การตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV: กรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของบริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด

PARTIAL DISCHARGE SIGNALS DETECTION IN 21 kV GENERATOR: CASE STUDY OF A GENERATOR AT THE COMBINED CYCLE POWER PLANT OF RATCHABURI POWER COMPANY LIMITED

วรัญญู บุญเพ็ญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV: กรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของ บริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด

วรัญญู บุญเพ็ญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV: กรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของบริษัทราชบุรี เพาเวอร์ จำกัด Partial Discharge Signals Detection in 21 kV Generator : Case Study of a Generator at the Combined Cycle Power Plant of Ratchaburi Power Company Limited
ชื่อ - นามสกุล	นายวรัญญู บุญเพ็ญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล, Ph.D.
ปีการศึกษา	2560

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณฐภัทร พันธ์คง, Ph.D.)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ธนพงศ์ สุวรรณศรี, Dr.-Ing.)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์บุญยัง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

.... กรรมการ
(อาจารย์ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)
วันที่ 19 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV: กรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของบริษัทราชบุรี เพาเวอร์ จำกัด
ชื่อ-นามสกุล	นายวรัญญู บุญเพ็ญ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล, Ph.D.
ปีการศึกษา	2560

บทคัดย่อ

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหาที่จะทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเกิดความเสียหายขั้นรุนแรงได้ จึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการตรวจวัดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนเพื่อทำให้ทราบถึงปัญหาลักษณะต่างๆ และนำไปใช้ในการกำหนดแนวทางซ่อมบำรุงเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งในการตรวจวัดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนโรงไฟฟ้าจะมีค่าใช้จ่ายในการจ้างบริษัทเข้ามาวัดสัญญาณจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน และทำการวิเคราะห์ผลการวัด

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการตรวจวัดและวิเคราะห์สัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV โดยการตรวจวัดและเก็บข้อมูลสัญญาณจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงร่วมกับชุดจัดเก็บข้อมูล จากนั้นนำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์เปรียบเทียบผลกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน โดยทำการตรวจวัดและเก็บข้อมูลสัญญาณของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเป็นกรณีศึกษา ณ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของบริษัทราชบุรี เพาเวอร์ จำกัด

ผลการวัดและตรวจสอบด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐานพบสัญญาณผิดปกติเกิดขึ้นที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่เฟส A ของยูนิต 10 โดยเกิดขึ้นที่มุม 90° และ 270° จึงทดลองใช้การตรวจวัดที่นำเสนอซึ่งสามารถตรวจจับสัญญาณผิดปกติได้แต่มุมที่เกิดจะต่างจากผลที่ได้จากเครื่องวัดมาตรฐานอยู่ 90° ทั้งนี้เนื่องมาจากคุณสมบัติของคาปาซิเตอร์เซ็นเซอร์ จึงทำการเลื่อนมุมเพิ่มไป 90° ทำให้ได้ผลการวัดที่ตรงกัน โดยสัญญาณมีความถี่ 25 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งจัดอยู่ในช่วงของสัญญาณรบกวนที่มีสาเหตุจากการแตกตัวของประจุในอากาศ จากการหยุดเดินเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อทำการซ่อมบำรุงพบว่า สาเหตุดังกล่าวเกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการติดตั้งในส่วนของจุดต่อของอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ

คำสำคัญ: สัญญาณดีสชาร์จบางส่วน เครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ออสซิโลสโคปความเร็วสูง

Thesis Title	Partial Discharge Signals Detection in 21 kV Generator: Case Study of a Generator at the Combined Cycle Power Plant of Ratchaburi Power Company Limited
Name-Surname	Mr. Warunyu Boonphen
Program	Electrical Engineering
Thesis Advisor	Mr. Chatchai Suppitaksakul, Ph.D.
Academic Year	2017

ABSTRACT

Partial discharge (PD) is one of the problems that can cause serious damage on generators. Therefore, it is necessary to measure partial discharge signals in order to gain insights into the problems, and then maintenance work of the generators can be done effectively. In measuring partial discharge signals, the power plant has to employ another company which has standard instruments to perform the task, which causes expenses.

This thesis proposed the measurement and analysis of partial discharge signals in a 21 kV generator derived from partial discharge sensors with a high speed oscilloscope and a storage unit. Then, the data were analyzed and compared with the results obtained from the standard instrument. As a case study, the measurement and data collection was conducted at the combined cycle power plant of Ratchaburi Power Company Ltd.

Measurement and inspection results with the standard instrument indicated that abnormal signals were found on the generator at Phase A of Unit 10 of the power plant, at the angles of 90° and 270°. Then, the proposed measurement method was implemented and, abnormal signals, then, were detected. However, the angles were different from those obtained from the standard instrument by 90°, which was due to the properties of the capacitor sensor. After adding 90° phase shift, the measurement results were exactly the same and the frequency of the signals was 25 MHz, the range in which a noise bandwidth that can be produced by disintegration of the charges in the air. After shutting down the generator for the maintenance purpose, it was found that the fault was caused during the installation of the junction box of the detector.

Keywords: partial discharge signal, combined cycle power plant, high speed oscilloscope

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณฐภัทร พันธ์คง ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนพงศ์ สุวรรณศรี ผู้ทรงคุณวุฒิ และดร.ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พินิจ จิตจริง ที่กรุณาให้คำแนะนำ และให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 5 ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรองงานวิจัยและให้คำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์สำหรับการทำวิจัยทั้งนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในการวิจัยครั้งนี้และขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ นักศึกษาระดับปริญญาโท และ ระดับปริญญาเอกทุกคน รวมถึงผู้บังคับบัญชา พี่ๆ เพื่อนๆ ที่ทำงานทั้งในส่วนของ บริษัทราชบุรี เพาเวอร์ จำกัด (RPCL) และ ในส่วนของโครงการเดินเครื่องและบำรุงรักษา ราชบุรี เพาเวอร์ จำกัด (อค-บพ.) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้กำลังใจในการดำเนินกิจกรรมการวิจัยจนได้ความสมบูรณ์ของงาน มีส่วนช่วยให้คำแนะนำช่วยเหลือในเรื่องการเรียนและเรื่องอื่นๆ ตลอดระยะเวลาที่ได้มาทำการศึกษา ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีตั้งแต่ต้นจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณยายจันทร์ ดำหริ คุณพ่อ ร้อยตรีสุรินทร์ บุญเพ็ญ คุณอานางสาวดลนภา บุญเพ็ญ รวมถึงญาติพี่น้องที่ผู้วิจัยรักและเคารพ ที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น และอบรมเลี้ยงดู เป็นกำลังใจ และให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยด้วยความรักมาโดยตลอด พร้อมทั้งสนับสนุนเรื่องการศึกษามาเป็นอย่างดี เป็นต้นไม้ใหญ่ที่เป็นร่มโพธิ์ ร่มไทร ให้กับผู้วิจัย และ ชี้แนะแนวทางการดำเนินชีวิต และการทำงาน จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วรัญญู บุญเพ็ญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญรูป	(9)
บทที่ 1 บทนำ	12
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	12
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	13
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย	13
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	14
1.5 ขั้นตอนการวิจัย	14
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ	14
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
2.1 ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge)	16
2.2 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	21
2.3 สาเหตุการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	22
2.4 การตรวจสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	26
2.5 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน	27
2.6 การวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน	35
2.7 ลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน	40
2.8 ฐานข้อมูลของผลการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2015	47
2.9 EMC Reference	49
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	49
2.11 สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	51
3.1 ผังขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	51
3.2 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน	52
3.3 ขั้นตอนการทดสอบ	58
3.4 สรุปการดำเนินงานวิจัย	72
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์	73
4.1 ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐานและเครื่องมือตรวจจับที่ออกแบบ	73
4.2 ผลการตรวจสอบหาสาเหตุจากการวิเคราะห์	81
4.3 สรุปผลการวิเคราะห์	88
บทที่ 5. ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	89
5.1 สรุปผลการวิจัย	89
5.2 ข้อเสนอแนะ	89
5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวเนื่องในอนาคต	90
บรรณานุกรม	91
ภาคผนวก	93
ภาคผนวก ก DEVICE SPECIFICATIONS NI PXIe-5160	94
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 ทั้ง 3 เฟส	96
ภาคผนวก ค Partial Discharge Report Executive Summary 24th November 2017	109
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่	145
ประวัติผู้เขียน	154

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปัญหาจากการขั้นตอนการผลิตที่ไม่เหมาะสม (Inadequate Bonding) 41

ตารางที่ 2.2 ปัญหาจากการเกิด Slot Discharge 41

ตารางที่ 2.3 ปัญหาจากความเครียดในสารเคลือบผิวต่าง ๆ (Stress Coating Interface) 42

ตารางที่ 2.4 ปัญหาจากการคลายตัวของขดลวด (Loose Windings) 43

ตารางที่ 2.5 ปัญหาจากช่องว่างระหว่าง Phase ที่ไม่เพียงพอ (Inadequate Spacing) 44

ตารางที่ 2.6 ปัญหาจากการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Connections) 44

ตารางที่ 2.7 ปัญหาจาก Surges 45

ตารางที่ 2.8 ปัญหาจากการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (Thermal Deterioration) 46

ตารางที่ 2.9 ปัญหาจากการปรับเปลี่ยน Load (Load Cycling) 46

ตารางที่ 2.10 ปัญหาจากความสกปรก (Contamination) 47

ตารางที่ 2.11 ฐานข้อมูลความรุนแรงของการเกิด PD พิกัด 21 kV 48

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 51

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางด้านเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 53

ตารางที่ 3.3 Features of Hydrogen Cooling 54

ตารางที่ 3.4 Installation Epoxy Mica Capacitor at RPCL 58

ตารางที่ 3.5 แสดงตารางฐานข้อมูลเทียบกับข้อมูลทางด้านเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 59

ตารางที่ 3.6 ตัวอย่างผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ที่ GTG11 .. 60

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ที่ STG10 ครั้งที่ 1 .. 64

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ที่ STG10 ครั้งที่ 2 .. 64

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ที่ STG10 ครั้งที่ 3 .. 67

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ที่ STG10 ครั้งที่ 1 .. 73

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ที่ STG10 ครั้งที่ 2 .. 74

ตารางที่ 4.3 ฐานข้อมูลความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนพิกัด 21 kV
และใช้ไฮโดรเจนในการระบายความร้อน 74

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ที่ STG10 ครั้งที่ 4 .. 86

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 รูปแบบของดิสชาร์จบางส่วน (PD) 17
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน ขั้วบวก 18
รูปที่ 2.3 แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซและกระแสที่ขั้วสายขณะเกิด คายประจุบางส่วน ขั้วบวก..... 20
รูปที่ 2.4 ลักษณะกระแสการคายประจุบางส่วนทางทฤษฎีสำหรับช่องว่างอากาศ..... 21
รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลเมื่อมีโพรงอากาศในเนื้อฉนวน 21
รูปที่ 2.6 การเสื่อมสภาพด้วยความร้อน 22
รูปที่ 2.7 การเคลือบฉนวนที่ไม่ดี 23
รูปที่ 2.8 การคลายตัวของขดลวด..... 24
รูปที่ 2.9 ช่องว่างระหว่างเฟสไม่เพียงพอ 25
รูปที่ 2.10 ความสกปรกในปลายขดลวด (End Winding)..... 26
รูปที่ 2.11 Cable Capacitor ทำด้วย HV Cable 28
รูปที่ 2.12 PD Sensor ชนิด EMC ขนาด 80 pF 28
รูปที่ 2.13 Pulse Width และ Rise Time ของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน 29
รูปที่ 2.14 การออกแบบและเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 80 pF..... 29
รูปที่ 2.15 ย่านความถี่ที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน..... 30
รูปที่ 2.16 การกรองสัญญาณความถี่ของตัวเก็บประจุขนาด 80 pF 31
รูปที่ 2.17 (ก)(ข) กล่องเชื่อมต่อสัญญาณภายนอกและภายใน 32
รูปที่ 2.18 การตรวจวัดสัญญาณด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน (TGA-B) 33
รูปที่ 2.19 (ก)(ข) การตรวจวัดสัญญาณด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน (TGA-B) เพื่อนำไปวิเคราะห์ 34
รูปที่ 2.20 Double – End Installation (2 PD Sensor / Phase)..... 34
รูปที่ 2.21 คุณลักษณะของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน..... 35
รูปที่ 2.22 ตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนที่เกิด และ ปริมาณ +PD และ –PD 36
รูปที่ 2.23 ตำแหน่งของดิสชาร์จบางส่วนว่าเกิดขึ้นที่บริเวณใด 36
รูปที่ 2.24 สัญญาณ -PD < +PD 37
รูปที่ 2.25 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ -PD < +PD 37
รูปที่ 2.26 สัญญาณ +PD ≈ –PD..... 38

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.27 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ +PD ≈ –PD.. 38

รูปที่ 2.28 สัญญาณ -PD > +PD 39

รูปที่ 2.29 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ -PD > +PD 39

รูปที่ 2.30 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณผิดปกติขึ้นที่มุม 270° 40

รูปที่ 2.31 คุณสมบัติของ Capacitor Load.. 49

รูปที่ 3.1 บริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด 52

รูปที่ 3.2 การติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ แบบ Directional 2PD Sensor/Phase 55

รูปที่ 3.3 Single line การติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ แบบ Directional 2PD Sensor/Phase 55

รูปที่ 3.4 แก๊สเทอร์ไบน์ มีอยู่ทั้งหมด 4 ยูนิต... 56

รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการติดตั้ง PD Sensor ที่แก๊สเทอร์ไบน์ 56

รูปที่ 3.6 สตรีมเทอร์ไบน์ มีอยู่ทั้งหมด 2 ยูนิต 57

รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการติดตั้ง PD Sensor ที่สตรีมเทอร์ไบน์.. 57

รูปที่ 3.8 การตรวจสอบด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน (TGA-B) 59

รูปที่ 3.9 PD Summary Variables 60

รูปที่ 3.10 การอ่านค่าของกราฟในแนวแกนตั้ง.. 61

รูปที่ 3.11 การอ่านค่าของกราฟในแนวแกนนอน 62

รูปที่ 3.12 รูปแบบของการแสดงผลในรูปแบบ 2 มิติ... 62

รูปที่ 3.13 รูปแบบของการแสดงผลในรูปแบบ 3 มิติ... 63

รูปที่ 3.14 ค่าขนาดของ PD จะอ่านจากจุดที่เกิด PD จำนวน 10 พลัลส์ต่อวินาที (pps)................ 63

รูปที่ 3.15 Data Report STG 10 ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2017 66

รูปที่ 3.16 Data Report STG 10 ในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2017 68

รูปที่ 3.17 การตรวจจับสัญญาณด้วยด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูง.. 69

รูปที่ 3.18 ออสซิลโลสโคปรุ่น NI Pxle-5160 500MHz , Sample rate 2.5 GS/s , 10 Bits........... 70

รูปที่ 3.19 การทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 2GS/s และ Sample to read ที่ 5M ที่ Phase A....... 71

รูปที่ 3.20 การทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 1GS/s และ Sample to read ที่ 5M ที่ Phase A....... 71

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.21 การทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 250MS/s และ Sample to read ที่ 5M ที่ Phase A .. 71

รูปที่ 3.22 การทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 10M ที่ Phase A 72

รูปที่ 3.23 การทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ที่ Phase A .. 72

รูปที่ 4.1 สัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A มุม 90° และ 270° 75

รูปที่ 4.2 สัญญาณผิดปกติเกิดขึ้นที่มุม 0° ตั้งค่า Sample rate 100 M/s และ Sample to read 5M.. 76

รูปที่ 4.3 การตัดสัญญาจากค่า Sample rate 100 MS/s และ Sample to read 5M มา 1 ลูกคลื่น..... 77

รูปที่ 4.4 การขยายสัญญาจากค่า Sample rate 100 MS/s และ Sample to read 5M ครั้งที่ 1......... 78

รูปที่ 4.5 การขยายสัญญาจากค่า Sample rate 100 MS/s และ Sample to read 5M ครั้งที่ 2......... 78

รูปที่ 4.6 ภาพขยายสัญญาณผิดปกติจากยอดถึงยอดเพื่อหาความถี่ที่ถูกต้อง ครั้งที่ 3 79

รูปที่ 4.7 ภาพขยายสัญญาณผิดปกติจากยอดถึงยอดเพื่อหาความถี่ที่ถูกต้อง ครั้งที่ 4 79

รูปที่ 4.8 สรุปสัญญาณผิดปกติที่เกิดขึ้นมีความถี่ 25 MHz.. 80

รูปที่ 4.9 ที่ความถี่ 25 MHz จะอยู่ในช่วงของสัญญาณรบกวน 80

รูปที่ 4.10 จุดที่ทำการตรวจสอบหาสาเหตุของสัญญาณรบกวน.. 82

รูปที่ 4.11 จุดที่ทำการตรวจสอบหาสาเหตุที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A.................................... 82

รูปที่ 4.12 จุดที่พบสาเหตุของการเกิดสัญญาณผิดปกติที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A 83

รูปที่ 4.13 จุดที่เกิดความเสียหายของรู Isolated Phase Bus ที่ทำการการต๊าปเลียวไม่ดี............... 83

รูปที่ 4.14 สาเหตุที่มาของสัญญาณผิดปกติที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A 84

รูปที่ 4.15 การเพิ่มขนาดน๊อตให้ใหญ่ขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A.............. 85

รูปที่ 4.16 การแก้ไขหลังจากตรวจพบสาเหตุที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A 85

รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B หลังจากการแก้ไข 86

รูปที่ 4.18 Data Report STG 10 ในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2017 87

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โดยปกติแล้ว เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) จะมีการใช้งานหรือเดินเครื่องอยู่ตลอดเวลา ซึ่งทำให้เป็นการยากที่จะตรวจสอบสภาพหรือความผิดปกติได้ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ตรวจสอบประเภท On-Line เพื่อทำการ Monitor ทั้งนี้จากสถิติที่เก็บไว้เกี่ยวกับความเสียหายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในประเทศสหรัฐอเมริกานั้น จะพบว่า 50 % เกิดจากปัญหา Vibration ซึ่งตรวจสอบได้โดยการติดตั้ง On-Line Vibration Analysis อีก 40 % เกิดจากปัญหาฉนวนที่ Stator ซึ่งตรวจสอบได้ด้วยการติดตั้ง Partial Discharge Monitoring และ 10 % เกิดจาก Rotor ซึ่งตรวจสอบได้ด้วยการติดตั้ง On-Line Flux Probe Monitoring

ปัจจุบันการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบหลักๆ ได้แก่การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) และการซ่อมแซมแก้ไข (Corrective Maintenance) ในส่วนของการบำรุงรักษาเชิงป้องกันนั้นยังแบ่งออกเป็นอีก 2 ส่วน ส่วนแรก คือ การบำรุงรักษาตามวาระ (Time Base Maintenance) คือ การตรวจสอบ การซ่อมแซม การเปลี่ยนชิ้นส่วน และ การเปลี่ยนฉนวน ในส่วนที่สอง คือ การบำรุงรักษาตามสภาพ (Condition Based Maintenance) คือ การวิเคราะห์สภาพฉนวน การประมาณอายุคงเหลือ และ การกำหนดแผนบำรุงรักษาตามสภาพเครื่องที่วัดได้ จากการประเมินสภาพของเครื่องจักรแล้ว จะมีการบำรุงรักษาแบบทวีผล (Predictive & Productive Maintenance) คือ การวางแผนระยะยาวในการบำรุงรักษา เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ยังมีอีก 1 รูปแบบที่ช่วยในการบำรุงรักษา คือ เทคโนโลยีการวัดและวิเคราะห์ (Diagnosis Technology)

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะประเมินสภาพฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ด้วยวิธีการวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งทางโรงไฟฟ้าพลังความร้อนร่วม บริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด ตั้งอยู่ที่ 245 หมู่ 6 ต.บ้านไร่ อ.ดำเนินสะดวก จ.ราชบุรี มีขนาดกำลังการผลิต 1,400 เมกะวัตต์ แบ่งออกเป็น 2 บล็อก โดยที่แต่ละบล็อก นั้นจะประกอบไปด้วย แก๊สเทอร์ไบน์ 2 ยูนิต และสตรีมเทอร์ไบน์ 1 ยูนิต ได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนของ IRIS POWER ENGINEERING, INC. เป็นการติดตั้งด้วยวิธี คาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ แบบ Direction 2PD / Phase เพื่อเป็นการตรวจสอบค่าความเป็นฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจำนวน 6 ยูนิตโดยทำการติดตั้งที่ แก๊สเทอร์ไบน์ 4 ยูนิต และ

สตรีมเทอร์ไบน์ 2 ยูนิตในส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนของ IRIS POWER ENGINEERING, INC. จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ

1. เซนเซอร์ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Sensor)

2. กล่องเชื่อมต่อสัญญาณ (Terminal Box)

3. เครื่องมือวัดมาตรฐาน Turbine Generator Analyzer (TGA-B)

ในส่วนของเครื่องมือวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนแบบมาตราฐาน Turbine Generator Analyzer ทางบริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด ไม่ได้ซื้อเครื่องมือวัดแบบมาตรฐานไว้ประจำโรงไฟฟ้า เพราะ เครื่องมือวัดดังกล่าวมีราคาแพงมาก และ การตรวจสอบพาเชี่ยลดิสชาร์จในแต่ละครั้งทางบริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด ต้องจ้างทางผู้เชี่ยวชาญมาดำเนินการตรวจสอบให้ซึ่งมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงเช่นกัน ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาคุณลักษณะข้อมูลพื้นฐานของการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อที่จะได้นำข้อมูลพื้นฐานดังกล่าวมาวิเคราะห์สัญญาณเบื้องต้นสำหรับงานบำรุงรักษาเชิงป้องกันและนำข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับที่ออกแบบเปรียบเทียบกับข้อมูลเครื่องมือวัดมาตรฐานและในอนาคตยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจ้างทางผู้เชี่ยวชาญมาดำเนินการตรวจสอบได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV

1.2.2 เพื่อศึกษาเทคนิคการตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.3 สมมุติฐานของงานวิจัย (ถ้ามี)

สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เป็นปรากฏการณ์ที่ฉนวนของขดลวดบางส่วนมีสภาพนำไฟฟ้า แต่ฉนวนโดยรวมยังสามารถทำหน้าที่ได้ตามปกติ แต่จะทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพเร็วกว่าที่ควร ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ไม่ใช่ปรากฏการณ์ที่จะก่อให้เกิดอันตรายอย่างเฉียบพลัน แต่เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นแล้วจะเร่งให้ฉนวนเสื่อมสภาพเร็วขึ้น และ จะมีผลให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนมากขึ้นเช่นกัน ถ้าไม่ได้รับการตรวจสอบหาดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และ แก้ไขในช่วงเวลาที่เหมาะสม ดิสชาร์จบางส่วนอาจกลายเป็นสาเหตุโดยตรงของการล้มเหลว (Breakdown) ของฉนวนอย่างถาวร ทั้งนี้การตรวจพบการเกิดดิสชาร์จ

บางส่วน ทำให้ทราบถึงปัญหาเพื่อนำมากำหนดแนวทางแก้ไขให้ถูกต้อง จะช่วยยืดอายุการใช้งานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.4.2 ออกแบบและติดตั้งระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV

1.4.3 วิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนและเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตราฐาน Turbine Generator Analyzer (TGA-B)

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1.5.1 ศึกษาข้อมูลการวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของ บริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด

1.5.2 ศึกษาทฤษฎีและหลักการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.5.3 ศึกษาและรวบรวมข้อมูลการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.5.4 ศึกษาการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พิกัด 21 kV

1.5.5 วิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนที่ออกแบบเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตราฐาน Turbine Generator Analyzer (TGA-B)

1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

1.6.1 Apparent Power (MVA) ระบุขนาดพิกัดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

1.6.2 Power Factor $(\cos\theta)$ ระบุให้ทราบค่าความสามารถในการจ่าย-รับ Reactive power

1.6.3 Power (MW) ค่าพิกัด Real power ที่หาได้จาก Rated MVA และ P.F.

1.6.4 Terminal Voltage (V) ระบุพิกัดแรงดันขาออก ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้า V_{L-L}

1.6.5 Stator Current (A) พิกัดกระแสอาร์เมเจอร์

1.6.6 Field Current (A) พิกัดกระแสในขดโรเตอร์ หรือ กระแสฟิลด์

1.6.7 Speed (rpm) ระบุความเร็วในการหมุน ซึ่งสามารถคำนวณความถี่ได้เมื่อทราบจำนวนโพล

1.6.8 Hydrogen Pressure (kg/cm^2, psi) ระดับแรงดันไฮโดรเจนที่ต้องการ

1.6.9 Short Circuit Ratio คือ อัตราส่วนกระแสฟิลด์ที่ใช้สร้างแรงดันพิกัดเมื่อเปิดวงจรที่สเตเตอร์ ต่อ กระแสฟิลด์ที่สร้างกระแสพิกัดเมื่อลัดวงจรที่สเตเตอร์ ที่ความถี่พิกัด

1.6.10 Volt per Hz พิจารณาเพื่อให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าถูกใช้งานโดยไม่เกินจุดอิ่มตัวของแกนเหล็ก

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ลดต้นทุนในการซื้อเครื่องมือวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบมาตราฐาน Turbine Generator Analyzer (TGA-B)

1.7.2 ลดค่าใช้จ่ายในการจ้างผู้เชี่ยวชาญมาดำเนินการตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วน

1.7.3 ตรวจสอบสภาพฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขณะเดินเครื่อง

1.7.4 เป็นข้อมูลการประกอบการตัดสินใจในการวางแผนบำรุงรักษา

1.7.5 ใช้ในระบบ Condition Base Maintenance (CBM) เพื่อลดระยะเวลาในการบำรุงรักษา

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีสาเหตุมาจากความไม่สมบูรณ์ของฉนวน ความผิดพลาดในการออกแบบฉนวนหรือความไม่เหมาะสมในการจัดขดลวด การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถเกิดได้ระหว่างผิวฉนวนของ Coil แบบ Stator Core ระหว่างฉนวนกับตัวนำ ภายในเนื้อฉนวน บริเวณรอยต่อระหว่างส่วนที่มีศักย์สูงกับส่วนที่ Ground บริเวณ Jumper และ Coil End พลังงานของดิสชาร์จบางส่วนนั้นจะแปรผันตรงกับค่า Capacitance ของโพรงอากาศ ในขณะที่อากาศเกิดการแตกตัว จะแปรผันเป็นกำลังสองกับขนาดแรงดันระหว่างโพรงอากาศนั้น ดังนั้นโพรงอากาศที่มีลักษณะกว้างและยาวจะทำให้เกิดดิสชาร์จบางส่วนที่มีพลังงานสูง และในสภาวะปกติขณะเดินเครื่องฉนวนต้องรับทั้งความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียดเชิงกล และ ความเครียดทางความร้อน ทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพตามเวลาการใช้งาน แต่เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นก็จะยิ่งเร่งให้ฉนวนเสื่อมสภาพมากขึ้น เมื่อฉนวนเสื่อมสภาพก็จะเกิดดิสชาร์จบางส่วนมากขึ้น ฉนวนจะยิ่งเสื่อมสภาพเร็วขึ้นไปอีก ดิสชาร์จบางส่วนจะเป็นสาเหตุหลักโดยตรงของการล้มเหลวของฉนวน ดังนั้นสิ่งสำคัญในการแก้ไข การตรวจสอบให้พบแต่เนิ่นๆ และทำการแก้ไข การตรวจสอบสามารถตรวจสอบโดยวิธีวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าผ่าน Coupling ซึ่งเป็นคาปาซิเตอร์และนับอัตราการเกิดสัญญาณพัลส์ของดิสชาร์จบางส่วนจากการวิเคราะห์จะสามารถติดตามสภาวะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนได้และนำผลมากำหนดแนวทางการแก้ไข และในอนาคตจะมีการติดตั้งอย่างแพร่หลายเพื่อใช้ในระบบ Condition Base Maintenance (CBM) เพื่อลดระยะเวลาในการบำรุงรักษา และช่วยประเมินอายุการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย

2.1 ดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge) [7]

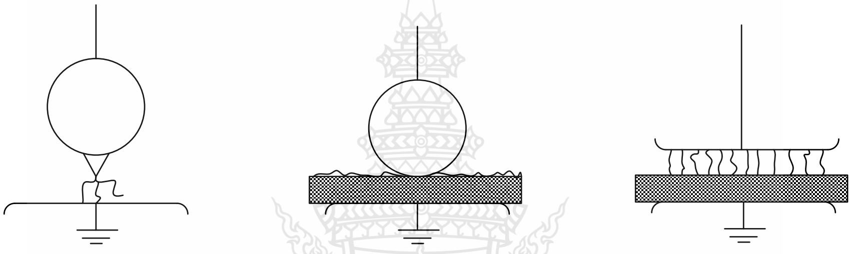
ในระบบการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ไม่ว่าจะเป็นสายส่งจ่าย หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงก็ตาม ถ้าหากความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดเกิดมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ หรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength) ของฉนวนจะทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ หรือเบรกดาวน์เป็นเพียงบางส่วน หรือที่เรียกว่า “ดิสชาร์จบางส่วน”

ดีสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงหรือฉนวน ที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมี

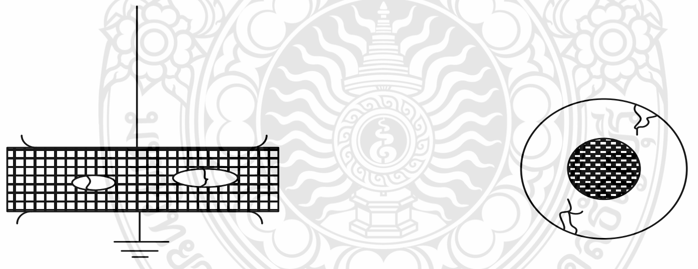
ค่าสูงกว่า ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้ หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้น

พัลส์ดีสชาร์จบางส่วนแต่ละครั้งจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน ในลักษณะชนกระแทก เป็นเหตุให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดๆ และเกิดผิดพร่องขยายตัวมากขึ้น และอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหายอายุการใช้งานของฉนวนจะสั้นลง

ดิสชาร์จบางส่วนแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ โคโรนาดิสชาร์จ ดิสชาร์จตามผิวและ ดิสชาร์จบางส่วนแบบภายใน แสดงในรูปที่ 2.1



ก) โคโรนาดิสชาร์จ ข) ดิสชาร์จตามผิว ค) ดิสชาร์จภายในรอยต่อ



ง) ดิสชาร์จภายในโพรงก๊าซ จ) ดิสชาร์จภายในมีสิ่งแปลกปลอม

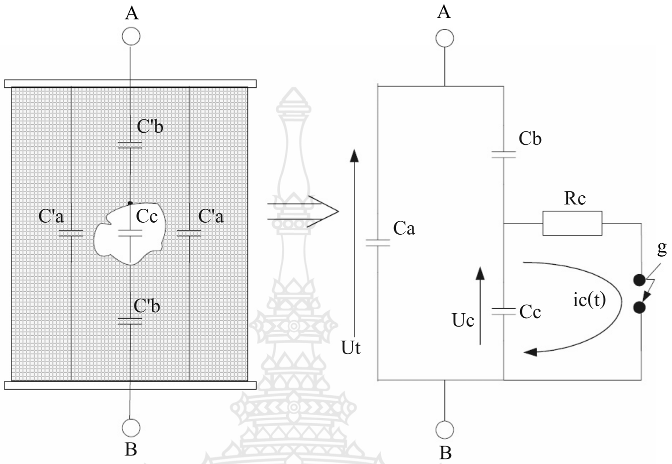
รูปที่ 2.1 รูปแบบของดิสชาร์จบางส่วน (PD) [7]

2.1.1 วงจรสมมูลการเกิดดิสชาร์จภายใน [7]

วัสดุฉนวนมีโพรงก๊าซภายในเนื้อฉนวนและฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A-B แสดงในรูปที่ 2.2 โพรงก๊าซจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C_c ส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงก๊าซหรือ C_c เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า C'_b ส่วนที่ต่ออนุกรมกับ C_c นี้จะรวมกันได้เป็น C_b ส่วนฉนวนที่สมบูรณ์ดี

อยู่โดยรอบของ C_c จะให้ค่าเป็น C_a และรวมกันในส่วนนี้จะได้เป็น C_a ดังรูปที่ 8 ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ C_t จะมีค่าโดยประมาณเท่าๆ กับ C_a ซึ่งมีค่ามากกว่า C_b มากๆ นั่นคือ ขั้วบวก

$$C_t \approx C_a \gg C_c > C_b$$



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงก๊าซและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน ขั้วบวก [7]

ถ้าแรงดันที่ป้อนทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงก๊าซที่แทนด้วย C_c จะเกิดเบรกดาวน์ในโพรงก๊าซ ซึ่งแทนด้วยช่องว่างอากาศ (g) โดยมีความต้านทาน R_c ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวกำจัดกระแสดิสชาร์จ $i_c(t)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์กว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก δU_c ที่โพรงก๊าซเกิดการปล่อยประจุดังสมการที่ 2.1

$$\Delta q_c = \delta U_c C_c \qquad (2.1)$$

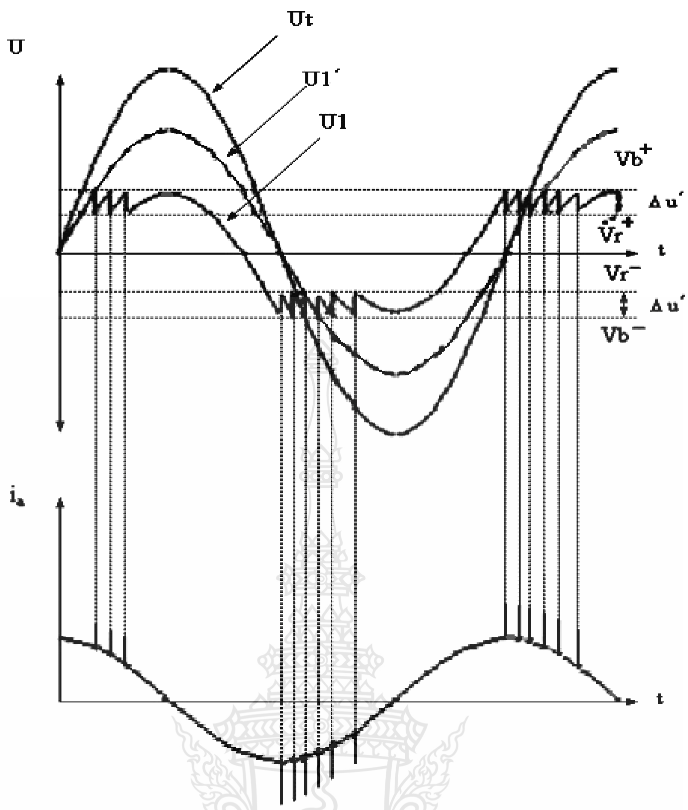
กระแส $i_c(t)$ นี้ไหลอยู่ภายในซึ่งไม่สามารถวัดได้ แต่การดิสชาร์จของ C_c ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ C_b และ C_a ของวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A-B เท่ากับ δU_t ซึ่งหาได้จากประจุใน C_c ดังสมการที่ 2.2

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta U_c}{C_b + C_a} \qquad (2.2)$$

2.1.2 ธรรมชาติของการเกิดการคายประจุบางส่วน

ดิสชาร์จบางส่วน คือ เบรกดาวน์ที่ไม่สมบูรณ์ที่ทำให้เกิดดิสชาร์จนั้นไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวอิเล็กโตรดจึงเรียกว่าคายประจุบางส่วนเพราะฉนวนของอิเล็กโตรดด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านซึ่งอาจเป็นของแข็งของเหลวหรือก๊าซยังเป็นฉนวนที่สมบูรณ์มั่นคงอยู่ส่วนคายประจุบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะไม่ สม่ำเสมอ สูงหรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันหรือมีสิ่งเจือปนซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางตำแหน่งในฉนวนมีความสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ แต่ไม่อาจทำให้เกิดการเบรกดาวน์ได้โดยสมบูรณ์ได้หากแต่เกิดเพียงบางส่วนเท่านั้นคายประจุบางส่วนจะเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับและสนามไฟฟ้ากระแสตรงภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับดิสชาร์จจะเกิดขึ้นซ้ำทุกไซเคิลของแรงดันโดยปกติจะเกิดขึ้นขณะแรงดันที่ป้อนเพิ่มขึ้นจากศูนย์ไปสู่การเกิด ดิสชาร์จบางส่วนอาจแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ โคโรนาดิสชาร์จ ดิสชาร์จตามผิว และดิสชาร์จภายใน

ในทางปฏิบัติ คายประจุบางส่วน อาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังรูปที่ 2.3 โดยที่ U_t คือ แรงดันตกคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์ U_b คือแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงก๊าซ U_r คือแรงดันหลังเบรกดาวน์ของโพรงก๊าซ U_1 คือแรงดันคร่อมโพรงก๊าซ $U_{1'}$ คือแรงดันคร่อมโพรงก๊าซถ้าไม่มีการเกิดคายประจุบางส่วน และ i_a คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 แรงดันตกคร่อมโพรงก๊าซและกระแสที่ขั้วสายขณะเกิด คายประจุบางส่วน ขั้วบวก [7]

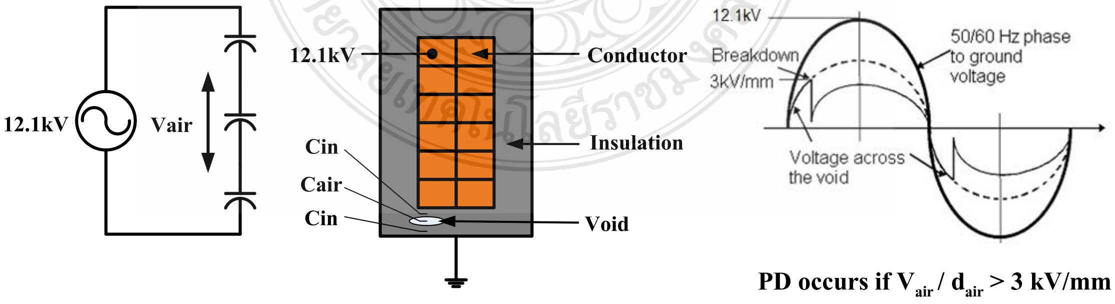
2.1.3 ลักษณะรูปร่างของกระแสคายประจุบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส คายประจุบางส่วน ในช่องว่างอากาศหรือโพรงก๊าซเล็กๆในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.4 ขณะเกิด คายประจุบางส่วน กระแสที่ไหลผ่านช่องว่างอากาศจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านช่องว่างอากาศสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอน ไหลผ่านช่องว่างอากาศหมดกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว และกระแสที่ลดลงนี้จะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ จะพบว่าความกว้างของกระแสพัลส์ที่เกิดจาก คายประจุบางส่วน ในฉนวนจะอยู่ในช่วงเวลา 1-5 นาโนวินาที ถึงช่วงเวลาเป็นหลัก 100 นาโนวินาที ดังนั้นกระแสพัลส์ดังกล่าวจึงมีสเปกตรัมของความถี่ที่มี แบนด์วิธกว้าง 10 เมกะเฮิรตซ์ ขึ้นไป และอาจจะมีความกว้างถึง 200 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งการเกิด คายประจุบางส่วน จากลักษณะการเกิด treeing ในเนื้อฉนวนจะมีช่วงเวลาของกระแสพัลส์กว้างที่สุด

รูปที่ 2.4 ลักษณะกระแสการคายประจุบางส่วนทางทฤษฎีสำหรับช่องว่างอากาศ [7]

2.2 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า [8]

โดยปกติแล้วในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ จะมีโพรงของอากาศปะปนอยู่ถึงแม้ว่าจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใหม่ก็ตาม ถ้าโพรงอากาศนั้นมีขนาด 1 มิลลิเมตรเมื่อแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตกคร่อมโพรงอากาศมีค่าสูงกว่า 3 kV/mm (Vair/Dair) จะเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นภายในโพรงอากาศ ดังรูปที่ 2.5 และในทุก 1 ไซเคิลจะเกิดการเบรกดาวน์ 2 ครั้ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน คือ การมีฉนวนบางส่วนเกิดสภาพการนำไฟฟ้าแต่ไม่ทำให้ฉนวนโดยรวมล้มเหลวในการเป็นฉนวน โดยขณะที่มีแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศเรียกว่า "ภาวะการชาร์จ" และขณะที่โพรงอากาศเกิดการเบรกดาวน์ เรียกว่า "ภาวะการดิสชาร์จ" ซึ่งจะเกิดทั้งลูกคลื่นบวก และลูกคลื่นลบ ของแรงดันรูปคลื่น Sine Wave และจะเป็นเช่นนี้ไปตลอดจนกว่าจะได้รับการแก้ไข หรือจนกว่าฉนวนนั้นจะเกิดการล้มเหลว



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลเมื่อมีโพรงอากาศในเนื้อฉนวน

2.3 สาเหตุการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

จากสถิติความเสียหายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าประมาณ 40% เกิดจากปัญหาที่ฉนวนของสเตเตอร์ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการติดตั้ง Partial Discharge Monitoring และสาเหตุหลักของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น คือ

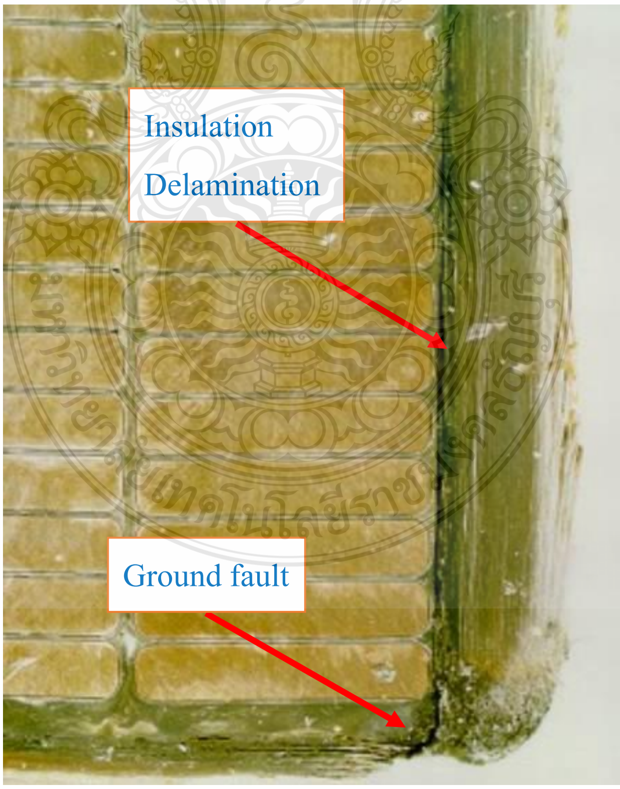
2.3.1 การเสื่อมสภาพด้วยความร้อน ดังรูปที่ 2.6

สาเหตุการเกิด

- เกิดจากการสูญเสียคุณภาพของฉนวน เช่น การเกิด Overload การระบายความร้อนไม่ดี หรือ แรงดัน 3 เฟสไม่สมดุล

กระบวนการเกิด

- เกิดการลอกออกของฉนวน
- การสั่นสะเทือนของตัวนำ
- เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นในโพรงอากาศ



รูปที่ 2.6 การเสื่อมสภาพด้วยความร้อน [10]

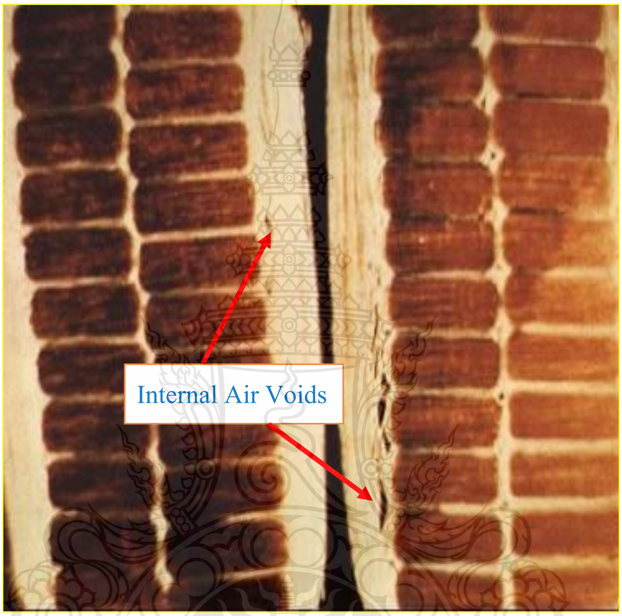
2.3.2 การเคลือบฉนวนที่ไม่ดี ดังรูปที่ 2.7

สาเหตุการเกิด

- ความผิดพลาดในกระบวนการผลิต

กระบวนการเกิด

- เกิดโพรงอากาศ
- เกิดดิสชาร์จบางส่วนขึ้นในเนื้อฉนวน



รูปที่ 2.7 การเคลือบฉนวนที่ไม่ดี [10]

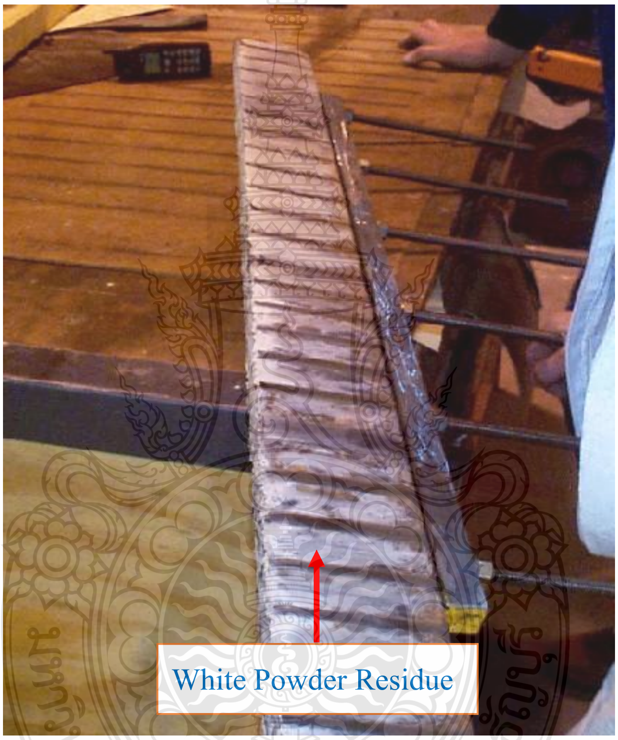
2.3.3 การคลายตัวของขดลวด ดังรูปที่ 2.8

สาเหตุการเกิด

- ขดลวดเกิดการคลายตัว
- เกิดแรงแม่เหล็กระหว่างบาร์ และ โรเตอร์ กับขดลวดสเตเตอร์

กระบวนการเกิด

- สารกึ่งตัวนำที่เคลือบเกิดการลอกออก
- เกิดโอโซน และ กรดไนตริก



รูปที่ 2.8 การคลายตัวของขดลวด [10]

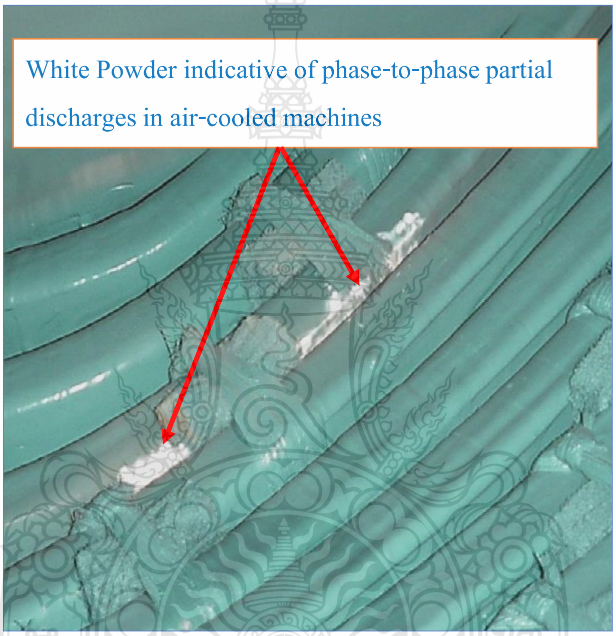
2.3.4 ช่องว่างระหว่างเฟสไม่เพียงพอ ดังรูปที่ 2.9

สาเหตุการเกิด

- การออกแบบที่ไม่ดี

กระบวนการเกิด

- เกิดดิสชาร์จบางส่วนแบบ Phase - phase
- เกิดโอโซน
- เกิดการกัดกร่อน และ เกิดรูขึ้นในฉนวน

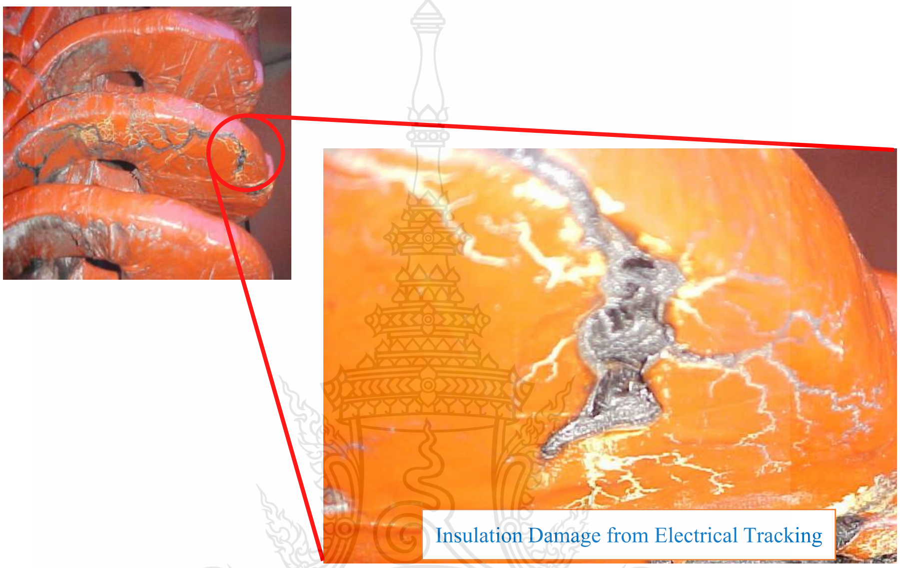


รูปที่ 2.9 ช่องว่างระหว่างเฟสไม่เพียงพอ [10]

2.3.5 ความสกปรกในปลายขดลวด (End Winding) ดังรูปที่ 2.10

สาเหตุการเกิด

- ความต้านทานที่ผิวลดลง
- เกิด Electrical tracking
- ฉนวนถูกกัดกร่อน



รูปที่ 2.10 ความสกปรกในปลายขดลวด (End Winding) [10]

2.4 การตรวจสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

การตรวจสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น ทำได้หลายวิธีดังนี้

2.4.1 Visual Inspection PD ที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้เกิดผงฝุ่นสีขาว เทา แดง น้ำตาล หรือ ดำ ติดอยู่บริเวณนั้นแต่คราบผงฝุ่นจากการตรวจสภาพแต่ละครั้งควรวิเคราะห์ให้แน่ชัดว่าเป็นผงฝุ่นที่เกิดจากสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนหรือเกิดจากการขัดสีของฉนวนเนื่องจากการสั่นในขณะเดินเครื่อง นอกจากนี้ถ้าฉนวนเป็นสารอินทรีย์ก็อาจมีร่องรอยการไหม้เกรียมขึ้นได้

2.4.2 Electrical Test ซึ่งสามารถจะทำได้ในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังเดินเครื่อง (On-line Test) และขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหยุดเครื่อง (Off-line Test)

ข้อดีของการทดสอบในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังเดินเครื่อง

- สามารถวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจริงในขณะใช้งาน

- เป็นการวัดในขณะที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้ารับความเครียดครบถ้วนทั้งทางด้านความเครียดทางไฟฟ้า ความเครียดทางกล และ ความเครียดทางความร้อน ในขณะที่การทดสอบในขณะหยุดเดินเครื่องฉนวนจะรับเพียงความเครียดทางไฟฟ้าเท่านั้น
- การทดสอบไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายแรงดันขนาดใหญ่ เพราะ Generated Voltage จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดันโดยตรง
- การทดสอบสามารถกระทำได้ตลอดเวลาที่ต้องการโดยไม่ต้องหยุดเครื่อง ทำให้ Availability ของเครื่องสูงขึ้น และยังสามารถทราบถึงสภาพของฉนวนได้ตลอดเวลาโดยไม่จำเป็นต้องหยุดเครื่อง

2.5 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน

อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน ประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ ดังนี้

2.5.1 PD Sensor หรือ Coupling Capacitor

ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น และส่งต่อไปยังกล่องเชื่อมต่อสัญญาณตลอดเวลาที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดินเครื่องอยู่ เมื่อต้องการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนนำเครื่อง Partial Discharge Analyzer มาต่อที่กล่องเชื่อมต่อสัญญาณก็จะสามารถวัดได้ทันที หรือจะต่อเครื่องวัดแบบ On-Line ตลอดเวลาก็ได้ คุณสมบัติของ PD Sensor จะต้องเป็นชนิด PD Free กล่าวคือตัว Sensor จะต้องไม่มีสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น และมีค่า Capacitance 80 pF เป็น High Pass Filter (HPF) ความถี่ในด้านของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจะสามารถผ่านได้ดี โดยทั่วไปที่ใช้อยู่มี 2 แบบด้วยกันคือ

1) Cable Capacitor

จะต้องเป็น HV Cable ที่สามารถทนแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ และผ่านการทดสอบ Dielectric Strength สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนและ Capacitance ตามมาตราฐานกำหนด ในอดีตที่ผ่านมาโรงไฟฟ้าเก่าของ การไฟฟ่าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ไม่มีการตรวจวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนมาก่อน ต่อมาได้มีการติดตั้ง PD Sensor ในโรงไฟฟ้าเก่าของ การไฟฟ่าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยโดย ฝ่ายบำรุงรักษาไฟฟ้า เมื่อประมาณปี 2533 โดยที่เริ่มที่โรงไฟฟ้าพลังน้ำเขื่อนสิริกิต์เป็นที่แรก โดยใช้ HV Cable ทำเป็น Coupling Capacitor จากต่างประเทศ ต่อมาในระยะหลังโรงไฟฟ้าที่สร้างใหม่ หรือโรงไฟฟ้าที่ทำ Renovation จะระบุใน Spec. ให้ติดตั้ง PD Sensor ด้วย และในระยะหลังนี้ได้มีการพัฒนามาใช้ PD Sensor ชนิด EMC (Epoxy Mica Capacitor) แทน ซึ่ง HV Cable นั้นเมื่อใช้

ไปสักระยะอาจเกิดการเสื่อมสภาพได้ และอาจส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนได้ ดังรูปที่ 2.11

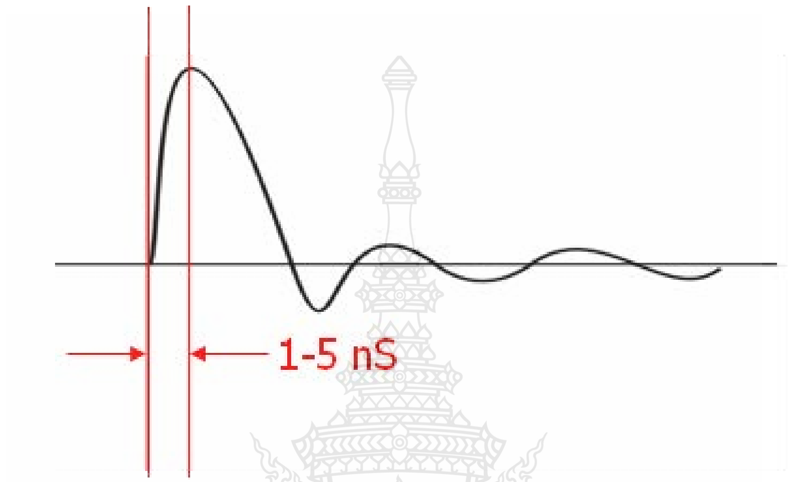
รูปที่ 2.11 Cable Capacitor ทำด้วย HV Cable [10]

2) Epoxy-Mica Capacitor (EMC) [8]

EMC Capacitor ผลิตขึ้นเพื่อใช้สำหรับวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนโดยเฉพาะ มีหลายขนาดขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ใช้งาน แต่จะมีค่าตัวเก็บประจุเท่ากันคือ 80 pF EMC ทำจากวัสดุ Epoxy Mica ทนแรงดันสูงได้ดีและตัว EMC ต้องไม่เกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนใช้งานได้ทนทาน และจะต้องผ่านการทดสอบ Dielectric Strength สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนและ Capacitance ตามมาตรฐานกำหนดก่อนนำไปใช้งาน จากข้อมูลการติดตั้งใช้งานทั่วโลกยังไม่พบ EMC Failure ในขณะเดินเครื่อง ดังรูปที่ 2.12

