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลที่ขดลวดสเตเตอร์ (อาร์มาเจอร์) ซึ่งอยู่ที่สเตเตอร์ ซึ่งประเภทของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสจะขึ้นอยู่กับการออกแบบตัวโรเตอร์ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการประยุกต์การใช้งานให้เหมาะสมตามความเร็วของตัวใบพัดของมอเตอร์ [1] เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

2.1.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบราวน์โรเตอร์

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบราวน์โรเตอร์หรือสามารถเรียกอีกชื่อว่า โรเตอร์ทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทนี้โดยทั่วไปแล้วจะมีความเร็วรอบการหมุนที่สูง นั่นคือจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1000 รอบ/นาที หรือสูงกว่า ซึ่งระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการใช้งานที่ความถี่ไฟฟ้า 50 Hz จะมีความเร็วรอบอยู่ที่ 1500 หรือ 3000 รอบ/นาที จากความเร็วรอบที่สูงนี้ ผิวของโรเตอร์จะมีลักษณะที่ราบเรียบสม่ำเสมอเพื่อที่จะลดความสูญเสียจากแรงต้านอากาศขณะที่หมุน นอกจากนี้รูปทรงผิวที่ราบเรียบนี้ก็จะเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงภายใต้แรงเหวี่ยงที่สูงที่เกิดขึ้นจากความเร็วรอบที่สูง บางครั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบราวน์โรเตอร์จะถูกเรียกว่า “เทอร์โบเจเนอเรเตอร์” ซึ่งขับเคลื่อนโดยสตีมเทอร์ไบน์หรือก๊าซเทอร์ไบน์ โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทนี้มักจะทำการติดตั้งในแนวนอนและจะมีระบบทำความเย็นโดยใช้ไฮโดรเจน



รูปที่ 2.1 โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบราวน์โรเตอร์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

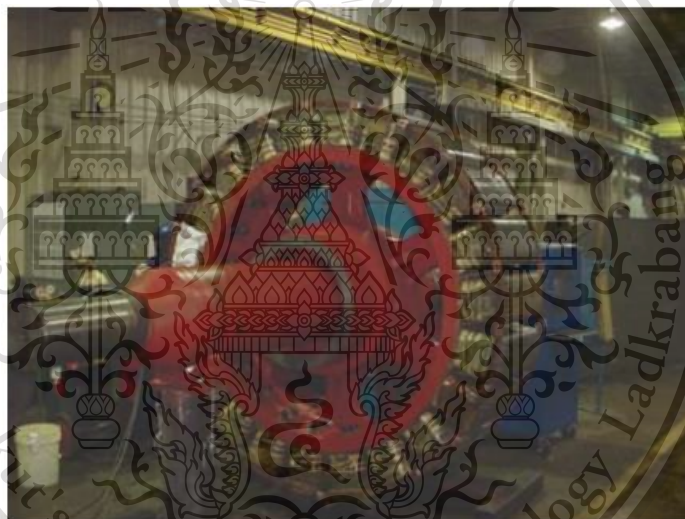
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขข้อมูลหรือเป็นความลับของทางราชการซึ่งมีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.1.2 เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบโรเตอร์ขั้วยื่น

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบโรเตอร์ขั้วยื่นจะมีขั้วสนามแม่เหล็กแต่ละขั้วติดตั้งอยู่ขั้วบนแกนเหล็กแบบทรงตันหรือแบบลามิเนต ดังรูปที่ 2.2 ในเครื่องกำเนิดประเภทนี้จะมีความเร็วรอบในการหมุนที่ต่ำ เนื่องจากโรเตอร์ประเภทนี้มีขั้วที่ยื่นออกมาจากขอบและมีช่องว่างระหว่างขั้วจึงทำให้ระยะช่องว่างอากาศระหว่างโรเตอร์กับสเตเตอร์มีความไม่สม่ำเสมอมากจึงทำให้มีความสูญเสียจากแรงต้านอากาศขณะหมุนสูง อย่างไรก็ตาม โรเตอร์ประเภทนี้จะมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าแบบราวน์โรเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบขั้วยื่นมักจะมีการใช้งานโดยใช้ไฮโดรเทอร์ไบน์ ซึ่งมีความเร็วรอบในการหมุนที่ต่ำ ซึ่งหมุนได้จากการไหลของน้ำจากที่สูง เพื่อที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ความถี่ 50 หรือ 60 Hz จำเป็นที่จะต้องมีการมีขั้วที่มากขึ้นเนื่องจากการใช้งานที่ความเร็วรอบต่ำ โดยอาจจะมีขั้วโรเตอร์ถึงประมาณ 50 ขั้ว โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประเภทนี้มักจะทำการติดตั้งในแนวตั้ง



รูปที่ 2.2 โรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสแบบโรเตอร์ขั้วยื่น [1]

2.2 โครงสร้างของระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์

ขดลวดสเตเตอร์จะเป็นส่วนที่หยุดนิ่งกับที่และเป็นที่อยู่ของขดลวดสเตเตอร์หรือที่เรียกว่าขดลวดอาร์มาเจอร์ โดยโครงการวิจัยฉบับนี้จะทำการวิเคราะห์ฉนวนที่มีการใช้งานในขดลวดสเตเตอร์ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส

2.2.1 ขดลวดสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า โดยทั่วไปแล้วขดลวดสเตเตอร์จะมีโครงสร้างต่างๆ ที่มีการใช้งานในเครื่องจักรกลหมุนตั้งแต่ไม่กี่วัตต์ถึง 2000 MW โดยสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท ดังนี้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

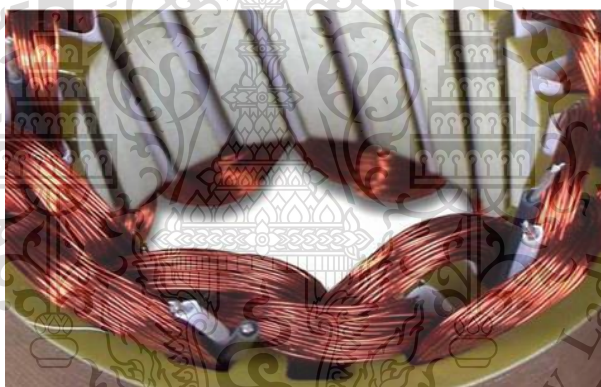
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

1. ขดลวดสเตเตอร์ที่พันแบบสุ่ม
2. ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน์โดยใช้คอยล์ที่มีหลายรอบ (Multi-turn coils)
3. ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน์โดยใช้โรเบลล์บาร์ (Roebel bar)

โดยทั่วไป ขดลวดสเตเตอร์ที่พันแบบสุ่มจะมีการใช้งานในเครื่องจักรกลหมุนที่มีพิกัดกำลังอยู่หลักร้อยกิโลวัตต์ ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน์จะมีการใช้งานในมอเตอร์และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าต่างๆ ที่จะมีพิกัดกำลังสูง 50 MVA จนถึง 100 MVA ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน์โดยใช้โรเบลล์บาร์จะมีการใช้งานในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่

2.2.1.1 ขดลวดสเตเตอร์ที่พันแบบสุ่ม

ขดลวดสเตเตอร์ที่พันแบบสุ่มประกอบด้วยตัวนำทองแดงที่มีฉนวนเคลือบซึ่งมีการพันอย่างต่อเนื่อง (พันด้วยมือหรือเครื่องจักร) ตลอดทั้งร่องสลอตในแกนเหล็กเพื่อให้เกิดเป็นขดลวดดังรูป 2.3 แต่ละรอบของตัวนำเคลือบทองแดงจะถูกวางแบบสุ่มซึ่งจะไม่ขึ้นอยู่กับระดับแรงดันในแต่ละรอบ โดยทั่วไปแล้วขดลวดสเตเตอร์ที่พันแบบสุ่มจะใช้งานที่ระดับแรงดันต่ำกว่า 1000 V



รูปที่ 2.3 ขดลวดสเตเตอร์ที่พันแบบสุ่ม [2]

2.2.1.2 ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน์แบบคอยล์

ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน์จะมีการใช้งานในระดับแรงดันที่สูงกว่า 1000 V ขดลวดเหล่านี้จะทำมาจากคอยล์ที่มีการฉนวนโดยจะมีการแทรกอยู่ร่องสลอตในแกนเหล็กสเตเตอร์ คอยล์จะประกอบด้วยตัวนำของทองแดงที่มีรูปร่างทรงสี่เหลี่ยมซึ่งพันอย่างต่อเนื่อง บางครั้งอาจเรียกว่ารูปร่างไดมอนด์ (Diamond shape) โดยมีฉนวนล้อมรอบตัวนำที่พันกันเป็นลูป โดยปกติแล้วแต่ละคอยล์จะมีตั้งแต่ 2 รอบ จนถึง 12 รอบ และแต่ละคอยล์จะทำการเชื่อมต่อกันให้ได้จำนวนขั้วและจำนวนรอบที่แน่นอนระหว่างขั้วของเฟสและกราวน์ (หรือนิวทรัล) ในการออกแบบนั้นจะต้องมีการผลิตเพื่อให้เกิดความต่างของแรงดันระหว่างคอยล์ให้น้อยที่สุด และการเกิดแรงดันระหว่างรอบต่อน้อยที่สุดโดยมีการใช้ฉนวนเพื่อแยกแต่ละรอบ โดยขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน์แบบคอยล์จะแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานาน นโมอนุญาติให้นำไปเผยแพร่เช่นดานการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมเห็ดดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

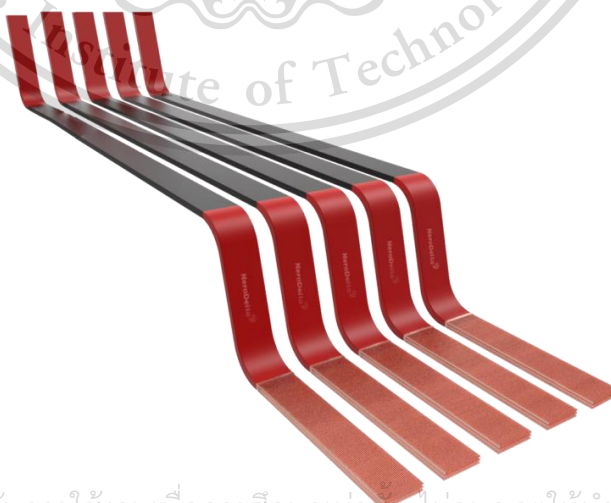
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.4 ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาร์นแบบคอยล์ [3]

2.2.1.3 ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาร์นแบบโรเบลล์บาร์

สเตเตอร์ที่มีการใช้งานในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีพิกัดกำลังสูงกว่าประมาณ 50 MVA ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาร์นจะต้องมีขนาดใหญ่และยากที่จะสอดแทรกทั้งสองขาของคอยล์ในร่องสลิตแคบๆ ในแกนเหล็กสเตเตอร์โดยไม่มีความเสี่ยงในขณะติดตั้ง ดังนั้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่จะไม่นิยมใช้คอยล์ที่มีหลายรอบ (Multi-turn coils) แต่จะใช้เป็นคอยล์ครึ่งรอบ หรือที่เรียกว่าโรเบลล์บาร์ (Roebel bar) โดยโครงสร้างของโรเบลล์บาร์จะมีเพียงแค่ครึ่งหนึ่งของคอยล์ที่จะทำการแทรกเข้าไปในร่องสลิตในแต่ละครั้งเท่านั้น ซึ่งจะง่ายกว่าการที่จะแทรกคอยล์ทั้งสองด้านเข้าไปพร้อมกัน ซึ่งการใช้งานโรเบลล์บาร์จำเป็นต้องมีการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองของบาร์เพื่อทำการเชื่อมต่อกับคอยล์อื่น ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาร์นแบบโรเบลล์บาร์แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาร์นแบบโรเบลล์บาร์ [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขข้อมูลเปลี่ยนแปลง และดัดแปลงสิ่งพิมพ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

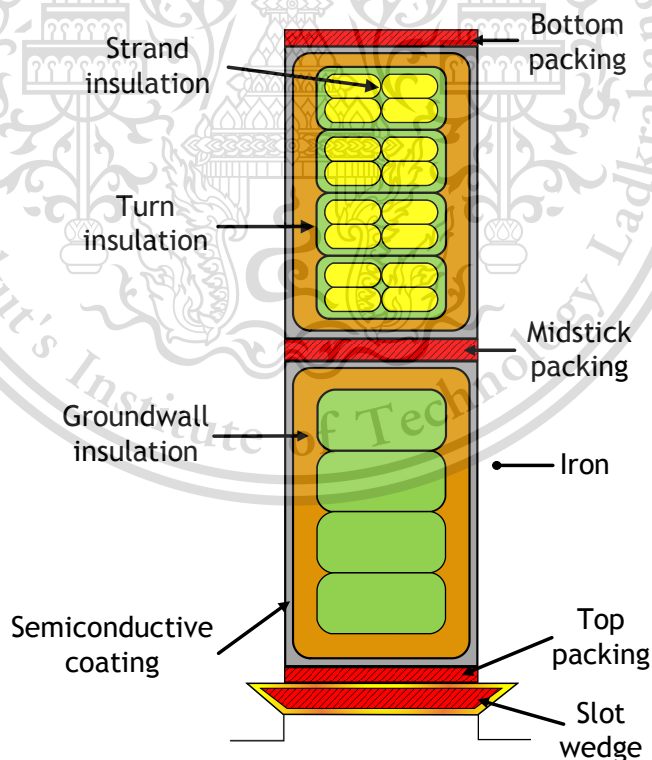
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.2 ระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน

ระบบฉนวนในขดลวดสเตเตอร์จะประกอบด้วยหลายส่วนประกอบที่สำคัญซึ่งทั้งหมดนี้จะต้องมั่นใจว่าจะไม่ทำให้เกิดการลัดวงจรเกิดขึ้นและความร้อนที่เกิดจากความสูญเสียจากตัวนำ (I^2R) จะต้องถูกถ่ายเทออกไปยังตัวระบายความร้อนได้ และตัวนำจะต้องไม่มีการสั้นเนื่องจากแรงแม่เหล็กไฟฟ้า องค์ประกอบพื้นฐานของระบบฉนวนของขดลวดสเตเตอร์มีดังนี้

- ฉนวนสเตรนด์ (Strand insulation)
- ฉนวนเทิร์น (Turn insulation)
- ฉนวนกราว์วอลล์ (Groundwall insulation)

รูปที่ 2.6 จะแสดงภาพหน้าตัดของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวนในร่องสลิตของสเตเตอร์ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบดังกล่าวข้างต้น โดยทั่วไปในหนึ่งร่องสลิตจะประกอบด้วยขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวน 2 คอยล์ต่อหนึ่งร่องสลิต โดยต่อไปนี้จะกล่าวถึงวัตถุประสงค์ของการใช้งานแต่ละองค์ประกอบดังกล่าว ซึ่งทั้งหมดนั้นจะได้รับความเครียดทางความร้อน ทางกลทางไฟฟ้า และจากสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 2.6 ภาพหน้าตัดของขดลวดสเตเตอร์แบบฟอร์มวาวนแบบคอยล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.2.1 ฉนวนสเตรนด์ (Strand insulation)

ฉนวนสเตรนด์จะทำหน้าที่เป็นฉนวนกันระหว่างแต่ละตัวนำสเตรนด์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างตัวนำย่อย โดยฉนวนสเตรนด์จะได้รับความเสียหายที่รุนแรงในกระบวนการผลิต ดังนั้นจึงต้องมีการคุณสมบัติทางกลที่ดี นอกจากนี้เนื่องจากเป็นฉนวนที่อยู่ติดกับตัวนำจึงเป็นส่วนที่ได้รับความร้อนสูงสุดซึ่งเกิดจากกระแสที่ไหลผ่านสูงจึงต้องมีคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีด้วย

2.2.2.2 ฉนวนเทิร์น (Turn insulation)

ฉนวนเทิร์นเป็นฉนวนที่อยู่ถัดไปจากฉนวนสเตรนด์ซึ่งจะเป็นส่วนที่ป้องกันการลัดวงจรระหว่างเทิร์น หากมีการลัดวงจรเกิดขึ้นจะเสมือนว่าเป็นการลัดวงจรที่ฝั่งหุติยภูมิของหม้อแปลงออตโตซึ่งจะมีกระแสลัดวงจรที่สูงมาก โดยฉนวนนั้นจะได้รับความเครียดจากแรงดันไฟฟ้าเฟส-เฟสในขดลวดแบบโรเบลล์บาร์มักจะมีการใช้งานโดยไม่มีฉนวนเทิร์น จะมีเพียงแต่ฉนวนสเตรนด์เท่านั้น

2.2.2.3 ฉนวนกราว์วอลล์ (Groundwall insulation)

ฉนวนกราว์วอลล์เป็นฉนวนหลักระหว่างตัวนำทองแดงกับกราว์วอลล์ของแกนเหล็กสเตเตอร์ซึ่งอายุการใช้งานนั้นจะขึ้นอยู่กับผลของความเครียดทางกล ทางความร้อน ทางไฟฟ้า และผลจากสิ่งแวดล้อม โดยผลในทางไฟฟ้า ฉนวนกราว์วอลล์จะได้รับความเครียดจากแรงดันเฟส-กราว์วอลล์ แม้ว่าแรงดันที่เกิดขึ้นสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ขั้วของขดลวดและแรงดันที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้ๆ นิเวศตรอลจะมีค่าต่ำ แต่ในการออกแบบเครื่องจักรกลหมุนทั้งหมดก็จะออกแบบให้มีความหนาของฉนวนเท่ากันทั้งหมด ในทางความร้อน ฉนวนกราว์วอลล์จะทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นที่ตัวนำทองแดงไปยังแกนเหล็กสเตเตอร์ ดังนั้น ฉนวนกราว์วอลล์จำเป็นที่จะต้องมีความต้านทานความร้อนต่ำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนสะสมสูงขึ้นที่ตัวนำทองแดง ฉนวนกราว์วอลล์จึงจำเป็นต้องมีการใช้งานวัสดุที่มีค่าความนำความร้อนสูงและเพื่อที่จะป้องกันการเกิดโพรงอากาศขึ้นในฉนวนกราว์วอลล์อีกด้วย ในทางกลฉนวนกราว์วอลล์จะได้รับแรงทางกลอันเนื่องจากแรงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลในตัวนำทองแดง ซึ่งแรงทางกลนี้จะมีค่าเป็นสองเท่าของความถี่ไฟฟ้า ฉนวนกราว์วอลล์จึงต้องมีการออกแบบให้มีการรับแรงทางกลที่ดีด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.3 การเคลือบเพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนกราวนวนอลล์

การเคลือบเพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในระบบฉนวนสำหรับขดลวดสเตเตอร์ความถี่ 50/60 Hz ที่ใช้งานที่ระดับแรงดัน 6 kV หรือสูงกว่า และขดลวดสเตเตอร์ในมอเตอร์ที่มีการใช้ Inverter-fed drive (IFD) ที่ใช้งานที่ระดับแรงดัน 3.3 kV และที่สูงกว่า จุดประสงค์ของการเคลือบนี้คือเพื่อที่จะป้องกันการดิสชาร์จบางส่วนซึ่งเกิดบนผิวของสเตเตอร์บาร์หรือคอยล์ การเคลือบนี้ป้องกันการดิสชาร์จบางส่วนในบริเวณที่มีช่องว่างอากาศที่อาจจะเกิดขึ้นระหว่างคอยล์/บาร์กับแกนเหล็กสเตเตอร์ หรือที่บริเวณปลายขดลวด (end winding) ซึ่งอยู่ใกล้ๆ กับแกนเหล็กสเตเตอร์

2.2.3.1 การเคลือบสารกึ่งตัวนำในร่องสล็อต

เนื่องจากการที่ดิสชาร์จบางส่วนสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างคอยล์และแกนเหล็กซึ่งคล้ายกับดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนกราวนวนอลล์ เนื่องจากคอยล์หรือบาร์ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นภายนอกของแกนเหล็กสเตเตอร์ ดังนั้น คอยล์และบาร์จำเป็นต้องมีมิติความกว้างที่น้อยกว่าความกว้างของร่องสล็อตเพื่อที่แทรกสอดคอยล์/บาร์ลงในร่องสล็อตได้ ดังนั้น ช่องว่างอากาศระหว่างคอยล์/บาร์กับแกนเหล็กจึงเกิดขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อที่จะป้องกันการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ทางผู้ผลิตได้มีการทำการเคลือบคอยล์/บาร์ในพื้นที่ที่อยู่ในร่องสล็อตโดยสารเคลือบที่มีค่าความนำไฟฟ้ามาอย่างยาวนาน สารเคลือบที่ใช้นี้มักจะใช้เป็นเกราะไฟต์สำหรับทาหรือเทป ด้วยค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำเพียงพอ และเนื่องจากมีส่วนที่สัมผัสกับแกนเหล็กซึ่งต่อลงกราวด์ ดังนั้น แรงดันตกคร่อมช่องว่างอากาศจึงมีค่าเป็นศูนย์ การดิสชาร์จบางส่วนจึงไม่เกิดขึ้นเพราะว่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะมีค่าไม่เกิน 3 kV/mm

2.2.3.2 การเคลือบซิลิกอนคาร์ไบด์

จากการเคลือบสารกึ่งตัวนำในร่องสล็อตโดยปกติแล้วจุดสิ้นสุดจะยื่นออกมาจากปลายของร่องสล็อตประมาณไม่กี่เซนติเมตร ทำให้บริเวณจุดนั้นเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูงซึ่งจะมีค่าสูงกว่า 3 kV/mm ทำให้จะเกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้นที่ปลายของการเคลือบนี้ เนื่องจากขอบคมนี้จะทำให้เกิดรูปแบบของสนามไฟฟ้าที่มีความไม่สม่ำเสมอสูงมากที่ปลายของการเคลือบ ซึ่งสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปลผลผันกับรัศมี ซึ่งก็คือความหนาของชั้นสารเคลือบสารกึ่งตัวนำ ยิ่งมีรัศมีค่าน้อย ก็จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงยิ่งขึ้น ดังนั้น เพื่อป้องกันการเกิดดิสชาร์จขึ้นที่บริเวณนี้จึงต้องทำการเคลือบสารจากวัสดุซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide) ซึ่งมีคุณสมบัติคือ เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าสูง ค่าความต้านทานของวัสดุนี้จะลดลง หรือก็คือมีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับ จึงทำให้ ซึ่งจะไม่ทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.4 ระดับชั้นของฉนวน

ในการประยุกต์ใช้งานฉนวนนั้น จะใช้อุณหภูมิที่ฉนวนสามารถทนได้เป็นเกณฑ์ในการแบ่งฉนวนแต่ละชนิดจะสามารถใช้งานที่อุณหภูมิเท่าไรจึงขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาใช้ทำเป็นฉนวน การแบ่งระดับชั้นฉนวนแบ่งได้ดังต่อไปนี้ [5,6]

1. ฉนวนระดับชั้น Y : ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 90 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ผ้าฝ้าย กระดาษเซลลูโลส (Cellulose based paper) เส้นใยไหมธรรมชาติที่ไม่มีการชุบน้ำมันวานิชหรือเรซินและรวมไปถึงยางธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนซ์

2. ฉนวนระดับชั้น A : ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 105 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ผ้าฝ้าย ผ้าไหม กระดาษเซลลูโลส และ ลินิน โดยจะมีการนำวัสดุ ฉนวนไปชุบด้วยน้ำมันวานิชหรือเรซิน รวมทั้งอีนาเมลที่เป็นประเภทสารอินทรีย์

3) ฉนวนระดับชั้น E : ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 120 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ลิมาเนตพลาสติกหรือเทอร์โมพลาสติกร่วมกับไฟเบอร์เทอร์โมเซตติ้ง อีพ็อกซีอีนาเมล หรือวานิช

4) ฉนวนระดับชั้น B : ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ไมก้า ไฟเบอร์กลาส และแก้วใยหิน (Asbestos) โดยจะใช้เซลแล็ค แอสฟัลต์ และโพลีเอสเตอร์เรซินเป็นตัวยึดประสาน

5) ฉนวนระดับชั้น F : ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 155 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ไมก้า ไฟเบอร์กลาส และแก้วใยหิน เช่นเดียวกันกับระดับชั้น B แต่วัสดุที่ใช้เป็นตัวยึดประสานจะใช้อีพ็อกซีเรซิน ซึ่งฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องจักรกลหมุนในยุคปัจจุบันจะเป็นฉนวนในระดับชั้นนี้

6) ฉนวนระดับชั้น H : ฉนวนระดับชั้นนี้จะใช้งานที่อุณหภูมิแวดล้อมไม่เกิน 180 องศาเซลเซียส วัสดุที่นำมาใช้ทำฉนวนประเภทนี้ ได้แก่ ไมก้า ไฟเบอร์กลาส และแก้วใยหิน เช่นเดียวกันกับระดับชั้น B แต่วัสดุยึดประสานจะใช้ซิลิโคนเรซิน หรือยางซิลิโคน

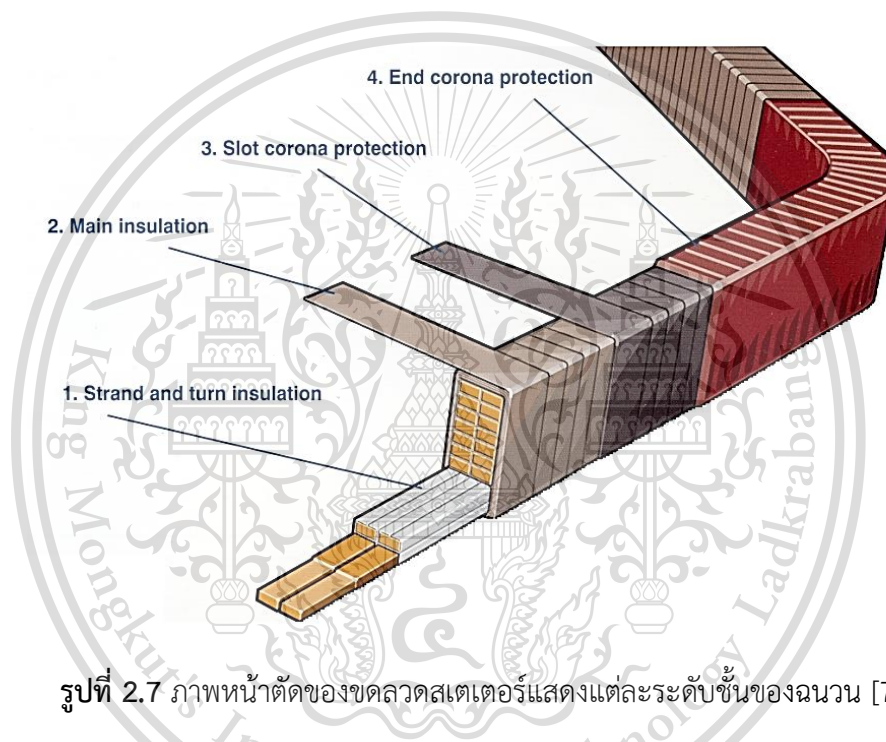
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.2.5 กระบวนการผลิต