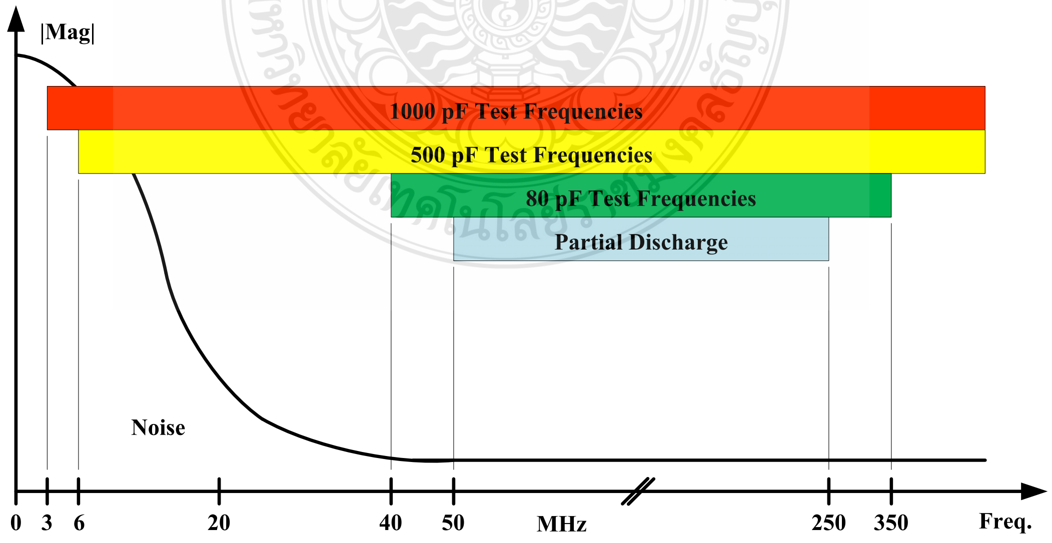
รูปที่ 2.12 PD Sensor ชนิด EMC ขนาด 80 pF [10]

ทำไมถึงต้องเป็นตัวเก็บประจุขนาด 80 pF เพราะว่า สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเป็นสัญญาณที่มี Pulse Width แคบ และมี Rise Time น้อยประมาณ 1-5 nS ความถี่ของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจะอยู่ในช่วง 1/(4xRise Time) ประมาณ 50 - 250 MHz และค่า Positive PD และ Negative PD นั้นจะเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วน ดังรูปที่ 2.13

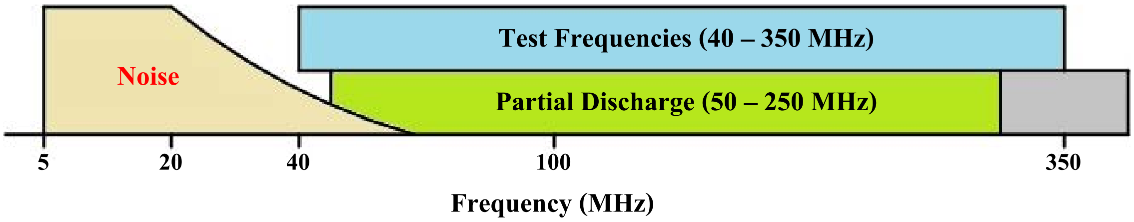


รูปที่ 2.13 Pulse Width และ Rise Time ของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน

และจากเหตุผลนี้ทาง Iris จึงได้ทำการออกแบบตัวเก็บประจุ ให้ทำการจับสัญญาณในช่วง 40 – 350 MHz เพื่อให้คลอบคลุมและใกล้เคียงสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนให้มากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15



รูปที่ 2.14 การออกแบบและเลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด 80 pF [8]



รูปที่ 2.15 ย่านความถี่ที่ใช้ในการตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน [10]

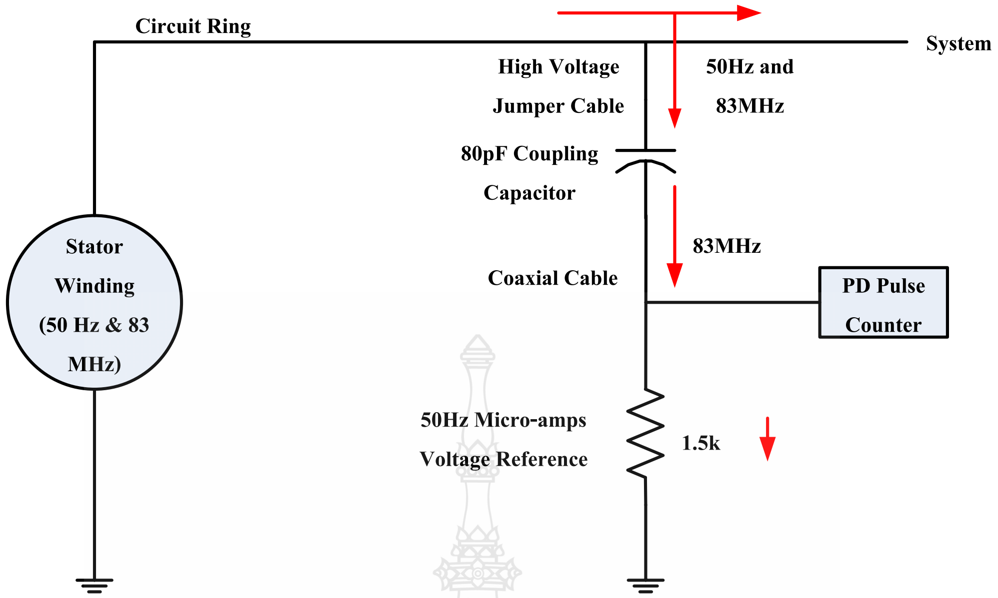
นอกจากการติดตั้งตัวเก็บประจุขนาด 80 pF จะทำการต่อเข้ากับบัสบาร์ทางด้านแรงสูงแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวกรองสัญญาณให้ความถี่สูงตั้งแต่ 40 MHz ผ่านเท่านั้น

จากสูตร $$XC = \frac{1}{2\pi fc}$$

ที่ความถี่ 50 Hz $$XC = \frac{1}{2\pi(50Hz)(80pF)} = 40M\Omega$$

ที่ความถี่ 40 MHz $$XC = \frac{1}{2\pi(40MHz)(80pF)} = 50\Omega$$

เนื่องจากการคำนวณค่า Capacitive Reactance ในช่วงความถี่สูงค่าความต้านทานของตัว Capatance จะมีค่าต่ำและค่า Capacitive Reactance ในช่วงความถี่ต่ำค่าความต้านทานของตัว Capatance จะมีค่าสูงหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า High pass filter ดังแสดงในรูปที่ 2.16

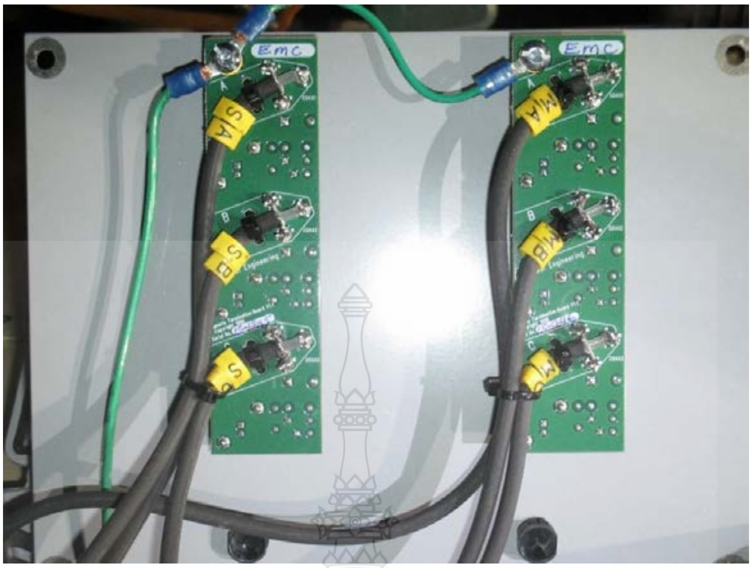


รูปที่ 2.16 การกรองสัญญาณความถี่ของตัวเก็บประจุขนาด 80 pF [10]

2.5.2 กล่องเชื่อมต่อสัญญาณ (Terminal Box)

เป็นจุดที่นำเครื่องมือวัดไปต่อเพื่อวัดสัญญาณ ภายในกล่องเชื่อมต่อสัญญาณจะมีแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วย แผงวงจนสำหรับติดตั้งตัวต้านทานขนาด 1,500 โอห์ม ขนาด 0.5 W ขึ้นไปจำนวน 6 Ea และ Varistor ขนาด 90 V จำนวน 6 Ea และ BNC Jack จำนวน 6 Ea ดังรูปที่ 2.17 (ก)(ข)

(ก)



(ข)

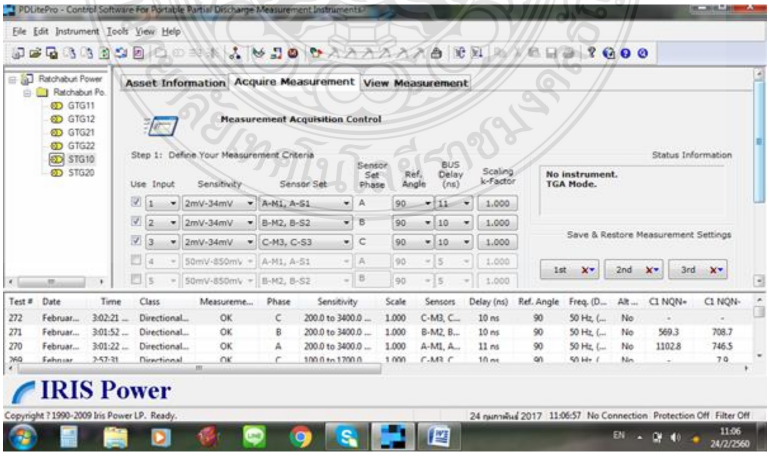
รูปที่ 2.17 (ก)(ข) กล่องเชื่อมต่อสัญญาณภายนอกและภายใน [10]

2.5.3 เครื่องวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge Analyzer)

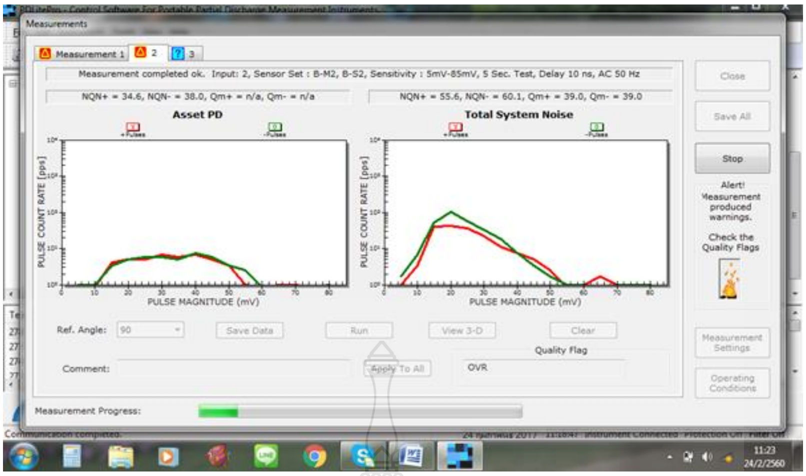
Partial Discharge Analyzer (PDA) คืออุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนซึ่งสามารถวัดการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในขณะเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเดินเครื่องได้ เครื่อง PDA จะรับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจาก เครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยผ่าน Coupling ซึ่งเป็นตัวเก็บประจุจากนั้นจึงนับอัตราการเกิดของ PD Pulse แต่ละขนาดแสดงผลออกมาให้เราทราบ โดยมี Software สำหรับวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนสำหรับ Partial Discharge Analyzer จะประกอบด้วย 2 ส่วนดังนี้

1) เครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B (Turbine Generator Analyzer – Bus Coupler)

รูปที่ 2.18 การตรวจวัดสัญญาณด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน (TGA-B) [10]



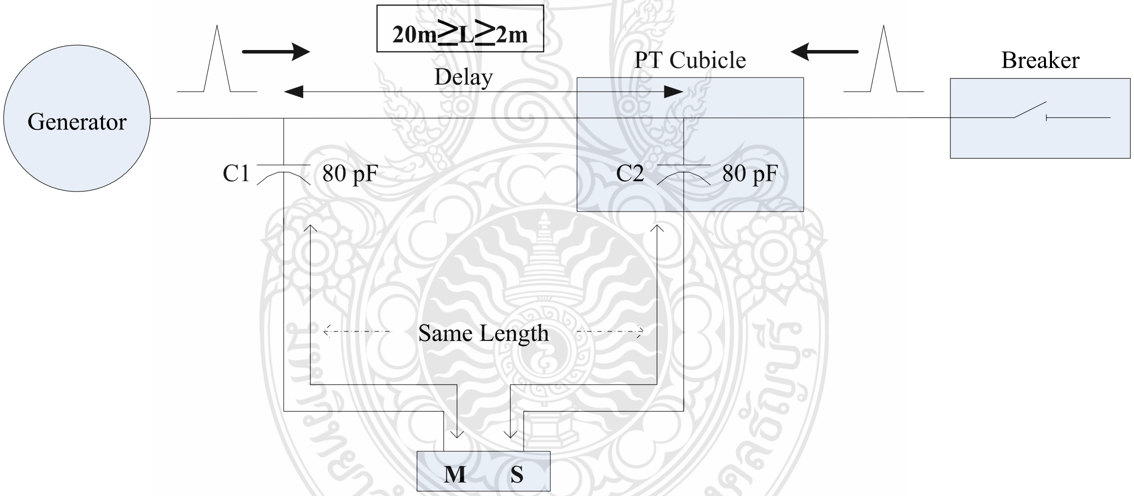
(ก)



(ข)

รูปที่ 2.19 (ก)(ข) การตรวจวัดสัญญาณด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน (TGA-B) เพื่อนำไปวิเคราะห์ [10]

2) เทคนิคการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์แบบ Directional 2 PD Sensor/Phase



รูปที่ 2.20 Double – End Installation (2 PD Sensor / Phase) [10]

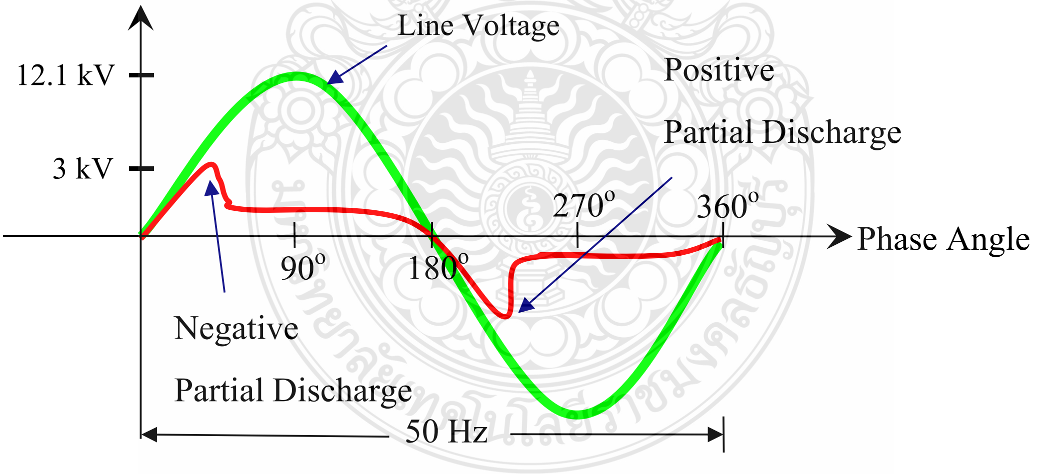
จากรูปที่ 2.20 การติดตั้งแบบ 2 PD Sensor/Phase สำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มี Lead เป็น Isolated Phase Bus หรือ Newtral Phase Bus การติดตั้งระยะห่างระหว่าง PD Sensor จะต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 2 เมตรโดย PD Sensor C1 ด้าน Machine (M) ควรติดตั้งใกล้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าให้มากที่สุด และ PD Sensor C2 ด้าน System (S) ติดตั้งห่างจาก C1 ออกไปอีกไม่น้อยกว่า 2 เมตรแต่ไม่ควรเกิน 20 เมตรเพราะจะทำให้สายนำสัญญาณ Coaxial Cable มีความยาวมากเกินไปทำให้มีผลลดทอนสัญญาณ

ที่วัดได้ ซึ่งเป็นวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนโดยให้มี Delay Time ระหว่าง PD Sensor C1 และ C2 ไม่น้อยกว่า 5 nS โดยจัดให้สายนำสัญญาณ Coaxial Cable C1 และ C2 มีความยาวเท่ากัน เมื่อมีสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจะมาถึง PD Sensor C1 ก่อนแล้วจึงมาถึง C2 ทีหลังโดยห่างกันไม่น้อยกว่า 5 nS เครื่องมือวัดมาตรฐาน (TGA-B) สามารถรับรู้ว่าสัญญาณที่ได้รับนั้นมาจากด้านเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นมาจากภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยจะต้องนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ Voltage Reference ในช่วงของมุมเฟสที่วัดได้

2.6 การวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน [8][9][10]

คุณลักษณะของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน

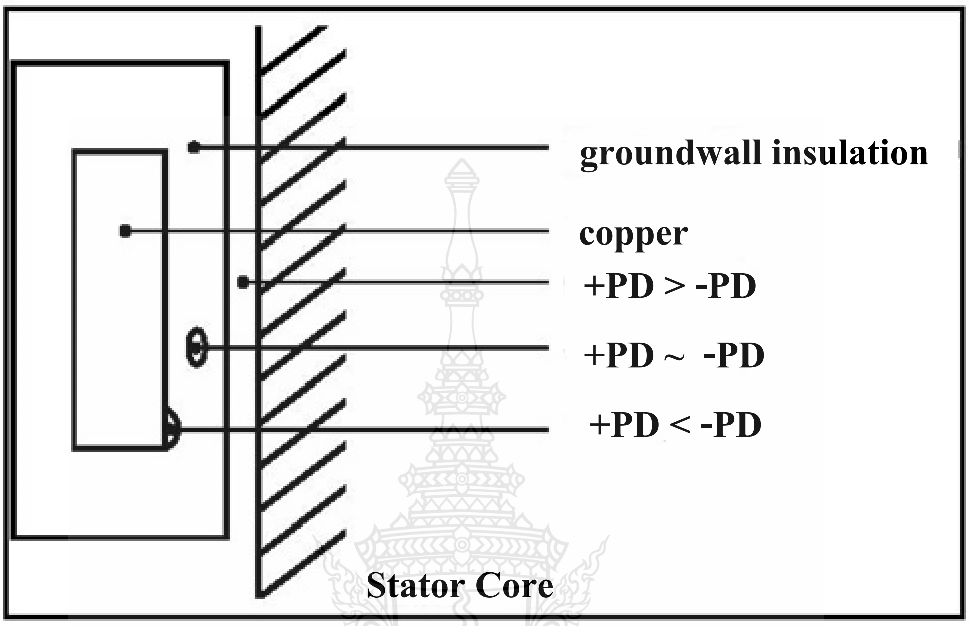
สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเป็นสัญญาณที่มี Pulse Width แคบ และมี Rise Time น้อยประมาณ 1-5 nS ความถี่ของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจะอยู่ในช่วง 1/(4xRise Time) ประมาณ 50 - 250 MHz และค่า Positive PD และ Negative PD นั้นจะเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 คุณลักษณะของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน [10]

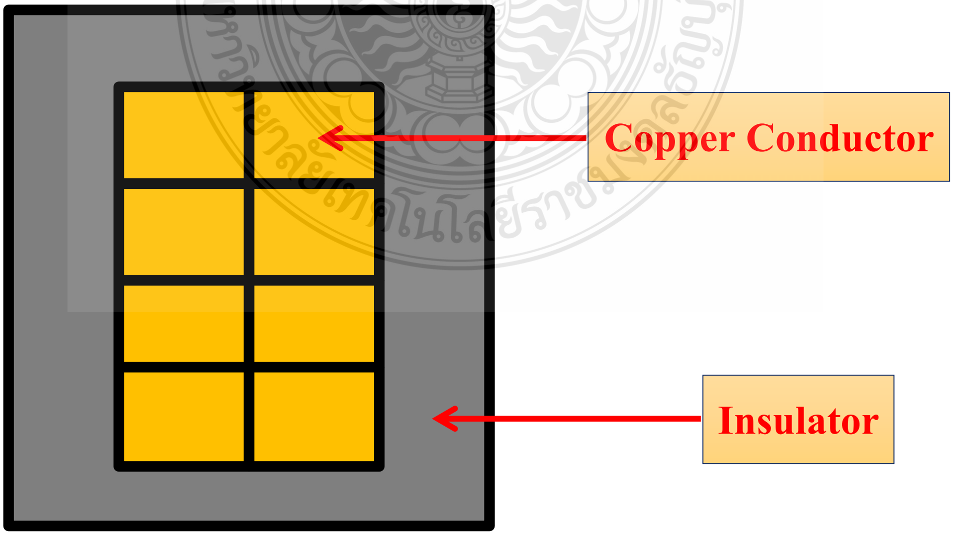
เครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นเกิดขึ้นหลายจุดภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยเฉพาะภายใน Slot Portion นั้นจะเกิดได้ง่าย การแก้ไขทำได้ยาก ปัญหาการเกิด Breakdown ของฉนวนจะเกิดใน Slot Portion เป็นส่วนใหญ่ เราจึงให้ความสำคัญกับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่ตำแหน่งนี้มากที่สุด

สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นมีทั้ง +PD และ –PD ปริมาณของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนใน Slot Portion สามารถจำแนกได้ 3 ตำแหน่งดังรูปที่ 2.22



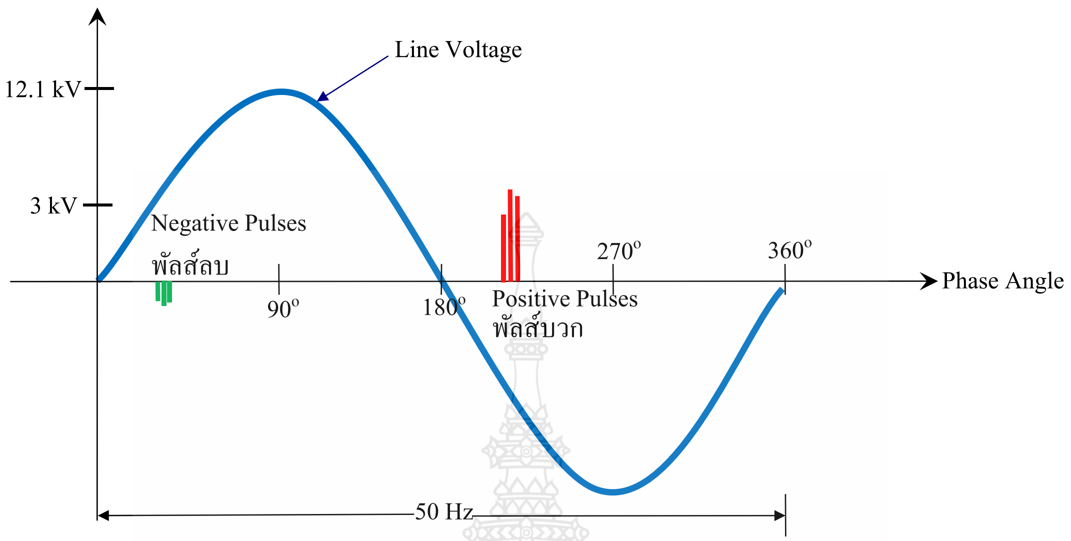
รูปที่ 2.22 ตำแหน่งของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิด และ ปริมาณ +PD และ –PD [10]

เพื่อความเข้าใจในการอธิบายขั้วของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนว่าสามารถบอกตำแหน่งว่าเกิดขึ้นที่ใด



รูปที่ 2.23 ตำแหน่งของ PD ว่าเกิดขึ้นที่บริเวณใด [10]

2.6.1 สัญญาณ -PD < +PD

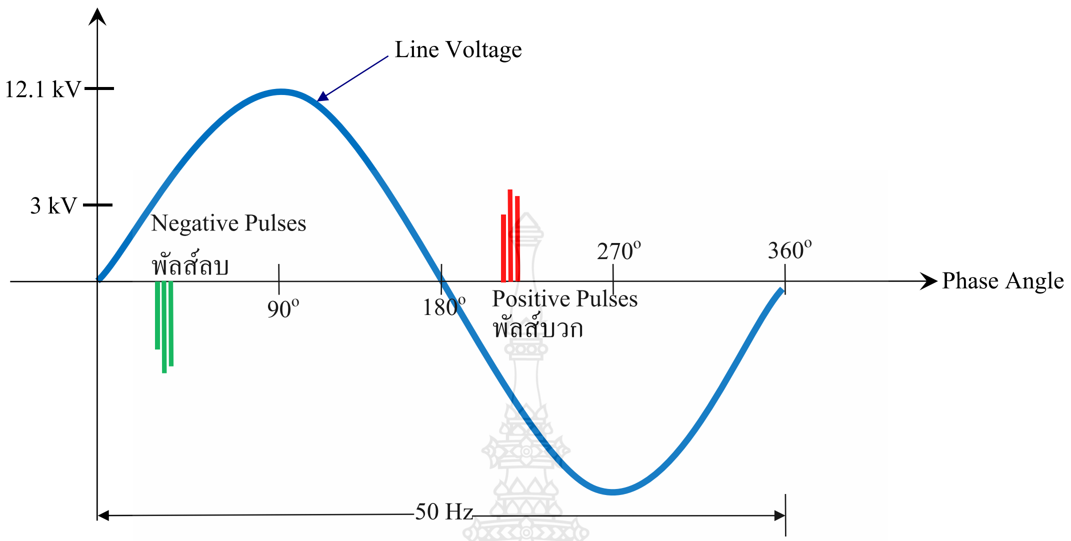


รูปที่ 2.24 สัญญาณ -PD < +PD [10]

รูปที่ 2.25 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ -PD < +PD [10]

จากรูปที่ 2.24 , 2.25 สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้พบว่า +PD เด่นชัดกว่าหรือมากกว่า –PD สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นอยู่ที่ตำแหน่งบนผิวของขดลวด สาเหตุเกิดจากการคลายตัวของขดลวด หรือ การเสื่อมของสารเคลือบผิว

2.6.2 สัญญาณ +PD ≈ -PD

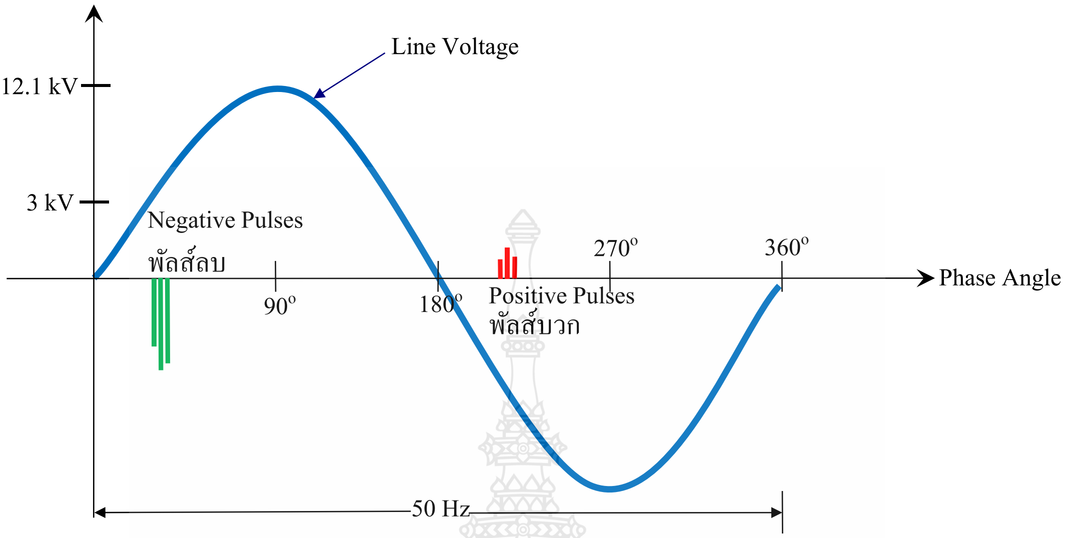


รูปที่ 2.26 สัญญาณ +PD ≈ –PD [10]

รูปที่ 2.27 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ +PD ≈ –PD [10]

จากรูปที่ 2.26 , 2.27 สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้พบว่า +PD มีปริมาณใกล้เคียงกับ –PD สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นอยู่ที่ตำแหน่ง ภายในเนื้อฉนวน เรียกว่า Internal Discharge สาเหตุเกิดจากการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน หรือ การเคลือบฉนวนไม่ดี