การผลิตขดลวดสเตเตอร์สำหรับเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงเมื่อมีการใช้ไมก้าเทปและเรซินสังเคราะห์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธีที่แตกต่างกัน วิธีแรก คือ การใช้เรซินรีชไมก้าเทปด้วยอีพอกซีเรซินที่มีอยู่แล้วในขั้นตอน B (B-stage) วิธีที่สอง คือ การใช้ไมก้าเทปแห้งที่ทำการอิมแพร์กเนตด้วยความดันสุญญากาศ (Vacuum pressure impregnated, VPI) ด้วยอีพอกซีเรซินแล้วจึงนำไปบ่ม (Cured) [7] ในการผลิตขดลวด ขั้นตอนแรกคือการสร้างขดลวดในรูปทรงเรขาคณิตจากจำนวนตัวนำที่ต้องการทั้งหมดดังรูปที่ 2.7 จึงจำเป็นที่จะต้องมีความเหมาะสมและมีการประสานตัวนำเข้าด้วยกัน



รูปที่ 2.7 ภาพหน้าตัดของขดลวดสเตเตอร์แสดงแต่ละระดับชั้นของฉนวน [7]

2.2.5.1 กระบวนการ Resin Rich

ในกระบวนการนี้จะทำการพันไมก้าเทปโดยอาจจะใช้มือมนุษย์หรือเครื่องจักรในการพัน โดยใช้แรงดึง 40 ถึง 60 N ซึ่งจะใช้จำนวนรอบในการพันที่แม่นยำและสม่ำเสมอเพื่อให้ได้ความหนาของชั้นฉนวนที่เท่ากันและถูกต้องสำหรับการออกแบบ จากนั้นจะนำคอล์ยไปทำการอัดร้อน (Hot press) ที่อุณหภูมิประมาณ 100°C ซึ่งจะใช้อุณหภูมิ 2 ระดับ ในระดับแรกเพื่อทำการอาบ (Soak) คอล์ยทั้งหมดด้วยเรซิน และระดับที่สองจะทำการบ่มฉนวนที่อุณหภูมิตัวอย่างเช่น 170°C เป็นเวลา 30 ถึง 40 นาที หลังจากนั้นจะทำการอัดเพื่อให้แน่ใจว่าเรซินจะกระจายตัวเข้าไปในคอล์ยและให้ได้รูปทรงทางเรขาคณิตที่ต้องการ หลังจากนั้นจะนำคอล์ยไปติดตั้งในร่องสลิตและจะทำการบ่มซ้ำ (Post-curing) โดยปกติแล้วจะใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 140°C ขณะทำการบ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำมาใช้ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น ย้ำพิมพ์ซ้ำหรือดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของเอกสารทุกครั้ง

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ซ้ำที่ปลายขดลวดก็จะถูกบ่มด้วยเช่นกัน ซึ่งในส่วนนี้จะมีการพันเทปที่หดได้ (Shrink tape) โดยในการอัดร้อน (Hot press) นั้นจะดำเนินการในส่วนที่อยู่ร่องสลิต (Slot portion) เท่านั้น ส่วนที่ปลายขดลวด (Endwinding) จะไม่มีการทำการอัดร้อนเนื่องจากเป็นส่วนที่โค้งงอซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายทางกลเกิดขึ้นได้ [7]

2.2.5.2 กระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI)

กระบวนการ VPI จะทำการพันขดลวดด้วยไมก้าเทปแห้ง ซึ่งแรงดึงในการพันและจำนวนของการซ้อนทับกันจะมีผลต่อกระบวนการอิมแพร์กเนต กระดาษไมก้าที่ใช้ส่วนใหญ่จะมีความพรุนสูงซึ่งทำให้ง่ายต่อการอิมแพร์กเนต วิธีการนี้เนื่องจากทำการอิมแพร์กเนตด้วยสุญญากาศจึงทำให้ของเหลวอีพอกซีเรซินสามารถแทรกซึมเข้าไปได้ในทุกส่วนของฉนวน ทำให้มีความแข็งแรงมากและจะทำให้เกิดช่องว่างอากาศน้อย รวมถึงทำให้ไม่มีความชื้นในตัวฉนวน [8,9] ในกระบวนการนี้จึงมีประสิทธิภาพที่ดีกว่ากระบวนการ Resin rich [10]

กระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation VPI แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1) Individual VPI หรือ Single Bar VPI คือ เมื่อขดลวดแต่ละขดผ่านกระบวนการพันฉนวนแล้วจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI) ก่อนที่จะนำไปประกอบเข้ากับสเตเตอร์

2) Global VPI คือ เมื่อขดลวดแต่ละขดผ่านกระบวนการพันฉนวนแล้วจะถูกนำไปประกอบเข้ากับสเตเตอร์ จากนั้นจึงนำสเตเตอร์ที่ประกอบด้วยขดลวดเสร็จแล้วไปผ่านกระบวนการ Vacuum Pressure Impregnation (VPI)

2.3 การดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge)

การดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) คือ การดิสชาร์จเบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์โดยพลังงานที่ทำให้เกิดการดิสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโทรดเพราะฉนวนของอิเล็กโทรดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้าน ซึ่งอาจเป็นของแข็งของเหลว หรือก๊าซ ยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์อยู่ การดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่ไม่มีความสม่ำเสมอหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามวิกฤต แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น [11] โดยมาตรฐานทางไฟฟ้า IEC 60270 [12] ได้กำหนดค่านิยามไว้ว่า การดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) เป็นการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ล้วนขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของผู้ออกเอกสาร และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

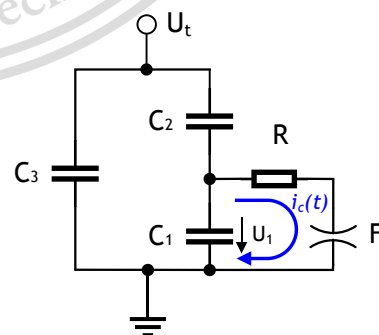
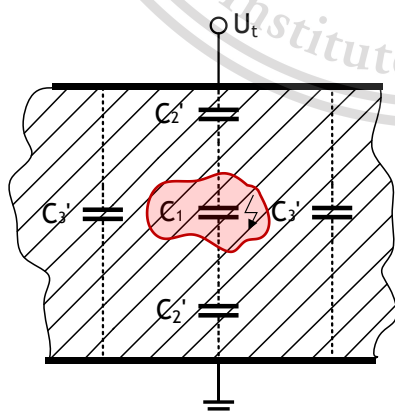
ดิสชาร์จทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเพียงบางส่วนระหว่างตัวนำและอาจเกิดหรือไม่เกิดขึ้นบริเวณที่ติดกับตัวนำ โดยทั่วไปแล้วการดิสชาร์จบางส่วนเป็นผลมาจากความเครียดทางไฟฟ้าภายในฉนวนหรือบนผิวของฉนวน โดยทั่วไปการดิสชาร์จดังกล่าวจะปรากฏเป็นพัลส์โดยมีระยะเวลาที่น้อยกว่า $1 \mu\text{s}$ [12]

การดิสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทบนผิวของฉนวน ในลักษณะการชนกระแทกเป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิวดร้งขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหาย อายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง การดิสชาร์จบางส่วนจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ โครโนดิสชาร์จ ดิสชาร์จตามผิว และ ดิสชาร์จภายใน

2.3.1 วงจรสมมูลของดิสชาร์จบางส่วน

เนื่องจากดิสชาร์จบางส่วนภายในที่เกิดขึ้นในเนื้อฉนวน หรือในอุปกรณ์ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตา ฉะนั้น เพื่อให้สามารถตรวจจับหรือทำการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนในฉนวนได้ จึงมีการเขียนวงจรสมมูลของฉนวนที่มีดิสชาร์จบางส่วนขึ้น ไม่ว่าจะเป็ดิสชาร์จบางส่วนชนิดใดก็สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ จึงใช้วงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงก๊าซเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดิสชาร์จบางส่วนภายใน [11] ดังวงจรสมมูลของฉนวนในรูปที่ 2.8

ในรูปที่ 2.8 (ก) แสดงวัสดุฉนวนที่มีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวน และฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_1 ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ C_2 เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_2' ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_1 นี้ จะรวมกันได้เป็น C_2 ส่วนฉนวนที่สมมูลคืออยู่โดยรอบของ C_1 จะให้ค่าเป็น C_3' และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_3 ดังรูปที่ 2.8 (ข) ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่า ๆ กับ C_3 ซึ่งมีความมากกว่า C_2 มากๆ นั่นคือ $C_t \approx C_3 \gg C_1 > C_2$



(ก) การดิสชาร์จภายในเนื้อฉนวน

(ข) วงจรสมมูลของการดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเนื้อหาและข้อมูลในเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 โครงสร้างของฉนวนที่มีโพรงอากาศอยู่ภายใน

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ถ้าป้อนแรงดัน U_t ที่ขั้วอิเล็กโตรด ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรก ดาวน์ของโพรงก๊าซซึ่งแทนด้วย C_1 ก็จะเกิดการเบรกดาวน์ในโพรงก๊าซ ซึ่งเขียนแทนด้วยแกป F (แล้วเอาตัวจ่ายแรงดันออก) จะมีความต้านทาน R ค่าหนึ่งต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสพัลส์ ดิสชาร์จ $i_c(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ช่วงกว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก δU_c ที่โพรง ก๊าซเกิดการดิสชาร์จ ซึ่งจะเกิดประจุขึ้นในโพรงอากาศ Δq_1 ดังสมการที่ 1

$$\Delta q_1 = \delta U_1 C_1 \quad (1)$$

เมื่อ กระแส $i_c(t)$ นี้ไหลอยู่ภายในที่ไม่สามารถวัดได้ แต่การดิสชาร์จของ C_1 ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุ ของ C_2 และ C_3 ในวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วเท่ากับ δU_t ซึ่งหาได้จากประจุใน C_1 ดัง สมการที่ 2

$$\delta U_t = \frac{C_2 \delta U_1}{C_2 + C_3} \quad (2)$$

ค่าแรงดันตกนี้ไม่ให้ข้อมูลอะไรเกี่ยวกับ δq_1 เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ $C_2 \delta U_1$ ค่า δU_1 นี้วัดได้เป็นพัลส์ รูปซัน ขึ้นอยู่กับ $i_c(t)$

เมื่อแทนค่า

$$\delta U_1 = \frac{\delta q_1}{C_1}$$

จะได้

$$\delta U_t = \frac{C_2 \delta q_1}{C_1 (C_2 + C_3)} \quad (3)$$

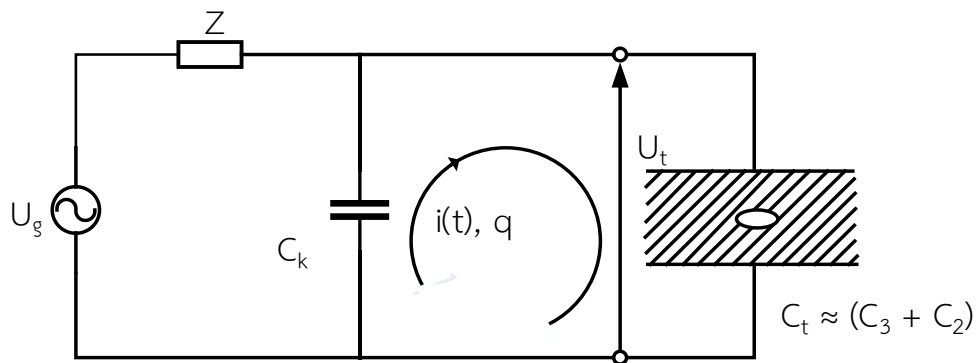
ค่าของ δU_t มีค่าเพียงเป็นมิลลิโวลต์ถึงโวลต์ ในขณะที่ δU_1 มีค่าเป็นกิโลโวลต์ แต่โดยที่ไม่ทราบค่า C_1 และ C_2 จึงไม่อาจหาความสัมพันธ์ของ δU_t กับ δU_1 และ δq_1 ได้ อย่างไรก็ตาม การดิสชาร์จใน โพรงก๊าซ C_1 เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทประจุ หรือกระแสในวงจรภายนอกที่สามารถ ตรวจวัดได้

2.3.2 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้

ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น การดิสชาร์จบางส่วนภายในเกิดขึ้นภายในฉนวน หรือภายในอุปกรณ์ที่ หุ้มห่อมิดชิด ดังนั้น ประจุหรือกระแสที่เกิดจากการดิสชาร์จในโพรงก๊าซนั้นไม่สามารถวัดได้ แต่การ ดิสชาร์จในโพรงก๊าซ C_1 นั้น มีผลให้เกิดการถ่ายเทประจุ เป็นผลให้เกิดแรงดันตก δU_t ที่ขั้วป้อน แรงดันภายนอก และการเคลื่อนที่ของประจุ หรือเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องจากแรงดันตก เป็น ค่ากระแสชดเชยที่วัดได้ (Measurable current) $i(t)$ ดังรูปที่ 2.9 แต่ไม่ใช่กระแสหรือประจุที่เกิดขึ้น จจริงภายในโพรงก๊าซ [11]

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.9 การดิสชาร์จบางส่วนในโพรงก๊าซในวัสดุฉนวน

เมื่อ U_g คือ ตัวจ่ายแรงดันป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k และวัสดุทดสอบ C_t

C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

C_t คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบประกอบด้วย C_1 , C_2 และ C_3 ดังรูปที่ 2.8

$i(t)$ คือ กระแสพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนที่ถ่ายทอดระหว่าง C_k กับ C_t เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกไป

ค่ากระแสไหลวน $i(t)$ ที่วัดได้นี้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนค่าเก็บประจุ C_k/C_t เพราะประจุจะเคลื่อนที่จากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ที่ชดเชยแรงดันตก δU_t คร่อม $C_t \approx (C_3 + C_2)$ ในกรณีอุดมคติ $C_k \gg C_t$ และ $C_t \approx C_3 + C_2$ ประจุ q จะมามีค่ามากที่สุด ค่า $C_k \gg C_t$ ค่า δU_t จะได้รับชดเชยสมบูรณ์ และประจุที่ถ่ายเท ก็คือ กระแส $i(t)$ ซึ่งประจุถ่ายเทหาได้จากสมการ [11]

$$q = \int i(t) dt = \left\{ C_3 + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \right\} \delta U_t \quad (4)$$

เพราะว่า $C_2 < C_1$ จึงได้
$$q = (C_3 + C_2) \delta U_t \quad (5)$$

เมื่อแทนค่าจาก (3) จะได้
$$q = \frac{C_2}{C_1} \delta q_1 \quad (6)$$

ประจุ q นี้ เรียกว่า ประจุที่ปรากฏของพัลส์ดิสชาร์จบางส่วน เพราะว่าประจุ q นี้ไม่เท่ากับประจุที่เกิดจริงในโพรงก๊าซ C_1 แต่สัมพันธ์กับ δq_1 ด้วยอัตราส่วนของ C_2/C_1 และเป็นพื้นฐานของการวัดค่าดิสชาร์จบางส่วนที่มีความเป็นจริงมากกว่า δU_t ในสมการ (2) โดยที่ C_3 เป็นค่าเก็บประจุหลักของ C_t ซึ่งไม่มีผลเกี่ยวกับค่าดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในทางปฏิบัติ เงื่อนไขที่จะทำให้ได้ $C_k \gg C_t$ หมายถึง ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยวมีค่ามากๆ นั้นไปได้ยาก เพราะว่าจะกลายเป็นโหนดให้กับตัวจ่ายแรงดัน และมีค่าใช้จ่ายที่สูง อย่างไรก็ตาม ค่ามากๆ นั้นตัวเก็บประจุ C_k จะใหญ่กว่า C_t ของวัสดุทดสอบเพียงเล็กน้อย จะเป็นผลทำให้ความไวในการตรวจจับหรือตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนนั้นน้อยลง เนื่องจากกระแสชดเชย $i(t)$ จะมีค่าน้อยลง

เมื่อพิจารณาจากการถ่ายเทของประจุระหว่าง C_t กับ C_k จะได้ความสัมพันธ์

$$Q = C_t \delta U_t \quad \text{เมื่อ} \quad C_t \approx (C_3 + C_2)$$

$$\text{นั่นคือ} \quad q = (C_t + C_k) \delta U'_t \quad (7)$$

เมื่อ $\delta U'_t$ คือ แรงดันที่ชั่วหลังจากสิ้นสุดการถ่ายเทประจุ ประจุที่ปล่อยจากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k สามารถวัดได้ และเรียกว่าประจุที่วัดได้ q_m (Measurable charge)

$$q_m = C_k \delta U'_t \quad (8)$$

ดังนั้น อัตราส่วนของประจุที่วัดได้ต่อประจุที่ปรากฏ คือ

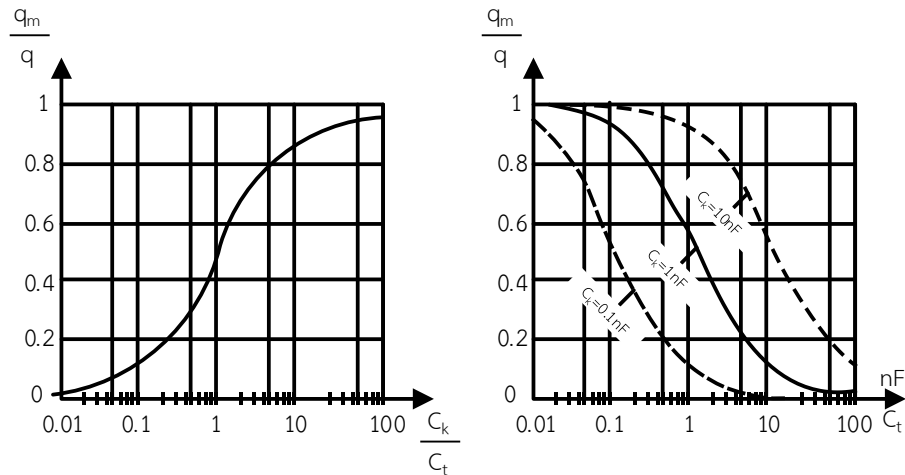
$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{(C_t + C_k)} \quad (9)$$

ความสัมพันธ์ของ q_m/q ในเทอมของ C_k/C_t หรือในเทอมของ C_t ดังแสดงในกราฟ รูปที่ 2.10 ซึ่งจะช่วยให้เลือกค่า C_k ที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ค่าความไวได้ตามต้องการ ถ้าต้องการความไวสูงจะต้องใช้ C_k ให้โตพอ ซึ่งอยู่กับ C_t แพลตฟอร์มวงจร q_m/q และความไวการวัดอาจตรวจสอบได้ จึงต้องการปรับเทียบวงจรทดสอบ โดยการป้อนประจุที่ทราบค่าแน่นอน และถูกต้องที่วัสดุทดสอบ ผลของ C_k/C_t ต่อความไวการวัด แสดงโดย q_m/q ดังรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

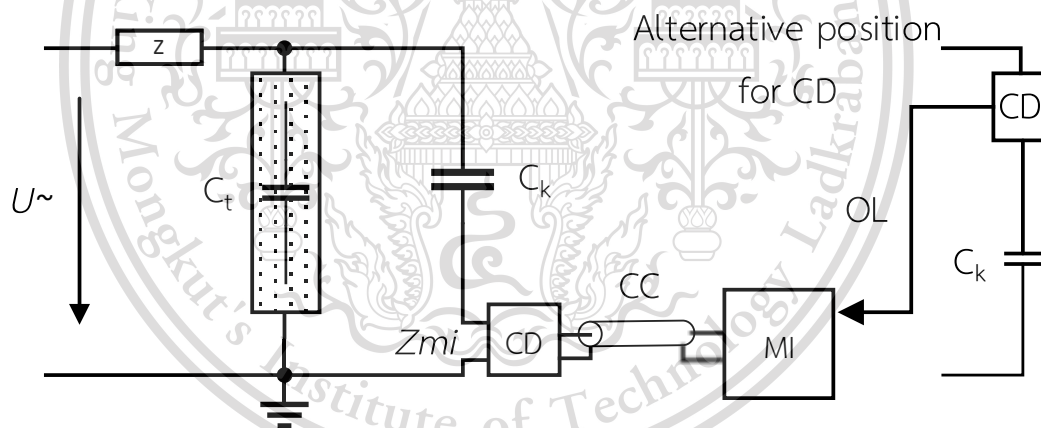
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.10 ผลของค่าตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว C_k ต่อความไวการวัด

2.3.3 วงจรทดสอบและระบบวัดการดิสชาร์จบางส่วน

วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนซึ่งเป็นวงจรที่ได้มาจากวงจรสมมูลพื้นฐานของการดิสชาร์จบางส่วน [12] แสดงดังรูปที่ 2.11-14

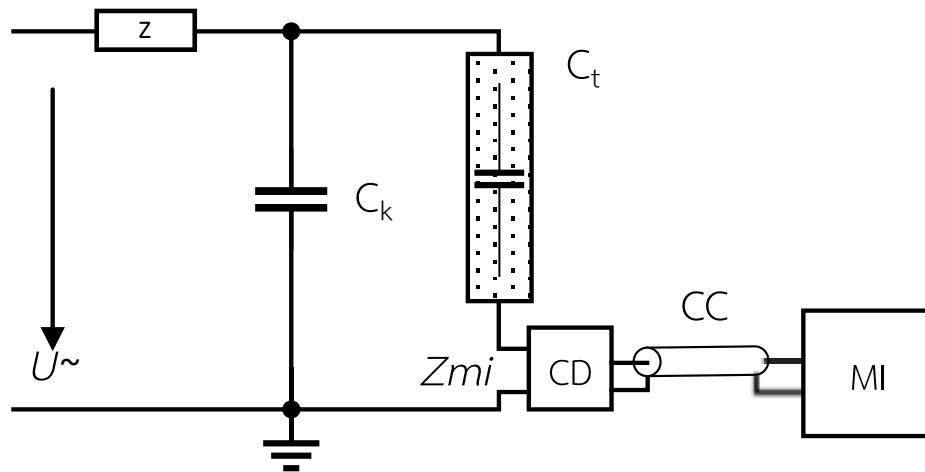


รูปที่ 2.11 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยการต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

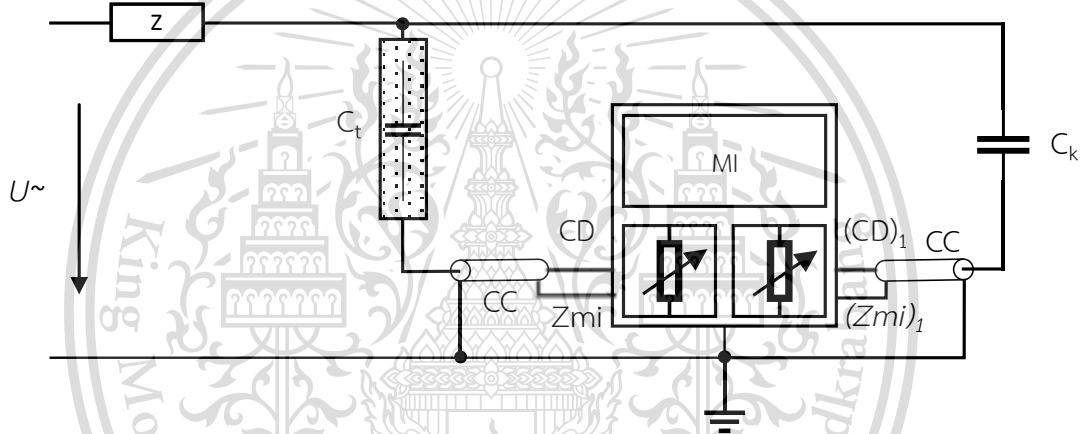
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

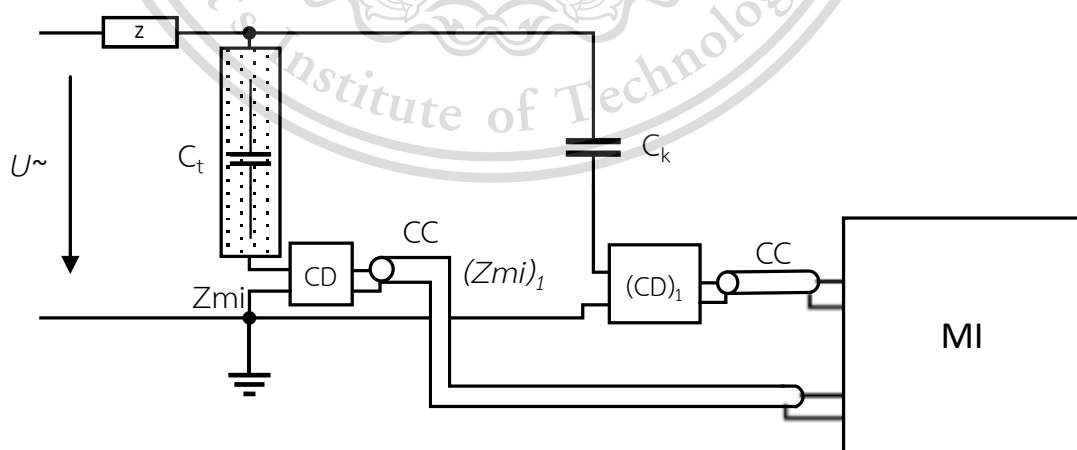
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.12 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยการต่ออุปกรณ์คัปปลิ่งอนุกรมกับวัตถุทดสอบ



รูปที่ 2.13 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยการต่อวงจรแบบสมดุล



รูปที่ 2.14 วงจรทดสอบสำหรับการวัดโดยการต่อวงจรแบบแยกขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในวงจรทดสอบจะประกอบด้วยอุปกรณ์ดังนี้ :