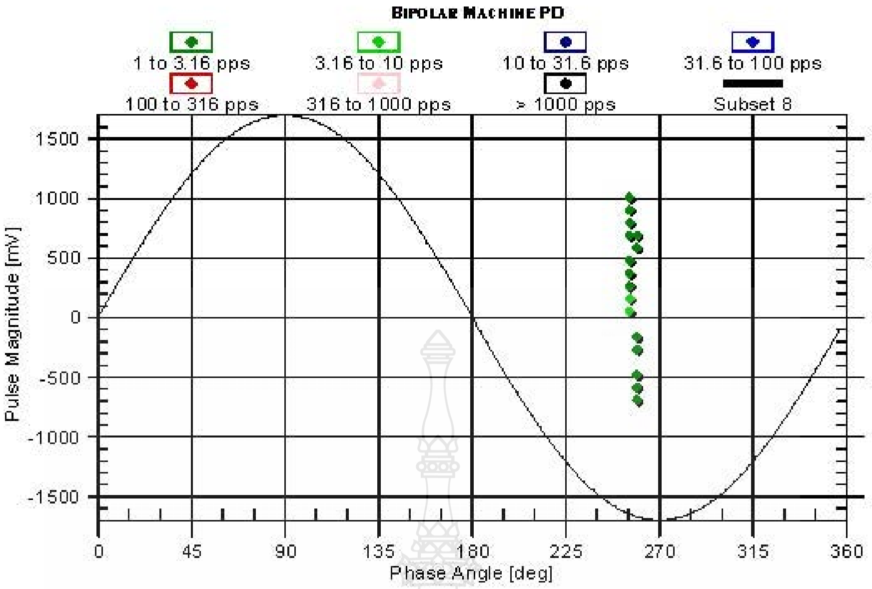
2.6.3 สัญญาณ –PD > +PD



รูปที่ 2.28 สัญญาณ -PD > +PD [10]

รูปที่ 2.29 ตำแหน่งการเกิดสัญญาณ -PD > +PD [10]

จากรูปที่ 2.28 , 2.29 สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้พบว่า –PD เด่นชัดกว่าหรือมากกว่า +PD สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นอยู่ที่ตำแหน่งใกล้กับลวดทองแดงตัวนำ สาเหตุเกิดจากการปรับเปลี่ยนโหลด (Load Cycling) หรือ เกิดความร้อนสูงทำให้เกิดฟองอากาศใกล้ขดลวดทองแดง



รูปที่ 2.30 ตัวอย่างการเกิดสัญญาณผิดปกติขึ้นที่มุม 270° [10]

2.7 ลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน [10]

ปัญหาที่เกิดขึ้นในหลายสาเหตุนั้นจะมีรูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนที่เป็นลักษณะเฉพาะ ดังนั้น การตรวจสอบลักษณะของดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้ จะช่วยในการระบุสาเหตุของการเกิดปัญหาในระบบได้

2.7.1 ปัญหาจากการขั้นตอนการผลิตที่ไม่เหมาะสม (Inadequate Bonding)

ในระหว่างกระบวนการผลิตขดลวดนั้น เมื่อมีการใช้ส่วนประกอบจำพวกเรซิ่น หรือเทปต่าง ๆ รวมถึงกระบวนการ VPI และปัจจัยอื่น อาจส่งผลให้เกิดโพรงของอากาศขึ้นภายในขดลวดได้ ตัวอย่างเช่น การเสื่อมของฉนวนอันเนื่องมาจากความร้อนนั้น จะทำให้เกิดโพรงของอากาศกระจายไปทั่วฉนวน โดยไม่กระจุกตัวอยู่ทางด้านใดด้านหนึ่ง (ไม่ว่าจะเป็นด้านทองแดง หรือด้านของ Core) ทำให้ไม่สามารถระบุขั้วของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนซึ่งจะเกิดขึ้นที่มุม 45° และมุม 225° ได้ นอกจากนี้ การเสื่อมของฉนวนอันเนื่องมาจากความร้อนนี้ จะส่งผลให้สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้น มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น นั่นคือ จะแปรผกผันกับอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นนี้ จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลด

ตารางที่ 2.1 ปัญหาจากการขั้นตอนการผลิตที่ไม่เหมาะสม (Inadequate Bonding)

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
การผลิตที่ไม่เหมาะสม	ค่าทางด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าทางด้านลบ	ไม่มี	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	45° และ 225°

2.7.2 ปัญหาจากการเกิด Slot Discharge

Slot Discharge คือ ดิสชาร์จที่เกิดขึ้นระหว่างผิวของขดลวด กับแกนเหล็กสเตเตอร์ ทั้งนี้ อาจกล่าวได้ว่า สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการคลายตัวของขดลวด (Loose Windings) สามารถก่อให้เกิด Slot Discharge ได้ แต่การเกิด Slot Discharge ไม่จำเป็นต้องมีสาเหตุมาจากการคลายตัวของขดลวดเท่านั้น บางครั้งยังอาจมีสาเหตุมาจากปัญหาอื่น เช่น สารเคลือบที่เป็นแบบกึ่งตัวนำ (Semi-Conductive Coating) เป็นต้น โดยรูปแบบของสัญญาณดิสชาร์จที่เกิดจาก Slot Discharge นี้ จะมีลักษณะใกล้เคียงกับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดจากการคลายตัวของขดลวด นั่นคือ จะเป็นสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วบวก เกิดขึ้นที่มุม 225° และแปรผกผันกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แต่เนื่องจาก Slot Discharge สามารถเกิดขึ้นได้ก่อนที่จะเกิดการคลายตัวของขดลวด ดังนั้นมันจึงไม่มีผลกระทบใด ๆ จากการเปลี่ยนแปลงของโหลด อนึ่ง การเกิด Slot Discharge นี้ ยังเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงเพิ่มขึ้นได้เช่นกัน

ตารางที่ 2.2 ปัญหาจากการเกิด Slot Discharge

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
Slot Discharge	ค่าทางด้านบวกจะมากกว่าค่าทางด้านลบ (≈1.5 เท่า)	ไม่มี	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	225°

2.7.3 ปัญหาจากความเครียดในสารเคลือบผิวต่าง ๆ (Stress Coating Interface)

สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นบริเวณสารเคลือบผิวต่าง ๆ จะเป็นแบบ Surface-Type นั่นคือ จะขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน Phase-to-Ground Voltage โดยจะเป็นสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วบวก และเกิดขึ้นที่มุม 225° อย่างไรก็ตาม สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนประเภทนี้จะแตกต่าง

จากสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจากการคลายตัวของขดลวด กล่าวคือ จะไม่มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด และเนื่องจากวัสดุที่ใช้ในสารเคลือบผิวเหล่านี้ได้ถูกออกแบบมาให้มีลักษณะเป็นสื่อไฟฟ้า (ความนำไฟฟ้าจะแปรผันตามอุณหภูมิ) ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน นั่นคือ อาจกล่าวได้ว่า ในกรณีที่รูปแบบของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่พบนั้น อยู่ทางด้านขั้วบวก เกิดขึ้นที่มุม 225° และมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิแล้ว จะมีความเป็นไปได้สูงมากที่จะเกิดจากความเสื่อมสภาพของสารเคลือบผิวต่าง ๆ และในกรณีที่เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงนั้น อาจเกิดพัลส์ขึ้นที่มุม 0° และมุม 180° ซึ่งเป็นค่าทั่วไปของการเกิดอาร์ค

ตารางที่ 2.3 ปัญหาจากความเครียดในสารเคลือบผิวต่าง ๆ (Stress Coating Interface)

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
สารเคลือบผิวต่างๆ	ค่าทางด้านบวกจะมากกว่าค่าทางด้านลบ (≈1.5 เท่า)	ไม่มี	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	225°

2.7.4 ปัญหาจากการคลายตัวของขดลวด (Loose Windings)

เมื่อเกิดการคลายตัวของขดลวดขึ้นใน Slot ปัญหาที่จะเกิดขึ้นทันที (ในกรณีที่ไม่ได้รับการแก้ไข) ก็คือ การคลายตัวนี้จะทำให้ชั้นผิวของแกนสเตเตอร์ไปทำลายสารเคลือบผิวของขดลวดอย่างรวดเร็ว และทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมบริเวณนี้ หรือระหว่างบริเวณนี้กับแกนของสเตเตอร์โดยในกรณีที่แรงดันตกคร่อมนี้มีค่าสูงกว่าค่าแรงดัน Breakdown ของ Gas จะทำให้เกิดดิสชาร์จขึ้น นั่นคือ พัลส์ที่เกิดขึ้นจากการคลายตัวของขดลวด จะมีลักษณะเป็นแบบ Surface-Type ในบริเวณ Slot โดยจะเป็นสัญญาณทางด้านขั้วบวก และเกิดขึ้นที่มุม 225° ทั้งนี้ข้อสังเกตที่เด่นชัดสำหรับกรณีการคลายตัวของขดลวดนี้จะได้แก่การเพิ่มขึ้นของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนอย่างรวดเร็ว (โดยเฉพาะสัญญาณทางด้านขั้วบวก) เมื่อโหลดมีการเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ เมื่อกระแสโหลด มีค่าเพิ่มขึ้น ขดลวดจะมีการสั่นสะเทือนเพิ่มมากขึ้น การสั่นสะเทือนนี้จะทำให้โพรงของอากาศระหว่างบริเวณด้านข้างของขดลวดกับ Ground Core เพิ่มมากขึ้น และ โพรงของอากาศที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้จะส่งผลให้สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วบวกมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม การที่กระแสโหลดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นนี้ จะส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นด้วยเช่นกัน และจะส่งผลให้สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน (ซึ่งแปรผกผันกับอุณหภูมิ) มีค่าลดลง ดังนั้น เมื่อต้องการตรวจสอบกรณี การคลายตัวของขดลวดนี้ ให้ทำการทดสอบด้วยการเดินเครื่องที่โหลดต่าง ๆ กัน แต่ควบคุมให้ค่าแรงดันไฟฟ้า อุณหภูมิ และค่าความดันของไฮโดรเจนมีค่าใกล้เคียงกัน อนึ่ง สำหรับขดลวดที่มีเฉพาะปัญหาจากการคลายตัวนั้น จะมีเฉพาะสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วบวกที่จะเปลี่ยนแปลงตามโหลดในขณะที่สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วลบจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก สำหรับกรณีที่สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วลบมีการเปลี่ยนแปลงตามโหลดนั้น อาจเป็นการแสดงถึงการสั่นสะเทือนของตัวนำ เนื่องจากผลของโพรงของอากาศที่เกิดขึ้นในบริเวณใกล้ กับตัวนำ

ตารางที่ 2.4 ปัญหาจากการคลายตัวของขดลวด (Loose Windings)

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
การคลายตัวของขดลวด	ค่าทางด้านบวกจะมากกว่าค่าทางด้านลบ (≈1.5 เท่า)	สัญญาณทางด้านบวกแปรผันตามโหลด	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	225°

2.7.5 ปัญหาจากช่องว่างระหว่างเฟสที่ไม่เพียงพอ (Inadequate Spacing)

สาเหตุของการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนประเภทนี้ (ซึ่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากความสกปรก) จะมีขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน Phase-to-Phase Voltage นั่นคือ ค่าของมุมจะเปลี่ยนไป 30° จากสัญญาณปกติ และเนื่องจากการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากสาเหตุนี้มักจะแตกต่างจากกรณีอื่น รูปแบบของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในบางครั้ง จะสามารถระบุเฟสที่เกี่ยวข้องได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อเฟสที่เกี่ยวข้องทั้งสองเฟสนั้น มีความสามารถในการตรวจสอบปัญหาจากช่วงปลายของขดลวด และลักษณะของการเกิด 30° Phase Shift นั้น จะเป็นไปตามลักษณะของ Rotation ของเครื่องจักรนั้น ๆ นอกจากนี้ เนื่องจากสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนประเภทนี้ สามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างขดลวดบนสุด กับ ขดลวดล่างสุดใน Slot ดังนั้น การตรวจสอบด้วยสายตาอาจทำได้ค่อนข้างลำบาก

ตารางที่ 2.5 ปัญหาจากช่องว่างระหว่างเฟสที่ไม่เพียงพอ (Inadequate Spacing)

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
ช่องว่างที่ไม่เพียงพอ	ค่าทางด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าทางด้านลบ	ไม่มี	ไม่แน่นอน	45° , 75° , 195° และ 225°

2.7.6 ปัญหาจากการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Connections)

สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากบริเวณจุดเชื่อมต่อต่าง ๆ จะปรากฏอยู่ในรูปของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่ขึ้นอยู่กับระบบทางกล โดยจะเกิดขึ้นที่มุม 0° และมุม 180° และเนื่องจากการเชื่อมต่อที่ไม่ดีนี้อาจถูกผลกระทบได้จากทั้งการเปลี่ยนแปลงของโหลด และการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จึงไม่สามารถคาดคะเนแนวทางการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนได้

ตารางที่ 2.6 ปัญหาจากการเชื่อมต่อทางไฟฟ้า (Electrical Connections)

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
การเชื่อมต่อที่ไม่ดี	ค่าทางด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าทางด้านลบ	ไม่แน่นอน	ไม่แน่นอน	0° และ 180°

2.7.7 ปัญหาจาก Surges

ความเครียดจาก Surge ที่เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันบนจุดเชื่อมต่อทางกลระหว่าง Groundwall กับ Strand หรือกับฉนวนของ Turn จะส่งผลให้จุดเชื่อมต่อนั้น เสื่อมสภาพลง และเสียหายได้ และจะก่อให้เกิดโพรงของอากาศขึ้นในฉนวนทางด้านของแกนทองแดง สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจากสาเหตุนี้ จะเกิดขึ้นทางด้านขั้วลบ เกิดขึ้นที่มุม 45° และมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีการเกิดโพรงของอากาศขึ้นภายในฉนวนทั่วไป กล่าวคือ จะมีลักษณะของการแปรผกผันกับอุณหภูมิ ทั้งนี้ ในกรณีที่โพรงของอากาศนั้นมีขนาดใหญ่มาก จะมีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วลบจะมีการเพิ่มขึ้นตามโหลดเนื่องจากผลของการสั่นสะเทือนของตัวนำที่เพิ่มมากขึ้นตามแรงทางกลที่เพิ่มสูงขึ้น และในกรณีของเครื่องจักรแบบ Multi-Turn Coil เช่น มอเตอร์นั้น จะมีลักษณะใกล้เคียงกับการเกิดปัญหาจาก Turn-to-Turn Fail

ตารางที่ 2.7 ปัญหาจาก Surges

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
Surge	ค่าทางด้านลบจะมากกว่าค่าทางด้านบวก (≈1.5 เท่า)	ค่อนข้างน้อย	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	45°

2.7.8 ปัญหาจากการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (Thermal Deterioration)

การเสื่อมสภาพด้วยความร้อนจะเป็นผลมาจากการเดินเครื่องที่ค่าสูงสุดติดต่อกันเป็นเวลานาน หรือจากการเดินเครื่องที่ค่าสูงกว่าค่าพิกัด (แม้จะเป็นเวลาสั้น ๆ ก็ตาม) ซึ่งจะให้ผลเช่นเดียวกับระบบฉนวนทั่วไป กล่าวคือ ความเสียหายที่เกิดขึ้นนี้จะสะสมมากขึ้นจนไม่สามารถทำให้กลับสู่สภาพเดิมได้ และส่งผลให้ความสามารถในการจับตัวกันของเรซิ่น(หรือ Epoxy หรือ Polyester) ลดลง

การสูญเสียความสามารถในการจับตัวกันนี้ จะทำให้เกิดโพรงของอากาศขึ้นในชั้นของเทป ซึ่งเป็นส่วนประกอบของฉนวนโพรงของอากาศเหล่านี้จะกระจายอยู่ทั่วฉนวน และอาจเกิดการดิสชาร์จขึ้นแบบไม่มีทิศทาง ซึ่งผลของมันจะทำให้โพรงของอากาศเหล่านี้ไม่แสดงขั้วของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนตามที่ควรจะเป็น และยังส่งผลให้เกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนขึ้นที่มุม 45° และมุม 225° นั่นคือ การเกิดดิสชาร์จทางขั้วบวกและขั้วลบเท่า ๆ กัน (ไม่ว่ามากหรือน้อย) ที่ค่ามุมปกติ จะเป็นการแสดงถึงการเกิด Thermal Deterioration หรือเป็นการแสดงอายุของฉนวนนั่นเอง

เนื่องจากผลของการขยายตัวด้วยความร้อน ทำให้โพรงของอากาศที่เกิดขึ้นใน Slot จะมีขนาดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นั่นคือ จะมีการแปรผกผันกับอุณหภูมิ กรณีนี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากผลของความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของโพรงของอากาศกับค่าแรงดัน Breakdown (โพรงของอากาศขนาดเล็กจะสามารถเกิดการ Spark ได้ที่แรงดันค่าต่ำ) ปริมาณการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนต่ออุณหภูมินี้ จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการลดขนาดของโพรงของอากาศนั้น สำหรับกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของโหลดนั้น สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

ตารางที่ 2.8 ปัญหาจากการเสื่อมสภาพด้วยความร้อน (Thermal Deterioration)

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
การเสื่อมสภาพจากความร้อน	ค่าทางด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าทางด้านลบ	ค่อนข้างน้อย	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	45° และ 225°

2.7.9 ปัญหาจากการปรับเปลี่ยนโหลด (Load Cycling)

การปรับเปลี่ยนโหลด (Load Cycling) จะเป็นรูปแบบเฉพาะของ Thermal Deterioration ซึ่งแสดงถึงความเสื่อมสภาพที่เกิดขึ้นจากการจับตัวกันระหว่างฉนวนของ Ground wall กับฉนวนของ Turn (ในระบบ Multi-Turn Coil) หรือระหว่างฉนวนของ Groundwall กับฉนวนของ Strand (ในระบบ Roebel Bars) โดยความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดขึ้นซ้ำกัน จะส่งผลให้จุดเชื่อมต่อระหว่าง Groundwall กับ Strand หรือกับฉนวนของ Turn เสื่อมสภาพลงและเสียหายได้ ได้ และจะก่อให้เกิดโพรงของอากาศขึ้นในฉนวนทางด้านของแกนทองแดง สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจากสาเหตุนี้ จะเกิดขึ้นทางด้านขั้วลบ เกิดขึ้นที่มุม 45° และมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีการเกิด Thermal Deterioration กล่าวคือ จะมีลักษณะของการแปรผกผันกับอุณหภูมิ ทั้งนี้ ในกรณีที่โพรงของอากาศนั้นมีขนาดใหญ่มาก จะมีความเป็นไปได้ว่าสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทางด้านขั้วลบจะมีการเพิ่มขึ้นตามโหลด เนื่องจากผลของการสั่นสะเทือนของตัวนำที่เพิ่มมากขึ้นตามแรงทางกลที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 2.9 ปัญหาจากการปรับเปลี่ยนโหลด (Load Cycling)

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
การปรับเปลี่ยน Load	ค่าทางด้านลบจะมากกว่าค่าทางด้านบวก (≈1.5 เท่า)	ค่อนข้างน้อย	แปรผกผันกับอุณหภูมิ	45°

2.7.10 ปัญหาจากความสกปรก (Contamination)

เนื่องจากบริเวณช่วงปลายของขดลวดจะถูกออกแบบให้แยกห่างออกจาก Ground Planes ดังนั้น สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นเนื่องจากความสกปรกในช่วงปลายของขดลวดนี้ จะ

ขึ้นอยู่กับค่าแรงดัน Phase-to-Phase Voltage โดยค่าของมุมจะเปลี่ยนไป 30° จากสัญญาณปกติ (ที่ 45° และ 225°) ซึ่งทิศทางของมุมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่เกิดความสกปรก และค่าแรงดันของขดลวดนั้น ๆ ซึ่งไม่สามารถระบุได้อย่างแน่นอน การตรวจสอบหรือการกำหนดตำแหน่งอาจทำได้ลำบากเนื่องจากระยะการมองเห็นที่ค่อนข้างจำกัด และถึงแม้ว่าสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจะมีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หรือจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด แต่ก็ไม่สามารถคาดคะเนผลที่จะเกิดขึ้นได้อย่างแน่นอนเช่นกัน อย่างไรก็ตาม สภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น อาจมีผลกระทบค่อนข้างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ความสกปรกเหล่านั้นจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้เมื่อมีความชื้นเกิดขึ้น

ตารางที่ 2.10 ปัญหาจากความสกปรก (Contamination)

สาเหตุ	Polarity	ผลจากโหลด	ผลจากอุณหภูมิ	มุมที่เกิด PD
ความสกปรก	ค่าทางด้านบวกจะใกล้เคียงกับค่าทางด้านลบ	ไม่มี	ไม่แน่นอน	15° , 75° , 195° และ 225°

2.7.11 ปัญหาจากการสั่นสะเทือนบริเวณช่วงปลายของขดลวด (Endwinding Vibration)

สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจะไม่ใช่อาการที่เกิดจากการสั่นสะเทือนบริเวณช่วงปลายของขดลวด (Endwinding Vibration) อย่างไรก็ตาม ผลอย่างหนึ่งที่เกิดจากการสั่นสะเทือนบริเวณนี้ ก็คือการเกิดรอยร้าวในฉนวน (ขนาดหลายเซนติเมตร) จากด้านปลายของ Slot ซึ่งมีความเป็นไปได้ว่ารอยร้าวเหล่านี้จะถูกพัฒนาไปถึงขั้นที่สามารถตรวจสอบสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนได้ (จัดเป็นผลข้างเคียงจากการสั่นสะเทือนบริเวณช่วงปลายของขดลวด)

2.8 ฐานข้อมูลของผลการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 2015 [11]

ทางบริษัท IRIS ได้ทำการเก็บข้อมูล Data base ของผลการวัดดิสชาร์จบางส่วนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าข้อมูลล่าสุดของปี 2015 อยู่ที่ 550,000 ข้อมูลซึ่งผู้ใช้งานสามารถใช้ข้อมูลนี้มาเปรียบเทียบได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้นมีระดับความรุนแรงของดิสชาร์จบางส่วนสูงหรือต่ำเพียงใด ซึ่งเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีพิกัด 21kV และใช้ไฮโดรเจนในการระบายความร้อนที่ 3bar.g เมื่อนำมาแปลงเป็น Psig จะมีค่าอยู่ที่ 43.51 Psig จึงเลือกใช้ค่าของตาราง H_2 อยู่ที่ 31 – 50 Psig

ตารางที่ 2.11 ฐานข้อมูลความรุนแรงของการเกิด PD พิกัด 21 kV

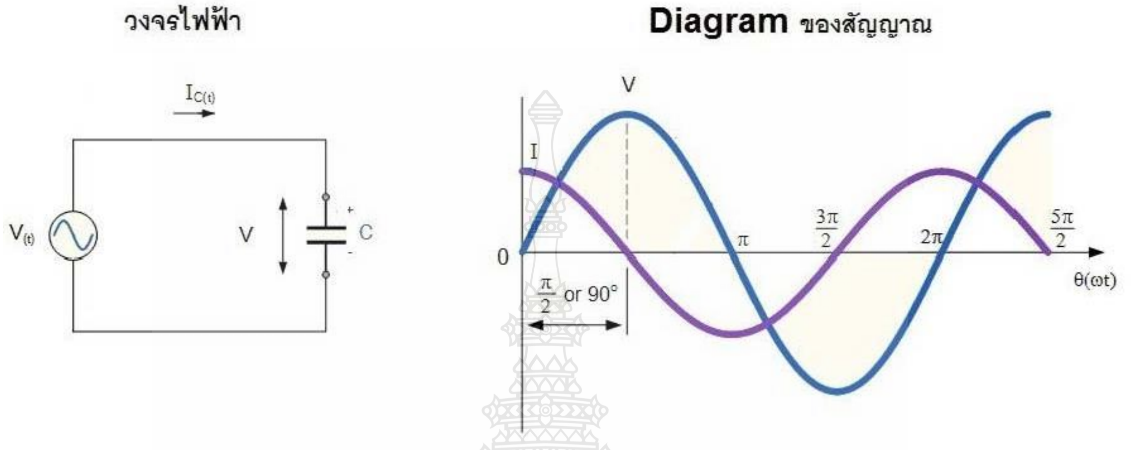
Rated (V)	>19 kV		
H_2 (Psig)	21 - 30	31 - 50	≥51
Negilible (ต่ำมาก)	43	22	10
Low (ต่ำ)	94	49	27
Typical (ปกติ)	172	90	60
Moderate (สูงปานกลาง)	217	154	398
High (สูงเกินมาตรฐาน)	246	224	987

จากตารางถ้าค่าพาเชี่ยลดิสชาร์จที่วัดได้มีค่า

1) ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดต่ำกว่า 22 mV แสดงว่ามีค่าดิสชาร์จบางส่วนต่ำมาก (Negligible) หรือ Stator Insulation อยู่ในสภาพดีเลิศ
2) ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดมีค่าอยู่ในช่วง 23-49 mV แสดงว่ามีค่าดิสชาร์จบางส่วนต่ำ (Low) หรือ Stator Insulation อยู่ในสภาพดีมาก
3) ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดมีค่าอยู่ในช่วง 50-90 mV แสดงว่ามีค่าดิสชาร์จบางส่วนปกติ (Typical) หรือ Stator Insulation อยู่ในสภาพดี
4) ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดมีค่าอยู่ในช่วง 91-154 mV แสดงว่ามีค่าดิสชาร์จบางส่วนสูงปานกลาง (Moderate) หรือ Stator Insulation อยู่ในสภาพปกติ
5) ค่าดิสชาร์จบางส่วนที่วัดมีค่าอยู่ในช่วง 155-224 mV แสดงว่ามีค่าดิสชาร์จบางส่วนสูง (High) หรือ สูงเกินมาตรฐานที่ควรจะเป็น

2.9 EMC Reference [12]

จาก EMC Reference IRIS แนะนำให้ทำการ Shift มุมบวกเพิ่ม 90° เนื่องจากคุณสมบัติของ Capacitor Load กระแสไฟฟ้า i_c จะนำหน้าความต่างศักย์ v_c เป็นมุม 90° ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 คุณสมบัติของ Capacitor Load

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบทันท่วงทีมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การตรวจวัดด้วย Capacitor Couplers การตรวจวัดด้วยวิธี Radio Frequency Current Transformer (RFCT) [1] ผลการตรวจวัดในเบื้องต้นด้วยวิธีการทั้ง 2 นั้นพบว่าสามารถตรวจพบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่ฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดได้ดังผลการตรวจวัดที่แสดงบนรูปคลื่นไซน์ และนำไปสู่การวิเคราะห์หาสาเหตุ ซึ่งพบว่า ดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นนั้นมีสาเหตุมาจากวัสดุป้องกันการรั่วซึมของไฮโดรเจน ของตัวสเตเตอร์เสื่อมสภาพและได้เข้าไปจับเกาะบนฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ระหว่างขดลวด เฟส B กับ เฟส C และการวิเคราะห์ยังสามารถแบ่งออกเป็นหลากหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น การวิเคราะห์รูปแบบ Phase Resolved Partial Discharge Pattern (PRPDP) ในรูปแบบสองมิติ และสามมิติแต่ต้องแปลความหมายโดยผู้มีประสบการณ์ [2] การวิเคราะห์ที่นำเสนอเน้นความบกพร่องของฉนวนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเทอร์โบ การตรวจสอบดิสชาร์จของ Slot, Inner Corona Grading Faults, Outside Corona Grading Faults การเกิดดิสชาร์จที่พื้นผิวในตอนปลายของขดลวด การเกิดประกายไฟและสัญญาณ Excitation ซึ่งยังไม่เป็นความบกพร่องของ สเตเตอร์ และยังได้มีการพัฒนาโปรแกรมดังกล่าว ซึ่งสามารถแปลผลรูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนในเชิงคุณภาพเน้นที่ความบกพร่องของฉนวนซึ่งแบ่งตามมาตรฐานสากล [3] สำหรับระบบตรวจสอบเครื่องกำเนิด

ไฟฟ้าที่มีอายุต่างกัน จากผู้ผลิตต่างกันที่มีการตรวจสอบ ผลการวัดทั้งสองภายใต้สภาวะการทำงานปกติ และการวิเคราะห์ด้วยการจ่ายพลังงานภายนอก และยังมีการตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดแรงดันสูงในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยี Global Vacuum Pressure Impregnation (GVPI) ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC60270 [5] เช่น การเกิดพาเชี่ยลดิสชาร์จสูงสุด กระแสดิสชาร์จเฉลี่ยและพลังงานบน Phase Resolved Partial Discharge (PRPD) histograms เพื่อแสดงถึงการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนสำหรับ 40MW 11KV TG มีการหาแรงดันไฟฟ้าภายในและภายนอกของ PDs ความถี่ที่กำหนดล่วงหน้าของสัญญาณลำดับเวลากระบวนการ Stochastic เหล่านี้ได้รับโดยการวิเคราะห์ FFT ข้อมูลที่มีถูกเก็บเป็น Signatures ที่มีการระบุตัวตนสำหรับการอ้างอิงในอนาคตเพื่อประเมินสภาพของฉนวน นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือวัดมาตรฐาน Turbine Generator Analyzer – Bus Coupler (TGA-B) ของ บริษัท IRIS ทำการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อคาดการณ์เวลาวิกฤตของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้วิธี Vector Autoregressive (VAR) [6] ผลการวิเคราะห์สามารถใช้เพื่อสนับสนุนการ Predictive maintenance (PdM) โดยการคาดการณ์เวลาวิกฤตของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาด 11.8 kV

2.11 สรุปทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้นำเสนอมา จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ต่างๆเหล่านี้จะช่วยให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมตามสภาพจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยไม่ต้องรอการบำรุงรักษาตามเวลา และยังสามารถหาสาเหตุได้ก่อนที่ความเสียหายจะเกิดขึ้น โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมราชบุรี จึงตัดสินใจทำการติดตั้งเซ็นเซอร์คาปาซิเตอร์ คัปเปอร์แบบ Directional 2 PD Sensor/Phase และทำการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เครื่องมือวัดมาตรฐาน (TGA-B) ของบริษัท IRIS เพื่อทำการวิเคราะห์ ซึ่งมีการวิเคราะห์ปีละ 2 ครั้ง และมีค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดแต่ละครั้ง อีกทั้งต้องรอผลการวิเคราะห์ของบริษัท ด้วยเหตุนี้ทำให้ผู้วิจัยเกิดความสนใจที่จะทำการศึกษา การตรวจจับสัญญาณการเกิดดีสชาร์จบางส่วนเบื้องต้น โดยใช้ออสซิลโลสโคปความเร็วสูงร่วมกับ ชุดจัดเก็บข้อมูล เพื่อให้ได้ข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐานต่อไป

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะเป็นกรณีศึกษาการตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV ของบริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 ผังขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัย	เดือนที่/ พ.ศ. 2557				เดือนที่/ พ.ศ. 2558				เดือนที่/ พ.ศ. 2559				เดือนที่/ พ.ศ. 2560			
	1	4	8	12	1	4	8	12	1	4	8	12	1	4	8	12
ศึกษา และ รวบรวมข้อมูลการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า																
ออกแบบการติดตั้งระบบตรวจจับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV และทำการตรวจสอบหาสัญญาณที่เกิดขึ้น																
วิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณที่ได้จากการตรวจจับที่ออกแบบเปรียบเทียบกับ เครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B																

การดำเนินงานวิจัย	เดือนที่/ พ.ศ. 2557				เดือนที่/ พ.ศ. 2558				เดือนที่/ พ.ศ. 2559				เดือนที่/ พ.ศ. 2560			
	1	4	8	12	1	4	8	12	1	4	8	12	1	4	8	12
ตรวจสอบหาสาเหตุของสัญญาณผิดปกติที่เกิดขึ้นพร้อมทำการแก้ไข																
ตรวจวัดสัญญาณอีกครั้งหลังจากการแก้ไข																

3.2 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน

บริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมตั้งอยู่ที่ 245 หมู่ 6 ตำบลบ้านไร่ อำเภอดำเนินสะดวก จังหวัดราชบุรี มีขนาดกำลังผลิตรวมทั้งสิ้น 1,400 เมกะวัตต์โดยแบ่งเป็น 2 บล๊อก โดยที่แต่ละบล๊อกนั้นจะประกอบด้วย แก๊สเทอร์ไบน์ 2 ยูนิต และสตรีมเทอร์ไบน์ 2 ยูนิต รวมทั้งหมดแล้วบริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด จะมีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 6 ยูนิตด้วยกัน และได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนของ IRIS POWER ENGINEERING, INC. เป็นการติดตั้งด้วยวิธี คาปาซิเตอร์ คัปเปอร์แบบ Direction 2PD /Phase

รูปที่ 3.1 บริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลทางด้านเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

MITSUBISHI	GENERATOR FOR GAS TURBINE	GENERATOR FOR STEAM TURBINE
RATED OUTPUT	309,000 kVA	346,000 kVA
RATED VOLTAGE	21 kV	21 kV
RATED CURRENT	8,459 A	9,513 A
POWER FACTOR	0.8	0.8
PHASE	3	3
FREQUENCY	50	50
ROTATING SPEED	3,000 min-1	3,000 min-1
HYDROGEN GAS PRESSURE	3 bar.g	3 bar.g
EXCITATION VOLTAGE	400 V	400 V
FIELD CURRENT	2,625 A	2,880 A
INSULATION CLASS	F	F
STANDARD	IEC 60034	IEC 60034
PROTECTION	IP 54	IP 54

จากตารางที่ 3.2 แสดงถึงข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของบริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด ทั้งในส่วนของแก๊สเทอร์ไบน์ และสตรีมเทอร์ไบน์

ในระบบการผลิตไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาให้กับระบบ ซึ่งในกระบวนการนี้จะเกิด Loss ขึ้น ภายในตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า Loss นี้จะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าออกสู่ภายนอกเพื่อไม่ให้ความร้อนที่เกิดขึ้นสะสมอยู่ภานในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามากเกินไปซึ่งตัวระบายความร้อนจะใช้ H_2 เพราะมีคุณสมบัติในการระบายความร้อนได้ดีกว่า Air

ตารางที่ 3.3 Features of Hydrogen Cooling

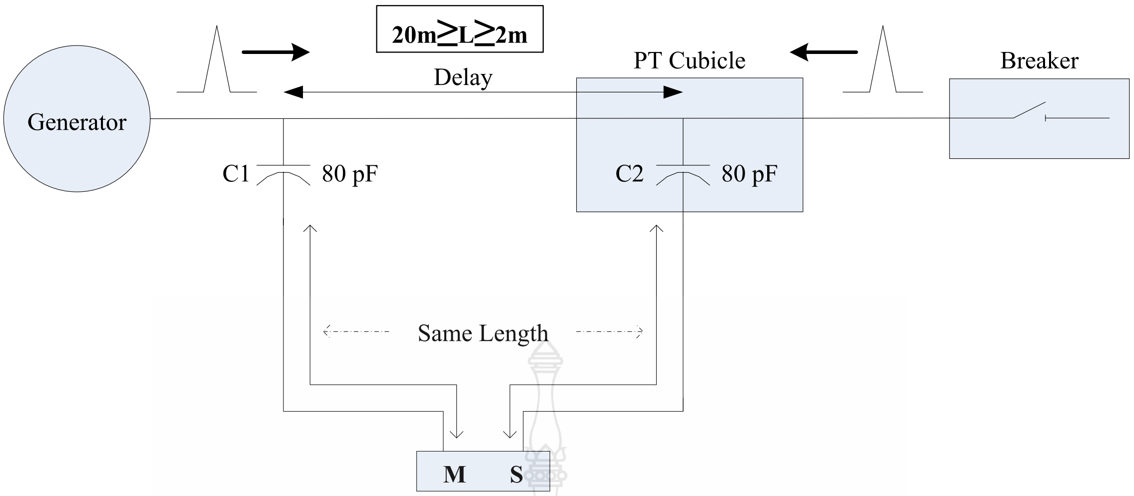
Characteristic	Air	Hydrogen
Density	1.00	0.07
Thermal Conductivity	1.00	7.14
Heat-transfer Coefficient	1.00	1.35
Specific Heat	1.00	0.98
Combustion Superlative	Yes	No.
Oxidizing Agent	Yes	No.

จากตารางที่ 3.3 แสดงถึงการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ไฮโดรเจนกับอากาศในการระบายความร้อนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

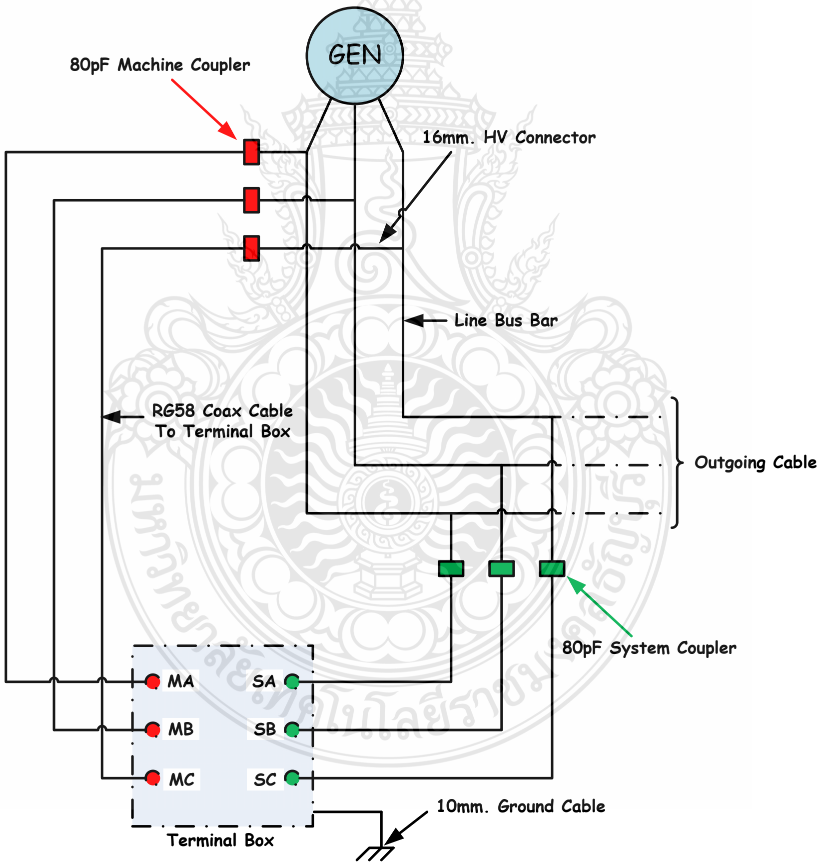
ข้อดีของ H_2

- ความหนาแน่นต่ำทำให้สามารถออกแบบให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีขนาดเล็กลงได้
- High Thermal Conductivity ของ H_2 มีค่าสูงกว่า Air 7.14 เท่าหมายความว่า H_2 สามารถนำความร้อนได้มากกว่า Air 7.14 เท่าที่ Seal Pressure เท่ากัน
- Loss ที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้แก่ Rotation Loss, Core Loss, I^2R Loss ของ Armature และ Field + Exciter (I^2R) Loss

Rotation Loss เนื่องจาก H_2 มี Heat Transfer Coefficient ดีกว่า Air 1.35 เท่า นั้นคือ H_2สามารถพาความร้อนจากผิวของ Rotor ได้ดีกว่า Air 1.35 เท่าและมี Specific Heat มากกว่า Air 14.43 เท่าและลด Winding Loss เนื่องจากความหนาแน่นต่ำพร้อมทั้งลดปัญหาเรื่องเสียงดัง เนื่องจากเป็นระบบปิด



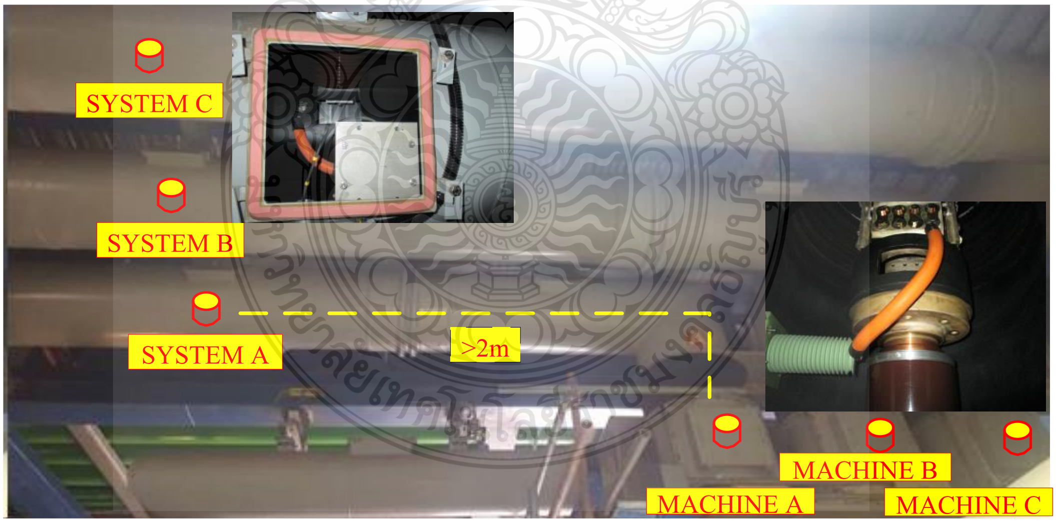
รูปที่ 3.2 การติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์แบบ Directional 2PD Sensor/Phase



รูปที่ 3.3 Single line การติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์แบบ Directional 2PD Sensor/Phase

จากรูปที่ 3.2 และ 3.3 แสดงถึงรูปแบบการติดตั้งชุดตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน และ Single line การติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์แบบ Directional 2PD Sensor/Phase

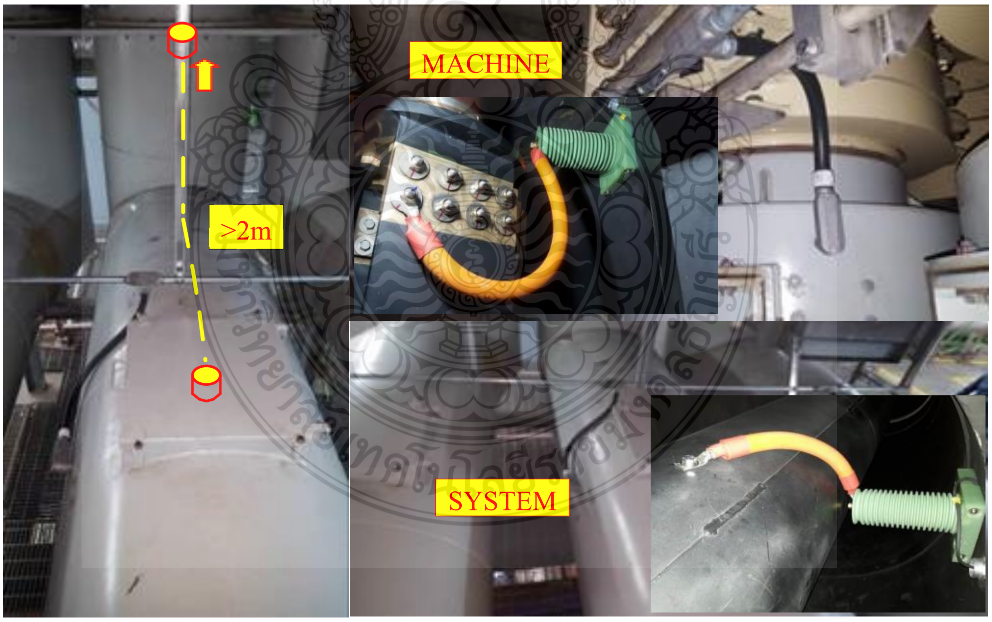
รูปที่ 3.4 แก๊สเทอร์ไบน์ มีอยู่ทั้งหมด 4 ยูนิต



รูปที่ 3.5 ตำแหน่งการติดตั้ง PD Sensor ที่แก๊สเทอร์ไบน์

จากรูปที่ 3.4 และ 3.5 แสดงถึงที่ตั้งและตำแหน่งของการติดตั้งชุดตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่แก๊สเทอร์ไบน์

รูปที่ 3.6 สตรีมเทอร์ไบน์ มีอยู่ทั้งหมด 2 ยูนิต



รูปที่ 3.7 ตำแหน่งการติดตั้ง PD Sensor ที่สตรีมเทอร์ไบน์

จากรูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงถึงที่ตั้งและตำแหน่งของการติดตั้งชุดตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สตรีมเทอร์ไบน์

ตารางที่ 3.4 Installation Epoxy Mica Capacitor at RPCL

Power Plant RPCL	Manufacturer	Capacity (MVA)	Rated Volt (kV)	Year of Manufac.	EMC Installation
GTG11	Mitsubishi	309	21	2007	2016
GTG12	Mitsubishi	309	21	2007	2015
STG10	Mitsubishi	346	21	2007	2015
GTG21	Mitsubishi	309	21	2007	2017
GTG22	Mitsubishi	309	21	2007	2017
STG20	Mitsubishi	346	21	2007	2017

จากตารางที่ 3.4 แสดงปีของการติดตั้งชุด Epoxy Mica Capacitor (EMC) ที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้าของบริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด ทั้ง 6 ยูนิต

3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

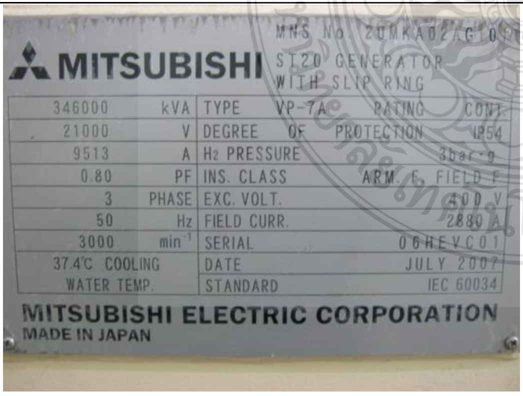
หลังจากที่ทางทางบริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด ได้ทำการติดตั้งชุดตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทั้งในส่วนของแก๊สเทอร์ไบน์ และสตรีมเทอร์ไบน์ ทีมผู้วิจัยได้ทำการทดสอบและเฝ้าติดตามการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ไประยะหนึ่งแล้ว ในช่วงแรกได้ทำการทดสอบด้วยเครื่องมือวัดแบบมาตรฐานเพียงอย่างเดียว ซึ่งเครื่องมือดังกล่าว เป็นเครื่องมือที่มีฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์สำเร็จรูปซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงโดยในระยะเวลา 1 ปี เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวจะมีการวิเคราะห์ข้อมูลปีละ 2 ครั้ง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดแต่ละครั้ง อีกทั้งต้องรอผลการวิเคราะห์ของบริษัท และไม่สามารถรู้ถึงที่มาที่ไปของข้อมูลจากรายงาน ด้วยเหตุนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่ทำการศึกษาการตรวจจับสัญญาณการเกิดดีสชาร์จบางส่วน เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นจากสัญญาณที่ได้ นำมาเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน เพื่อนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบต่อไป ด้วยเหตุนี้ขั้นตอนการทดสอบจึงมี 2 ส่วน ดังนี้

3.3.1 การทดสอบด้วยเครื่องมือมาตรฐาน

รูปที่ 3.8 การตรวจสอบด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน (TGA-B)

จากรูปที่ 3.8 แสดงถึงการทดสอบด้วยเครื่องมือวัดแบบมาตรฐาน ซึ่งสามารถทดสอบได้ทีเดียวเลยทั้ง 3 เฟสโดยทำการยกเครื่องมือมาติดตั้งหน้างานแล้วมาเก็บข้อมูลกลับไปวิเคราะห์

ตารางที่ 3.5 แสดงตารางฐานข้อมูลเทียบกับข้อมูลทางด้านเทคนิคของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

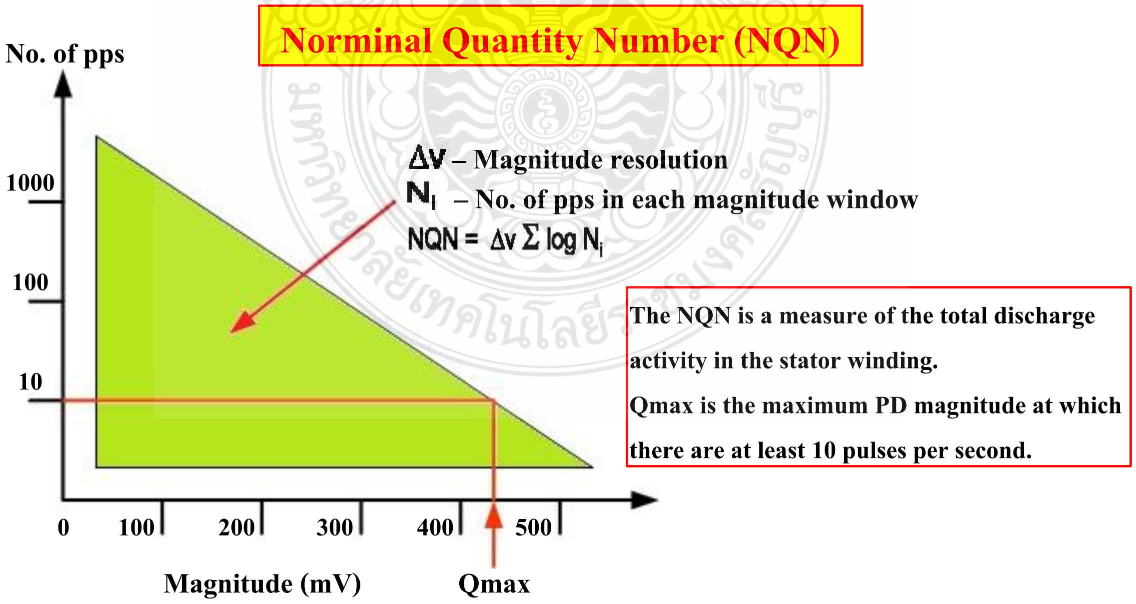
<table>
<tr><td rowspan="7">
</td><td>Rated (V)</td><td>>19 kV</td></tr>
<tr><td>H_2 (Psig)</td><td>31-50</td></tr>
<tr><td>Negligible (ต่ำมาก)</td><td>22</td></tr>
<tr><td>Low (ต่ำ)</td><td>49</td></tr>
<tr><td>Typical (ปกติ)</td><td>90</td></tr>
<tr><td>Moderate (สูงปานกลาง)</td><td>154</td></tr>
<tr><td>High (สูงเกินมาตรฐาน)</td><td>224</td></tr>
</table>

จากตารางที่ 3.5 แสดงถึงการเลือกตารางเพื่อมาเปรียบเทียบที่ค่าได้ทำการทดสอบด้วยเครื่องมือวัดแบบมาตรฐานจะเห็นได้ว่าเครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีพิกัด 21kV และใช้ไฮโดรเจนในการระบายความร้อนที่ 3bar.g เมื่อนำมาแปลงเป็น Psig จะมีค่าอยู่ที่ 43.51 Psig

ตารางที่ 3.6 ตัวอย่างผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ที่ GTG11 GTG11

Rated (V)	>19 kV	ปี 2016					
H_2 (Psig)	31-50	Phase	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-	Status
Negligible	22	A	49	31	N/A	N/A	Negligible
Low	49	B	17	31	N/A	N/A	Negligible
Typical	90	C	38	33	N/A	N/A	Negligible
Moderate	154						
High	224						

จากตารางที่ 3.6 แสดงผลการทดสอบของ GTG 11 ปี 2016 จะเห็นได้ว่าค่าจากตารางจะมีค่า NQN+, NQN-, Qm+, Qm- ซึ่งจะขออธิบายถึงที่มาของผลทั้งหมดจากรูปที่ 3.9

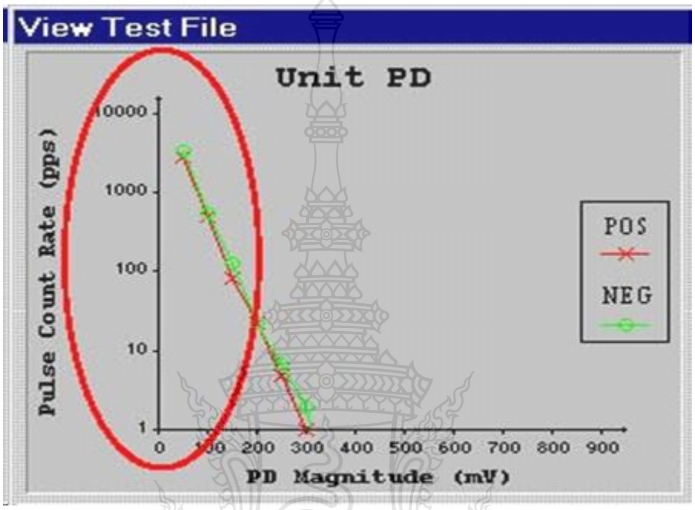


รูปที่ 3.9 PD Summary Variables [8]

จากรูปที่ 3.9 จะขออธิบายความหมายของกราฟดังนี้

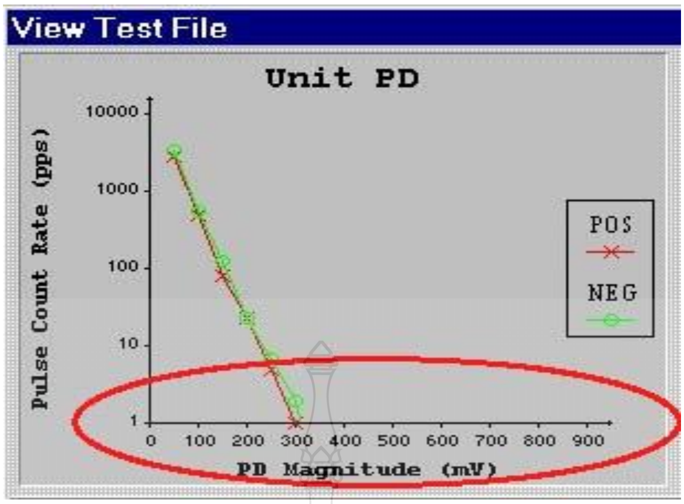
NQN : แทนพื้นที่ใต้กราฟ หมายถึง ปริมาณสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนทั้งหมดที่เกิดขึ้น

Qm : ค่าของขนาดสูงสุดของพัลส์ที่เกิด 10 พัลส์ต่อวินาที มีหน่วยเป็น mV หมายถึง ขนาดของโพรงอากาศถ้าค่า Qm สูงแสดงว่าฟองอากาศมีขนาดใหญ่



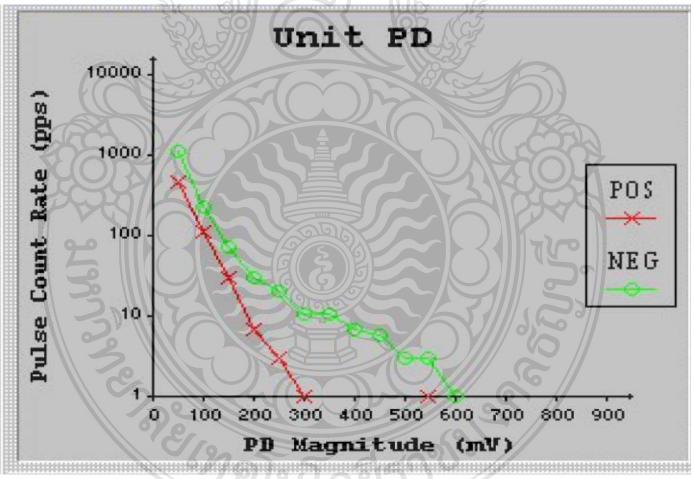
รูปที่ 3.10 การอ่านค่าของกราฟในแนวแกนตั้ง

รูปที่ 3.10 แสดงการอ่านค่ากราฟในแนวแกนตั้ง จะแสดงถึงจำนวนครั้งของการเกิด Breakdown ของโพรงอากาศในหนึ่งวินาที ที่เกิดขึ้นในฉนวนของสเตเตอร์หรือพูดอย่างง่าย คือ จำนวนโพรงอากาศในฉนวนกันความร้อนของสเตเตอร์นั่นเอง จำนวนของโพรงอากาศจะเป็นตัวแปรหนึ่งที่บ่งชี้ถึงสภาพของฉนวนกันความร้อนของสเตเตอร์ ผลการวัดจะบอกได้ว่าปริมาณของโพรงอากาศมีมากหรือน้อยเท่าไหร่



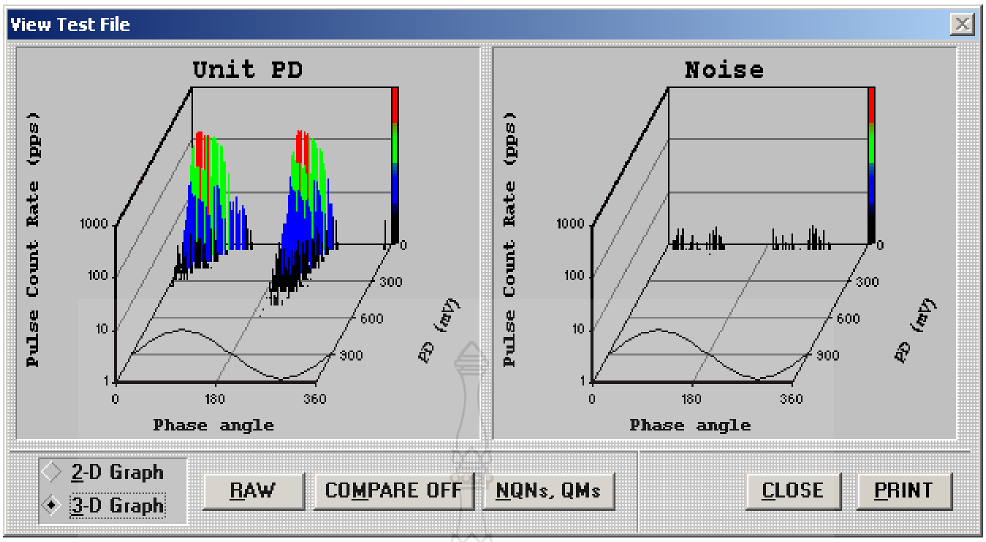
รูปที่ 3.11 การอ่านค่าของกราฟในแนวแกนนอน