C_L คือ วัตถุทดสอบจะมีค่าความจุไฟฟ้าค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นภาระ (Load) ส่วนหนึ่งของวงจร

U คือ แหล่งจ่ายแรงดันสูงกระแสสลับที่ใช้ในการป้อนแรงดันให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและวัตถุทดสอบ

Z_k คือ ตัวกรองความถี่ ซึ่งจะมีคุณสมบัติแบบความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) นั่นคือ ตัวกรองจะทำหน้าที่ป้องกันสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันไม่ให้เข้าไปรบกวนวงจรทดสอบ แต่ยอมให้กระแสทดสอบที่ความถี่ต่ำผ่านไปได้ หน้าที่อีกอย่างก็คือ จะป้องกันไม่ให้สัญญาณพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนจากวัตถุทดสอบไหลออกจากลูปของวงจรวัด

C_k คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่มีค่าความจุไฟฟ้าสูงกว่าความจุทดสอบมากๆ โดยทั่วไปจะมีการใช้งานตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ค่าความจุ 1 nF โดยตัวเก็บประจุนี้จะทำหน้าที่ชดเชยประจุหรือกระแสให้กับวัตถุทดสอบขณะที่วัตถุทดสอบเกิดการดิสชาร์จบางส่วน ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวที่ใช้ในวงจรทดสอบควรจะไม่มีการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นภายในตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเอง

2.3.4 ระบบวัดสำหรับการวัดประจุปรากฏ (apparent charge)

จากที่ได้กล่าวไปข้างต้น ระบบวัดการดิสชาร์จบางส่วนสามารถแบ่งออกเป็นระบบย่อยได้ 3 ระบบ คือ 1. อุปกรณ์คัปปลิ่ง (Coupling device) 2. ระบบสายส่งสัญญาณ (สายเคเบิลวัดสัญญาณหรือสายไฟเบอร์ออปติก) และ 3. เครื่องมือวัด (Measuring instrument)

1. อุปกรณ์คัปปลิ่ง (Coupling device) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่วัดพัลส์กระแสที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วน นอกจากนี้ยังสามารถใช้งานเป็นภาคแรงต่ำของโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ เมื่อพิจารณาให้ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวเป็นตัวเก็บประจุภาคแรงสูง อุปกรณ์คัปปลิ่งจะแสดงลักษณะเป็นความถี่สูงผ่าน (High pass filter) เนื่องจากภายในจะประกอบด้วยอุปกรณ์พาสซีฟ (Passive element) เช่น มีตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกันอยู่ จึงสามารถป้องกันแรงดันสูงที่เกิดจากแรงดันความถี่กำลังไฟฟ้า

2. สายโคแอกเซียลเคเบิล (Coaxial cable) เป็นสายเคเบิลสำหรับส่งสัญญาณจากอุปกรณ์คัปปลิ่งในวงจรทดสอบไปยังระบบวัดซึ่งอาจจะเป็นห้องที่มีการชิลด์และมีความปลอดภัยจากแรงดันสูงในวงจรทดสอบ โดยในปัจจุบันจะมีการใช้งานสายไฟเบอร์ออปติก (Fiber optic) ซึ่งจำเป็นต้องมีอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นแสง และอุปกรณ์แปลงสัญญาณทางแสงเป็นไฟฟ้า ซึ่งจะช่วยป้องกันอุปกรณ์วัดไม่ให้เกิดความเสียหายในกรณีวัตถุทดสอบเกิดการเบรคดาวน์ในขณะที่ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นใบนี้เพื่อประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. เครื่องมือวัด (Measuring instrument) เป็นอุปกรณ์วัดและแสดงผลโดยอาจจะเป็นออสซิลอโคปหรืออาจจะเป็นเครื่องวิเคราะห์การดิสชาร์จบางส่วนที่สามารถประมวลผลสัญญาณวิเคราะห์สัญญาณแล้วสามารถแสดงผลในหน้าจอคอมพิวเตอร์ได้

2.3.4.1 ผลตอบสนองขบวนพัลส์ (Pulse train) ของเครื่องมือวัดประจุปรากฏ

จากสมมติฐานที่ว่าค่าแอมพลิจูดของพัลส์ที่อินพุตเข้ามามีค่าคงที่ในช่วงแบนด์วิดท์ (Bandwidth, Δf) ของระบบวัด ผลตอบสนองของระบบวัดจะเป็นสัญญาณพัลส์แรงดันที่มีค่าพีค (Peak) ซึ่งมีค่าเป็นสัดส่วนกับค่าพัลส์ประจุ รูปร่าง ช่วงระยะเวลาพัลส์ และค่าพีคของสัญญาณพัลส์เอาต์พุตจะสามารถหาได้จากฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของระบบวัด ดังนั้นรูปร่างและช่วงระยะเวลาของสัญญาณพัลส์จะแตกต่างจากสัญญาณพัลส์อินพุตไปอย่างสิ้นเชิง โดยสัญญาณพัลส์แรงดันสามารถแสดงผลในรูปแบบฐานของเวลาในเชิงเส้น (Linear time base) ซึ่งเทียบกับแรงดันทดสอบ หรือ แสดงผลในฐานของเวลาในรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal time base) ซึ่งเทียบแรงดันความถี่ทดสอบ หรือ แสดงผลในฐานของเวลาในรูปวงรี (Elliptical time base) ซึ่งเป็นการหมุนแรงดันความถี่ทดสอบเป็นรูปวงรี นอกจากนี้ มาตรฐานทางไฟฟ้า IEC 60270 ได้มีการแนะนำให้เครื่องมือวัดหรืออุปกรณ์บันทึกจะต้องหาปริมาณขนาดของดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดซ้ำสูงสุด (Largest repeatedly occurring PD magnitude) โดยการอ่านค่าของเครื่องมือวัดนี้ เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในการทดสอบจะต้องอยู่บนฐานของวงจรตรวจจับค่าพีคแบบแอนะล็อก หรือซอฟต์แวร์ที่ตรวจจับค่าพีคแบบดิจิทัลซึ่งมีค่าคงที่เวลาของประจุไฟฟ้า (Electrical charge time constant) ของที่ต่ำมากๆ และต้องมีค่าไม่เกิน 0.44

ผลตอบสนองของระบบต่อขบวนพัลส์ (pulse train) ประกอบด้วยพัลส์ที่มีระยะห่างเท่าๆ กัน และความถี่ในการเกิดซ้ำของพัลส์ (Pulse repetition frequency, N) ที่ทราบค่า โดยเครื่องมือวัดจะต้องทำการอ่านค่า (Reading) ตามตารางที่ 2.1 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 2.15 เพื่อระบุค่าขนาดของการดิสชาร์จบางส่วน ช่วงและอัตราขยาย (Gain) ของเครื่องมือวัดจะถือว่ามี การปรับที่เต็มสเกล (Full scale) หรือ 100% สำหรับ $N = 100$

ตารางที่ 2.1 ผลตอบสนองขบวนพัลส์ (Pulse train) ของเครื่องมือวัดการดิสชาร์จบางส่วน

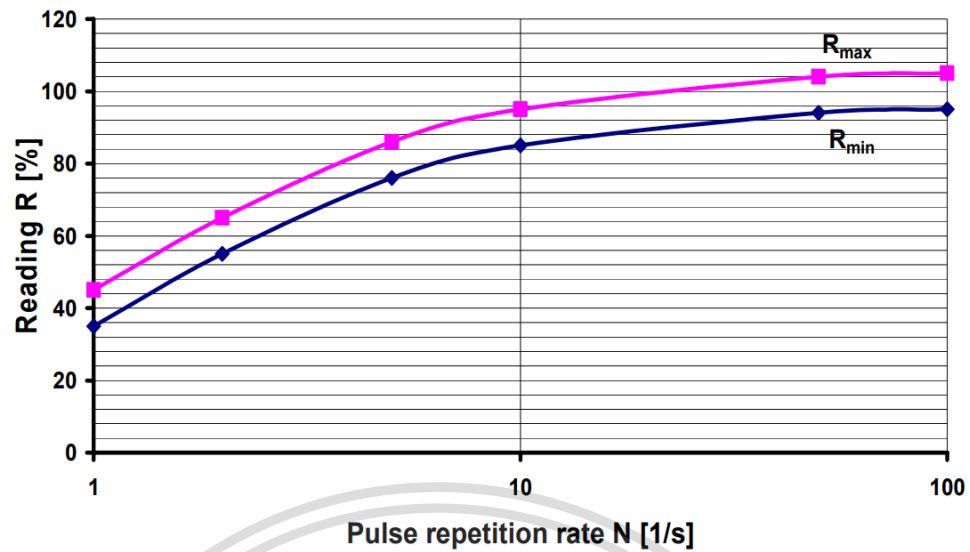
N (1/s)	1	2	5	10	50	≥ 100
R _{min} (%)	35	55	76	85	94	95
R _{max} (%)	45	65	86	95	104	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับอาจารย์และบุคลากรที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.15 Tolerance band ของผลตอบสนองขบวนพัลส์
ของการดิสชาร์จบางส่วน [12,13]

2.3.4.2 เครื่องมือวัดการดิสชาร์จบางส่วนแบบแถบกว้าง (Wide-band)

เครื่องมือวัดชนิดนี้เป็นระบบวัดการดิสชาร์จบางส่วนแบบแถบกว้างซึ่งแสดงลักษณะโดยฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function, $Z(f)$) โดยมีการกำหนดค่าของความถี่จำกัดขอบล่าง (Lower limit frequency, f_1) และความถี่จำกัดขอบบน (Upper limit frequency, f_2) และมีการลดทอนที่เพียงพอที่ความถี่ต่ำกว่า f_1 และ ความถี่สูงกว่า f_2 โดยมาตรฐาน IEC 60270 [12] ได้มีการแนะนำค่าต่างๆ ที่สำคัญ เช่น f_1 , f_2 และ Δf ดังนี้:

$$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz};$$

$$f_2 \leq 1 \text{ MHz};$$

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 900 \text{ kHz};$$

ผลตอบสนองของเครื่องมือวัดพัลส์กระแสดิสชาร์จบางส่วนโดยทั่วไปจะมีการแกว่งแบบหน่วงเกิน ซึ่งสามารถหาค่าประจุปรากฏ (Apparent charge, q) และชั่วของพัลส์กระแสดิสชาร์จบางส่วนได้จากผลตอบสนองนี้ ความละเอียดของพัลส์จะมีค่าน้อย โดยมีค่าโดยทั่วไปที่ $5 - 10 \mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.3.4.3 เครื่องมือวัดการดิซาร์จบางส่วนแบบแถบกว้างโดยแอ็กทีฟอินทิเกรเตอร์

เครื่องมือวัดประเภทนี้ประกอบด้วยวงจรขยายแบบแถบกว้างมากโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์อินทิเกรเตอร์ซึ่งถูกกำหนดลักษณะโดยค่าคงที่เวลาของค่าความจุไฟฟ้าและค่าความต้านทานไฟฟ้าของโครงข่าย ผลตอบสนองของอินทิเกรเตอร์ต่อพัลส์ดิซาร์จบางส่วน คือ สัญญาณแรงดันที่เพิ่มขึ้นด้วยผลรวมของประจุที่เวลาทันทีทันใด ค่าขนาดสุดท้ายของสัญญาณจึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับประจุมรวม โดยกำหนดให้ค่าคงที่เวลาของอินทิเกรเตอร์มีค่ามากกว่าช่วงระยะของพัลส์ดิซาร์จบางส่วน ในทางปฏิบัติค่าคงที่เวลาจะอยู่ที่ประมาณ 1 μ s ค่าความละเอียดเวลาพัลส์ของพัลส์ดิซาร์จบางส่วนที่ต่อเนื่องจากมีค่าน้อยกว่า 10 μ s

2.3.4.4 เครื่องมือวัดการดิซาร์จบางส่วนแบบแถบแคบ (Narrow-band)

เครื่องมือวัดประเภทนี้มีคุณลักษณะที่มีแบนด์วิดท์ (Δf) ต่ำ และมีค่าความถี่ตรงกลางแถบ f_m ซึ่งสามารถปรับค่าได้ตลอดย่านในช่วงความถี่กว้าง โดยค่าขนาดของสเปกตรัมของพัลส์กระแสดิซาร์จบางส่วนโดยประมาณมีค่าคงที่ มีการแนะนำค่าต่างๆ ที่สำคัญ เช่น Δf และ f_m ดังนี้:

$$9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz};$$

$$50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz};$$

และมีข้อแนะนำเพิ่มเติม คือ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function, $Z(f)$) ที่ความถี่ $f_m \pm \Delta f$ ควรมีค่าต่ำกว่าค่าพีคของแถบผ่าน (Peak pass-band value) อยู่ที่ 20 dB ผลตอบสนองของเครื่องมือวัดประเภทนี้ต่อพัลส์กระแสดิซาร์จบางส่วนจะมีการแกว่งโดยค่าบวกและค่าลบของลักษณะการ envelope ซึ่งเป็นสัดส่วนกับค่าประจุมปรากฏ โดยจะไม่ขึ้นอยู่กับชั่วของประจุ ค่าความละเอียดเวลาของพัลส์จะมีค่าสูง โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ที่ 80 μ s

2.3.5 ข้อกำหนดสำหรับการวัดด้วยเครื่องมือวัดดิซาร์จบางส่วนแบบดิจิทัล

(Digital PD-instruments)

ข้อกำหนดขั้นต่ำสำหรับเครื่องมือวัดดิซาร์จบางส่วนแบบดิจิทัล มีดังนี้ :

1. แสดงค่าของอัตราการเกิดซ้ำสูงสุดของขนาดของดิซาร์จบางส่วนที่เกิดซ้ำสูงสุด (Largest repeatedly occurring PD magnitude) นอกจากนี้ ปริมาณดังต่อไปนี้ตั้งแต่หนึ่งค่าหรือมากกว่าจะต้องถูกประเมินและถูกบันทึก

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2. ประจุมปรากฏ (Apparent charge, q_a) ที่ขณะเวลาใดๆ t_a เป็นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

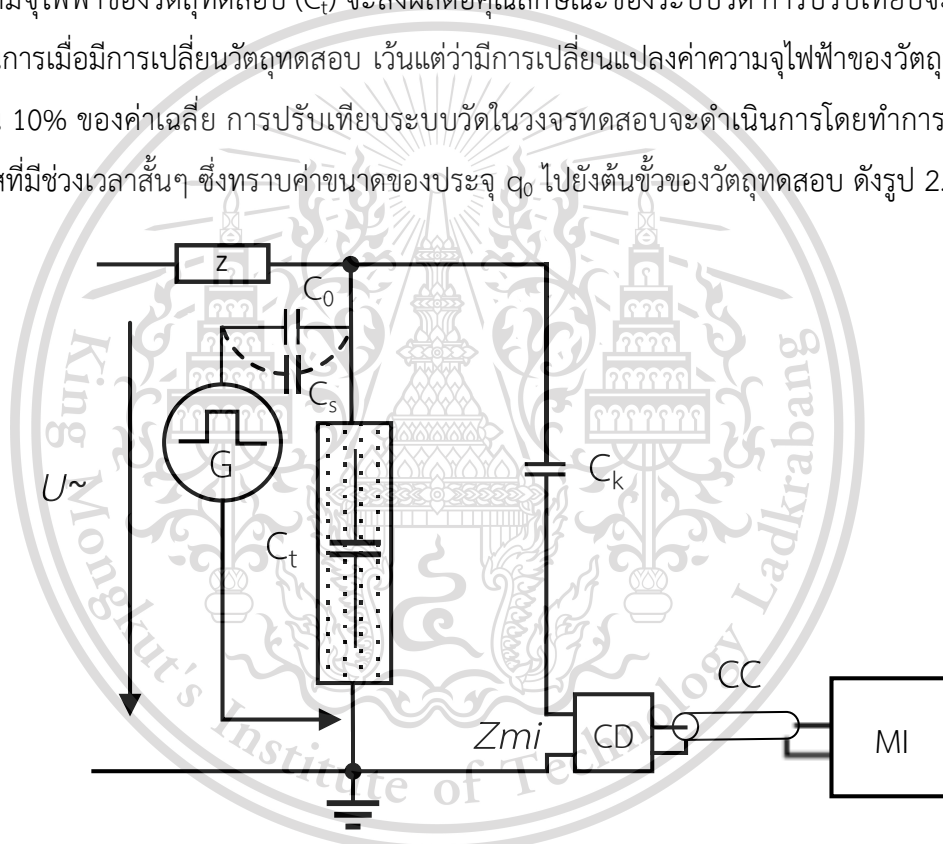
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3. ค่าแรงดันทดสอบที่ขณะใดขณะหนึ่งซึ่งถูกวัดที่ขณะเวลาใดๆ ของการเกิดขึ้นของแต่ละประจุปรากฏ (Individual apparent charge, q_i)
4. มุมเฟส Φ_i ของการเกิดพัลส์ดิสชาร์จบางส่วนที่เวลาใดๆ t_i

2.3.6 การปรับเทียบระบบวัดในวงจรทดสอบ

วัตถุประสงค์ของการปรับเทียบ คือ เพื่อตรวจสอบว่าระบบวัดจะสามารถที่จะวัดค่าขนาดของดิสชาร์จบางส่วนที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง การปรับเทียบระบบวัดในวงจรทดสอบจะถูกใช้เพื่อหาค่าสเกลแฟคเตอร์ (Scale factor, k) สำหรับการวัดค่าประจุปรากฏ (Apparent charge) เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของวัตถุทดสอบ (C_t) จะส่งผลต่อคุณลักษณะของระบบวัด การปรับเทียบจะต้องถูกดำเนินการเมื่อมีการเปลี่ยนวัตถุทดสอบ เว้นแต่จะมีการเปลี่ยนแปลงค่าความจุไฟฟ้าของวัตถุทดสอบไม่เกิน 10% ของค่าเฉลี่ย การปรับเทียบระบบวัดในวงจรทดสอบจะดำเนินการโดยทำการฉีดพัลส์กระแสที่มีช่วงเวลาสั้นๆ ซึ่งทราบค่าขนาดของประจุ q_0 ไปยังต้นขั้วของวัตถุทดสอบ ดังรูป 2.16

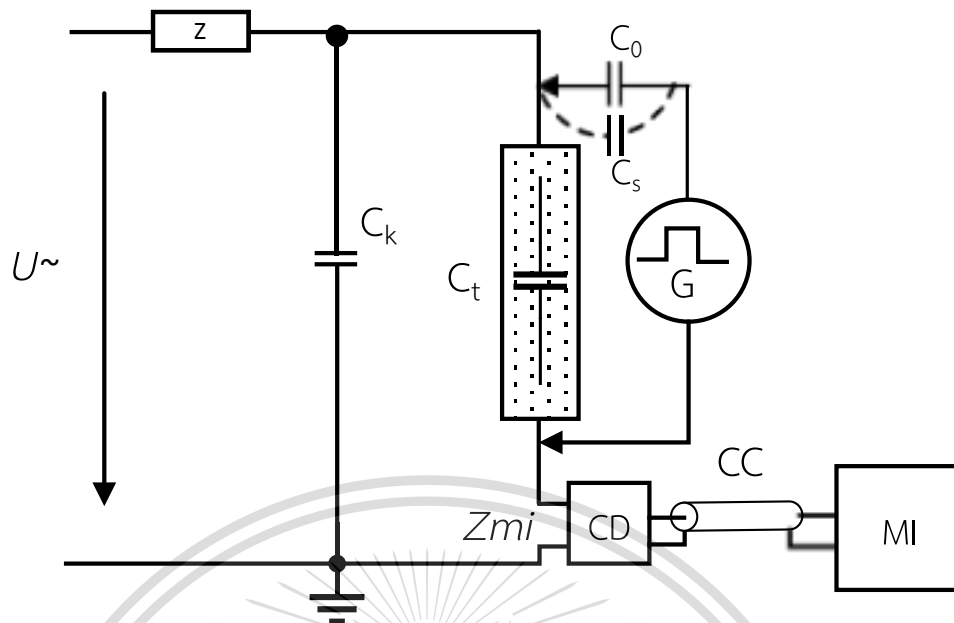


รูปที่ 2.16 การต่อเครื่องปรับเทียบในวงจรวัดที่อุปกรณ์คัปปลิ้ง
ต่ออนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.17 การต่อเครื่องปรับเทียบในวงจรวัดที่อุปกรณ์คัปปลิ่ง
ต่ออนุกรมอยู่กับตัววัตถุทดสอบ

2.3.6.1 ขั้นตอนการปรับเทียบ

การปรับเทียบระบบวัดสำหรับการวัดประจุปรากฏ (Apparent charge, q) จะดำเนินการโดยฉีดพัลส์กระแสโดยใช้เครื่องปรับเทียบ (Calibrator) ทำการต่อคร่อมที่ขั้วของวัตถุทดสอบ การปรับเทียบจะต้องดำเนินการที่ค่าขนาดหนึ่งค่าในช่วงของค่าขนาดที่คาดหวัง เพื่อให้มั่นใจว่าจะมีความแม่นยำที่ดีสำหรับค่าขนาดดิสชาร์จบางส่วนที่ระบุ (Specified PD magnitude) เนื่องจากตัวเก็บประจุ C_0 ของเครื่องปรับเทียบโดยทั่วไปมักจะใช้เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ การปรับเทียบวงจรทดสอบจึงต้องดำเนินการในวัตถุทดสอบที่ไม่มีการจ่ายไฟ สำหรับตัวเก็บประจุในการปรับเทียบ C_0 ควรมีค่าความจุมากกว่าค่าความจุของวัตถุทดสอบ 10 เท่า หลังจากการปรับเทียบเครื่องปรับเทียบจะต้องถูกนำออกจากวงจรทดสอบก่อนที่จะทำการจ่ายไฟ

2.3.6.2 เครื่องปรับเทียบ (Calibrator)

ในการปรับเทียบระบบวัดโดยทั่วไปแล้วจะทำการป้อนพัลส์กระแสด้วยเครื่องปรับเทียบ (Calibrator) ซึ่งประกอบด้วยเครื่องกำเนิดพัลส์แรงดันไฟฟ้าสเต็ป (Step voltage pulse) ซึ่งมีค่าแรงดัน คือ U_0 โดยต่ออนุกรมอยู่กับตัวเก็บประจุซึ่งมีค่า C_0 ดังนั้น พัลส์ในการปรับเทียบจึงเป็นพัลส์ประจุที่เกิดขึ้นๆ ซึ่งมีขนาดคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$q_0 = U_0 C_0 \quad (10)$$
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เครื่องปรับเทียบสามารถเป็นได้ทั้งพัลส์กระแสที่เป็นขั้วเดียว (Unipolar) และ สองขั้ว (Bipolar) ความถี่การเกิดซ้ำของพัลส์ (Pulse repetition frequency, N) จะต้องคงค่าไว้ (ตัวอย่างเช่น เป็นสองเท่าของความถี่แรงดันทดสอบ) หรือ ปรับค่าได้ (โดยให้ช่วงระหว่างพัลส์เกินเวลาความละเอียดของพัลส์ (Pulse resolution time)) เครื่องปรับเทียบดังกล่าวสามารถใช้ปรับเทียบระบบวัดเพื่อหาค่าสเกลแฟคเตอร์ (Scale factor) ของระบบวัดการดิสชาร์จบางส่วน โดยทั่วไปแล้วค่าสเกลแฟคเตอร์จะหาได้จากที่ 50% ถึง 200% ของค่าขนาดดิสชาร์จบางส่วนที่ระบุ (Specified PD magnitude)

2.4 การดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องจักรกลหมุน

ในเครื่องจักรกลหมุนทางไฟฟ้าแรงดันกระแสสลับส่วนใหญ่ จะมีบริเวณที่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้นจำนวนมาก การออกแบบเครื่องจักรกลหมุน วัสดุของโครงสร้าง วิธีการผลิต เงื่อนไขในการใช้งาน และการบำรุงรักษาในทางปฏิบัติสามารถส่งผลกระทบต่อปริมาณ ตำแหน่ง ลักษณะ และความสำคัญของดิสชาร์จบางส่วน หนึ่งในแหล่งกำเนิดของการดิสชาร์จในสเตเตอร์ก็คือ การดิสชาร์จภายใน (Internal discharge) ซึ่งเกิดขึ้นภายในโพรงอากาศซึ่งอยู่ภายในฉนวนกราวนด์วอลล์ (Groundwall insulation) โดยกิจกรรมนี้สามารถเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันแรกของการใช้งานจนถึงสิ้นสุดอายุการใช้งาน (End of life) ของเครื่องจักรกลหมุน โดยกิจกรรมดังกล่าวถือว่าเป็นกิจกรรมดิสชาร์จบางส่วนที่เป็นปกติ ดังนั้น จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องแยกแยะความแตกต่างระหว่างกิจกรรมที่เกิดขึ้นอย่างปกตินี้กับการดิสชาร์จอื่นๆ ที่เป็นอันตรายต่อฉนวนมากขึ้น ระบบฉนวนในขดลวดสเตเตอร์จะมีการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นในการใช้งาน โดยธรรมชาติแล้วระบบฉนวนจะมีคุณสมบัติในการต้านทานต่อการเกิดดิสชาร์จบางส่วนอันเนื่องมาจากฉนวนที่ใช้เป็นฉนวนไม่ก้ำซึ่งเป็นวัสดุอินทรีย์ อย่างไรก็ตาม การดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นมักจะเป็นเพียงอาการ (Symptom) ของจุดบกพร่องของฉนวน เช่น ความผิดพลาดในกระบวนการผลิตหรือการเสื่อมสภาพในการใช้งาน แทนที่จะเป็นสาเหตุโดยตรงของการล้มเหลว อย่างไรก็ตาม ที่กล่าวมาข้างต้นจะขึ้นอยู่กับแหล่งกำเนิดและขนาดของดิสชาร์จบางส่วน จุดนี้อาจจะกลายเป็นปัจจัยในการเสื่อมสภาพของฉนวนที่บริเวณที่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้น โดยประเภทของดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องจักรกลหมุนแบ่งได้ดังนี้ [14,15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.1 ดิสชาร์จภายใน (Internal discharges)