รูปที่ 3.11 แสดงการอ่านค่ากราฟในแนวแกนนอนจะบอกค่า Breakdown เป็น mV ถ้าโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ค่า Breakdown ก็จะสูง ผลการวัดจะบอกได้ว่าขนาดของโพรงอากาศมีขนาดเล็กหรือ ใหญ่มากน้อยแค่ไหน



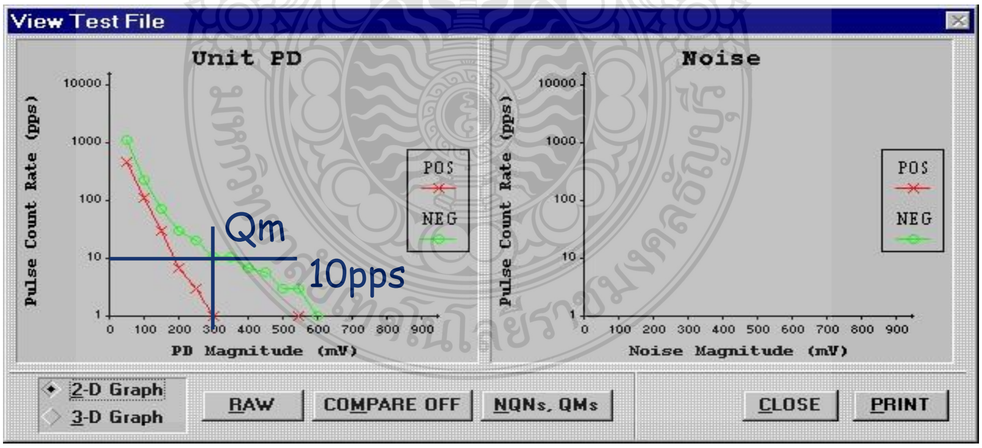
รูปที่ 3.12 รูปแบบของการแสดงผลในรูปแบบ 2 มิติ

รูปที่ 3.12 แสดงรูปแบบของการแสดงผลในรูปแบบ 2 มิติซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า Negative เส้นสีเขียวในแนวแกนนอนจะบอกค่า Breakdown เป็น mV ถ้าโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ค่า Breakdown ก็จะสูง แต่ปริมาณในการเกิดนั้นมีปริมาณน้อย ซึ่งทาง IRIS สามารถโชว์ผลการวัดในรูปแบบ 3 มิติได้ด้วย เพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าค่า Breakdown ที่มีค่าสูงแต่มีปริมาณน้อยนั้นเป็นอย่างไร



รูปที่ 3.13 รูปแบบของการแสดงผลในรูปแบบ 3 มิติ

รูปที่ 3.13 แสดงรูปแบบของการแสดงผลในรูปแบบ 3 มิติซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า Negative เส้นสีเขียวในแนวแกนนอน ถึงแม้ว่าโพรงอากาศมีขนาดใหญ่แต่ปริมาณในการเกิดนั้นมีปริมาณน้อย ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปแบบ 3 มิติซึ่งจากเอกสาร IEEE 1434:2014 [8] และ IEC 60034-27 [9] ได้กำหนดค่าของขนาดสูงสุดของพัลส์ที่เกิด 10 พัลส์ต่อวินาทีเพื่อที่จะแสดงให้เห็นว่าค่า Breakdown และปริมาณของโพรงอากาศที่เกิดขึ้นเพื่อนำมาแสดงผลว่าเป็นอย่างไรดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ค่าขนาดของ PD จะอ่านจากจุดที่เกิด PD จำนวน 10 พัลส์ต่อวินาที (pps)

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะขอนำเสนอผลการทดสอบจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า STG10 เท่านั้น เพราะเป็นเครื่องกำเนิดที่ได้ทำการติดตั้งตั้งแต่ปี 2015 ได้ทำการตรวจสอบครั้งแรกในปี 2016 ไม่พบความ

ผิดปกติแต่ในการตรวจสอบครั้งที่ 2 ในปี 2017 พบความผิดปกติจึงทำให้เกิดความสนใจที่จะศึกษาหาข้อมูลที่มาที่ไปของสัญญาณที่เกิดขึ้นว่าเกิดขึ้นจากสาเหตุอะไร

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ที่ STG10 ครั้งที่ 1

STG10

Rated (V)	>19 kV	ปี 2016					
H_2 (Psig)	31-50	Phase	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-	Status
Negligible	22	A	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
Low	49	B	N/A	20	N/A	26	Negligible
Typical	90	C	N/A	11	N/A	N/A	Negligible
Moderate	154						
High	224						

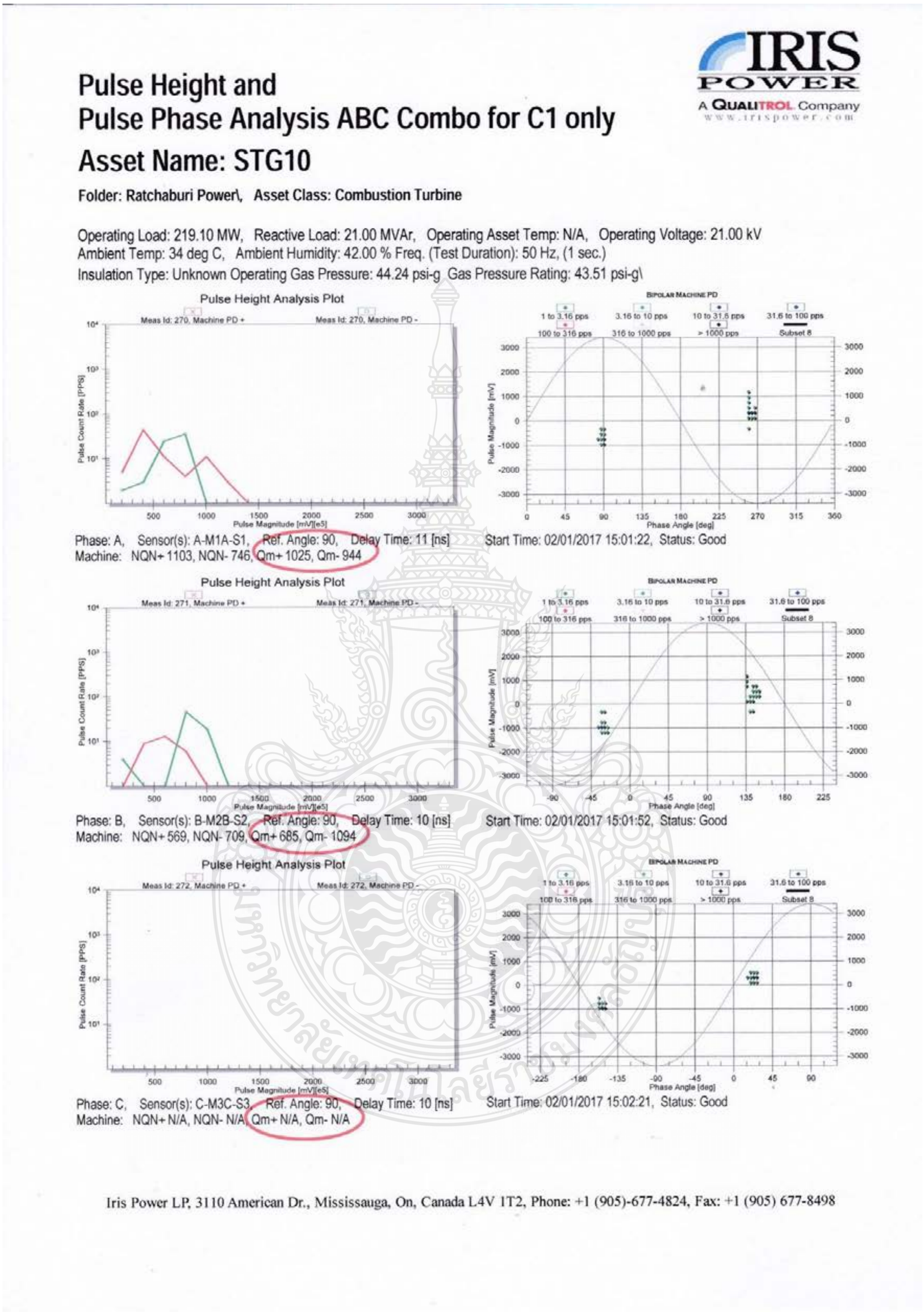
จากตารางที่ 3.7 แสดงผลการทดสอบของ STG 10 ครั้งที่ 1 ในปี 2016 จะเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้เมื่อเทียบค่ากับตารางฐานข้อมูลแล้วจะเห็นได้ว่า Status ของทั้ง 3 เฟสคือ Negligible ซึ่งมีค่าอยู่ในเกณฑ์ต่ำมาก

ตารางที่ 3.8 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ที่ STG10 ครั้งที่ 2

STG10

Rated (V)	>19 kV	ปี 2017					
H_2 (Psig)	31-50	Phase	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-	Status
Negligible	22	A	1103	746	1025	944	High
Low	49	B	569	709	685	1095	High
Typical	90	C	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
Moderate	154						
High	224						

จากตารางที่ 3.8 แสดงผลการทดสอบของ STG 10 ครั้งที่ 2 ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2017 จะเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้เมื่อเทียบค่ากับตารางฐานข้อมูลแล้วจะเห็น Status ของเฟส A และเฟส B นั้นคือ High ซึ่งเมื่อดูจากตารางฐานข้อมูลแล้วจะเห็นได้ว่า ค่าสูงสุดนั้นอยู่ที่ 224 เท่านั้น แต่ค่าที่วัดได้นั้นสูงมากจนผิดปกติดังแสดงจาก Data Report ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2017 จากบริษัท IRIS ดังรูปที่ 3.15



Pulse Height and
Pulse Phase Analysis ABC Combo for C1 only
Asset Name: STG10

Folder: Ratchaburi Power\, Asset Class: Combustion Turbine

Operating Load: 219.10 MW, Reactive Load: 21.00 MVAr, Operating Asset Temp: N/A, Operating Voltage: 21.00 kV
Ambient Temp: 34 deg C, Ambient Humidity: 42.00 % Freq. (Test Duration): 50 Hz, (1 sec.)
Insulation Type: Unknown Operating Gas Pressure: 44.24 psi-g Gas Pressure Rating: 43.51 psi-g\

Phase: A, Sensor(s): A-M1A-S1, Ref. Angle: 90, Delay Time: 11 [ns] Start Time: 02/01/2017 15:01:22, Status: Good
Machine: NQN+ 1103, NQN- 746, Qm+ 1025, Qm- 944

Phase: B, Sensor(s): B-M2B-S2, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 02/01/2017 15:01:52, Status: Good
Machine: NQN+ 569, NQN- 709, Qm+ 685, Qm- 1094

Phase: C, Sensor(s): C-M3C-S3, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 02/01/2017 15:02:21, Status: Good
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A

Iris Power LP, 3110 American Dr., Mississauga, On, Canada L4V 1T2, Phone: +1 (905)-677-4824, Fax: +1 (905) 677-8498

รูปที่ 3.15 Data Report STG 10 ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2017

จากข้อมูลรายงานผลการทดสอบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ด้วยเครื่องมือมาตรฐานจาก IRIS POWER ENGINEERING,INC. จากการตรวจสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้ง 6 ยูนิตพบความผิดปกติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 (STG10) เฟส A ทางบริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด จึงได้มีการวางแผนร่วมกับทางทีมผู้วิจัยและทางตัวแทน IRIS POWER ENGINEERING, INC. ว่าจะต้องมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อความถูกต้องโดยมีกำหนดการในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2017 ได้ทำการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลอีกครั้ง โดยทีมผู้วิจัยได้ทำการปรึกษาหารือกันว่าทำอย่างไรถึงจะสามารถรู้ข้อมูลดิบของ Data Report ซึ่งเครื่องมือมาตรฐาน เป็นเครื่องมือที่มีฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์สำเร็จรูปซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงโดยในระยะเวลา 1 ปี เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวจะมีการวิเคราะห์ข้อมูลปีละ 2 ครั้ง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดแต่ละครั้ง อีกทั้งต้องรอผลการวิเคราะห์ของบริษัท ด้วยเหตุนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่ทำการศึกษาการตรวจจับสัญญาณการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ในการศึกษาเบื้องต้นทีมวิจัยได้ใช้โมดูลออสซิลโลสโคปความเร็วสูง รุ่น NI PXle – 5160 500 MHz (2.5GS/s, 10-Bits Digitizer) ร่วมกับชุดเก็บข้อมูล (Data Acquisition, DAQ)

ตารางที่ 3.9 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ที่ STG10 ครั้งที่ 3

STG10

Rated (V)	>19 kV	ปี 2017					
H_2 (Psig)	31-50	Phase	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-	Status
Negligible	22	A	577	437	652	868	High
Low	49	B	582	933	648	979	High
Typical	90	C	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
Moderate	154						
High	224						

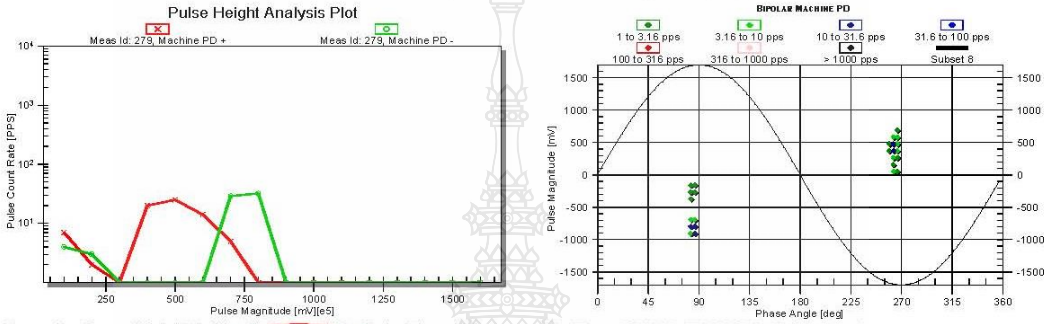
จากตารางที่ 3.9 แสดงผลการทดสอบของ STG 10 ครั้งที่ 3 ในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2017 จะเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้เมื่อเทียบค่ากับตารางฐานข้อมูลแล้วจะเห็นได้ว่า Status ของเฟส A และเฟส B นั้นยังคงมีค่า High และค่าที่วัดได้นั้นสูงมากจนผิดปกติดังแสดงจาก Data Report ในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2017 จากบริษัท IRIS ดังรูปที่ 3.16

IRIS POWER
A QUALITROL Company
www.irispower.com

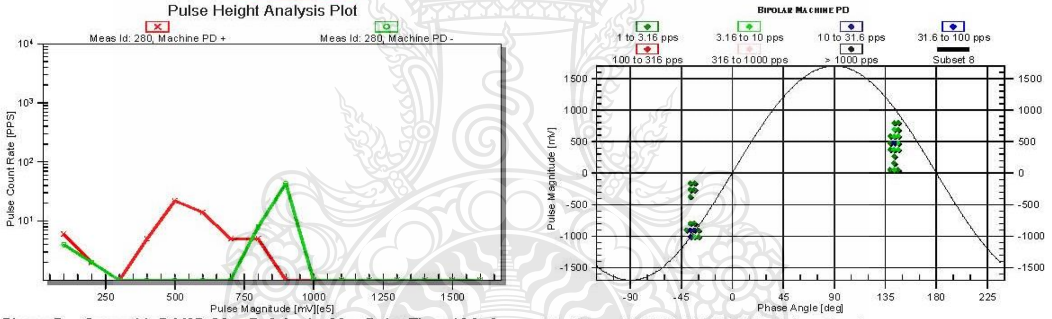
Pulse Height and
Pulse Phase Analysis ABC Combo for C1 only
Asset Name: STG10

Folder: Ratchaburi Power\, Asset Class: Combustion Turbine

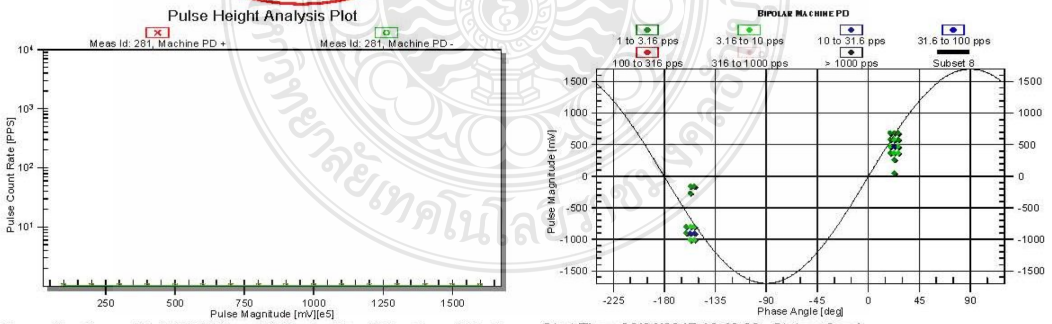
Operating Load: 0.00 MW, Reactive Load: 48.00 MVAr, Operating Asset Temp: 63 deg C, Operating Voltage: 21.00 kV
Ambient Temp: 35 deg C, Ambient Humidity: 57.00 % Freq. (Test Duration): 50 Hz, (5 sec.)
Insulation Type: Unknown Operating Gas Pressure: 42.06 psi-g Gas Pressure Rating: 43.51 psi-g\



Phase: A, Sensor(s): A-M1A-S1, Ref. Angle: 90, Delay Time: 11 [ns] Start Time: 02/24/2017 12:36:31, Status: Good
Machine: NQN+577, NQN- 437, Qm+652, Qm- 868



Phase: B, Sensor(s): B-M2B-S2, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 02/24/2017 12:38:27, Status: Good
Machine: NQN+582, NQN- 393, Qm+648, Qm- 979



Phase: C, Sensor(s): C-M3C-S3, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 02/24/2017 12:40:22, Status: Good
Machine: NQN+N/A, NQN- N/A, Qm+N/A, Qm- N/A

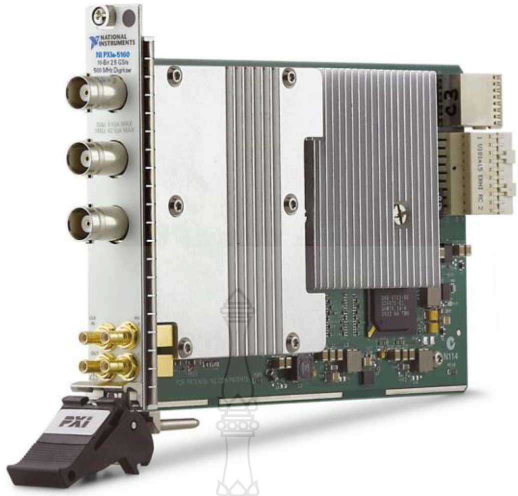
Iris Power LP, 3110 American Dr., Mississauga, On, Canada L4V 1T2, Phone: +1 (905)-677-4824, Fax: +1 (905) 677-8498

รูปที่ 3.16 Data Report STG 10 ในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2017

จากการวิเคราะห์หาสาเหตุความผิดปกติดังกล่าวทางทีมผู้วิจัยได้ปรึกษากันว่าจะออกแบบเครื่องมือวัดอย่างไรให้สามารถจับสัญญาณผิดปกติได้เนื่องจากสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนนั้นเป็นพัลส์กระแสที่มีหน้าคลื่นที่ชันและสั้นมาก ประมาณ 1-5 nS และอยู่ในช่วงความถี่ 50 – 250 MHz และด้วยการออกแบบเครื่องมือตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนของ บริษัท IRIS ได้ออกแบบ Epoxy Mica Capacitor ให้มีขนาดอยู่ที่ 80 pF ซึ่งจะอยู่ในช่วงความถี่ 40 – 350 MHz ในการศึกษาเบื้องต้นทีมวิจัยได้ใช้โมดูลออสซิลโลสโคปความเร็วสูง รุ่น NI PXle – 5160 500 MHz (2.5GS/s, 10-Bits Digitizer) ร่วมกับชุดเก็บข้อมูล (Data Acquisition, DAQ) เพื่อให้คลอบคลุมความถี่ ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18

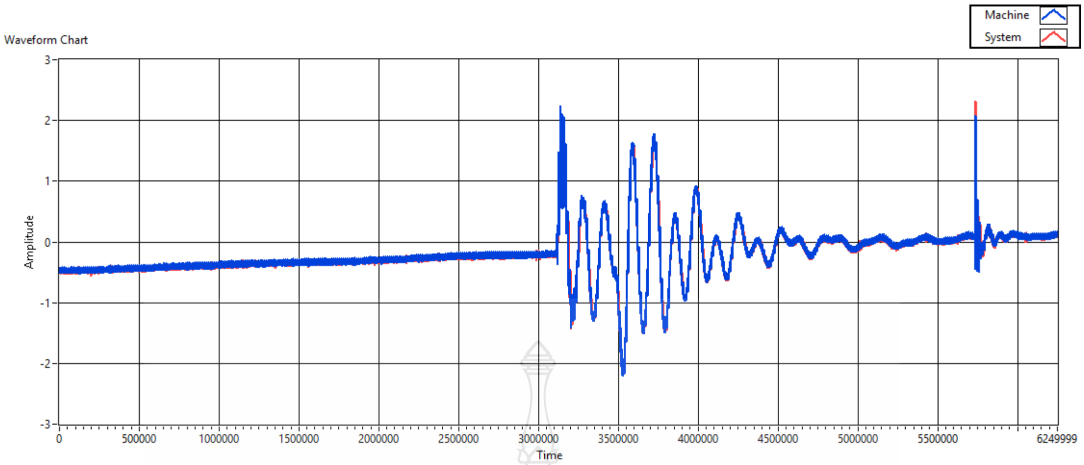
3.3.2 การทดสอบด้วยด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูง

รูปที่ 3.17 การตรวจจับสัญญาณด้วยด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูง

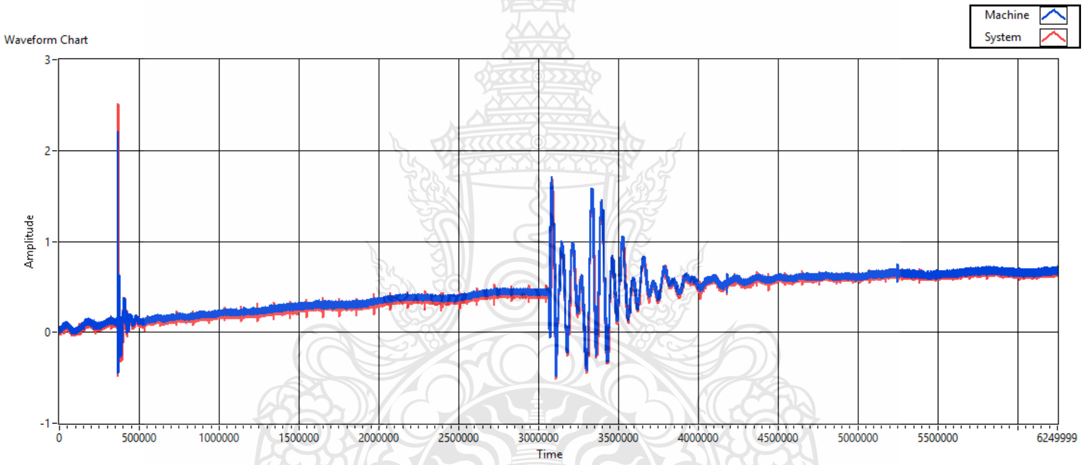


รูปที่ 3.18 ออสซิลโลสโคปรุ่น NI Pxle-5160 500MHz , Sample rate 2.5 GS/s , 10 Bits

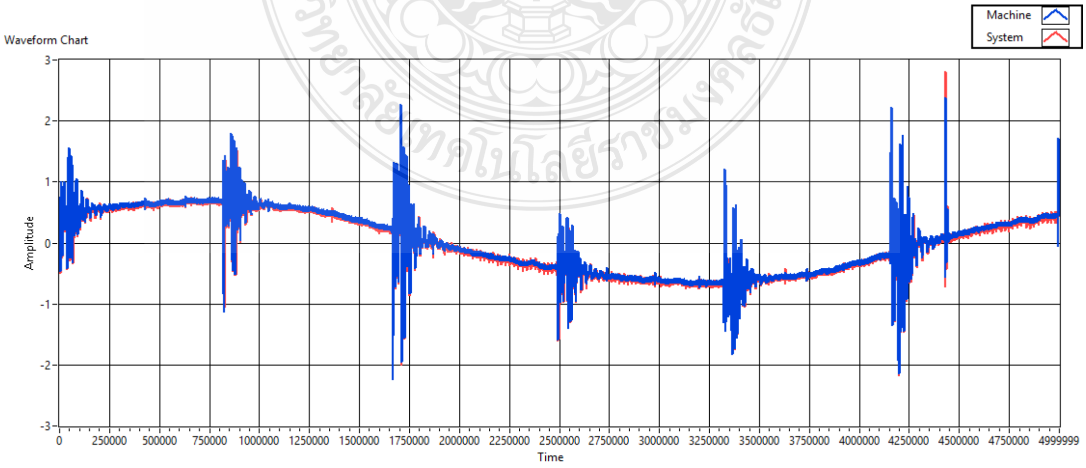
ทางทีมผู้วิจัยมีความสนใจที่ทำการศึกษาการตรวจจับสัญญาณการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในการศึกษาเบื้องต้นทีมวิจัย ได้ใช้โมดูลออสซิลโลสโคปความเร็วสูง รุ่น NI PXle – 5160 (2.5GS/s, 10-Bits Digitizer) ร่วมกับชุดเก็บข้อมูล (Data Acquisition, DAQ) ทำการตั้งค่าอัตราการเก็บตัวอย่างสัญญาณ Sampling rate และ ตั้งค่าการอ่าน Sample to read หลายค่า เพราะ ความยากของการตรวจจับในครั้งนี้ ทางทีมผู้วิจัยไม่สามารถจะรู้ได้ว่าจะพบสัญญาณความผิดปกติหรือไม่ ในบทนี้จะขอแสดงผลการวัดเฉพาะเฟส A เท่านั้นเพราะเป็นเฟสที่ทาง IRIS ได้ทำการวิเคราะห์ว่า เป็นเฟสที่ผิดปกติส่วนเฟส B เกิดจากการอินดิ้วของกระแสจากเฟส A ไปยังเฟส B สำหรับการวัดและบันทึกสัญญาณการเกิดความผิดปกติที่ได้ จะนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน เพื่อนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบต่อไป ดังรูปที่ 3.19 – 3.23



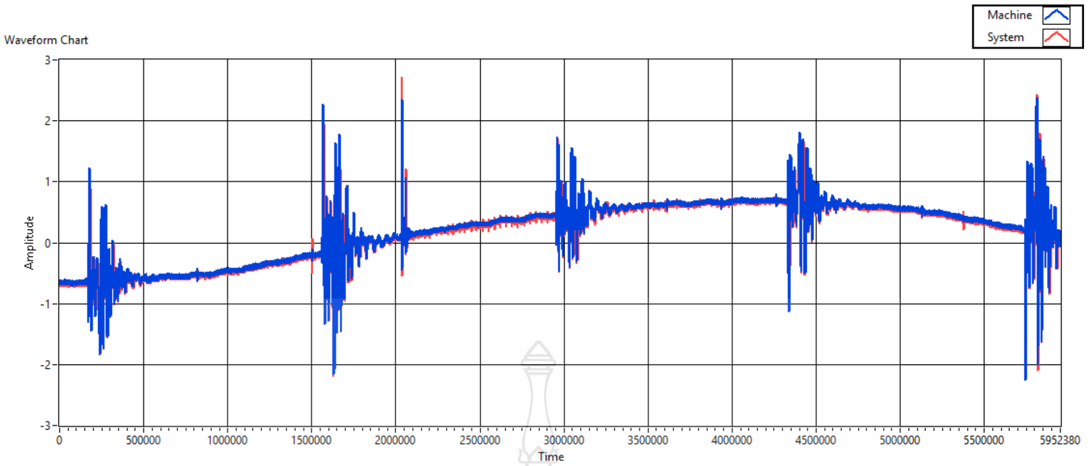
รูปที่ 3.19 การทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 2GS/s และ Sample to read ที่ 5M ที่เฟส A



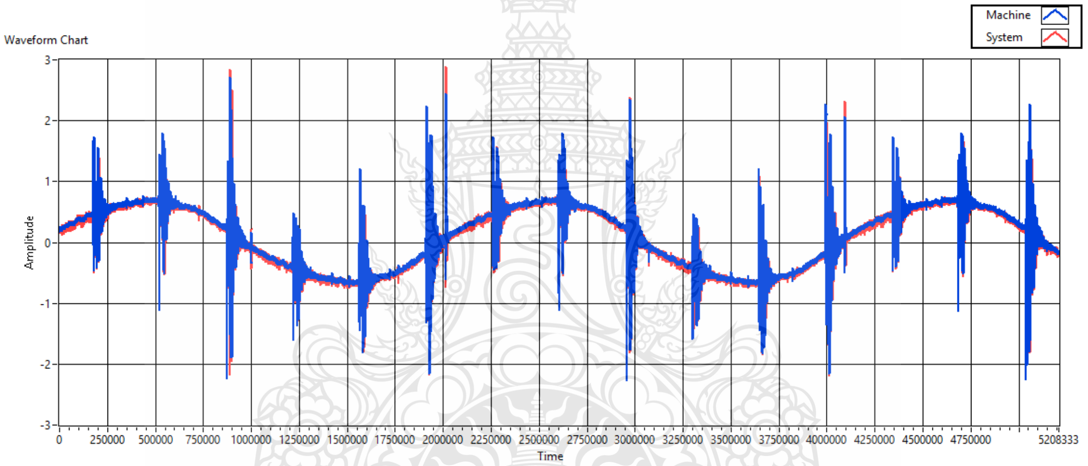
รูปที่ 3.20 การทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 1GS/s และ Sample to read ที่ 5M ที่เฟส A



รูปที่ 3.21 การทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 250MS/s และ Sample to read ที่ 5M ที่เฟส A



รูปที่ 3.22 การทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 10M ที่เฟส A



รูปที่ 3.23 การทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ที่เฟส A

3.4 สรุปการดำเนินงานวิจัย

จากขั้นตอนทดสอบทั้ง 2 วิธีจะเห็นได้ว่าทางทีมผู้วิจัยจะมุ่งเน้นไปที่การออกแบบเครื่องมือตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน เพื่อที่จะได้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน เพื่อจะได้มีการวางแผนและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งผลการวิเคราะห์สัญญาณที่วัดได้จะนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิเคราะห์ความผิดปกติของการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยผลการวิเคราะห์จะแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้

1) ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B และ เครื่องมือตรวจจับที่ออกแบบ
2) ผลการตรวจสอบหาสาเหตุจากการวิเคราะห์

4.1 ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน และ เครื่องมือตรวจจับที่ออกแบบ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B ทางทีมผู้วิจัยได้ทำการทดสอบและเฝ้าติดตามการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ ไประยะหนึ่งแล้ว สามารถตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนได้ที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A จากข้อมูลของ IRIS POWER ENGINEERING,INC. ได้ทำการสรุปลักษณะเฉพาะรูปแบบของการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนดังนี้

1) สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุม 45° หรือ 225° เป็นสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดในฉนวนของ Stator Winding Generator
2) สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุม 15°, 75° , 195° หรือ 255° เป็นสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนชนิด Phase to Phase หรือ End Winding
3) สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุม 0° หรือ 180° เป็นสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นจากปัญหา Electrical Connection บกพร่อง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ที่ STG10 ครั้งที่ 1

STG10

ปี 2016					
Phase	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-	Status
A	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
B	N/A	20	N/A	26	Negligible
C	N/A	11	N/A	N/A	Negligible

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบของ STG 10 ครั้งที่ 1 ในปี 2016 จะเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้เมื่อเทียบค่ากับตารางฐานข้อมูลแล้วจะเห็นได้ว่า มีค่าต่ำมาก

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้งคาปาซิเตอร์ คัปเปอร์ที่ STG10 ครั้งที่ 2

STG10

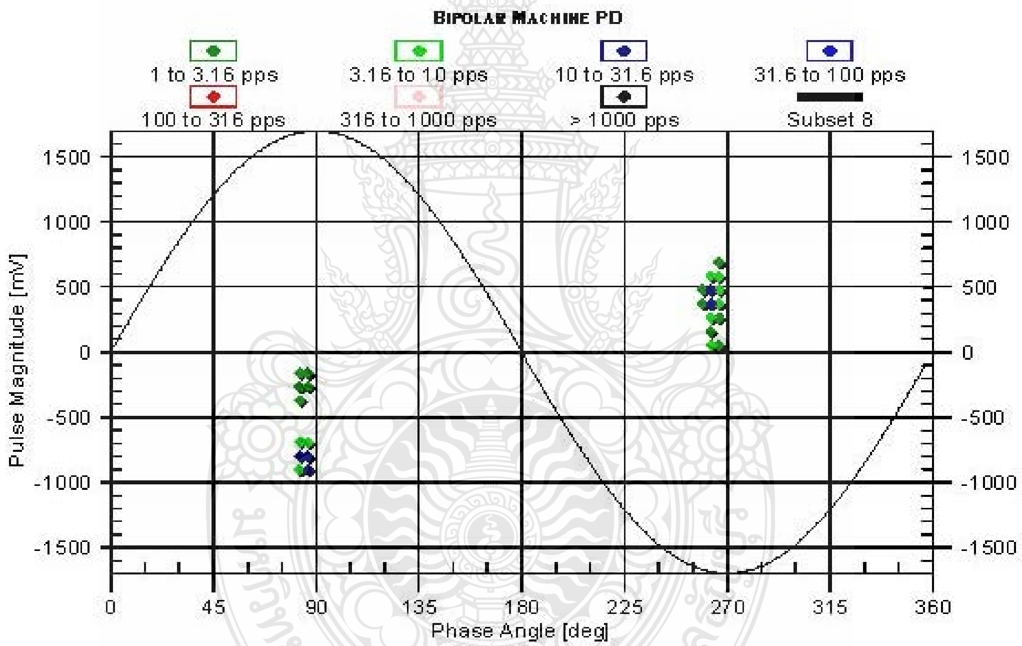
ปี 2017					
Phase	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-	Status
A	1103	746	1025	944	High
B	569	709	685	1095	High
C	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบของ STG 10 ครั้งที่ 2 ในวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2017 จะเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้เมื่อเทียบค่ากับตารางฐานข้อมูลแล้วจะเห็นได้ว่า มีค่าสูงผิดปกติที่เฟส A และเฟส B แต่ค่าที่ผิดปกติของเฟส B เกิดจากการอินดิ้วของกระแสจากเฟส A ไปยังเฟส B ทาง IRIS จึงทำการวิเคราะห์เฉพาะเฟส A เท่านั้น

ตารางที่ 4.3 ฐานข้อมูลความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนพิกัด 21 kV และใช้ไฮโดรเจนในการระบายความร้อน

Rated (V)	>19 kV
H_2 (Psig)	31 - 50
Negilible (ต่ำมาก)	22
Low (ต่ำ)	49
Typical (ปกติ)	90
Moderate (สูงปานกลาง)	154
High (สูงเกินมาตรฐาน)	224

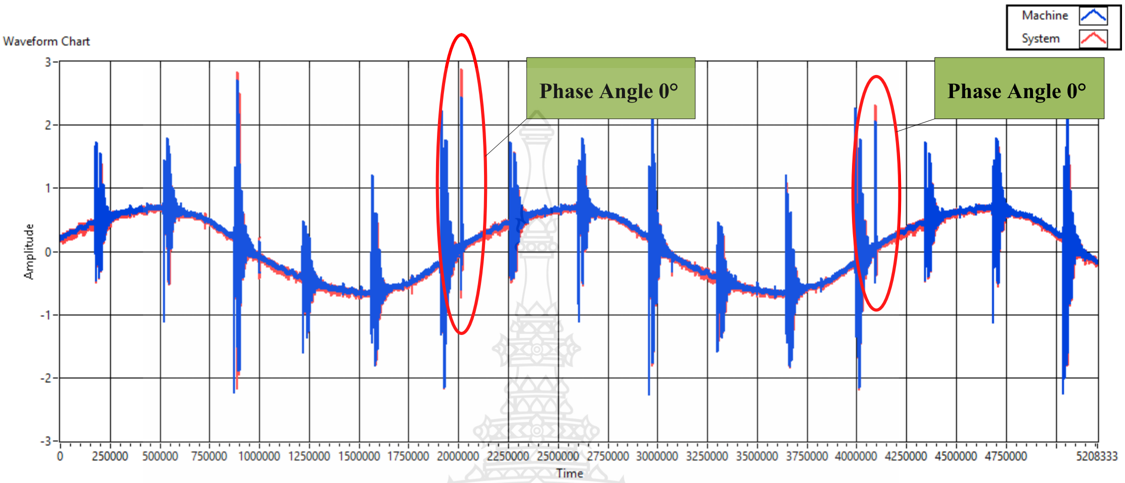
ถ้าเทียบจากตารางฐานข้อมูลความรุนแรงของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะพบว่าค่าที่วัดได้จากปี 2016 มีค่าต่ำมาก หรือ Stator Insulation อยู่ในสภาพดีเลิศ แต่ค่าที่ได้ทำการวัดเก็บข้อมูลอีกครั้งปี 2017 พบว่าค่าที่วัดได้นั้นมีค่าสูงมาก ถ้าเทียบค่าจากตารางฐานข้อมูลจะเห็นได้ว่าค่าสูงสุดอยู่ที่ 224 ซึ่งเป็นค่าที่มีความผิดปกติอย่างเห็นได้ชัด และยังพบว่ามุมเฟสของสัญญาณการเกิดดิสชาร์จนั้นเกิดขึ้นที่มุม 90° และ 270° ของเฟส A ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งมุมเฟสที่เกิดขึ้นนั้นไม่เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนซึ่งทาง IRIS POWER ENGINEERING, INC.ได้สรุปข้อมูลดังกล่าวว่า เป็นมุมการเกิดที่แตกต่างจากรูปแบบปกติและได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนดังกล่าวว่า เกิดจาก Open air arc หรือ Corona แล้วจะมีการตรวจสอบหน้างานวันที่ 1 พฤศจิกายน 2017



รูปที่ 4.1 สัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A มุม 90° และ 270° [13]

4.1.2 ผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือตรวจจับที่ออกแบบ ผลการวัดสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วย ออสซิลโลสโคปความเร็วสูง ในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2017 โดยทำการตั้งค่าอัตราการเก็บตัวอย่างสัญญาณ (Sampling rate) ที่ 100 MS/s และตั้งค่าการอ่านตัวอย่างสัญญาณ (Sample to read) ที่ 5M พบสัญญาณผิดปกติเกิดขึ้นที่มุม 0° ของเฟส A และเกิดขึ้นซ้ำกันทุก 1 ไซเคิล ซึ่งเป็นมุมที่แตกต่างจากลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน สัญญาณสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน

เกิดขึ้นที่มุม 0° จากคุณสมบัติของตัวเก็บประจุ กระแสไฟฟ้า i_c นำหน้าความต่างศักย์ v_c เป็นมุม 90° จึงเป็นมุมเดียวกันกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สัญญาณผิดปกติเกิดขึ้นที่มุม 0° ตั้งค่า Sample rate 100 M/s และ Sample to read 5M

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าเกิดความผิดปกติที่มุม 0° ในทุก 1 ลูกคลื่นจึงทำการวิเคราะห์สัญญาณที่ทำการตรวจจับได้นั้นเป็นสัญญาณที่เป็นความถี่เดียวกันกับความถี่ของบ้านเรา คือ ความถี่ 50 Hz ใช่หรือไม่โดยทำการคำนวณดังนี้

จากสูตร
$$f = \frac{1}{T}$$

ที่ความถี่ 50 Hz
$$T = \frac{1}{50\ \text{Hz}}$$

$$T = 20\ \text{mS}$$

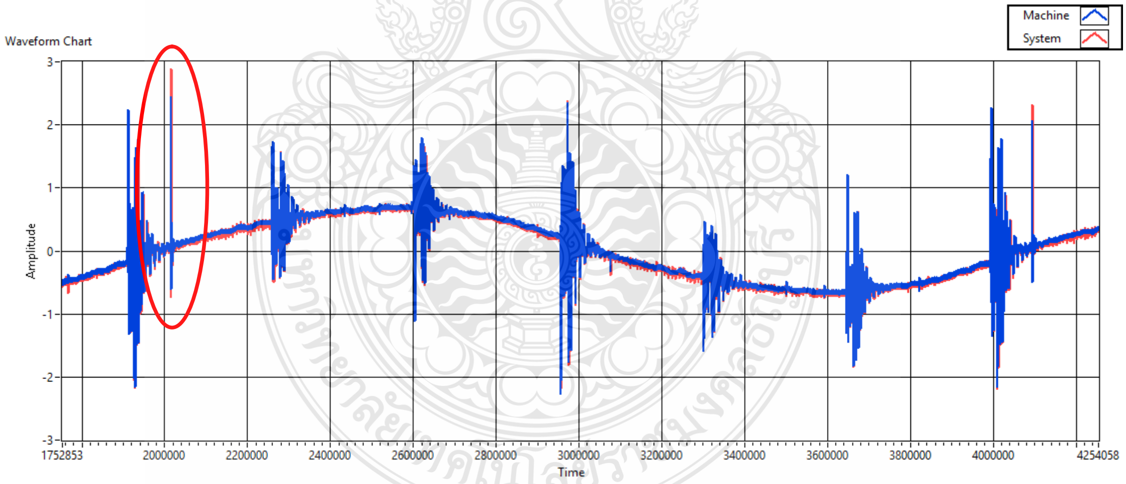
เพราะฉะนั้นใน 1 ลูกคลื่นจะมีช่วงเวลาเท่ากับ 20 mS

ค่า Sample rate 100 MS/s และ Sample to read 5M จะได้

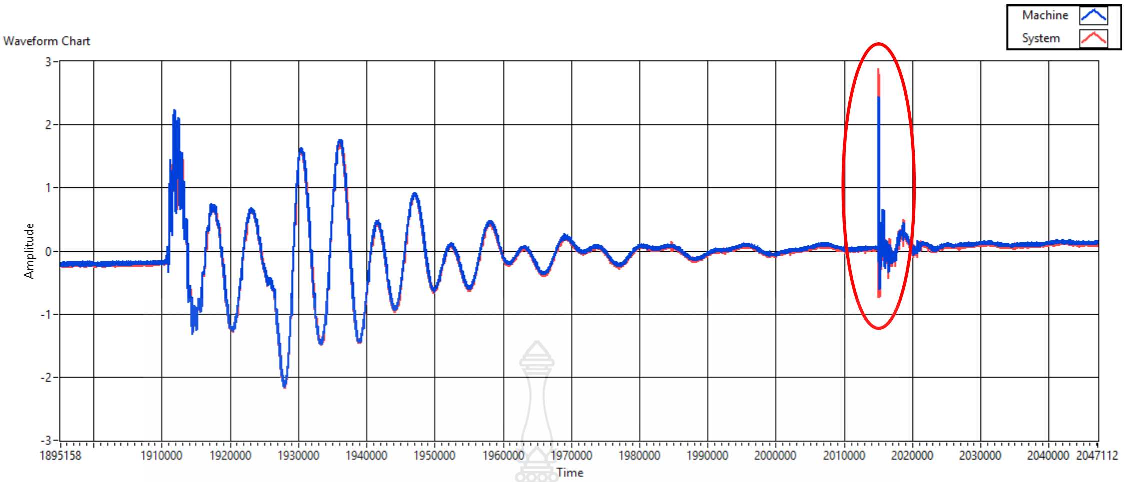
$$T = \frac{5M}{100MS/_s}$$

$$T = 50\ mS$$

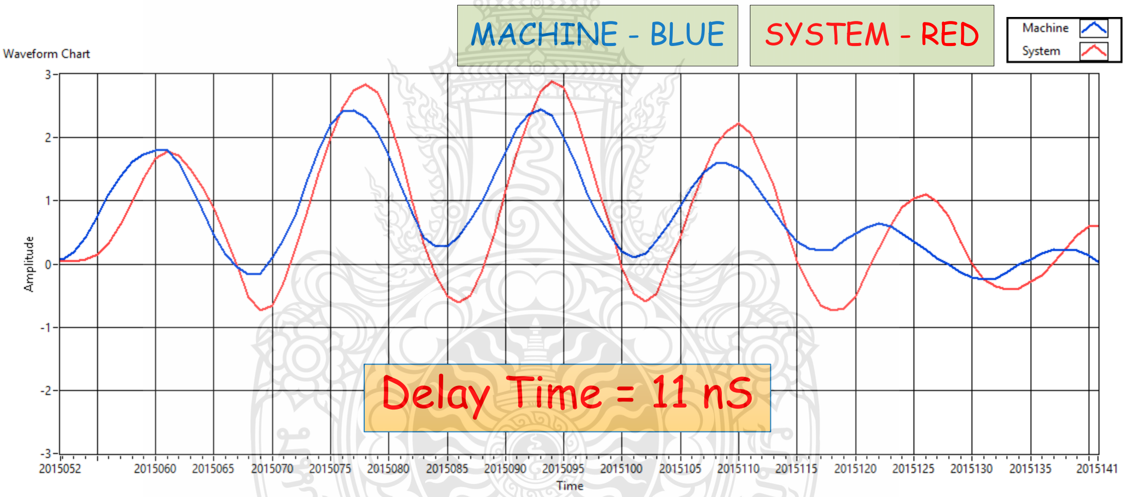
จากการคำนวณจะเห็นได้ว่าช่วงของเวลานั้นจะเท่ากับ 50 mS เมื่อนำค่าที่ได้จากการตั้งค่าของเครื่องมือวัดเทียบกับความถี่ที่ 50 Hz จะได้ลูกคลื่น 2 ลูกครึ่ง ซึ่งจะเป็นสัญญาณที่อยู่ในช่วงของความถี่เดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4.2 ทำให้สามารถตัดสินใจได้ว่าสัญญาณที่ตรวจวัดได้นั้นเป็นสัญญาณที่ถูกต้อง แต่ จากสัญญาณที่วัดได้นั้นจะเป็นสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนหรือไม่ ยังไม่สามารถสรุปได้จึงทำการขยายสัญญาณ เพื่อคำนวณหาความถี่ที่เกิดขึ้นต่อ ดังนี้



รูปที่ 4.3 การตัดสัญญาจากค่า Sample rate 100 MS/s และ Sample to read 5M มา 1 ลูกคลื่น

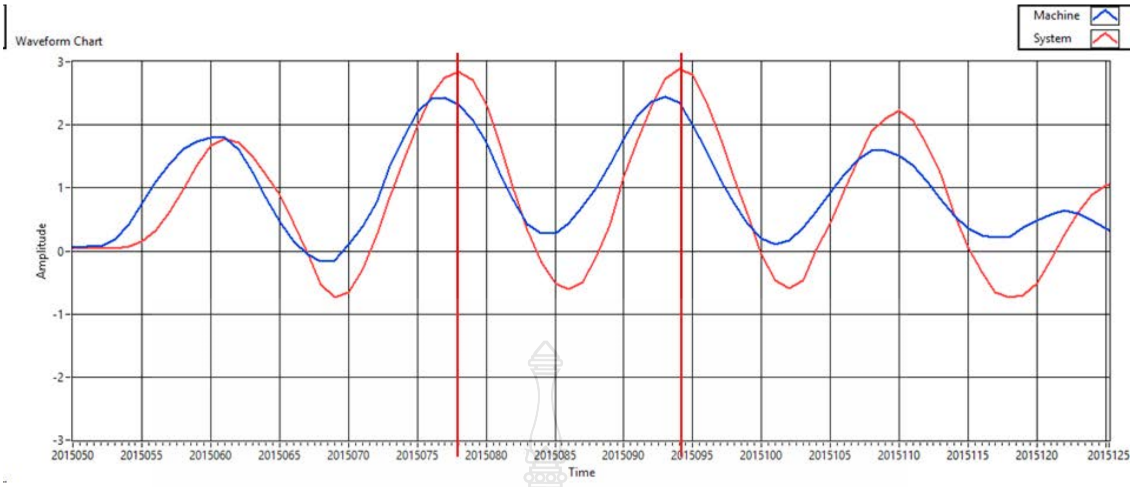


รูปที่ 4.4 การขยายสัญญาจากค่า Sample rate 100 MS/s และ Sample to read 5M ครั้งที่ 1

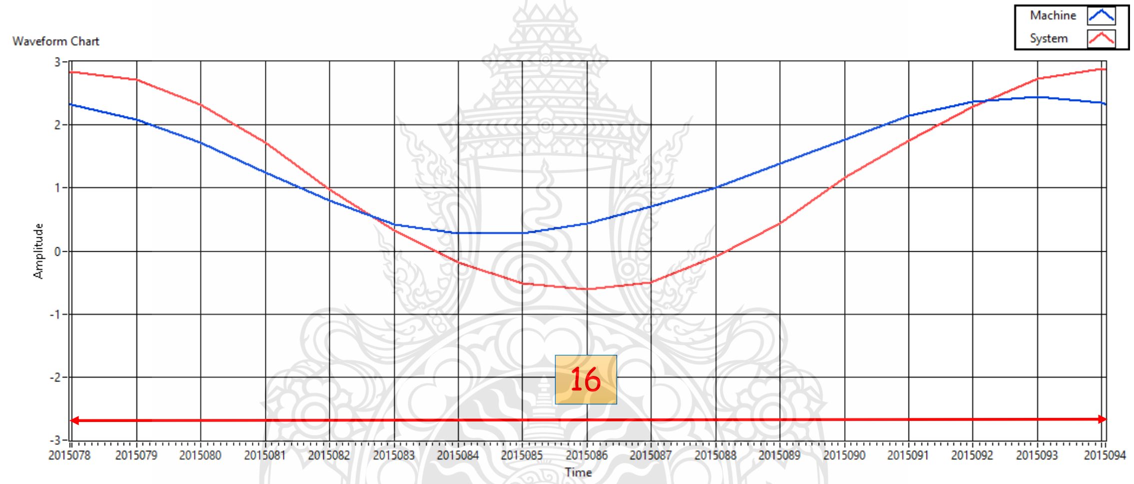


รูปที่ 4.5 การขยายสัญญาจากค่า Sample rate 100 MS/s และ Sample to read 5M ครั้งที่ 2

จากการขยายสัญญาณความผิดปกติในรูปที่ 4.3 - 4.5 จะเห็นได้ว่าเส้นสีน้ำเงิน คือ สัญญาณของด้าน Machine และเส้นสีแดง คือ สัญญาณของด้าน System ซึ่งมีค่าสูงกว่าทางด้าน Machine อย่างเห็นได้ชัดและมีค่า Delay Time อยู่ที่ 11 nS จากเทคนิคของการตรวจสอบสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีCapacitor Couplers แบบ Directional 2 PD Sensor/Phase ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นนั้นไม่ใช่สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าแน่นอน จากนั้นจึงทำการขยายสัญญาณเพื่อทำการวิเคราะห์หาความถี่ต่อ โดยทำการขยายสัญญาณช่วงยอด ถึงยอดของลูกคลื่นดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ภาพขยายสัญญาณผิดปกติจากยอดถึงยอดเพื่อหาความถี่ที่ถูกต้อง ครั้งที่ 3



รูปที่ 4.7 ภาพขยายสัญญาณผิดปกติจากยอดถึงยอดเพื่อหาความถี่ที่ถูกต้อง ครั้งที่ 4

จากการขยายสัญญาณความผิดปกติในรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าสัญญาณจากยอดถึงยอดนั้นมีข้อมูลทั้งหมดอยู่ที่ 16 ข้อมูลจึงทำการการคำนวณเพื่อหาความถี่ที่เกิดขึ้นดังนี้

จากจำนวนข้อมูลจากยอดถึงยอด 16 ข้อมูลจะได้

$$T = \frac{16}{100MS/_{S}}$$

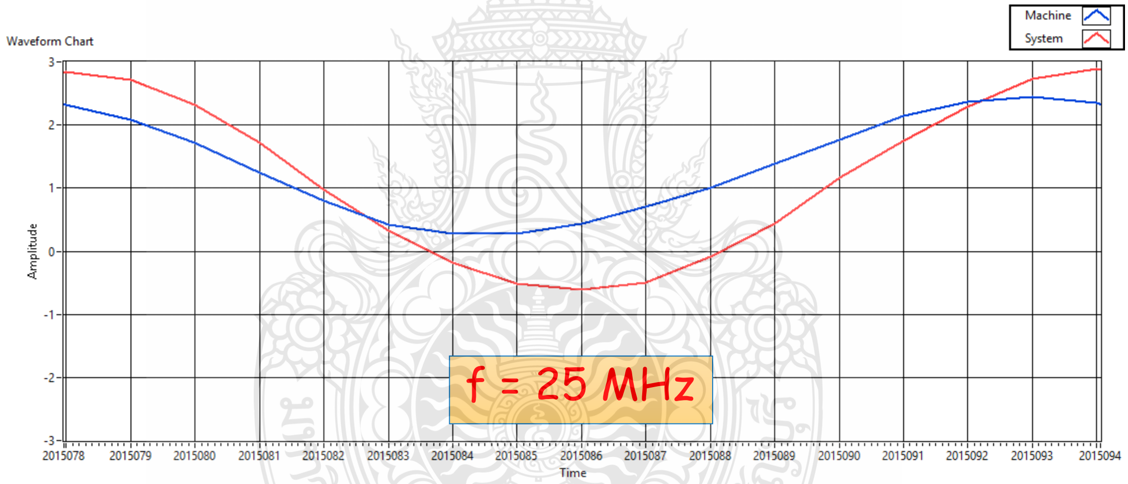
$$T = 160\ nS$$

และจากความถี่ของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจะอยู่ในช่วง 1/(4xRise Time)

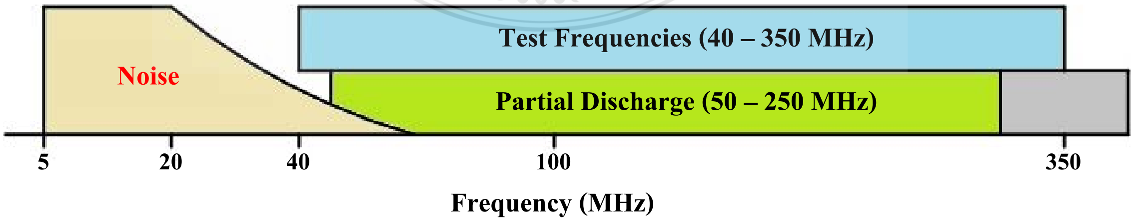
$$f_{PD} = \frac{1}{T} = \frac{1}{(4 \times \text{rise time})}$$

เพราะฉะนั้นจะได้ความถี่ที่เกิดขึ้นคือ

$$f = \frac{1}{160nS/_{4}} = 25\ \text{MHz}$$



รูปที่ 4.8 สรุปสัญญาณผิดปกติที่เกิดขึ้นมีความถี่ 25 MHz

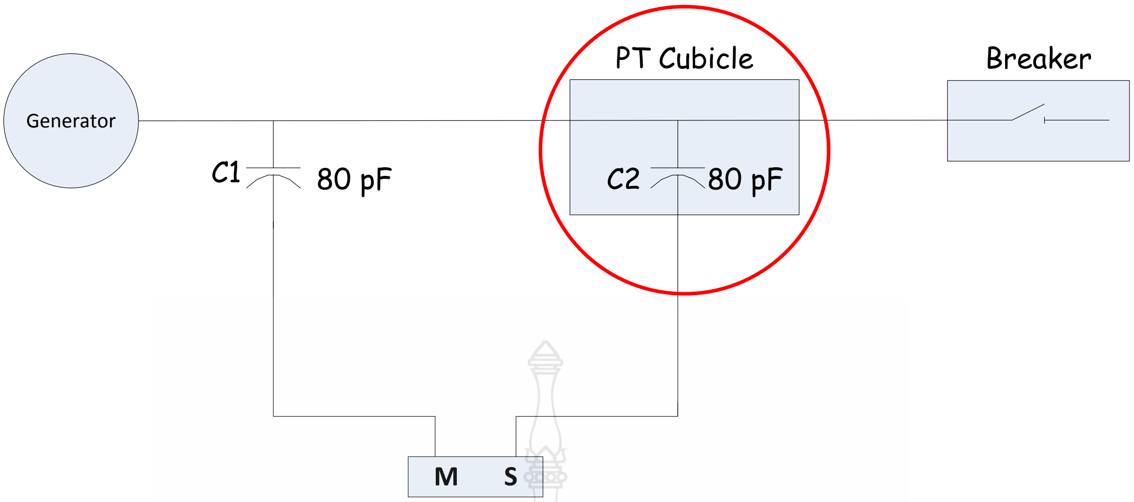


รูปที่ 4.9 ที่ความถี่ 25 MHz จะอยู่ในช่วงของสัญญาณรบกวน [10]