หนึ่งในแหล่งกำเนิดการดิสชาร์จบางส่วนที่พบบ่อยที่สุดในสเตรเตอร์ คือ ดิสชาร์จภายในซึ่งเป็นช่องเล็กๆ ภายในฉนวนกราวด์วอลล์ การดิสชาร์จนี้เกิดขึ้นตั้งแต่วันแรกที่มีการใช้งานจนถึงจุดสิ้นสุดของอายุการใช้งาน (End of life) โดยไม่ได้มีการลดอายุการใช้งานที่คาดการณ์ไว้ (Expected life) ของเครื่องจักรกลและถือเป็นการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นปกติ ดังนั้น จึงเป็นสิ่งที่สำคัญที่จะต้องแยกแยะความแตกต่างระหว่างการดิสชาร์จบางส่วนที่เป็นปกตินี้และการดิสชาร์จบางส่วนอื่นๆ ที่เป็นอันตรายอย่างมาก

2.4.1.1 โพรงอากาศภายใน (Internal voids)

แม้ว่าในกระบวนการผลิตจะมีการออกแบบให้มีโพรงอากาศภายในน้อยที่สุด แต่ก็จะมีโพรงอากาศบางส่วนในระบบฉนวนที่มีการใช้เทปไมก้าอิมแพ็คเน็ตด้วยเรซินซึ่งโดยปกติจะมีการใช้งานในเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง เนื่องจากดิสชาร์จบางส่วนเป็นเรื่องที่ปกติสำหรับเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง ไมก้าจึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้มีอายุการใช้งานที่ยอมรับได้ภายใต้เงื่อนไขการเสื่อมสภาพที่กำหนด

2.4.1.2 ดิลาไมเนชันภายใน (Internal delamination)

ดิลาไมเนชันภายในฉนวนอาจเกิดขึ้นได้จากการอิมแพ็คเน็ตด้วยเรซินหรือการบ่มของระบบฉนวนในกระบวนการผลิตที่ไม่เหมาะสม หรือเกิดขึ้นโดยการมีความเครียดทางความกลและความร้อนสูงเกินขณะใช้งาน ดิลาไมเนชันเนื่องจากการเสื่อมสภาพโดยปกติจะเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระยะยาว (Long-term process) ดังนั้น ดิลาไมเนชันในฉนวนเก่าจึงเป็นสัญลักษณ์ของการเสื่อมสภาพ ช่องว่างขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นนี้จะส่งผลให้เกิดการดิสชาร์จซึ่งปลดปล่อยพลังงานที่มีค่าค่อนข้างสูงซึ่งอาจจะทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพลงอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดิลาไมเนชันจะลดค่าความนำความร้อนของฉนวน ซึ่งนำไปสู่การเร่งในการเสื่อมสภาพของฉนวน

2.4.1.3 ดิบอนดิงระหว่างตัวนำที่มีฉนวนหุ้มและฉนวนกราวด์วอลล์

การดิสชาร์จบางส่วนจากการดิบอนดิง (Debonding) ระหว่างตัวนำและวัสดุฉนวนจะเกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศตามแนวยาวซึ่งภายในจะมีอากาศหรือก๊าซอยู่ ซึ่งมีการฝังตัวอยู่ระหว่างฉนวนหลักและตัวนำ โดยจะทำให้เกิดความร้อนสูงหรือแรงทางกลที่สูงซึ่งทั้งสองอย่างนี้จะนำไปสู่การแยกตัวของบริเวณขนาดใหญ่ระหว่างชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.4.2 สล็อตดิสชาร์จ (Slot discharges)

สล็อตดิสชาร์จ (Slot discharges) ในเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูงอาจเกิดขึ้นได้เมื่อการเคลื่อนที่ของสล็อตที่มีค่าความนำไฟฟ้าเสียหาย ซึ่งสิ่งนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าที่สิ่งสกปรกบริเวณวัสดุที่ใช้เคลือบ หรือเพราะว่าคอยล์/บาร์มีการเคลื่อนไหวในร่องสล็อต การสึกกร่อนและการขัดสีของวัสดุ การเสียหายที่เกิดขึ้นจากสารเคมี หรือการบกพร่องในกระบวนการผลิต เมื่อคอยล์/บาร์มีการหลวมในร่องสล็อต แรงแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้คอยล์/บาร์ที่หลวมนี้เกิดการสั่นสะเทือนในร่องสล็อต นำไปสู่การขัดสีตรงบริเวณสารเคลือบสารกึ่งตัวนำและฉนวน ทำให้เกิดความเสียหายเฉพาะจุดเกิดขึ้นที่สารเคลือบสารกึ่งตัวนำ จึงทำให้เกิดการดิสชาร์จบางส่วนที่มีขนาดพัลส์ที่สูงเกิดขึ้นระหว่างกราวด์โลหะอิเล็กทรอนิกส์และเนื้อฉนวนหลัก

2.4.3 การดิสชาร์จที่ช่องว่างระหว่างปลายขดลวดและบริเวณผิว

การดิสชาร์จบางส่วนในบริเวณปลายขดลวดอาจเกิดขึ้นหลายตำแหน่งซึ่งเป็นจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าเฉพาะจุดสูง การดิสชาร์จดังกล่าวมักจะเกิดขึ้นตรงบริเวณผิวหน้าสัมผัสระหว่างองค์ประกอบที่แตกต่างกันของขดลวดสเตเตอร์ในส่วนที่ไม่ได้อยู่ในร่องสล็อต (Overhang) ถ้าสารเคลือบควบคุมสนามของปลายขดลวด (End-winding) ไม่มีประสิทธิภาพในการควบคุมสนามเนื่องจากการออกแบบที่ไม่ดี สิ่งสกปรก ความพรุน ผลกระทบจากความร้อน เป็นต้น การเกลี่ยสนามจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้จึงทำให้มีการเกิดดิสชาร์จขึ้น ซึ่งจะค่อยๆ กัดกร่อนฉนวนและผิวของวัสดุ

นอกจากนี้ การดิสชาร์จบางส่วนอาจเกิดขึ้นระหว่างเฟส ตัวอย่างเช่น การมีระยะเคลียร์เรนซ์ (Clearance) ที่ไม่เพียงพอ เกิดขึ้นที่อุปกรณ์รองรับที่ส่วนที่ไม่ได้อยู่ในร่องสล็อต (Overhang support system) หรือเนื่องจากการดิสชาร์จระหว่างเฟสเทียบกราวด์บนผิวของปลายขดลวด (End-winding surface)

2.4.4 การดิสชาร์จเนื่องจากวัสดุอื่นที่มีความนำไฟฟ้า

สิ่งสกปรกที่มีความนำไฟฟ้าของขดลวดความเข้มข้นเฉพาะจุดของการดิสชาร์จบางส่วนอย่างมาก โดยจะทำให้เกิดความเสียหายที่บริเวณเฉพาะจุดในฉนวน สิ่งอื่นที่อันตรายกว่านี้อาจเกิดจากการมีชิ้นส่วนโลหะขนาดใหญ่อยู่ เช่น สลักเกลียวหรือสกรูที่หักงอถึงการลึ้มอุปกรณ์ไว้โดยไม่ตั้งใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5 ตัวอย่างของ PRPD patterns ที่ถูกบันทึกในห้องปฏิบัติการ

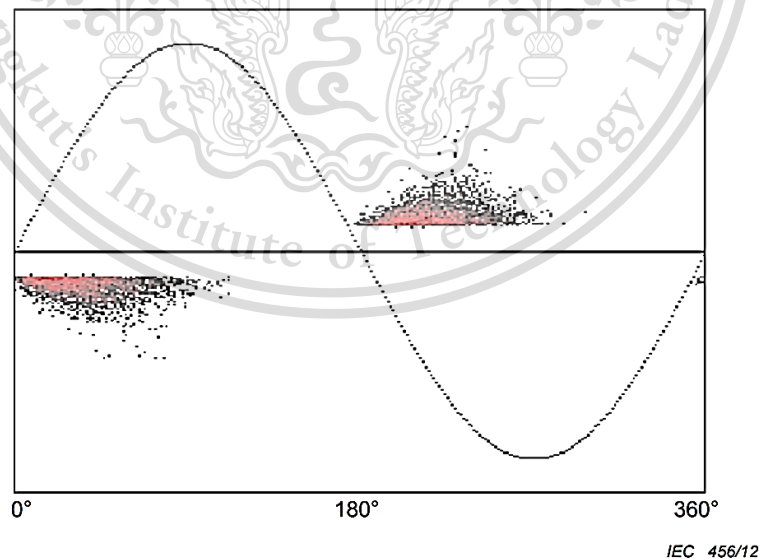
การวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนที่ดำเนินการในสถานะห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอย่างดี เพื่อให้เกิดผลจากสัญญาณรบกวนน้อย สำหรับจุดบกพร่องทุกกรณีที่ถูกจำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการ โดยทำการบันทึกในรูปแบบ Φ -q-n patterns หลายครั้งในระยะเวลายาวนานเพื่อตรวจสอบความสามารถในการทำซ้ำของ PRPD patterns [16,17]

2.5.1 การดิสชาร์จภายใน

การดิสชาร์จภายใน จะแยกเป็นกรณีศึกษา โพรงอากาศภายใน รอยแยกภายใน และ รอยแยกภายในระหว่างตัวนำและฉนวน

2.5.1.1 โพรงอากาศภายใน (Internal voids)

การดิสชาร์จภายในเกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศหรือก๊าซที่ฝังอยู่ภายในเนื้อฉนวน กราวนัวอลล์ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการผลิตและไม่ได้บ่งบอกถึงปัจจัยในการเสื่อมสภาพ ภายใต้การเกิดดิสชาร์จภายในไม่สามารถนำไปสู่การเสื่อมสภาพของฉนวนได้ ในรูปที่ 2.18 แสดงถึง PRPD patterns ซึ่งถูกบันทึกได้ในห้องปฏิบัติการ เมื่อมีเพียงดิสชาร์จภายในเกิดขึ้นในบาร์เท่านั้น คุณลักษณะที่สำคัญของ PRPD มีลักษณะที่สมมาตรของดิสชาร์จบางส่วนชั่ววอกและชั่วลบ รวมถึงมีรูปร่างโค้งมน โดยปกติแล้วดิสชาร์จบางส่วนชั่วลบจะเกิดขึ้นในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0 - 90 องศา และ ดิสชาร์จบางส่วนชั่วบวกจะเกิดขึ้นในช่วงมุมเฟสระหว่าง 180 - 270 องศา



รูปที่ 2.18 ตัวอย่าง PRPD ในโพรงอากาศ

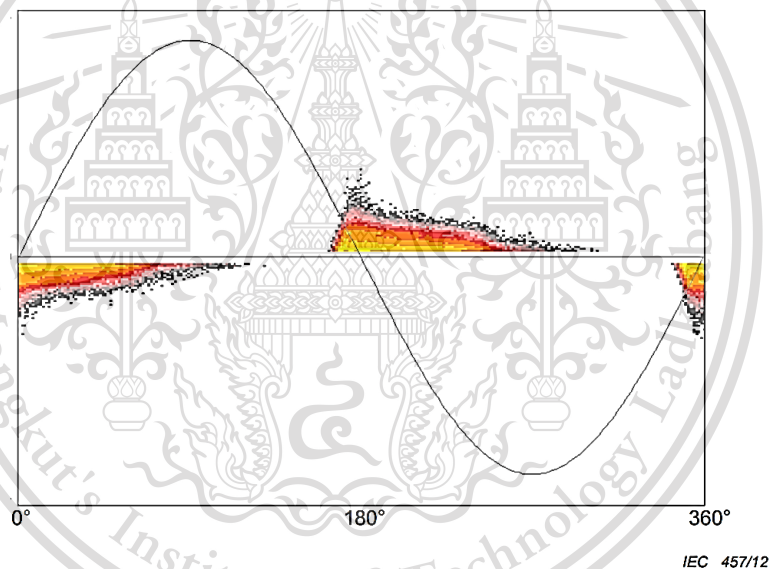
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5.1.2 รอยแยกภายใน

ดิสชาร์จบางส่วนในรอยแยกของฉนวน เกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศหรือก๊าซมีลักษณะเป็นแนวยาวซึ่งฝังตัวอยู่ในเนื้อฉนวนกราวด์วอลล์ มักจะเกิดจากความร้อนที่สูงเกินไปหรือจากแรงทางกลที่รุนแรงซึ่งทั้งสองอย่างนี้สามารถนำไปสู่การแยกขาดบริเวณกว้างระหว่างชั้นของฉนวน โดยทั่วไปแล้ว PRPD pattern เกิดจากการแยกตัวภายในเนื้อฉนวน ดังรูป 2.19 เช่นเดียวกับ PRPD pattern ของการดิสชาร์จภายใน จะสมมาตรในลักษณะจำนวนของดิสชาร์จบางส่วนซึ่งสะท้อนถึงความสมมาตรของจุดบกพร่อง แม้ว่าจุดบกพร่องประเภทนี้จะคล้ายกับการดิสชาร์จในโพรงอากาศ แต่จำนวนของดิสชาร์จบางส่วนจะมีค่าที่สูงกว่า โดยส่วนใหญ่เป็นเพราะมีขนาดของดิสชาร์จบางส่วนที่ใหญ่กว่า นอกจากนี้ PRPD pattern จะมีรูปร่างโค้งมนน้อยกว่า PRPD pattern ในโพรงอากาศ ซึ่งบางครั้งก็มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปสามเหลี่ยม ระบบฉนวนที่ใช้งานรุ่นเก่าจะมีการแยกตัวในเนื้อฉนวนมากกว่าในฉนวนไมก้า-อีพ็อกซี



รูปที่ 2.19 ตัวอย่าง PRPD ในรอยแยกช่องว่างอากาศ

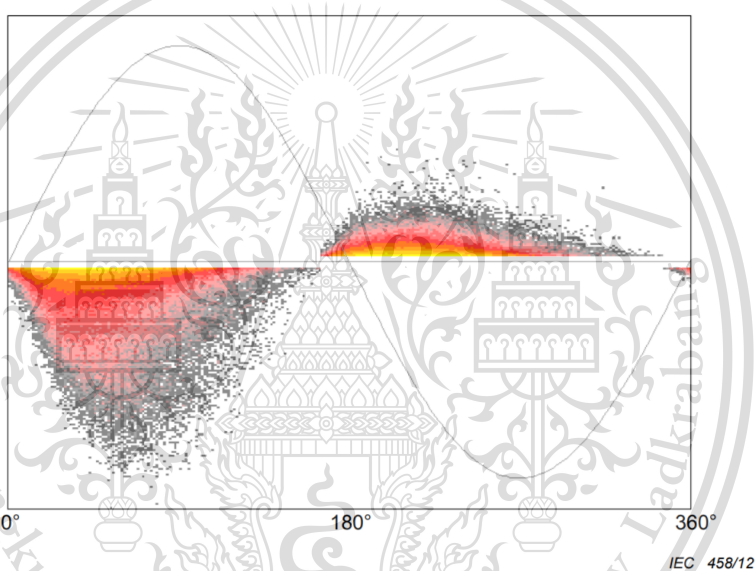
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5.1.3 รอยแยกภายในระหว่างตัวนำและฉนวน

ดิสชาร์จบางส่วนในรอยแยกระหว่างตัวนำและเนื้อฉนวนกราวนัวอลล์ เกิดขึ้นภายในช่องว่างอากาศซึ่งมีลักษณะเป็นแนวยาวซึ่งฝังตัวอยู่ระหว่างเนื้อฉนวนกราวนัวอลล์และตัวนำทองแดง มักจะเกิดจากความร้อนที่สูงเกินไปหรือจากแรงทางกลที่รุนแรงซึ่งทั้งสองอย่างนี้สามารถนำไปสู่การแยกขาดบริเวณกว้างระหว่างชั้นของฉนวน โดยทั่วไปแล้ว PRPD pattern ที่เกิดขึ้นจากการแยกตัวระหว่างตัวนำและฉนวน ดังรูป 2.20 เนื่องจากจุดบกพร่องประเภทนี้ไม่สมมาตร (ฝั่งหนึ่งคือ ตัวนำทองแดงและอีกฝั่งคือ ฉนวนกราวนัวอลล์) PRPD pattern ที่เกิดขึ้นก็จะมีลักษณะที่ไม่สมมาตร เช่นเดียวกับดิสชาร์จบางส่วนชั่วพลบที่เกิดขึ้นในช่วงครึ่งไซเคิลของแรงดันบวกจะมีจำนวนและขนาดที่สูงกว่าดิสชาร์จบางส่วนชั่วพลบที่เกิดขึ้นในช่วงครึ่งไซเคิลของแรงดันลบ



รูปที่ 2.20 ตัวอย่าง PRPD ในรอยแยกระหว่างตัวนำและฉนวน

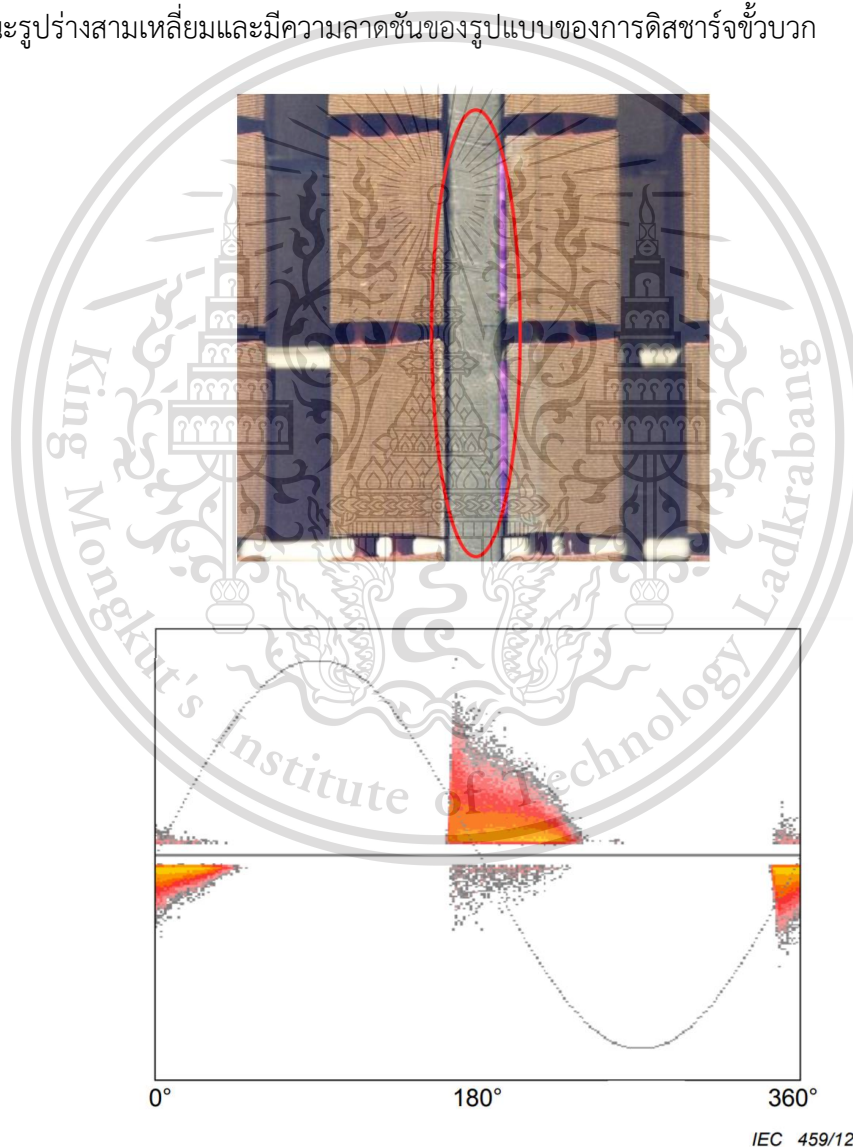
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5.2 สล๊อตดิสชาร์จ

การดิสชาร์จบางส่วนในร่องสล๊อต เกิดจากช่องอากาศหรือก้ำขระหว่างผิวของบาร์และแกนเหล็กสเตเตอร์ ทำให้เกิดการสัมผัสทางไฟฟ้าระหว่างสารกึ่งตัวนำที่ใช้เคลือบบาร์และสล๊อตเสียหายหรือสูงเกินไป การเกิดดิสชาร์จบางส่วนประเภทนี้ได้ถูกจำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการ ดังรูป ด้านซ้าย PRPD pattern ที่เกิดขึ้นจากดิสชาร์จบางส่วนประเภทนี้ ดังรูป 2.21 (ด้านล่าง) เนื่องจากสล๊อตดิสชาร์จในจุดบกพร่องแสดงถึงจุดบกพร่องที่มีลักษณะไม่สมมาตร (ฝั่งหนึ่งคือฉนวนและอีกฝั่งคือแกนเหล็กสเตเตอร์) PRPD pattern จึงมีลักษณะที่ไม่สมมาตรเช่นเดียวกัน PRPD pattern ในร่องสล๊อตมีลักษณะไม่สมมาตรเนื่องจากการดิสชาร์จค่าบวก ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงครึ่งไซเคิลของแรงดันลบ ซึ่งรวมกับลักษณะรูปร่างสามเหลี่ยมและมีความลาดชันของรูปแบบของการดิสชาร์จขั้วบวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **รูปที่ 2.21** ตัวอย่าง PRPD ของสล๊อตดิสชาร์จให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

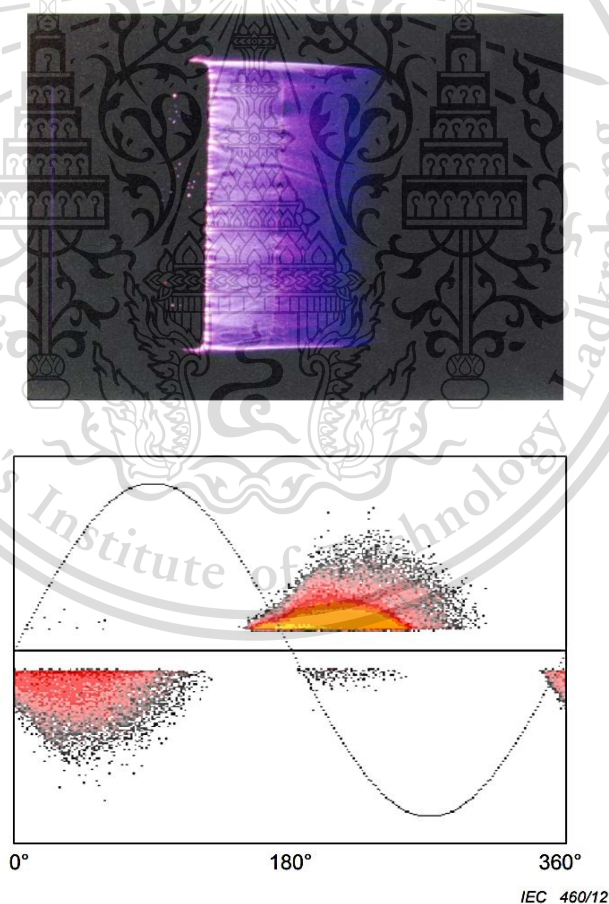
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5.3 การดิสชาร์จบริเวณขดลวดปลาย

การดิสชาร์จบริเวณขดลวดปลายจะแยกเป็นกรณีศึกษา การเกิดโคโรนาบริเวณสารเคลือบกึ่งตัวนำและสารเคลือบลดความเครียด ดิสชาร์จแตร็คกิ้งตามรอยผิว และแก๊ปดิสชาร์จ

2.5.3.1 การเกิดโคโรนาบริเวณสารเคลือบกึ่งตัวนำและสารเคลือบลดความเครียด

การดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นโดยตรงที่จุดเชื่อมต่อของ S/C และ Stress grading coating เมื่อ field grading system ไม่เพียงพอส่งผลให้มีความเครียดเฉพาะจุดสูงขึ้น การดิสชาร์จประเภทนี้ได้ถูกจำลองในห้องปฏิบัติการ ดังรูป 2.22 (ด้านบน) ในรูปนี้การเคลือบ S/C จะอยู่ด้านซ้าย ในขณะที่ Stress grading coating จะอยู่ด้านขวา โดยทั่วไป PRPD pattern ที่เกิดขึ้นในรูป ด้านขวาจะมีลักษณะไม่สมมาตรเนื่องจากการดิสชาร์จค่าบวก ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงครึ่งไซเคิลของแรงดันลบ ซึ่งรวมถึงลักษณะรูปร่างโค้งมน ในบางกรณีความไม่สมมาตรของค่าแอมพลิจูดสูงสุดอาจไม่เกิดขึ้น แต่ยังคงมีความไม่สมมาตรของจำนวนดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.22 ตัวอย่าง PRPD โคโรนาบริเวณสารเคลือบกึ่งตัวนำและสารเคลือบลดความเครียด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5.3.2 ดิสชาร์จแตร็คกิ้งตามรอยผิว

การดิสชาร์จบางส่วนประเภทนี้เกิดขึ้นตามแนว winding overhang เนื่องจากสิ่งเปราะเปื้อนในอากาศหรือบนผิวฉนวน การดิสชาร์จนี้ถูกจำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการ ดังรูป 2.23 (บน) ในรูปนี้ S/C coating อยู่ด้านซ้ายขณะที่ grading coating อยู่ด้านขวา โดยทั่วไป PRPD pattern เนื่องจากการดิสชาร์จประเภทนี้ ดังรูป 2.23 (ล่าง) การดิสชาร์จ surface tracking ในวงรีสีแดงในรูป คุณลักษณะหลักของ surface tracking จะเกิดขึ้นในลักษณะเป็นหมอกในแนวตั้ง ซึ่งรวมถึงจำนวนดิสชาร์จบางส่วนที่ต่ำ ในบางกรณี ดิสชาร์จบางส่วนอาจเกิดขึ้นทั้งสองข้าง



รูปที่ 2.23 ตัวอย่าง PRPD ของการดิสชาร์จแตร็คกิ้งตามแนวขดลวดปลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2.5.3.3 แก๊ปดิสชาร์จ

การดิสชาร์จประเภทนี้จะเกิดขึ้นระหว่างบาร์ในบริเวณ winding overhang หรือระหว่างบาร์และ press finger ของแกนสเตเตอร์ การดิสชาร์จทั้งสองนี้ได้ถูกจำลองขึ้นในห้องปฏิบัติการ ดังรูป 2.24 (ซ้าย) รูปด้านบนแสดงถึงการดิสชาร์จบางส่วนระหว่างบาร์และรูปด้านล่างแสดงถึงการดิสชาร์จบางส่วนระหว่างบาร์และ press finger ของแกนสเตเตอร์ โดยทั่วไป PRPD pattern เนื่องจากการดิสชาร์จประเภทนี้ ดังรูป 2.24 (ขวา) คุณลักษณะหลักของ gap type discharge มีลักษณะเป็นหมอกในแนวนอนซึ่งมีขนาดค่อนข้างคงที่อยู่ที่ทั้งสองขั้วของแรงดัน เนื่องจากจุดบกพร่องของทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันมาก PRPD pattern จึงมีลักษณะคล้ายกันมาก ดังนั้นจึงเป็นไปได้เลยที่จะอาศัยเพียง PRPD pattern เพื่อแยกความแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์ทั้งสอง



รูปที่ 2.24 ตัวอย่าง PRPD ของแก๊ปดิสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

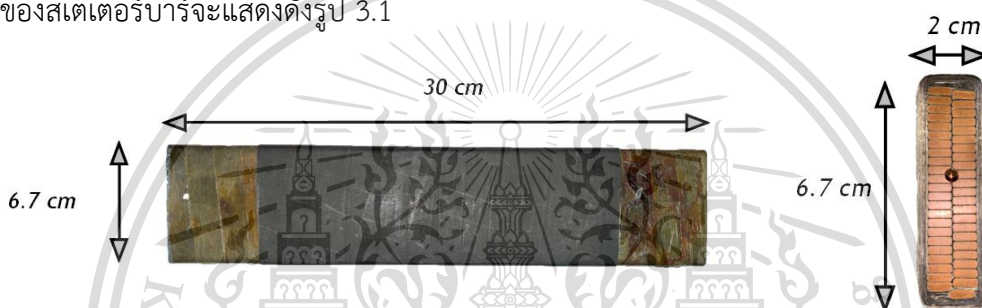
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 3

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบและการออกแบบการทดลอง

3.1 วัตถุทดสอบ

วัตถุทดสอบจะใช้เป็นสเตเตอร์บาร์หรือโรเบลล์บาร์ของเครื่องจักรกลไฟฟ้าซิงโครนัสมาเป็นระยะเวลา 30 ปี ซึ่งมีพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส คือ พิกัดกำลัง 96.6 MVA พิกัดแรงดัน 13.8 kV และมีระดับชั้นของฉนวนอยู่ที่ชั้น B ซึ่งทนอุณหภูมิได้ 130 องศาเซลเซียส โดยชิ้นงานจะมีความยาวท่อนละ 30 เซนติเมตร เป็นจำนวน 12 ชิ้น เพื่อทำการจำลองจุดบกพร่องต่อไป โดยขนาดของสเตเตอร์บาร์จะแสดงดังรูป 3.1



รูปที่ 3.1 สเตเตอร์บาร์ที่ใช้เป็นวัตถุทดสอบ

3.2 การจำลองจุดบกพร่องในวัตถุทดสอบ

ในการจำลองจุดบกพร่องในสเตเตอร์บาร์จะนำสเตเตอร์บาร์ไปจำลองจุดบกพร่องในแต่ละกรณี ซึ่งสเตเตอร์บาร์บางชิ้นเป็นกรณีที่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นอยู่แล้วไม่ได้นำไปจำลองจุดบกพร่องเพิ่มเติม โดยการจำลองจุดบกพร่องจะแบ่งเป็น 12 กรณี ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 3.1 การจำลองจุดบกพร่องของสเตเตอร์บาร์

กรณี	การจำลองจุดบกพร่อง
1	มีรอยการขีดสีผิวเคมีคอนดักเตอร์ข้างทั้ง 2 ด้านออก
2	ตัดผิวเคมีคอนดักเตอร์ 1 ด้าน โดยตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 ซม. × 3 ซม.
3	นำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
4	นำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
5	ทำการสอดเข็มเข้าไปในเนื้อฉนวนที่หน้าตัดทั้งสองด้านของสเตเตอร์บาร์ โดยเข็มมีความยาว 10 ซม. หลังจากนั้นทำการฉีดย้ำเข้าไปในร่องการเจาะด้วยเข็มดังกล่าว
6	มีจุดบกพร่องจากการใช้งานอยู่แล้ว ซึ่งเป็นร่องรอยการเกิดดิสซาร์จที่บริเวณผิวของเคมีคอนดักเตอร์
7	ให้ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
8	เจาะรูที่ฉนวนบริเวณหน้าตัดทั้งสองด้านทั้งหมดสี่รู บริเวณขอบของตัวนำที่หน้าตัดของสเตเตอร์บาร์ทั้งสองด้าน
9	เจาะรูที่ฉนวนในลักษณะเดียวกับกรณีจำลองที่ 8 และทำการสอดเข็มไปหนึ่งรู ซึ่งเข็มมีความยาว 10 ซม.
10	เจาะรูที่ฉนวนในลักษณะเดียวกับกรณีจำลองที่ 8 และทำการเจาะรูขนาดเล็ก ซึ่งรูมีความลึกประมาณ 3 มม. ที่บริเวณตรงกลางของผิวสเตเตอร์บาร์
11	เจาะรูขนาดเล็กด้านข้างของสเตเตอร์บาร์ ซึ่งรูมีความลึกประมาณ 1.5 มม. จากผิวสเตเตอร์และทำการสอดเข็มหนึ่งเล่มที่หน้าตัดบริเวณเนื้อฉนวน ซึ่งเข็มมีความยาว 10 ซม.
12	เจาะรูขนาดเล็ก ซึ่งมีความลึกประมาณ 2.8 มม. ที่ผิวข้างของสเตเตอร์บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.1 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 1

สเตเตอร์บาร์ที่จำลองจุดบกพร่องโดยการมีรอยการขีดสีที่ผิวของเซมิคอนดักเตอร์ด้านข้าง โดยใช้วัสดุโลหะที่มีคมในการขีดผิวเซมิคอนดักเตอร์บริเวณด้านข้างของสเตเตอร์บาร์ทั้งสองข้างออก



รูปที่ 3.2 วัตถุประสงค์สอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 1

3.2.2 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 2

สเตเตอร์บาร์ที่มีการจำลองจุดบกพร่องโดยการตัดผิวเซมิคอนดักเตอร์ 1 ด้าน โดยตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 ซม. × 3 ซม. โดยใช้มีดที่มีความคมกรีดลงบนผิวของเซมิคอนดักเตอร์ตามขนาดที่ต้องการอย่างระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดรอยตัดบนผิวของฉนวนกราวน้อลล์หรือให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด



รูปที่ 3.3 วัตถุประสงค์สอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 2

3.2.3 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 3

สเตเตอร์บาร์ที่มีการจำลองจุดบกพร่องโดยการนำไปอบโดยใช้ตู้อบดังรูปที่ 3.5 ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ดังแสดงในรูป 3.4



รูปที่ 3.4 วัตถุประสงค์สอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.5 ตู้อบที่ใช้ในการอบสเตเตอร์บาร์

3.2.4 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 4

สเตเตอร์บาร์ที่มีการจำลองจุดบกพร่องโดยการนำไปอบโดยใช้ตู้อบดังรูปที่ 3.5 ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส โดยนำสเตเตอร์บาร์ไปอบในตู้อบโดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 วัตถุประสงค์สอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 4

3.2.5 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 5

สเตเตอร์บาร์ที่มีการจำลองจุดบกพร่องโดยทำการสอดเข็มเข้าไปในเนื้อฉนวนที่หน้าตัดทั้งสองด้านของสเตเตอร์บาร์ โดยเข็มมีความยาว 10 ซม. หลังจากนั้นทำการฉีดน้ำเข้าไปในร่องที่เกิดจากการเจาะด้วยเข็มดังกล่าว



รูปที่ 3.7 วัตถุประสงค์สอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 5

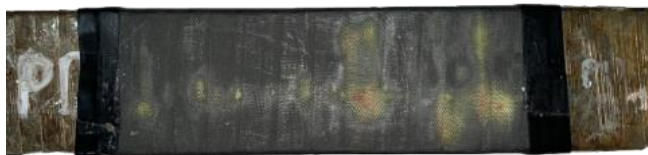
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.6 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 6

สเตเตอร์บาร์ที่มีจุดบกพร่องจากการใช้งาน ซึ่งเป็นร่องรอยการเกิดดิสชาร์จที่บริเวณผิวของ เซมิคอนดักเตอร์ โดยเป็นสเตเตอร์บาร์ที่มีจุดบกพร่องในการใช้งานอยู่แล้วไม่ได้ทำการจำลองเพิ่มเติม



รูปที่ 3.8 วัตถุประสงค์สอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 6

3.2.7 วัตถุประสงค์สอบกรณีที่ 7

สเตเตอร์บาร์ที่มีการจำลองจุดบกพร่องโดยทำการให้ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดย นำ สเตเตอร์บาร์ไปให้ใส่ในกระโถมที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติก ในภาชนะที่มีการใส่น้ำด้านล่างแสดงดังรูปที่ 3.10 เพื่อให้ความชื้นเข้าไปในสเตเตอร์บาร์ ทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยนำเครื่องวัดความชื้น วางไว้บนสเตเตอร์บาร์เพื่อตรวจสอบค่าความชื้นสัมพัทธ์ในกระโถม



รูปที่ 3.9 วัตถุประสงค์สอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 7



รูปที่ 3.10 กระโถมที่ห่อหุ้มด้วยพลาสติกในภาชนะที่มีการใส่น้ำด้านล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.8 วัตถุทดสอบกรณีที่ 8

สเตเตอร์บาร์ที่มีการจำลองจุดบกพร่องโดยการเจาะรูที่ฉนวนบริเวณหน้าตัดทั้งสองด้าน ทั้งหมดสี่รู โดยใช้วัตถุโลหะที่มีคมนำมาเสียบที่เนื้อฉนวนตรงบริเวณขอบของตัวนำที่หน้าตัดของสเตเตอร์บาร์ทั้งสองด้าน รวมเป็นสี่รู (ยาว) ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 8

3.2.9 วัตถุทดสอบกรณีที่ 9

สเตเตอร์บาร์ที่มีการจำลองจุดบกพร่องโดยการเจาะรูที่ฉนวนบริเวณหน้าตัดทั้งสองด้าน ทั้งหมดสี่รูในลักษณะเดียวกับกรณีจำลองที่ 8 และทำการสอดเข็มไปหนึ่งรู ซึ่งเข็มมีความยาว 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 9

3.2.10 วัตถุทดสอบกรณีที่ 10

สเตเตอร์บาร์ที่มีการจำลองจุดบกพร่องโดยการเจาะรูที่ฉนวนบริเวณหน้าตัดทั้งสองด้าน ทั้งหมดสี่รูในลักษณะเดียวกับกรณีจำลองที่ 8 และทำการเจาะรูขนาดเล็ก ซึ่งรูมีความลึกประมาณ 3 มิลลิเมตรที่บริเวณตรงกลางของผิวสเตเตอร์บาร์



รูปที่ 3.13 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.2.11 วัตถุทดสอบกรณีที่ 11

สเตเตอร์บาร์ที่มีการจำลองจุดบกพร่องโดยทำการเจาะรูขนาดเล็กด้านข้างของสเตเตอร์บาร์ ซึ่งรูมีความลึกประมาณ 1.5 มิลลิเมตรจากผิวสเตเตอร์ และทำการสอดเข็มหนึ่งเล่มที่หน้าตัดบริเวณเนื้อฉนวน ซึ่งเข็มมีความยาว 10 เซนติเมตร



รูปที่ 3.14 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 11

3.2.12 วัตถุทดสอบกรณีที่ 12

สเตเตอร์บาร์ที่มีการจำลองจุดบกพร่องโดยทำการเจาะรูขนาดเล็กด้านข้างของสเตเตอร์บาร์ ซึ่งรูมีความลึกประมาณ 2.8 มิลลิเมตรจากผิวสเตเตอร์



รูปที่ 3.15 วัตถุทดสอบที่ทำการจำลองกรณีที่ 12

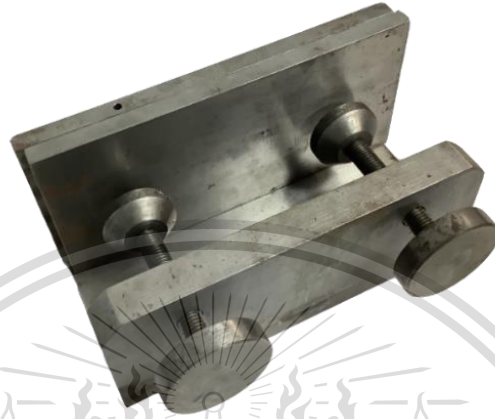
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

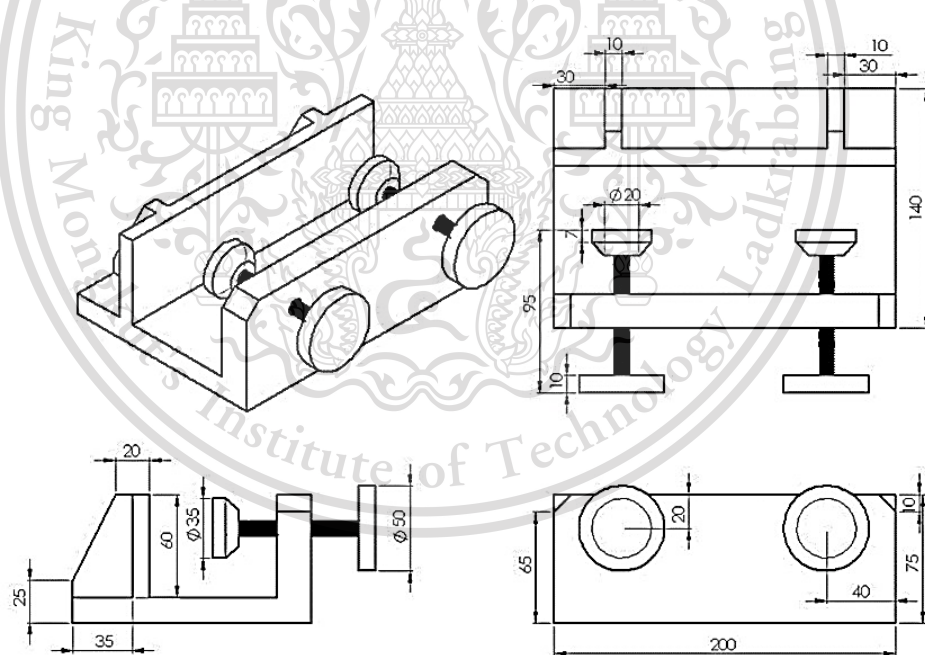
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ร่องสลีตจำลองใช้เพื่อจำลองเสมือนเป็นร่องสลีตในเครื่องจักรกลหมุน โดยในการทดสอบจะนำวัตถุทดสอบสเตเตอร์บาร์ไปแทรกระหว่างตัวนำที่สามารถปรับระยะเข้า-ออกได้ ร่องสลีตจำลองและแบบแปลน แสดงดังรูป 3.16-17



รูปที่ 3.16 ร่องสลีตจำลอง



รูปที่ 3.17 มิติของร่องสลีตจำลอง

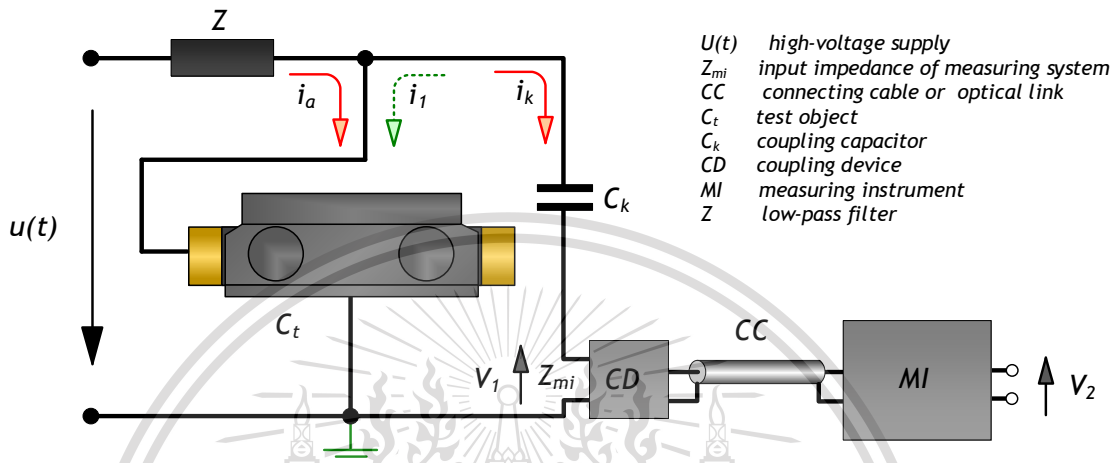
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

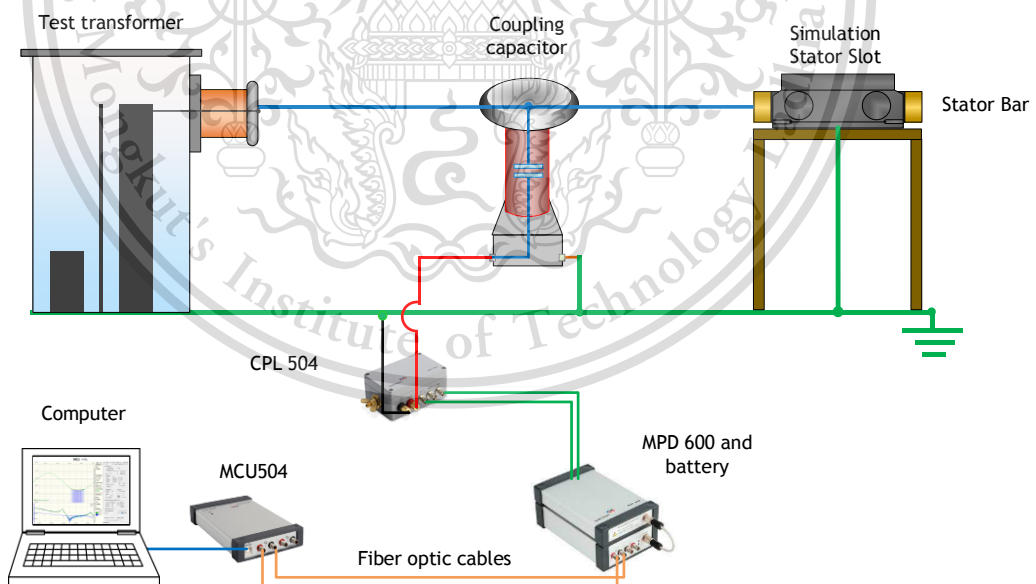
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.4 การต่อวงจรทดสอบ

การต่อวงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน (Partial discharge) แสดงดังรูปที่ 3.18 จะดำเนินการตามมาตรฐาน IEC 60270 โดยในการทดสอบจะทำการแทรกสแตเตอร์บาร์ในร่องสลิตต่อจำลองโดยทำการปรับให้หน้าสัมผัสทั้งสองของร่องสลิตจำลองแนบกับสแตเตอร์บาร์พอดี



รูปที่ 3.18 วงจรสมมูลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสแตเตอร์บาร์



รูปที่ 3.19 วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนในสแตเตอร์บาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.5 การเตรียมการทดสอบ

ก่อนที่จะทำการทดสอบสเตเตอร์บาร์ทุกชิ้นจะต้องถูกเจาะรูที่หน้าตัดตรงตัวนำของสเตเตอร์บาร์เพื่อไว้เสียบสกรูยึด เพื่อใช้เป็นหัวต่อสำหรับการจ่ายแรงดันในการทดสอบ ดังรูปที่ 3.20



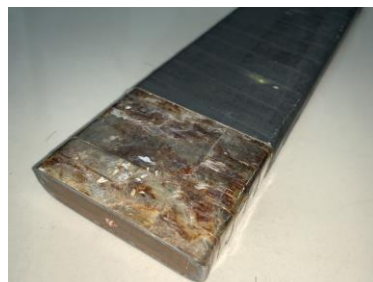
รูปที่ 3.20 สเตเตอร์บาร์ที่ถูกเจาะรูที่หน้าตัดตรงตัวนำของสเตเตอร์

ปลายอีกด้านหนึ่งของสเตเตอร์บาร์จะทำการทาด้วย copper paint เพื่อให้ตัวนำสแตนด์ทั้งหมดของสเตเตอร์บาร์เชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า ดังรูป 3.21



รูปที่ 3.21 สเตเตอร์บาร์ที่ถูกทาด้วย copper paint

บริเวณขอบของผิวเซมิคอนดักทีฟแถบเป็นบริเวณที่เป็นขอบคมซึ่งอาจจะเกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้น (เกิดโคโรนาดิสชาร์จ) เป็นสิ่งที่ไม่พึงประสงค์เนื่องจากในการวัดการดิสชาร์จบางส่วนนั้น เราต้องการที่จะพิจารณาจุดบกพร่องหรือก็คือการดิสชาร์จบางส่วนภายในเนื้อฉนวนเท่านั้น ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้ สเตเตอร์บาร์ทุกชิ้นจะต้องถูกพันด้วยเทปฉนวน ดังรูปที่ 3.22 (ข) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดดิสชาร์จขึ้นตรงบริเวณขอบของผิวเซมิคอนดักทีฟแถบ โดยขณะที่ไม่ทำการพันนั้น ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงจะทำให้อากาศตรงบริเวณนั้นเกิดการเบรคดาว์นจนเกิดการดิสชาร์จบางส่วน (โคโรนาดิสชาร์จ) ขึ้น แต่หลังจากทำการพันเทปฉนวนแล้ว เนื่องจากค่าความคงทนต่อการเบรคดาว์นของเทปฉนวนมีค่าสูงจึงทำให้ไม่เกิดการดิสชาร์จบางส่วนขึ้น



(ก) ก่อนการพันเทป

(ข) หลังพันเทป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.22 การป้องกันการดิสชาร์จบางส่วนบริเวณขอบของเซมิคอนดักทีฟแถบ

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

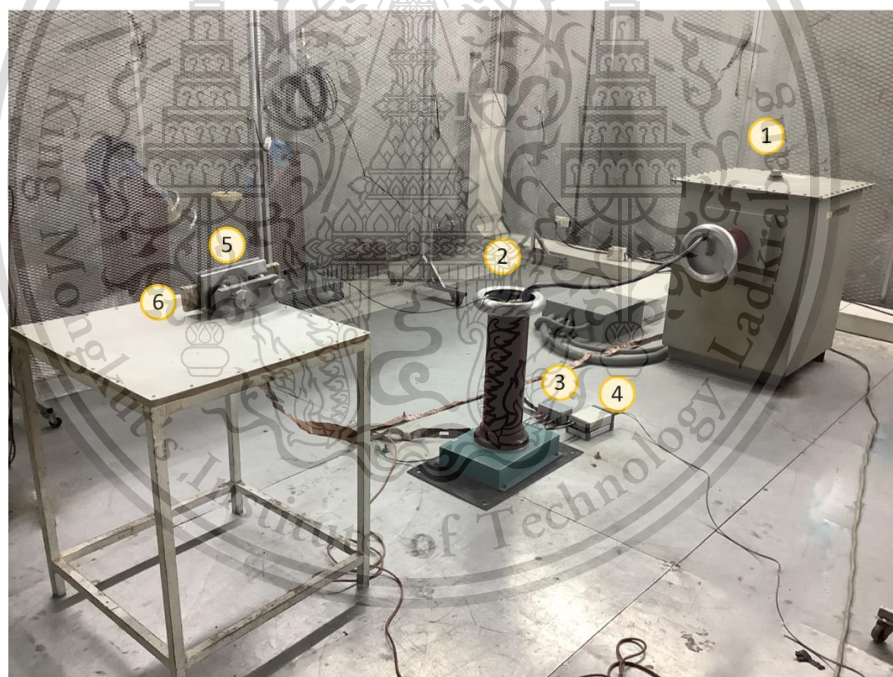
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

3.6 การดำเนินการทดสอบ

หลังจากทำการจำลองจุดบกพร่องทุกกรณีและทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบเรียบร้อยแล้ว การจะทำการทดสอบโดยมีการจัดเรียงสเตเตอร์บาร์ในวงจรทดสอบและป้อนแรงดันเข้าทางฝั่งที่ได้เจาะรูสำหรับยึดสกรูไว้ ดังรูป 3.23 ในขั้นตอนถัดไปทำการต่อวงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน ดังรูป 3.19 แสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.23 การป้อนแรงดันให้กับสเตเตอร์บาร์ที่แทรกอยู่ในร่องสลิตที่ต่อลงกราวด์



รูปที่ 3.24 การต่อวงจรทดสอบ

- เมื่อ 1) หม้อแปลงทดสอบ (Test transformer) 4) MPD 600
 2) ตัวเก็บประจุคัปปลิ่ง (Coupling capacitor) 5) ร่องสลิตจำลอง (Simulation stator slot)

- 3) อุปกรณ์คัปปลิ่ง (Coupling device) 6) ชิ้นงานทดสอบ (Test specimen)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การปรับเทียบวงจรวัด (Calibration) โดยในการทดสอบจะต้องการปรับเทียบวงจรวัดจะทำการปรับเทียบโดยใช้เครื่องปรับเทียบ (Calibrator) ดังรูปที่ 3.25 ซึ่งทำการต่อคร่อมระหว่างขั้วตัวนำของสเตเตอร์บาร์และกราวด์ของวงจรวัด โดยค่าที่ใช้ในการปรับเทียบจะเป็นค่าที่ต้องการจะวัดซึ่งก็คือ เป็นค่าขนาดของดิสชาร์จบางส่วนที่จะเกิดขึ้นที่แรงดันทดสอบ โดยปกติแล้วขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนของฉนวนในสเตเตอร์บาร์หรือแม่เหล็กทั้งในเครื่องจักรกลหมุนจะมีค่าในหลักนาโนคูลอมป์ (nC) ซึ่งเครื่องปรับเทียบสามารถป้อนขนาดได้สูงสุดเพียง 100 pC เท่านั้น ดังนั้น ในการปรับเทียบการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในการทดลองทั้งหมดจึงทำการปรับเทียบประจุที่ค่า 100 pC



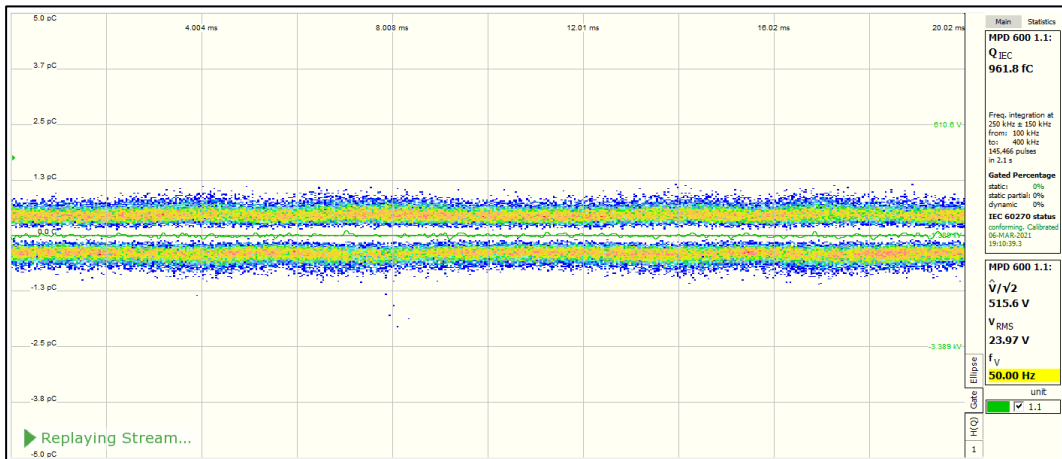
รูปที่ 3.25 เครื่องปรับเทียบประจุ

โดยในขณะที่ทำการปรับเทียบจะทำให้ได้ค่าสเกลแฟคเตอร์ (Scale factor) ของระบบวัด ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าประจุที่ทำการปรับเทียบและค่าประจุที่เครื่องมือวัดอ่านได้ หลังจากทำการปรับเทียบระบบวัดเรียบร้อยแล้ว จึงทำการจ่ายไฟฟ้าแก่ระบบ โดยไม่มีการขึ้นแรงดัน ในขั้นตอนนี้จะทำการวัดค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ของระบบ โดยตามมาตรฐาน IEC 60270 ค่าของดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จะต้องมีค่ามากกว่าสองเท่าของสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) เท่านั้นจึงจะยอมรับผลการทดสอบ โดยในการวัดค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ในทุกการทดสอบพบว่าค่าไม่เกิน 1 pC ดังรูป 3.26 ซึ่งมีค่าต่ำเพียงพอสำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3.26 การแสดงผลสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ขณะทำการจ่ายไฟให้แก่ระบบ

หลังจากนั้นจะทำการขึ้นแรงดันโดยค่อยๆ ขึ้นแรงดันแบบแรมพ์ (Ramp) จนถึงระดับแรงดันทดสอบ โดยแรงดันที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละก็กรณีนั้นจะแตกต่างกัน อาจมีค่าที่สูงหรือต่ำ โดยพิจารณาควบคู่กับขนาดการดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น เนื่องจากในบางกรณี เมื่อค่อยๆ เพิ่มแรงดันจนถึงประมาณ 3 kV ขนาดของดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้ก็มีค่าสูงถึงหลักนาโนคูลอมป์แล้ว ซึ่งไม่ควรที่จะเพิ่มขึ้นแรงดันสูงขึ้นไปอีกเพราะจะมีความเสี่ยงที่จะทำให้ระบบวัดเสียหายได้ ทั้งนี้ระดับแรงดันทดสอบก็จะขึ้นอยู่กับดุลยพินิจของผู้ทดสอบ โดยทั่วไปแรงดันทดสอบจะอยู่ที่ประมาณ 3 kV ถึง 6 kV ($0.35U_0 - 0.75U_0$ เมื่อ U_0 คือ แรงดันเฟสเทียบกราวด์ของพิกัดแรงดันเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งมีค่าอยู่ที่ $13.8/\sqrt{3} \approx 7.967$ kV)

เมื่อทำการขึ้นแรงดันทดสอบถึงระดับแรงดันทดสอบ (Test voltage) จะทำการคงค่าแรงดันค่านี้นิ่งไว้เป็นระยะเวลา 1 นาที เพื่อทำการบันทึกผล PRPD pattern หลังจากนั้นจึงทำการค่อยๆ ลดแรงดันอย่างช้าๆ จนมีค่าเข้าใกล้ 0 kV จากนั้นจึงทำการหยุดจ่ายไฟแก่ระบบทดสอบ

โดยการแสดงผลการวัดการดิสชาร์จบางส่วน จะแสดงดังรูป 3.27 โดยรายละเอียดของความสัมพันธ์ในหน้าจอแสดงผล ดังนี้

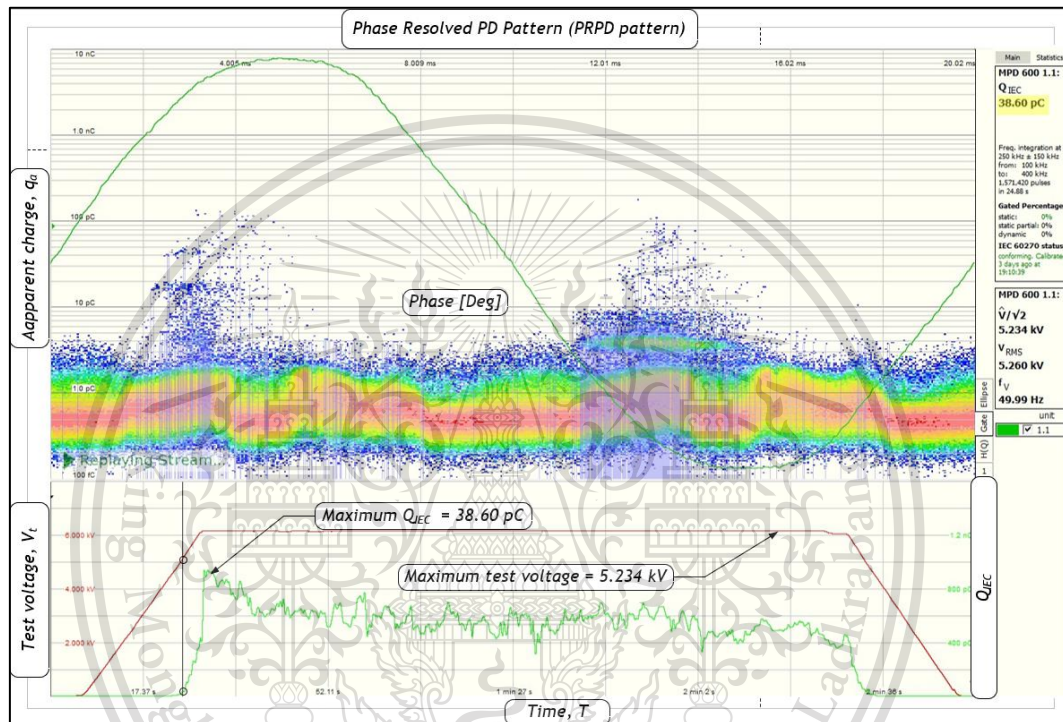
- แสดงผล PRPD pattern โดยแต่ละจุดในหน้าจอแสดงผลก็คือ พัลส์ดิสชาร์จบางส่วนแต่ละพัลส์ โดยเทียบกับมุมเฟสที่เกิดบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal time base)
- แสดงขนาดของดิสชาร์จบางส่วนโดย แสดงค่า Q_{EC} แสดงในหน่วย pC หรือ nC
- แสดงค่าแรงดันทดสอบ ($V_m/\sqrt{2}$, V_{rms}) และค่าความถี่ของแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ แรงดันนั้น เทียบกับเวลา
- แสดงแถบความถี่แบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของระบบวัด ค่าความถี่จำกัดขอบล่าง (Lower limit frequency) และขอบบน (Upper limit frequency) และ ความถี่กลางแถบผ่าน (Midband frequency) โดยจากรูป 3.27 จะมีค่าความถี่จำกัดขอบล่าง 100 kHz ความถี่จำกัดขอบบน 400 kHz แบนด์วิดท์ 300 kHz และความถี่กลางแถบผ่าน 250 kHz



รูปที่ 3.27 การแสดงผลการวัดการดิสชาร์จบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

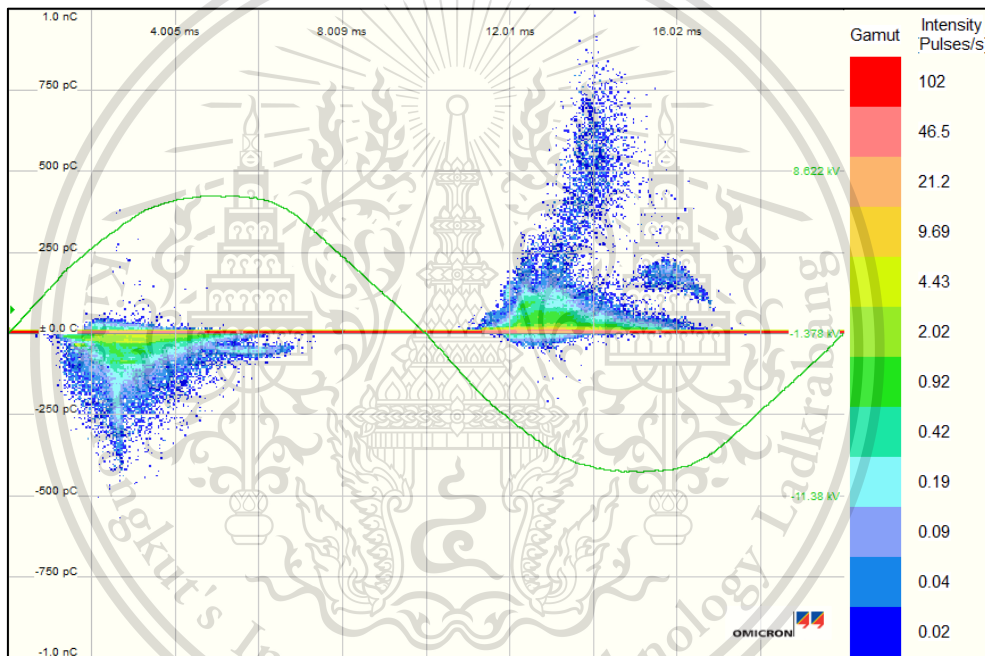
บทที่ 4

ผลการทดสอบ

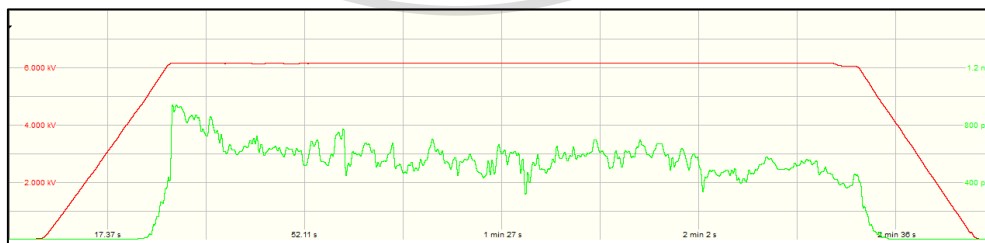
4.1 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วน

เมื่อดำเนินการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนตามที่กล่าวไว้ข้างต้น PRPD pattern กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) เทียบกับเวลา และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในแต่ละกรณีจะแสดงดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลการทดสอบกรณีที่ 1



(ก) PRPD pattern



(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) เทียบกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และบุคลากรที่เกี่ยวข้องเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปบนเวบไซต์ใดๆ ได้โดยไม่ขออนุญาต
รูปที่ 4.1 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสแตเตอร์บาร์ กรณีที่ 1
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 1

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	4.01
	Q_{IEC} (pC)	3.20
PDEV	V_{rms} (kV)	4.89
	Q_{IEC} (pC)	53
Maximum test voltage (kV)		6.18
Maximum Q_{IEC} (pC)		947

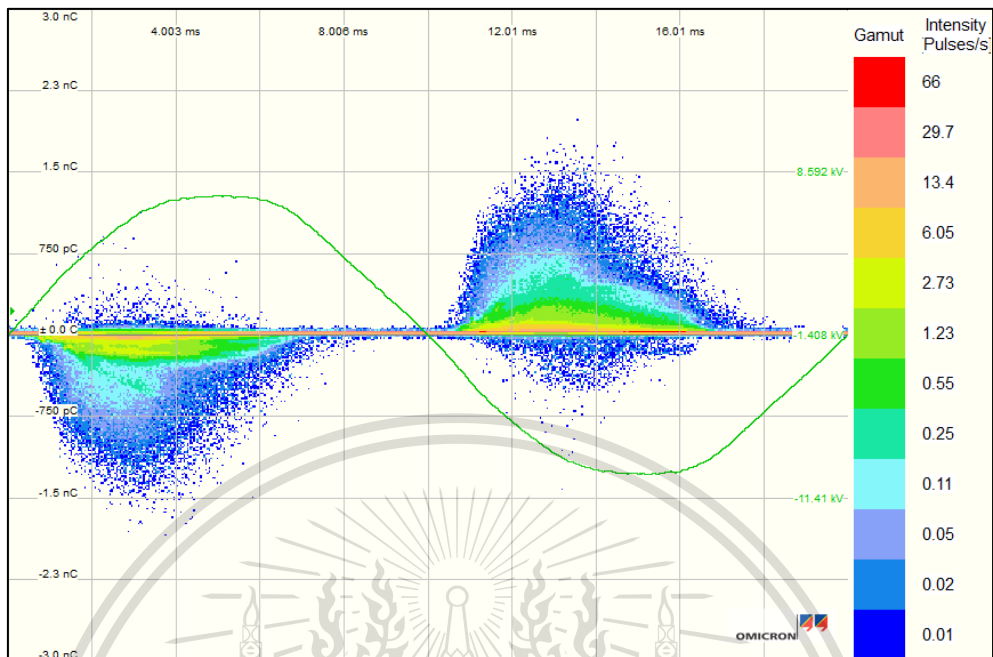
- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดิสชาร์จภายใน (Internal discharge)
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าสูงกว่าค่า PDIV
- ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) มีค่าสูง (ประมาณหลักนาโนคูลอมป์) ที่ระดับแรงดันเพียง 6.18 kV หรือก็คือประมาณ $0.78U_0$
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการบ่อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ ที่แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อขึ้นแรงดันที่ค่าแรงดันทดสอบ และเมื่อเวลาผ่านไปค่าขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนจะค่อยๆ มีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

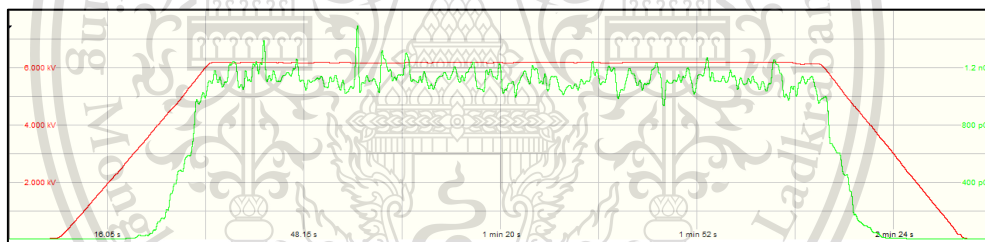
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.2 ผลการทดสอบกรณีที่ 2



(ก) PRPD pattern



(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.2 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 2

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	2.05
	Q_{IEC} (pC)	2.2
PDEV	V_{rms} (kV)	2.67
	Q_{IEC} (pC)	6.5
Maximum test voltage (kV)		5.19
Maximum Q_{IEC} (nC)		1.5

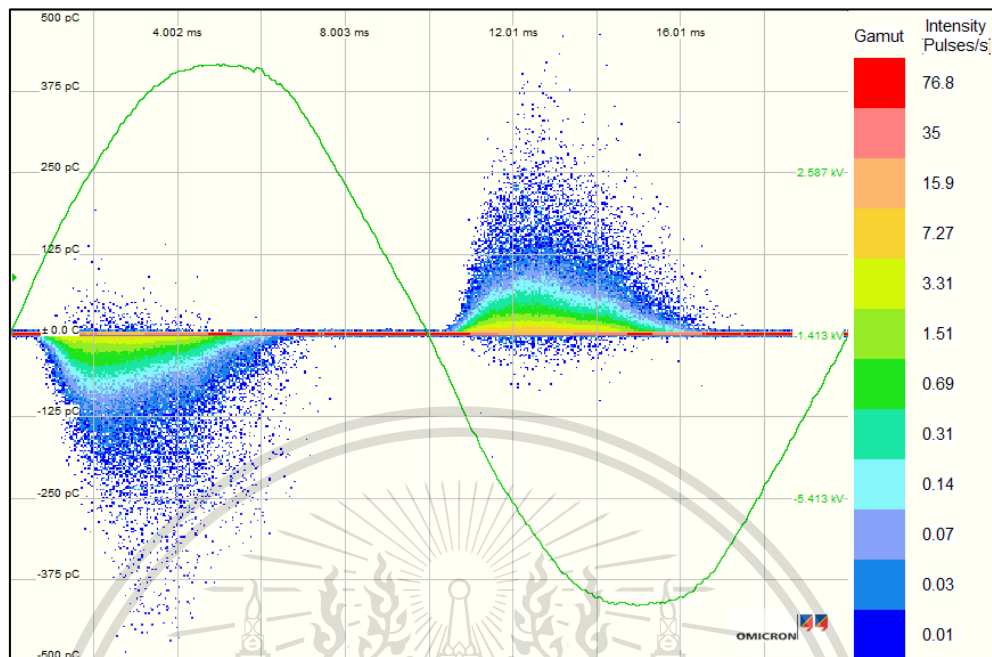
- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดิสชาร์จภายใน (Internal discharge)
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าสูงกว่าค่า PDIV
- ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) มีค่าสูงถึงหลักนาโนคูลอมป์ที่ระดับแรงดันเพียง 5.19 kV หรือก็คือประมาณ $0.65U_0$
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการบ๊อและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ ที่แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนจะค่อนข้างคงที่ขณะคงค่าแรงดันทดสอบตลอดระยะเวลา 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

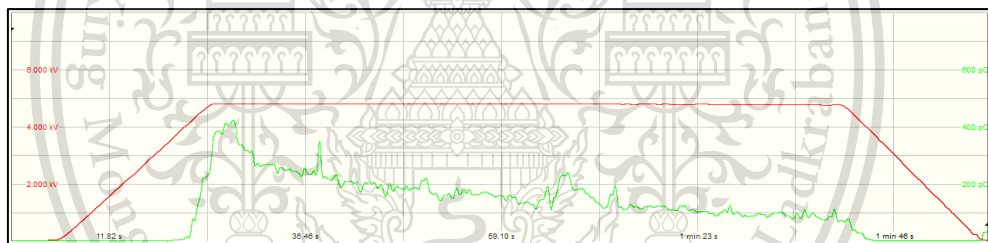
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.3 ผลการทดสอบกรณีที่ 3



(ก) PRPD pattern



(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.3 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 3

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	3.72
	Q_{IEC} (pC)	3.30
PDEV	V_{rms} (kV)	4.43
	Q_{IEC} (pC)	3.90
Maximum test voltage (kV)		4.82
Maximum Q_{IEC} (pC)		426

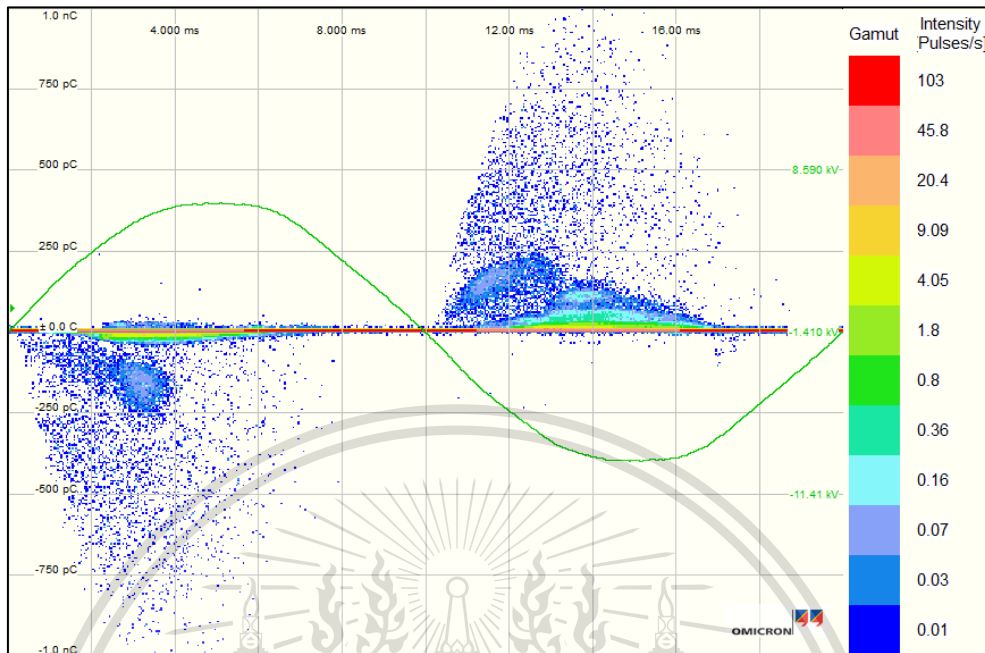
- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดิสชาร์จภายใน (Internal discharge) ซึ่งเป็นลักษณะการดีบอนด์ดิสชาร์จ (Debonding discharge) ภายในเนื้อฉนวน
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าสูงกว่าค่า PDIV
- ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) มีค่าสูงถึงหลายร้อยพิโคคูลอมป์ที่ระดับแรงดันเพียง 4.82 kV หรือก็คือประมาณ $0.6U_0$
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการบอนด์และค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ ที่แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อขึ้นแรงดันที่ค่าแรงดันทดสอบ และเมื่อเวลาผ่านไปค่าขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนจะค่อยๆ มีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

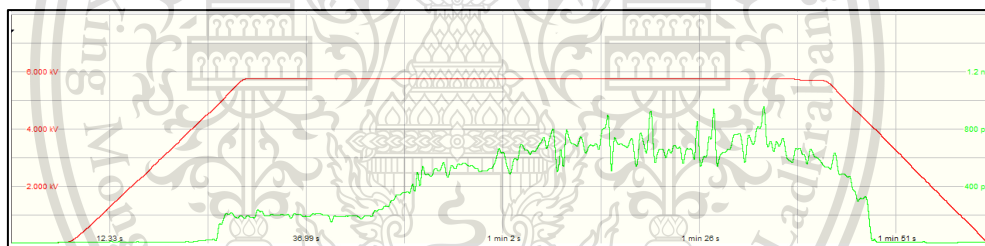
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.4 ผลการทดสอบกรณีที่ 4



(ก) PRPD pattern



(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.4 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 4

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	2.45
	Q_{IEC} (pC)	9
PDEV	V_{rms} (kV)	4.01
	Q_{IEC} (pC)	28
Maximum test voltage (kV)		5.77
Maximum Q_{IEC} (pC)		959

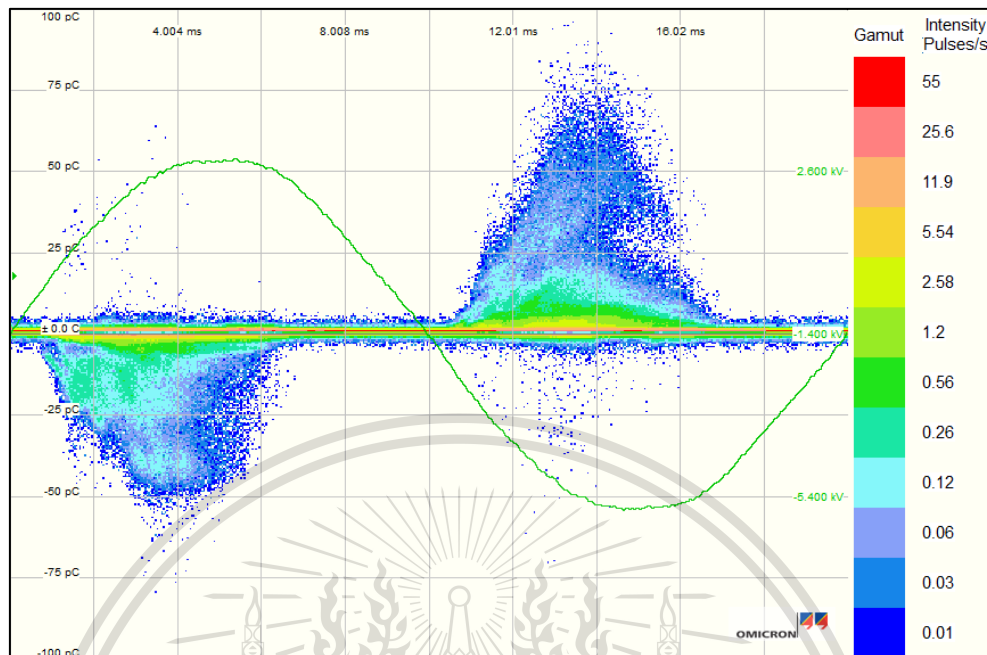
- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดิสชาร์จภายใน (Internal discharge) ซึ่งเป็นลักษณะการดีบอนดิงดิสชาร์จ (Debonding discharge) ภายในเนื้อฉนวน
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าสูงกว่าค่า PDIV
- ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) มีค่าสูงถึงหลายร้อยพิโคคูลอมป์ที่ระดับแรงดันเพียง 5.77 kV หรือก็คือประมาณ $0.72U_0$
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ ที่แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนในช่วงแรกๆ ขณะคงค่าแรงดันสอบจะมีค่าต่ำ แต่ค่าจะสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเวลาผ่านไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

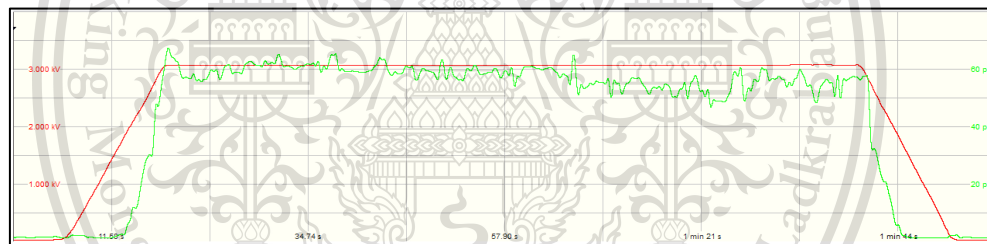
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.5 ผลการทดสอบกรณีที่ 5



(ก) PRPD pattern



(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดีสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.5 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดีสชาร์จบางส่วนในสแตเตอร์บาร์ กรณีที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 5

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	1.65
	Q_{IEC} (pC)	2.2
PDEV	V_{rms} (kV)	1.85
	Q_{IEC} (pC)	5.7
Maximum test voltage (kV)		3.08
Maximum Q_{IEC} (pC)		67

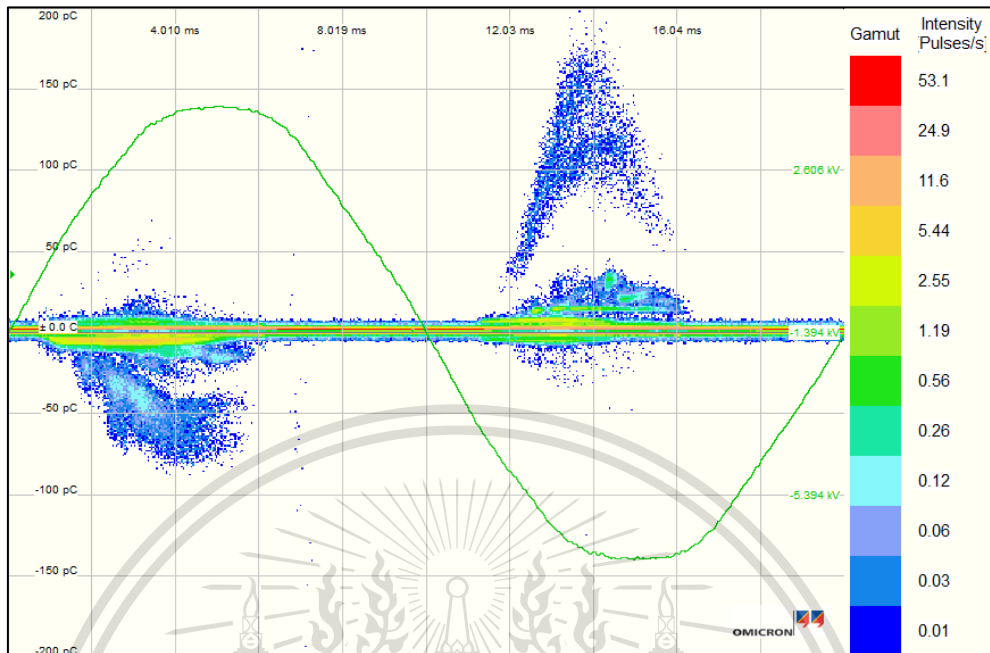
- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดีสชาร์จภายใน (Internal discharge)
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าสูงกว่าค่า PDIV และค่า PDIV มีค่าต่ำมาก
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดีสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ ที่แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนจะค่อนข้างคงที่ขณะคงค่าแรงดันทดสอบตลอดระยะเวลา 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

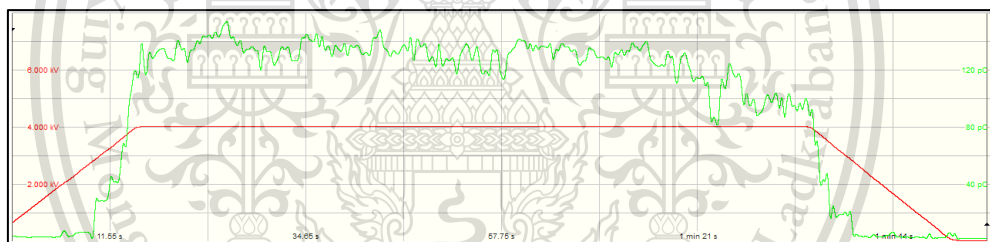
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.6 ผลการทดสอบกรณีที่ 6



(ก) PRPD pattern



(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.6 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 6

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	2.18
	Q_{IEC} (pC)	3.4
PDEV	V_{rms} (kV)	2.77
	Q_{IEC} (pC)	3.4
Maximum test voltage (kV)		4.04
Maximum Q_{IEC} (pC)		154

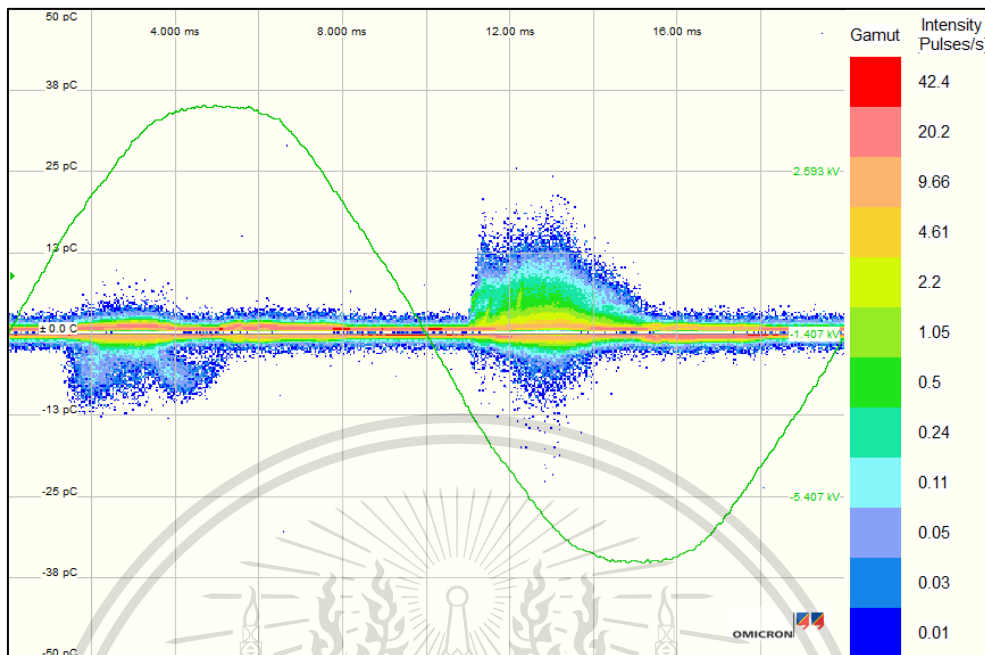
- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดีสชาร์จภายใน (Internal discharge)
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าสูงกว่าค่า PDIV
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดีสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อขึ้นแรงดันที่ค่าแรงดันทดสอบ และเมื่อเวลาผ่านไปค่าขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนจะค่อยๆ มีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

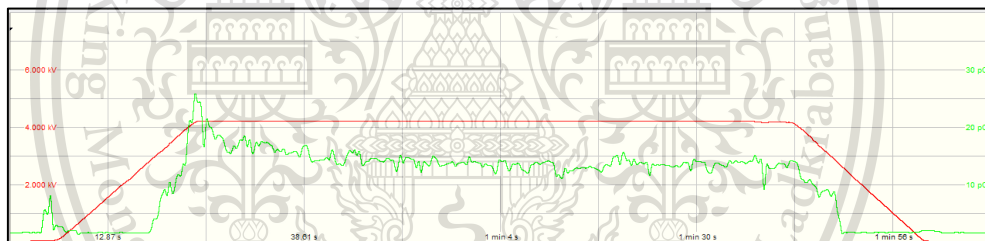
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.7 ผลการทดสอบกรณีที่ 7



(ก) PRPD pattern



(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.7 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสแตเตอร์บาร์ กรณีที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 7

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	2.95
	Q_{IEC} (pC)	3.8
PDEV	V_{rms} (kV)	2.61
	Q_{IEC} (pC)	5
Maximum test voltage (kV)		4.01
Maximum Q_{IEC} (pC)		15

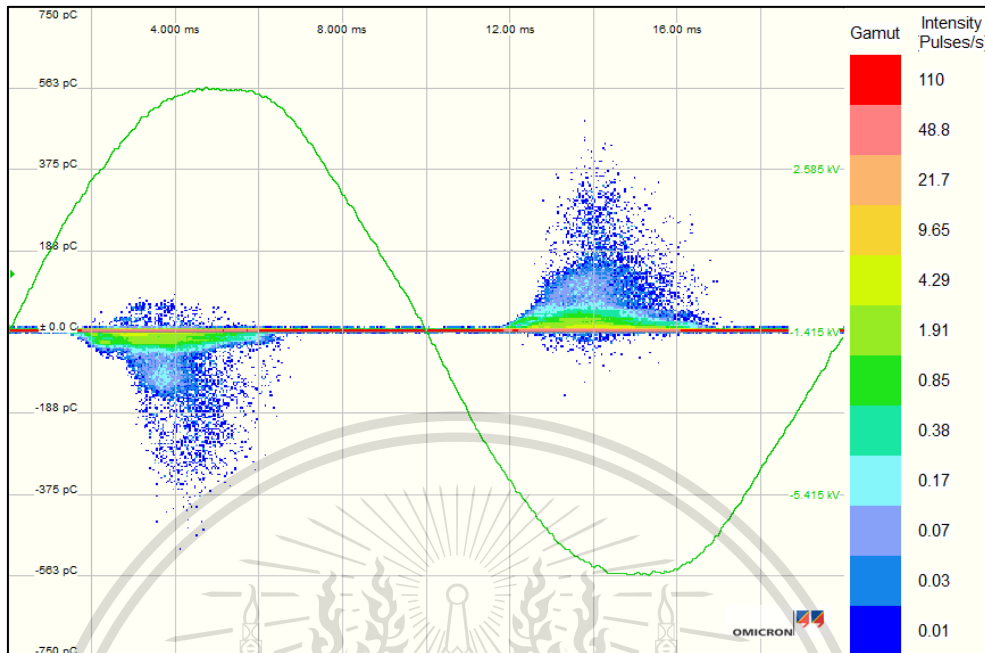
- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดีสชาร์จภายใน (Internal discharge)
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าต่ำกว่าค่า PDIV
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดีสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อขึ้นแรงดันที่ค่าแรงดันทดสอบ และเมื่อเวลาผ่านไปค่าขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนจะค่อยๆ มีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

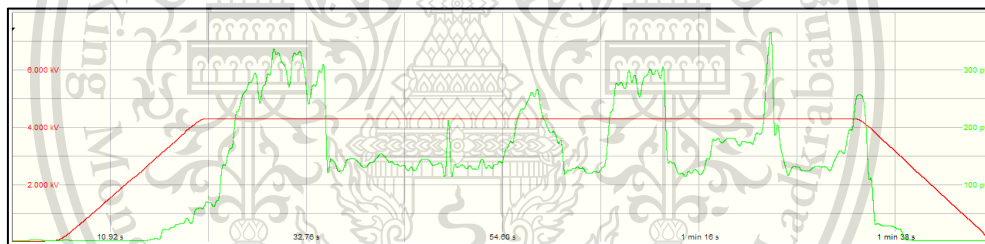
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.8 ผลการทดสอบกรณีที่ 8



(ก) PRPD pattern



(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.8 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสแตเตอร์บาร์ กรณีที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.8 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 8

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	2.86
	Q_{IEC} (pC)	5.4
PDEV	V_{rms} (kV)	3.16
	Q_{IEC} (pC)	25
Maximum test voltage (kV)		4.31
Maximum Q_{IEC} (pC)		367

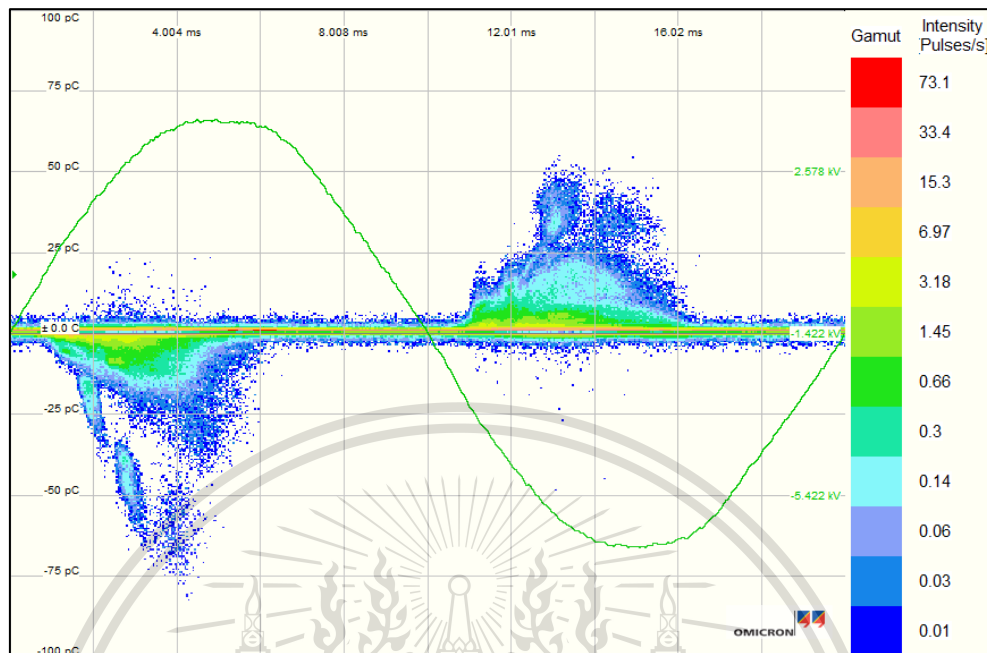
- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดิสชาร์จภายใน (Internal discharge)
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าสูงกว่าค่า PDIV
- ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) มีค่าสูงถึงหลายร้อยพิโคคูลอมป์ที่ระดับแรงดันเพียง 4.31 kV หรือก็คือประมาณ $0.54U_0$
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการบ่อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ ที่แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดิสชาร์จบางส่วนจะมีค่าผันผวนขณะทำการคงค่าแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

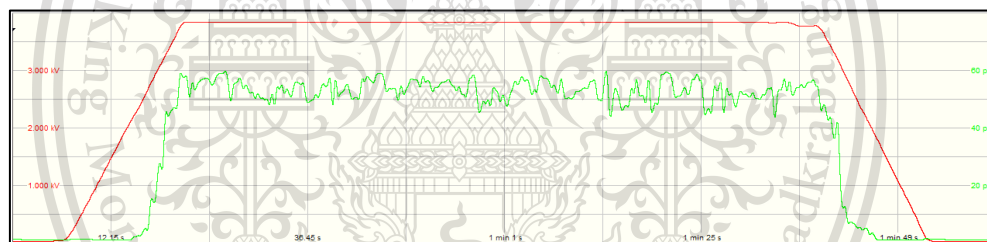
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.9 ผลการทดสอบกรณีที่ 9



(ก) PRPD pattern



(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.9 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตรเตอร์บาร์ กรณีที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.9 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 9

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	2.51
	Q_{IEC} (pC)	4.1
PDEV	V_{rms} (kV)	2.76
	Q_{IEC} (pC)	7.2
Maximum test voltage (kV)		3.85
Maximum Q_{IEC} (pC)		60

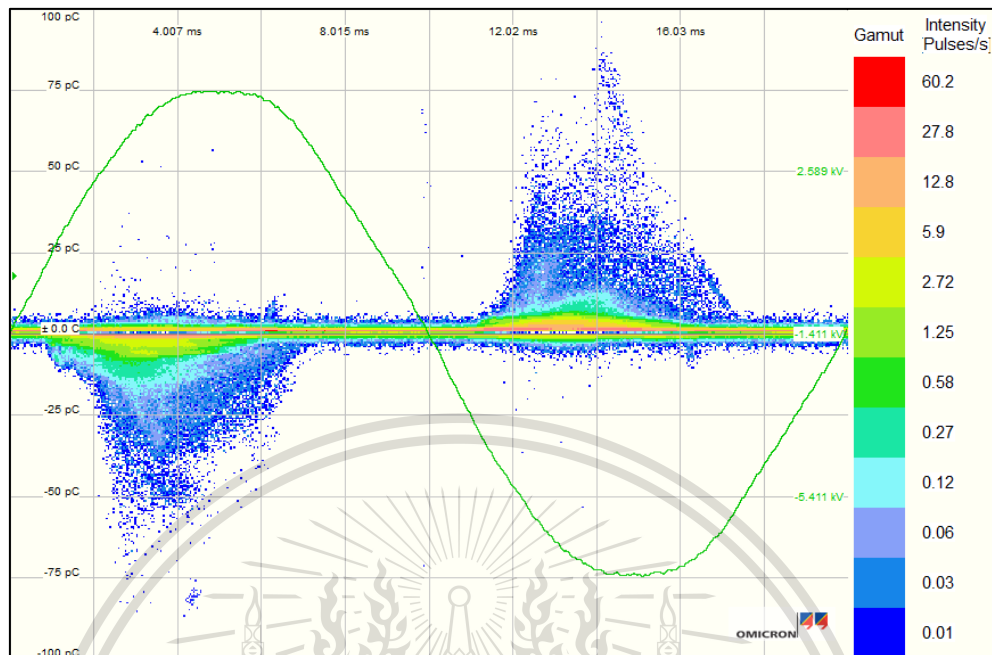
- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดีสชาร์จภายใน (Internal discharge)
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าสูงกว่าค่า PDIV
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดีสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ ที่แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนจะค่อนข้างคงที่ขณะคงค่าแรงดันทดสอบตลอดระยะเวลา 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

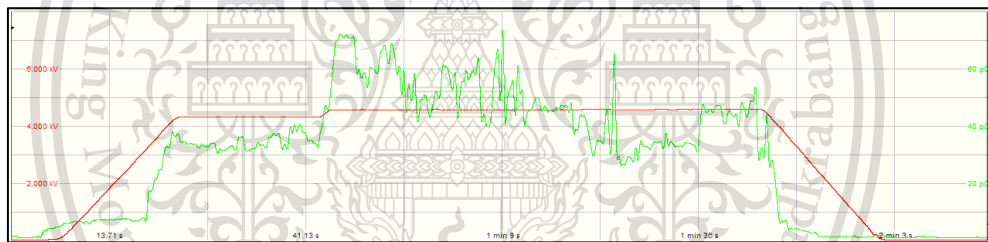
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.10 ผลการทดสอบกรณีที่ 10



(ก) PRPD pattern

(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.10 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 10

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	3.05
	Q_{IEC} (pC)	8
PDEV	V_{rms} (kV)	3.29
	Q_{IEC} (pC)	4.2
Maximum test voltage (kV)		4.59
Maximum Q_{IEC} (pC)		74

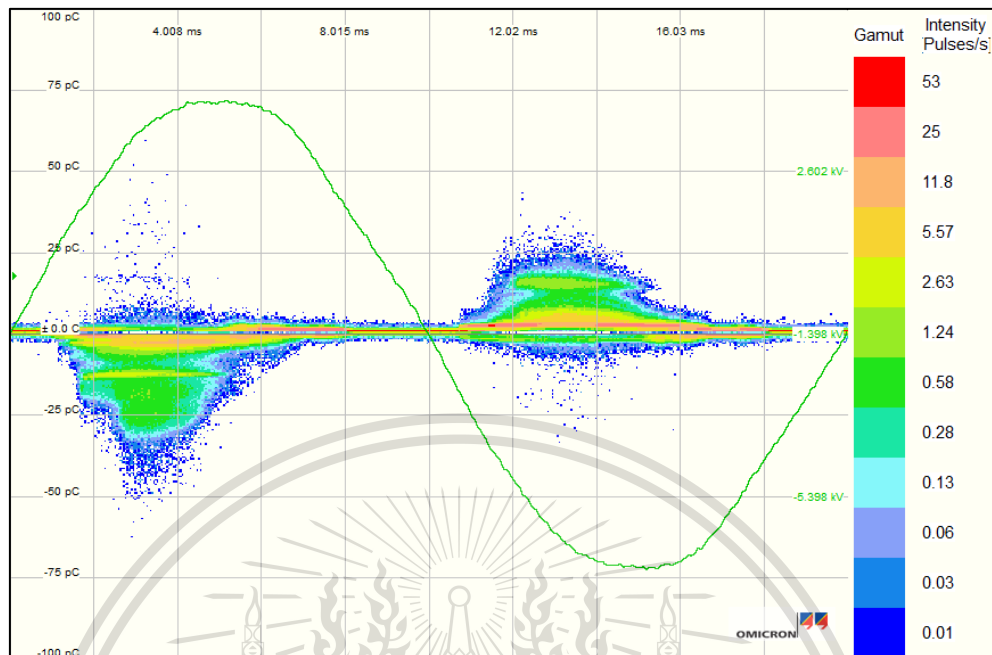
- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดีสชาร์จภายใน (Internal discharge)
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าสูงกว่าค่า PDIV
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดีสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ ที่แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนจะมีค่าผันผวนขณะทำการคงค่าแรงดันทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

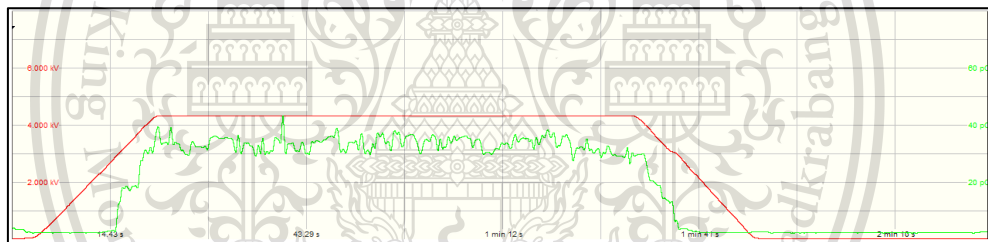
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.11 ผลการทดสอบกรณีที่ 11



(ก) PRPD pattern



(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.11 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสแตเตอร์บาร์ กรณีที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 11

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	2.98
	Q_{IEC} (pC)	12
PDEV	V_{rms} (kV)	3.32
	Q_{IEC} (pC)	14
Maximum test voltage (kV)		4.33
Maximum Q_{IEC} (pC)		43

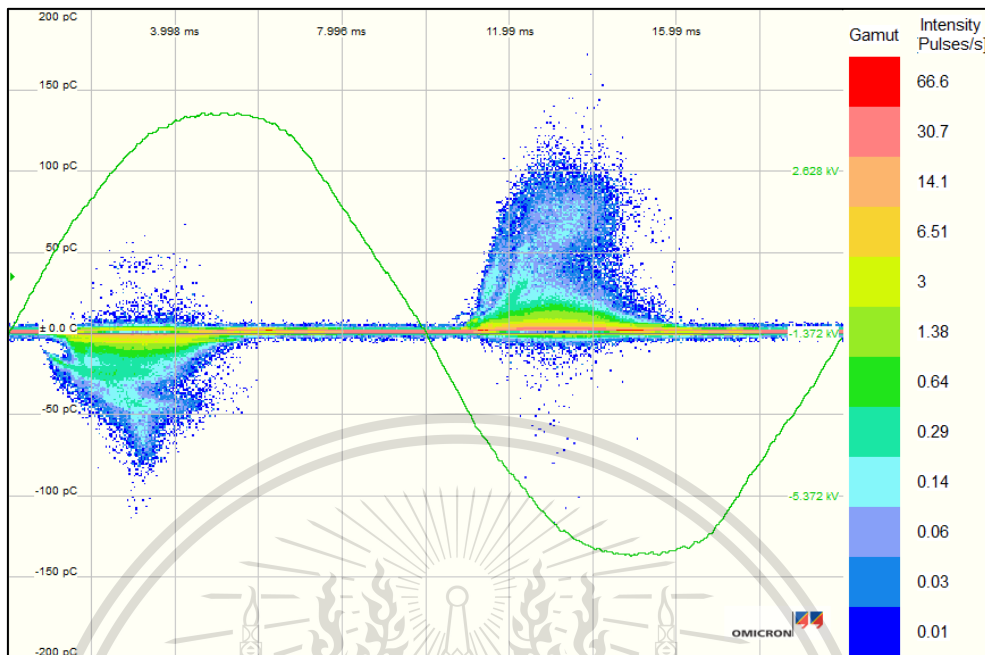
- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดีสชาร์จภายใน (Internal discharge)
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าสูงกว่าค่า PDIV
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดีสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนจะค่อนข้างคงที่ขณะคงค่าแรงดันทดสอบตลอดระยะเวลา 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

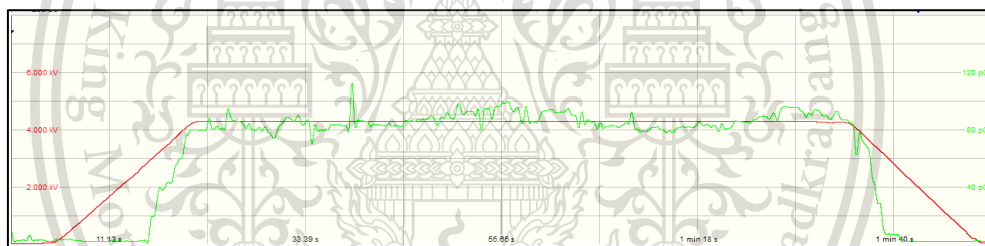
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

4.1.12 ผลการทดสอบกรณีที่ 12



(ก) PRPD pattern

(ข) กราฟแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดิสชาร์จบางส่วน (Q_{EC}) เทียบกับเวลา

รูปที่ 4.12 หน้าจอแสดงผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์ กรณีที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์จากการทดลอง กรณีที่ 12

Description		
PDIV	V_{rms} (kV)	2.91
	Q_{IEC} (pC)	7.2
PDEV	V_{rms} (kV)	2.99
	Q_{IEC} (pC)	7.1
Maximum test voltage (kV)		4.31
Maximum Q_{IEC} (pC)		112

- รูปแบบของ PRPD pattern จะเป็นรูปแบบของการดีสชาร์จภายใน (Internal discharge)
- จากผลการทดลองจะพบว่าค่า PDEV จะมีค่าสูงกว่าค่า PDIV
- จากผลกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ทำการป้อนและค่าดีสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) ณ ที่แรงดันนั้น เทียบกับเวลาพบว่าขนาดของการดีสชาร์จบางส่วนจะค่อนข้างคงที่ขณะคงค่าแรงดันทดสอบตลอดระยะเวลา 1 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์จากการวัดของวัตถุทดสอบทุกกรณีศึกษา

กรณี	แรงดันทดสอบ (kV)	PDIV (kV)	PDEV (kV)	Maximum Q_{IEC} (pC)
1	6.18	4.01	4.89	947
2	5.19	2.05	2.67	1500
3	4.82	3.72	4.43	426
4	5.77	2.45	4.01	959
5	3.08	1.65	1.85	67
6	4.04	2.18	2.77	154
7	4.01	2.95	2.61	15
8	4.31	2.86	3.16	367
9	3.85	2.51	2.76	60
10	4.59	3.05	3.29	74
11	4.33	2.98	3.32	43
12	4.31	2.91	2.99	112

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

จากผลการทดสอบในสแตเตอร์บาร์แต่ละกรณีข้างต้นโดยทำการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนในทุกกรณีที่ทำการจำลองจุดบกพร่อง สามารถสรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

1. เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบรูปแบบของ PRPD pattern ตามมาตรฐาน IEC 60034-27 [15,16] พบว่าในบางกรณีที่จำลองขึ้นไม่ได้มีรูปแบบเพียงรูปแบบเดียว เนื่องจากสแตเตอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นสแตเตอร์ที่มีการใช้งานแล้ว แสดงว่าสแตเตอร์บาร์จึงมีจุดบกพร่องในตัวอยู่แล้ว นอกจากนี้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดทุกกรณีจะมีค่าต่ำกว่า $1U_0$ ซึ่งนั่นหมายความว่าสแตเตอร์บาร์ในการใช้งานก็จะมีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นซึ่งเป็นสิ่งที่ปกติเนื่องจากฉนวนที่มีการใช้งานในเครื่องจักรกลหมุนจะเป็นวัสดุจำพวกอินทรีซึ่งมีคุณสมบัติต่อต้านการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
2. ในบางกรณีจะพบว่ามีรูปแบบของ PRPD pattern ที่สอดคล้องกับมาตรฐานอย่างชัดเจน ซึ่งก็คือ ในกรณีที่ 3 และ 4 เป็นซึ่งเป็นกรณีที่จำลองโดยการนำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 220 และ 250 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่า PRPD pattern มีแนวโน้มตรงกับกรณี Debonding discharge ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน IEC 60034-27-1 โดยเนื่องจากฉนวนจะเสื่อมสภาพอย่างถาวรเนื่องจากความร้อนสูงจนทำให้โครงสร้างภายในเสียหายอย่างมาก
3. เมื่อพิจารณาค่า PDIV และ PDEV จะพบว่ามีการที่ 7 เพียงกรณีเดียวที่ค่า PDIV สูงกว่าค่า PDEV ส่วนกรณีที่เหลือจะมีค่า PDIV ต่ำกว่าค่า PDEV ทั้งหมด ซึ่งอาจเป็นเพราะในกรณีที่ 7 สแตเตอร์บาร์ได้ถูกนำไปอบด้วยความชื้นจึงอาจทำให้โมเลกุลของของน้ำส่งผลกระทบต่อเนื้อฉนวนภายใน จึงทำให้พฤติกรรมของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

5.2 ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

การทดสอบดิสซาร์จบางส่วนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นเพียงการทดสอบสเตเตอร์บาร์เพียงชิ้นส่วนเดียวเท่านั้นซึ่งผลที่ได้นั้นจะแตกต่างจากไปจากการทดสอบดิสซาร์จบางส่วนในเครื่องจักรกลหมุนของจริงอันเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น ในการใช้งานเครื่องจักรกลหมุนที่หน่วยงานจะได้รับ ความเครียดหรือสภาพแวดล้อมที่เป็นสภาวะใช้งานจริง (Online operation) ซึ่งสเตเตอร์บาร์ที่ใช้ทดสอบไม่ได้อยู่ภายในสภาวะดังกล่าว ซึ่งจะเป็นสิ่งที่ยากที่จะเชื่อมโยงผลการศึกษาจากสเตเตอร์บาร์ที่ทดสอบในห้องปฏิบัติการกับเครื่องจักรกลหมุนของจริง ดังนั้นสิ่งสำคัญที่ควรจะมีการศึกษาเพิ่มเติมก็คือ วิธีการที่จะเชื่อมโยงผลการศึกษาดังกล่าวเพื่อวิเคราะห์ผลในเครื่องจักรกลหมุนของจริงได้ นอกจากนี้ ในการวิเคราะห์การจำลองจุดบกพร่องต่างๆ ควรจะต้องใช้วิธีการวิเคราะห์อื่นๆ มาเปรียบเทียบผลรวมด้วยเพื่อช่วยให้สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Greg C. Stone, and et al, *Electrical Insulation for Rotating Machines*, 1st Ed., Wiley-IEEE Press, 2004.
- [2] CEN-PING Industrial, “Coil inserting,” [Online], Available : <https://www.cen-ping.com/bldc%20stators.htm>,” May 2021.
- [3] Gulf Electroquip, “Stator upgrade,” [Online]. Available : <https://www.gulfelectroquip.com/stator-upgrade/>,” May 2021.
- [4] NeroDelta, “Stator Winding Bars,” [Online]. Available : <https://nerodelta.com/portfolio/stator-winding-bars/>,” May 2021.
- [5] W. McDermid, “Insulation systems and monitoring for stator windings of large rotating machines,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 9, No. 4, 1993, pp. 7-15.
- [6] ศุภวัตร น้าประเสริฐ, “การศึกษาแบบจำลองจุดบกพร่องของฉนวนในเครื่องจักรกลหมุนโดยการทดสอบการปล่อยประจุบางส่วน,” *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต*, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [7] Anders Helgeson. “Analysis of Dielectric Response Measurement Methods and Dielectric Properties of Resin-Rich Insulation During Processing,” *PhD thesis*, Royal Institute of Technology, 2000.
- [8] ชินปกรณ์ ชลศิริพงษ์ และ คณะ, “การวิเคราะห์ฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าควยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน,” *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต*, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.
- [9] ภูริชญ์ บุรพสายนท์ และ คณะ, “การศึกษาเทคนิคการวินิจฉัยฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง,” *ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต*, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [10] Conseil International des Grands Réseaux Électriques, “Guide of methods for determining the condition of stator winding insulation and their effectiveness in large motors,” **Technical Brochure**, Ref. 662, 2013.
- [11] สำรวย สัจษ์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพมหานคร, 2561.
- [12] International Electrotechnical Commission, “High-voltage test techniques - Partial discharge measurements,” **IEC Standard**, IEC 60270, 2000.
- [13] Conseil International des Grands Réseaux Électriques, “Guide for electrical Partial Discharge Measurements in compliance to IEC 60270,” **Technical Brochure**, Ref. 366, 2008.
- [14] Institute of Electrical and Electronics Engineers, “IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery,” **IEEE Standard**, IEEE 1434-2014 (Revision of IEEE Std 1434-2000), pp.1-89, 4 Dec. 2014.
- [15] International Electrotechnical Commission, “Rotating electrical machines - Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation,” **IEC Standard**, IEC 60034-27-1, 2017.
- [16] International Electrotechnical Commission, “Rotating electrical machines - Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines,” **IEC Standard**, IEC TS 60034-27-2, 2012.
- [17] C. Hudon and M. Belec, “Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics,” **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 12, no. 2, pp. 297-319, April 2005.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

การศึกษาจุดบกพร่องในฉนวนของเครื่องจักรกลหมุนโดยวิธีการวัดการดิสชาร์จบางส่วน

THE STUDY OF DEFECT IN INSULATION OF ROTATING MACHINES

BY PARTIAL DISCHARGES MEASUREMENT

ชัยณัฐ ศรีนางแย้ม วีรนนท์ จงเจริญศรีศิริ ศิวกร จินเมือง และ สรวิชญ์ พนิควงศ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 065-5262321 Email: 60010240@kmit.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาจุดบกพร่องของฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัสที่ติดตั้งกำลัง 96.6 MVA ที่แรงดัน 13.8 kV ด้วยวิธีการวัดการดิสชาร์จบางส่วน ในการศึกษาจะจำลองจุดบกพร่องในสเตเตอร์บาร์จำนวนทั้งหมด 12 กรณี คือ สเตเตอร์บาร์ที่รอยขีดสีด้านข้าง สเตเตอร์บาร์ที่มีรอยตัดบนผิวเซมิคอนดักทีฟสเตเตอร์บาร์ที่นำไปอบด้วยความร้อน สเตเตอร์บาร์ที่มีการเจาะรูที่เนื้อฉนวนบริเวณหน้าตัดและสอดเข็ม สเตเตอร์บาร์ที่นำไปอบด้วยความชื้น โดยแต่ละกรณีจะทำการศึกษา PRPD pattern ขนาดของการดิสชาร์จบางส่วน (Q_{IEC}) รวมถึงค่า PDIV และ PDEV จากการทดลองพบว่าสเตเตอร์บาร์ในทุกกรณีจะมีการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น โดยที่ค่าแรงดันเริ่มเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่ำกว่า $1U_0$ นั้นหมายความว่า ที่แรงดันใช้งานจะมีการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นในสเตเตอร์ ซึ่งเป็นสิ่งปกติสำหรับฉนวนที่ใช้ในเครื่องจักรกลหมุนแรงดันสูง เนื่องจากคุณสมบัติที่ต่อต้านการดิสชาร์จบางส่วน ในกรณีที่นำสเตเตอร์บาร์ไปอบด้วยความร้อน ผลการดิสชาร์จบางส่วนจะมีรูปแบบ PRPD pattern สอดคล้องกับมาตรฐาน ในกรณียัดยอนดิสชาร์จ นอกจากนี้สเตเตอร์บาร์ในทุกกรณีจะมีรูปแบบ PRPD pattern ที่เป็นรูปแบบของการดิสชาร์จภายใน

คำสำคัญ: เครื่องกำเนิดไฟฟ้าซิงโครนัส, สเตเตอร์บาร์, ดิสชาร์จบางส่วน

Abstract

This paper studies the defects of insulation used in the synchronous generator at rated 96.6 MVA, 13.8 kV by partial discharge (PD) measurement. In the study, the stator bars were simulated of 12 case studies which comprised of the stator bar with abraded semiconductive layers, the stator bar that was cut semiconductive layer, the stator bars that were heated, the stator bars with air-cavities, the stator bars that were perforated by needle and the stator bar that was steeped by moisture. In each case, the phase-resolved partial discharge (PRPD) pattern, the

magnitude of partial discharge (Q_{IEC}) as well as the partial discharge inception voltage (PDIV) and the partial discharge extinction voltage (PDEV) values were studied. According to the experiment, partial discharge occurs in all cases of the simulated stator bars and the PDIV values are lower than $1U_0$ for all cases. That means, in operation, the partial discharge will occur in the stator bars. However, this is normal for insulation used in high-voltage rotating machines due to PD resistance property. In the cases of the stator bar was heated, the partial discharge results will have a PRPD pattern, consistent with the standard in the debonding discharge case. In addition, the stator bar in all cases will have the PRPD pattern of internal discharge.

Keywords: Synchronous Generator, Stator Bar, Partial Discharge

1. บทนำ

เครื่องจักรกลหมุน (Rotating Machine) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมรวมถึงโรงไฟฟ้าซึ่งเป็นต้นกำลังหลักในการผลิตกำลังไฟฟ้าเพื่อจ่ายกำลังเข้าระบบไฟฟ้าเพื่อการใช้งาน หากเครื่องจักรกลหมุนมีความบกพร่องชำรุด หรือเสียหายก็จะส่งผลกระทบต่อทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและรวมถึงโรงไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการป้องกัน หรือเฝ้าระวังมิให้เกิดความเสียหายขึ้นต่อเครื่องจักรกลหมุน ความบกพร่องดังกล่าวส่วนหนึ่งเกิดจากการได้รับความเครียดในหลายรูปแบบ ได้แก่ ความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียดทางความร้อน ความเครียดทางกล และ ความเครียดที่อยู่ในรูปแบบของสิ่งแวดล้อมที่สภาวะใช้งาน [1-2]

วิธีการประเมินสภาพของฉนวนด้วยวิธีการทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนเป็นวิธีการที่ใช้วินิจฉัยจุดบกพร่องของฉนวนซึ่งเมื่อฉนวนมีการเสื่อมสภาพก็อาจจะมีการเกิดโพรงอากาศหรือมีรอยแตกขึ้นภายในเนื้อฉนวน ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่ได้รับความเครียดสูง [3] และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

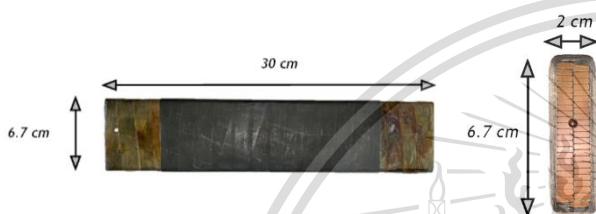
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

2. การทดสอบการเกิดคิสซาร์จบางส่วน

การทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC 60270 [4] ซึ่งทำจำลองจุดบกพร่องในฉนวนของสเตรเตอร์บาร์ซึ่งคาดว่าจะเกิดการคิสซาร์จขึ้นจากจุดบกพร่องดังกล่าว

2.1 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์จะใช้เป็นสเตรเตอร์บาร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าซึ่งโคโรนมาเป็นระยะเวลา 30 ปี โดยชิ้นงานจะมีความยาว 30 เซนติเมตรจำนวน 12 ชิ้น เพื่อทำการจำลองจุดบกพร่องต่อไป โดยขนาดของสเตรเตอร์บาร์จะแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 สเตรเตอร์บาร์ที่ใช้เป็นวัตถุประสงค์

2.2 กรณีศึกษา

ในการจำลองจุดบกพร่องในสเตรเตอร์บาร์จะนำสเตรเตอร์บาร์ไปจำลองจุดบกพร่องในแต่ละกรณี ซึ่งสเตรเตอร์บาร์บางชิ้นเป็นกรณีที่มีจุดบกพร่องเกิดขึ้นอยู่และไม่ได้นำไปจำลองจุดบกพร่องเพิ่มเติม โดยการจำลองจุดบกพร่องจะแบ่งเป็น 12 กรณี แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจำลองจุดบกพร่องของสเตรเตอร์บาร์

กรณี	การจำลองจุดบกพร่อง
1	มีรอยการขีดสีผิวเซมิคอนดักเตอร์ข้างทั้ง 2 ด้านออก
2	ตัดผิวเซมิคอนดักเตอร์ 1 ด้าน โดยตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 ซม. × 3 ซม.
3	นำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
4	นำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง
5	ทำการสอดเข็มเข้าไปในเนื้อฉนวนที่หน้าตัดทั้งสองด้านของสเตรเตอร์บาร์ โดยเข็มมีความยาว 10 ซม. หลังจากนั้นทำการฉีสน้ำเข้าไปในร่องการเจาะด้วยเข็มดังกล่าว

ตารางที่ 1 การจำลองจุดบกพร่องของสเตรเตอร์บาร์ (ต่อ)

กรณี	คำอธิบาย
6	มีจุดบกพร่องจากการใช้งานอยู่แล้ว ซึ่งเป็นร่องรอยการเกิดคิสซาร์จที่บริเวณผิวของเซมิคอนดักเตอร์
7	ให้ความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
8	เจาะรูที่ฉนวนบริเวณหน้าตัดทั้งสองด้านทั้งหมดที่รู บริเวณขอบของตัวนำที่หน้าตัดของสเตรเตอร์บาร์ทั้งสองด้าน
9	เจาะรูที่ฉนวนในลักษณะเดียวกับกรณีจำลองที่ 8 และทำการสอดเข็มไปหนึ่งรู ซึ่งเข็มมีความยาว 10 ซม.
10	เจาะรูที่ฉนวนในลักษณะเดียวกับกรณีจำลองที่ 8 และทำการเจาะรูขนาดเล็ก ซึ่งรูมีความลึกประมาณ 3 มม. ที่บริเวณตรงกลางของผิวสเตรเตอร์บาร์
11	เจาะรูขนาดเล็กด้านข้างของสเตรเตอร์บาร์ ซึ่งรูมีความลึกประมาณ 1.5 มม. จากผิวสเตรเตอร์และทำการสอดเข็มหนึ่งเล่มที่หน้าตัดบริเวณเนื้อฉนวน ซึ่งเข็มมีความยาว 10 ซม.
12	เจาะรูขนาดเล็ก ซึ่งมีความลึกประมาณ 2.8 มม. ที่ผิวข้างของสเตรเตอร์บาร์

2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

ร่องสลีตจำลองใช้เพื่อจำลองร่องสลีตในเครื่องจักรกลหมุน โดยในการทดสอบจะนำวัตถุประสงค์สเตรเตอร์บาร์ไปแทรกกระหว่างตัวนำที่สามารถปรับระยะเข้า-ออกได้ ร่องสลีตจำลอง แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ร่องสลีตจำลอง

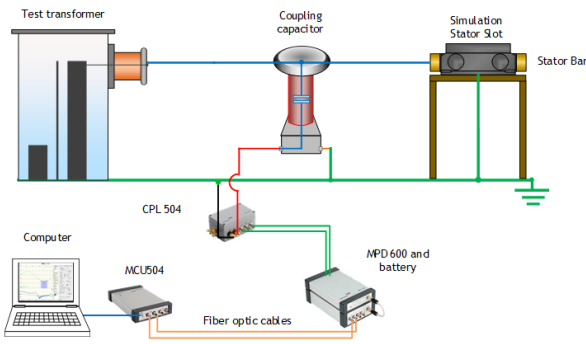
2.4 วงจรทดสอบ

การต่อวงทดสอบการคิสซาร์จบางส่วน จะทำการแทรกสเตรเตอร์บาร์ในร่องสลีตจำลองโดยทำการปรับให้หน้าสัมผัสทั้งสองของร่องสลีตจำลองแนบกับสเตรเตอร์บาร์พอดี แสดงดังรูปที่ 3

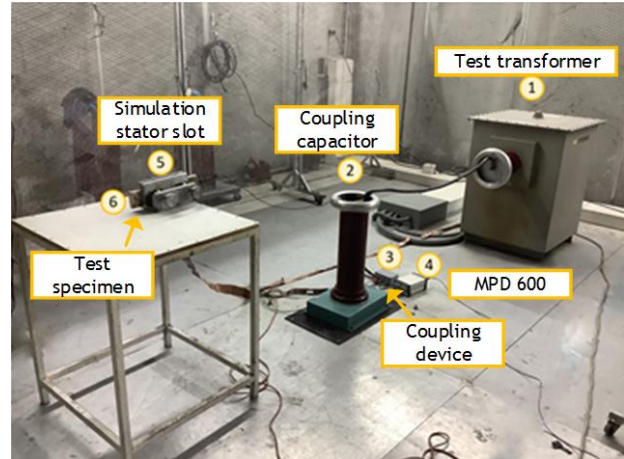
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้าโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 3 วงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วนในสเตเตอร์บาร์



รูปที่ 6 การต่อวงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน

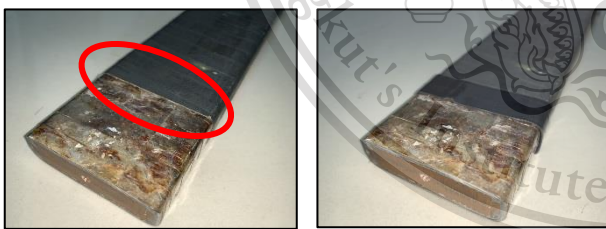
2.5 การเตรียมการและดำเนินการทดสอบ

ก่อนที่จะทำการทดสอบสเตเตอร์บาร์ทุกชิ้นจะต้องถูกเจาะรูที่หน้าตัดตรงตัวนำของสเตเตอร์บาร์ไว้โดยสกรูเนื้อ เพื่อใช้เป็นหัวต่อสำหรับการจ่ายแรงดันดังรูปที่ 4 (ซ้าย) ในการทดสอบและปลายอีกด้านหนึ่งของสเตเตอร์บาร์จะทำการทาด้วย copper paint เพื่อให้ตัวนำสมมาตรทั้งหมดของสเตเตอร์บาร์ถึงกันทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 4 (ขวา) นอกจากนี้ สเตเตอร์บาร์ทุกชิ้นจะต้องถูกพันด้วยเทปฉนวน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดดิสชาร์จขึ้นตรงบริเวณขอบของผิวเคมีคอนดักทีฟเทป ดังรูปที่ 5

หลังจากทำการปรับเทียบระบบวัดแล้วจะทำการจ่ายไฟฟ้าแก่ระบบ โดยไม่มีการขึ้นแรงดันเพื่อที่จะทำการอ่านค่าสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ของระบบวัด โดยตามมาตรฐาน IEC 60270 [4] นั้นค่าของดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จะต้องมีค่ามากกว่าสองเท่าของสัญญาณรบกวนพื้นหลังเท่านั้นจึงจะยอมรับผลการทดสอบ



รูปที่ 4 สเตเตอร์บาร์ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 5 การป้องกันไม่ให้เกิดดิสชาร์จขึ้นตรงบริเวณขอบเคมีฯ

3. ผลการทดสอบ

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนแต่ละกรณีศึกษา

กรณี	แรงดันทดสอบ (kV)	PDIV (kV)	PDEV (kV)	Maximum Q _{IEC} (pC)
1	6.18	4.01	4.89	947
2	5.19	2.05	2.67	1500
3	4.82	3.72	4.43	426
4	5.77	2.45	4.01	959
5	3.08	1.65	1.85	67
6	4.04	2.18	2.77	154
7	4.01	2.95	2.61	15
8	4.31	2.86	3.16	367
9	3.85	2.51	2.76	60
10	4.59	3.05	3.29	74
11	4.33	2.98	3.32	43
12	4.31	2.91	2.99	112

หลังจากทำการจำลองจุดบกพร่องทุกกรณีและทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบเรียบร้อยแล้ว การจะทำการทดสอบโดยมีการจัดเรียงสเตเตอร์บาร์ในวงจรทดสอบและทำการต่อวงจรทดสอบการดิสชาร์จบางส่วน ดังรูปที่ 5 ก่อนที่จะทำการทดสอบจะต้องมีการปรับเทียบระบบวัดด้วยเครื่องปรับเทียบ ซึ่งทำการต่อรอมระหว่างตัวนำของสเตเตอร์บาร์และกราวด์เพื่อที่จะปรับเทียบให้ระบบทำการวัดได้อย่างถูกต้อง รวมถึงเพื่อหาค่าสเกลแฟกเตอร์ของระบบวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำเนื้อหาไปใช้

4. การสรุปผล

จากผลการทดสอบในแต่ละกรณีข้างต้น โดยทำการวัดค่าการดิสชาร์จบางส่วนในทุกกรณีที่ทำกรจำลองจุดบกพร่อง พบว่าในทุกกรณีจะมีดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น นอกจากนี้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ดิสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดทุกกรณีจะมีค่าต่ำกว่า $1U_0$ ซึ่งนั่นหมายความว่าสเตเตอร์บาร์ในการใช้งานก็จะมีการดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นซึ่งเป็นสิ่งที่ปกติเนื่องจากฉนวนที่มีการใช้งานในเครื่องจักรกลหมุนจะเป็นวัสดุจำพวกอินทรีซ์ซึ่งมีคุณสมบัติต่อต้านการเกิดดิสชาร์จบางส่วนและเมื่อพิจารณาค่า PDIV และ PDEV จะพบว่ามีการที่ 7 เพียงกรณีเดียวที่ค่า PDIV สูงกว่าค่า PDEV ส่วนกรณีที่เหลือจะมีค่า PDIV ต่ำกว่าค่า PDEV ทั้งหมด ซึ่งอาจเป็นเพราะในกรณีที่ 7 สเตเตอร์บาร์ได้ถูกนำไปอบด้วยความชื้นจึงอาจทำให้โมเลกุลของของน้ำส่งผลกระทบต่อเนื้อฉนวนภายใน



นาย ชัยพงษ์ ศรีนางแย้ม
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail: 60010240@kmitl.ac.th



นาย วีรนต์ จงเจริญศิริ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail: 60010946@kmitl.ac.th

5. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้คงไม่สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีหากปราศจากความช่วยเหลือของ รศ.ดร. นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ผศ.ดร. กพ จันท์เจริญสุข ผู้คอยให้คำปรึกษารวมทั้งชี้แนะแนวทางให้ความรู้เกี่ยวกับโครงการและคอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ ขอขอบคุณ คุณเพทาย นิ่มสนอง และ คุณ กิตติศักดิ์ ถึงสูง ตลอดจนที่ปรึกษาทุกท่านที่คอยชี้แนะตลอดจนให้ความรู้และแบ่งปันประสบการณ์อันดีเกี่ยวกับการศึกษา



นาย ศิวกร จินเมือง
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail: 60010983@kmitl.ac.th



นาย สรวิชญ์ พินิตวงศ์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
E-mail: 60011024@kmitl.ac.th

เอกสารอ้างอิง

- [1] Greg Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, and Hussein Dhirani, "Rotating Machine Insulation Systems," in *Electrical Insulation for Rotating Machines*, 1st ed. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2004, ch. 1, pp. 1-41.
- [2] Andreas K., in *High Voltage Engineering Fundamentals-Technology-Applications*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2005.
- [3] ชินปกรณ์ ชลศิริพงษ์ และ คณะ "การวิเคราะห์จำนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยวิธีวัดกระแสโพลาริเซชันและดีโพลาริเซชัน," ปริญญานิพนธ์ วศ.บ., วศ. ไฟฟ้า, สจล, ลาดกระบัง, กทม. 2559.
- [4] *High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*, IEC 60270 : 2000+AMD1 : 2015 CSV Consolidated version, International Electrotechnical Commission, Switzerland, 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ประวัติผู้เขียน



ชื่อ-นามสกุล นาย ชิชณพงศ์ ศรีนางแย้ม
วัน เดือน ปีเกิด 12 พฤศจิกายน 2541
ที่อยู่ 27/39 ถนนพญาไท ตำบลหนองปรือ
อำเภอบางละมุง ชลบุรี 20150
อีเมล chissanupong.sny@gmail.com
โทรศัพท์ 065-5262321

ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ-นามสกุล นาย วีรนนท์ จงเจริญศรีศิริ
วัน เดือน ปีเกิด 13 สิงหาคม 2541
ที่อยู่ บ้านเลขที่ 280 หมู่ 1 ตำบลบ้านปรานค์
อำเภอคง นครราชสีมา 30260
อีเมล weeranon@hotmail.co.th
โทรศัพท์ 085-4198827

ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



ชื่อ-นามสกุล นาย ศิวกร จินเมือง
 วัน เดือน ปีเกิด 15 ตุลาคม 2541
 ที่อยู่ 219 หมู่ 4 ตำบลพญาขัน
 อำเภอเมือง พัทลุง 93000
 อีเมล siwakorn.je@gmail.com
 โทรศัพท์ 096-7945233

ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
 เจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ชื่อ-นามสกุล นาย สรวิชญ์ พินตวงศ์
 วัน เดือน ปีเกิด 8 เมษายน 2542
 ที่อยู่ 227 ซอยลาดพร้าว62 แขวงวังทองหลาง
 เขตวังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310
 อีเมล name13572468@gmail.com
 โทรศัพท์ 094-5453116

ประวัติการศึกษา 2560 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
 เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.