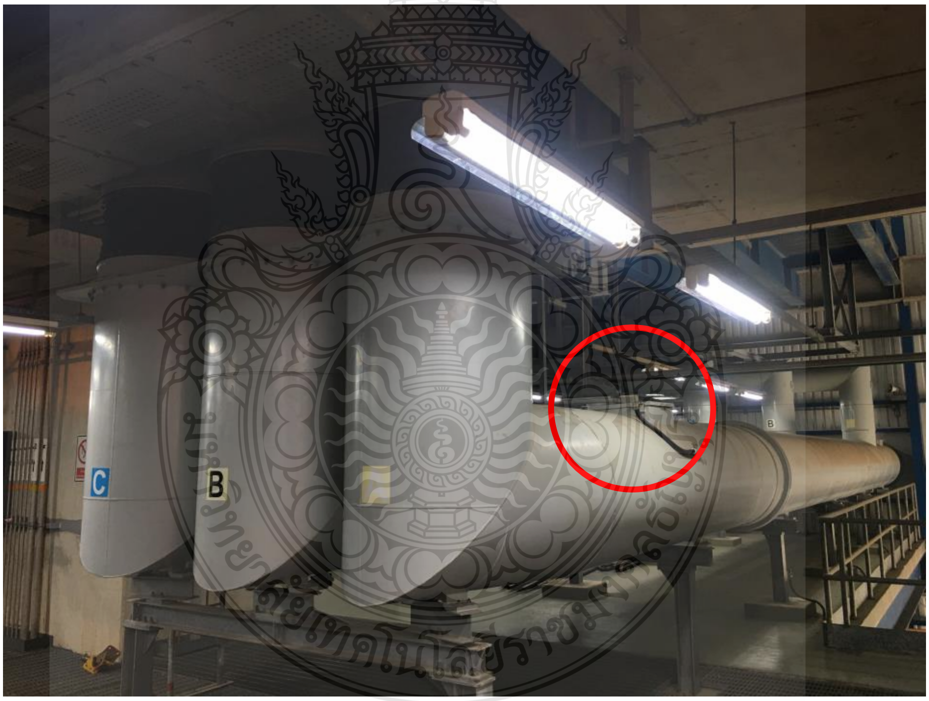
จากการคำนวณเพื่อหาความถี่ที่เกิดขึ้นสรุปได้ว่าสัญญาณที่เกิดขึ้นมีความถี่ 25 MHz และเมื่อทำการดูความถี่เปรียบเทียบกับรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าที่ความถี่ 25 MHz นั้นเป็นความถี่ที่จัดอยู่ในช่วงของสัญญาณรบกวน [8] เมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน พบว่ามีผลการวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกัน แล้วจะมีการตรวจสอบหน้างานในวันที่ 1 พฤศจิกายน 2017 เช่นเดียวกัน

4.2 ผลการตรวจสอบหาสาเหตุจากการวิเคราะห์

จากการทดสอบการเกิดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV จะเห็นได้ว่าผลการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 จากเครื่องมือวัดแบบมาตรฐานนั้นมีมุมเฟสการเกิดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่มุม 90° และ 270° ซึ่งทาง IRIS POWER ENGINEERING, INC. ได้สรุปข้อมูลดังกล่าวว่า เป็นมุมการเกิดที่แตกต่างจากรูปแบบปกติและได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนดังกล่าวว่า เกิดจาก Open air arc หรือ Corona และเมื่อเปรียบเทียบผลการวัดสัญญาณจากเครื่องมือวัดออสซิลโลสโคปความเร็วสูง ซึ่งเกิดขึ้นที่มุม 0° อันเป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของ Capacitor load และจาก EMC Reference ได้มีข้อแนะนำให้ทำการเลื่อนมุมเฟสไป 90° ตามทฤษฎี ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า มุมของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากชุดวัดและบันทึกผลที่นำเสนอ เป็นมุมเดียวกันกับผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน คือมุม 90° และ 270° และสัญญาณที่เกิดขึ้นมีความถี่ 25 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่จัดอยู่ในช่วงของสัญญาณรบกวน และในวันที่ 1 พฤศจิกายน 2560 ที่ผ่านมาได้มีงาน Minor Inspection สตรีมเทอร์ไบน์ 10 จึงได้ทำการตรวจสอบหาสาเหตุการเกิดสัญญาณผิดปกติ และมุ่งประเด็นไปในจุดที่ในส่วนของ System ในส่วนของจุดต่อทาง System C2 พบว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.10

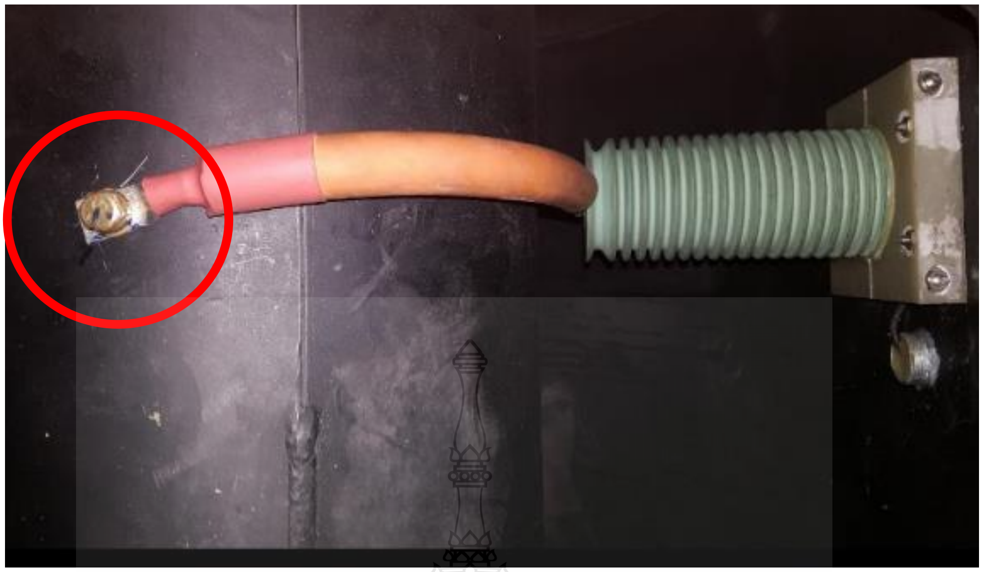


รูปที่ 4.10 จุดที่ทำการตรวจสอบหาสาเหตุของสัญญาณรบกวน



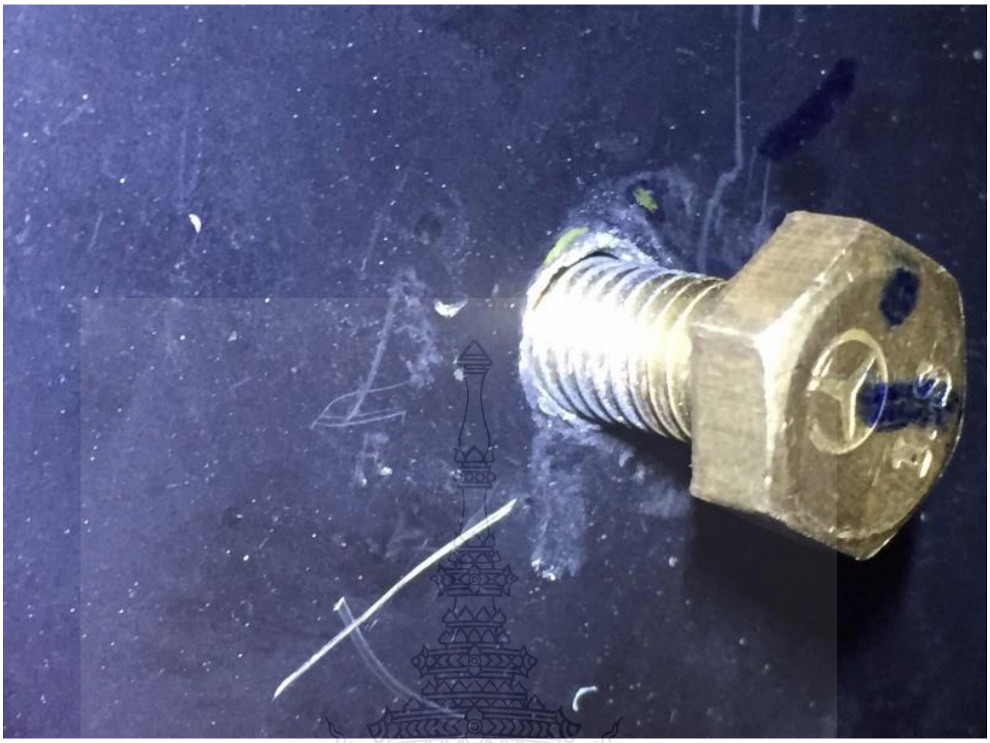
รูปที่ 4.11 จุดที่ทำการตรวจสอบหาสาเหตุที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A

จากรูปที่ 4.11 จะแสดงรูปการตรวจสอบสอบที่หน้างานของจุดที่ทางบำรุงรักษาได้ทำการตรวจสอบหาสาเหตุของสัญญาณผิดปกติ และ สามารถเจอที่มาของสาเหตุของการเกิดสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 4.12 - 4.13



รูปที่ 4.12 จุดที่พบสาเหตุของการเกิดสัญญาณผิดปกติที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A

รูปที่ 4.13 จุดที่เกิดความเสียหายของรู Isolated Phase Bus ที่ทำการการต๊าปเลียวไม่ดี



รูปที่ 4.14 สาเหตุที่มาของสัญญาณผิดปกติที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าจากการตรวจสอบหาสาเหตุหน้างานนั้น พบว่า สาเหตุที่มาของสัญญาณผิดปกตินั้น เกิดจากการเจาะรูแล้วทำการต๊าปเกลียวไม่ดี เนื่องจากเวลาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าใช้งานอยู่ จะมีทั้งความร้อนและ Vibration ตลอดเวลาจึงทำให้เกิดความเสียหาย หลังจากทำการตรวจสอบหาสาเหตุของสัญญาณผิดปกติเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ได้ทำการแก้ไข โดยการเพิ่มขนาดของน๊อตตัวผู้ให้ใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.15 พร้อมทั้งทำการขายรู Isolated Phase Bus เพื่อทำการต๊าปเกลียวใหม่จากนั้นก็ทำการติดตั้งใหม่เพื่อเตรียมความพร้อมของการใช้งานของชุดตรวจวัดสัญญาณก่อน Start up เครื่องกำเนิดไฟฟ้าดังรูปที่ 4.16

รูปที่ 4.15 การเพิ่มขนาดน๊อตให้ใหญ่ขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A

รูปที่ 4.16 การแก้ไขหลังจากตรวจพบสาเหตุที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 เฟส A

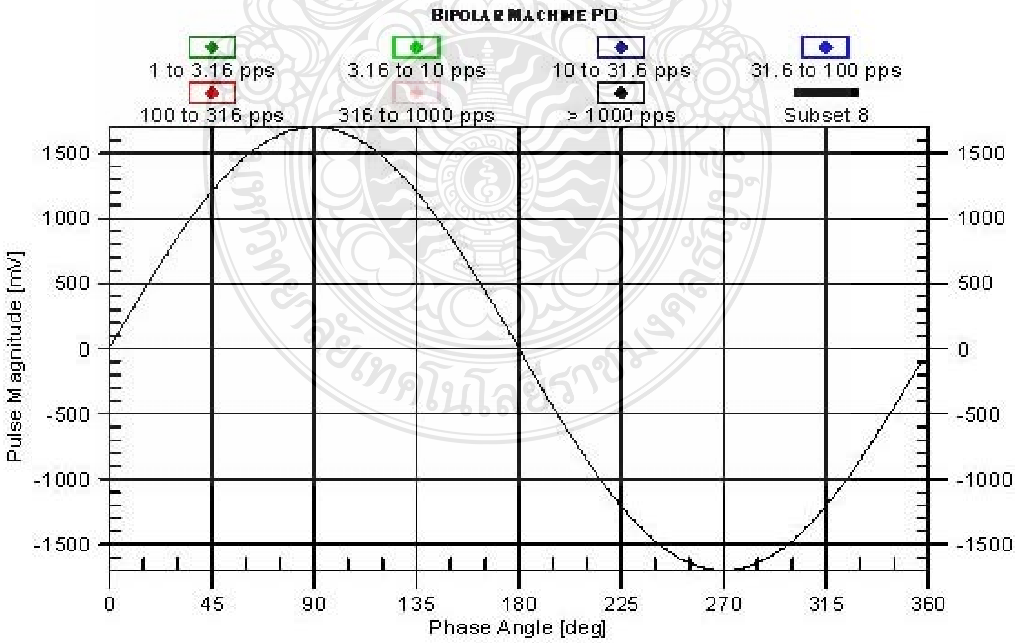
ภายหลังจากการตรวจสอบหาสาเหตุ และ ทำการแก้ไขสามารถสรุปได้ว่า สาเหตุดังกล่าวเกิดจากความผิดพลาดในการติดตั้ง และได้มีกำหนดการตรวจสอบในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2560 ด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐานอีกครั้ง

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบหลังจากที่ได้ทำการติดตั้ง Capacitor Couplers ที่ STG10 ครั้งที่ 4

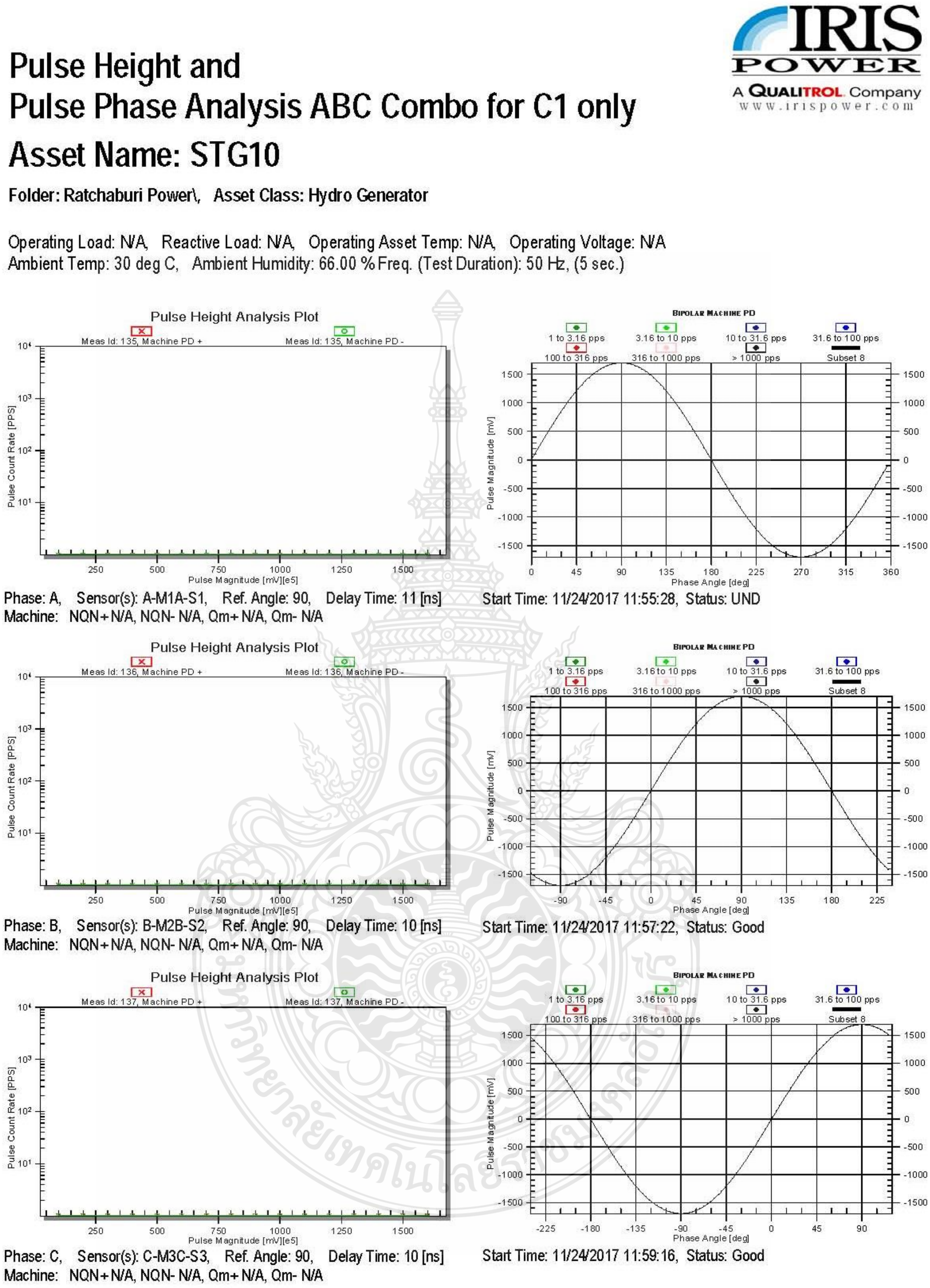
STG10

Rated (V)	>19 kV	ปี 2017					
H_2 (Psig)	31-50	Phase	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-	Status
Negligible	22	A	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
Low	49	B	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
Typical	90	C	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
Moderate	154						
High	224						

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าหลังจากการแก้ไข ได้มีการตรวจวัดเพื่อหาสัญญาณความผิดปกติอีกครั้งในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2017 ซึ่งจากตารางแสดงผลจะเห็นได้ว่าค่าที่วัดได้เมื่อเทียบค่ากับตารางฐานข้อมูลแล้วจะเห็นได้ว่า ไม่พบสัญญาณผิดปกติ และได้แสดงผลในรูปของ Phase Angle ก็ไม่พบความผิดปกติแต่อย่างใดดังแสดงในรูปที่ 4.17 และจาก Data Report ในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2017 จากบริษัท IRIS ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B หลังจากการแก้ไข [13]



Pulse Height and
Pulse Phase Analysis ABC Combo for C1 only
Asset Name: STG10

Folder: Ratchaburi Power\, Asset Class: Hydro Generator

Operating Load: N/A, Reactive Load: N/A, Operating Asset Temp: N/A, Operating Voltage: N/A
Ambient Temp: 30 deg C, Ambient Humidity: 66.00 % Freq. (Test Duration): 50 Hz, (5 sec.)

Phase: A, Sensor(s): A-M1A-S1, Ref. Angle: 90, Delay Time: 11 [ns] Start Time: 11/24/2017 11:55:28, Status: UND
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A

Phase: B, Sensor(s): B-M2B-S2, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 11/24/2017 11:57:22, Status: Good
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A

Phase: C, Sensor(s): C-M3C-S3, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 11/24/2017 11:59:16, Status: Good
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A

Iris Power LP, 3110 American Dr., Mississauga, On, Canada L4V 1T2, Phone: +1 (905)-677-4824, Fax: +1 (905) 677-8498

รูปที่ 4.18 Data Report STG 10 ในวันที่ 24 พฤศจิกายน 2017

4.3 สรุปผลการวิเคราะห์

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลของทาง IRIS และจากเครื่องมือวัดที่ทางทีมผู้วิจัยได้ทำการออกแบบและทดสอบ จะเห็นได้ว่าทั้ง 2 วิธีนั้น ผลที่ได้จากการวิเคราะห์นั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และจากการตรวจสอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสตรีมเทอร์ไบน์ 10 นั้นก็เป็นไปตามที่ทาง IRIS และทางทีมผู้วิจัยได้ได้สรุปและวิเคราะห์ข้อมูลการเกิดสัญญาณดังกล่าว ซึ่งจะสรุปผลการวิจัยและนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 5
ผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษา และ ทดสอบการเกิดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV ด้วยวิธีการติดตั้งแบบ Directional 2 PD Sensor/Phase ที่แก๊สเทอร์ไบน์ และสตรีมเทอร์ไบน์ จะเห็นได้ว่าผลการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่สตรีมเทอร์ไบน์ 10 จากเครื่องมือวัดแบบมาตรฐาน นั้นพบสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนที่มุม 90° และ 270° ซึ่งทาง IRIS POWER ENGINEERING, INC. ได้สรุปข้อมูลดังกล่าวว่า เป็นมุมการเกิดที่แตกต่างจากรูปแบบปกติและได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนดังกล่าวว่า เกิดจาก Open air arc หรือ Corona และเมื่อเปรียบเทียบผลการวัดสัญญาณจากเครื่องมือวัดออสซิลโลสโคปความเร็วสูง ซึ่งเกิดขึ้นที่มุม 0° และเกิดขึ้นซ้ำกันทุก 1 ไซเคิลอันเป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของ Capacitor load นั้นกระแสไฟฟ้าจะนำหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90° จาก EMC Reference ได้มีข้อแนะนำให้ทำการเลื่อนมุมเฟสไป 90° ตามทฤษฎี ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า มุมของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากชุดวัดและบันทึกผลที่นำเสนอเป็นมุมเดียวกันกับผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน คือมุม 90° และ 270° และสัญญาณที่เกิดขึ้นมีความถี่ 25 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่จัดอยู่ในช่วงของสัญญาณรบกวน และจากการตรวจสอบหาสาเหตุของสัญญาณผิดปกติพบว่า สาเหตุดังกล่าวอยู่ในส่วนของด้าน System ที่เกิดขึ้นจากความผิดพลาดในการติดตั้ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทำวิทยานิพนธ์เรื่องการตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า พิกัด 21 kV กรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของบริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด ผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะดังนี้

5.2.1 ชุดเครื่องมือวัดและบันทึกผลที่นำเสนอ สามารถนำไปออกแบบ เพื่อใช้ทดแทนการตรวจสอบด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐานได้

5.2.2 เป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน นำไปใช้เพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

5.2.3 สามารถลดจำนวนครั้งในการใช้เครื่องมือมาตรฐาน

5.2.4 สามารถลดค่าใช้จ่าย และ ลดเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูล

5.3 งานวิจัยที่เกี่ยวเนื่องในอนาคต

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้มุ่งเน้นไปที่การออกแบบเครื่องมือวัดที่สามารถทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลในเบื้องต้น เพื่อทำการหาข้อมูลถึงที่มาที่ไปของผลการวัดจากผู้เชี่ยวชาญ และจากค่า Sampling rate และ Sampling to read ที่ได้ออกแบบและวิเคราะห์นั้นสามารถสรุปได้ว่า ผลการทดสอบและวิเคราะห์นั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน ซึ่งในงานวิจัยต่อไปนั้นน่าจะนำข้อมูลพื้นฐานจากงานวิจัยนี้ไปสร้างเครื่องมือวัดที่มีราคาถูกกว่า เครื่องมือวัดมาตรฐาน และที่สำคัญที่สุดจะต้องสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นได้ เพื่อเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในอนาคต ต่อไป

บรรณานุกรม

[1] นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ธเนศ วอทอง "การตรวจสอบเฝ้าติดตามการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัส ขนาด 15.75 kV 211.75 MVA" The 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31) หน้า 243-246.

[2] G. Ujvari, G. Pascoil, C. Kral, C. Kollmitzer "Partial Discharge Pattern Recognition Algorithm for Turbo Generator Monitoring" 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, pp.1-6, Sept 2005.

[3] Gert Pascoli, Wolfgang Hribernik, Gusztav Ujvari, Bernhard Fruth "Partial Discharge Diagnosis of Generator Insulation System – Measurement, Simulation and Picture Recognition" IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electrical and Drives, pp.475-479, Sept 2007.

[4] Hee-Sang Shin, Jae-Chul Kim "A study on partial discharge signals and noises at on-line generator stator windings" Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, pp.1-4, Oct 2009.

[5] P. G. S. Kumar, J. Amarnath, B. P. Singh "Partial Discharge in Stator Winding Insulation of Turbine Generators – A case study and remedies", pp.1-5, Dec 2011.

[6] Djoko Darwanto, Deny Hamdani, Didik Dwi Hariyanto, Otto Hari Karyawan "Statistical analysis of partial discharge characteristics for predictive maintenance of generator of geothermal power plant" IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp.1003-1006, Dec 2011.

[7] สำรวย สังข์สะอาด. 2549. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. พิมพ์ครั้งที่ 3, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

[8] IEEE 1434: 2014, " IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electrical Machinery."

[9] IEC 60034-27, Clause 5 Measuring Tech & Instruments

[10] IRIS POWER. PD Seminar – Module 1: Basic PD Theory, Detection and Characteristics.

[11] V. Warren and H. Sedding, Qualitrol - Iris Power, Partail Discharge Testing: A Progress Report Hydrogen-Cooled Windings.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[12] IRIS POWER PD Seminar – Module 4: Data Collection Using TGA/PDA-IV Instruments.

[13] Power Testing Product “Partial Discharge Report Executive Summary” 24th Feb 2017.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

DEVICE SPCIFICATIONS NI PXle-5160

DEVICE SPECIFICATIONS

NI PXIe-5160

2.5 GS/s, 10-Bit Digitizer

This document lists the specifications for the NI PXIe-5160, 500 MHz digitizer.

Unless otherwise noted, the following conditions were used for each specification:

- All vertical ranges
- All bandwidths and bandwidth limit filters
- Sample rate set to 1.25 GS/s or 2.5 GS/s
- Onboard Sample clock locked to onboard Reference clock

Warranted specifications describe the warranted, traceable product performance over ambient temperature ranges of 0 °C to 45 °C and include guardband for measurement uncertainty, unless otherwise noted. Specifications are warranted under the following conditions:

- The NI 5160 module is warmed up for 15 minutes at ambient temperature
- Self-calibration is completed after warm-up period
- Calibration cycle is maintained
- The PXI Express chassis fan speed is set to HIGH, the foam fan filters are removed if present, and the empty slots contain PXI chassis slot blockers and filler panels. For more information about cooling, refer to the *Maintain Forced-Air Cooling Note to Users* document available at *ni.com/manuals*.
- NI-SCOPE 4.1 or later instrument driver is used
- External calibration is performed at 23 °C ± 3 °C

Typical specifications are unwarranted values that are representative of measurements taken during development or production and cover the expected performance of units over ambient temperature ranges of 0 °C to 45 °C with a 90% confidence level.

Characteristic values (or supplemental information) describe additional information about the product that may be useful, including expected performance that is not covered under *Warranted* or *Typical* values.

Specifications are subject to change without notice. For the most recent NI 5160 specifications, visit *ni.com/manuals*.

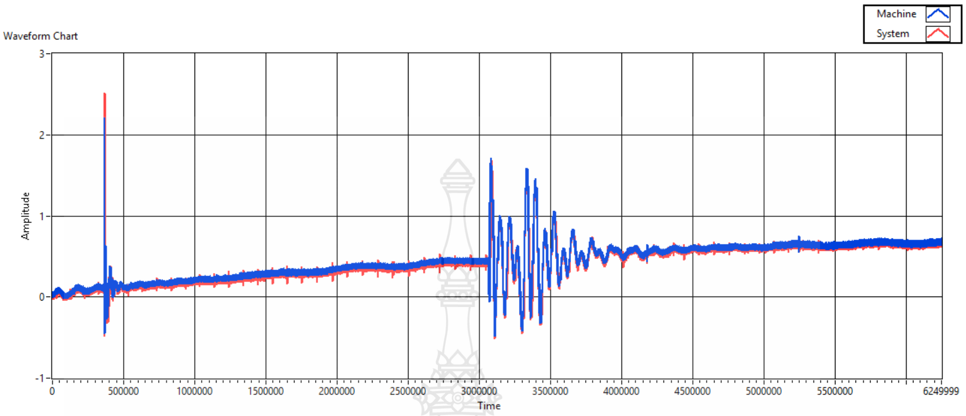
NATIONAL INSTRUMENTS

ภาคผนวก ข

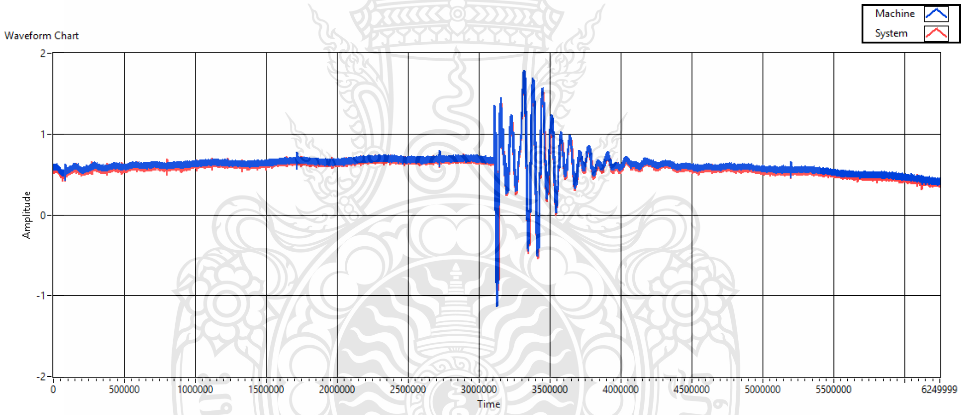
ผลการทดสอบด้วยด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 ทั้ง 3 เฟส

การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส A

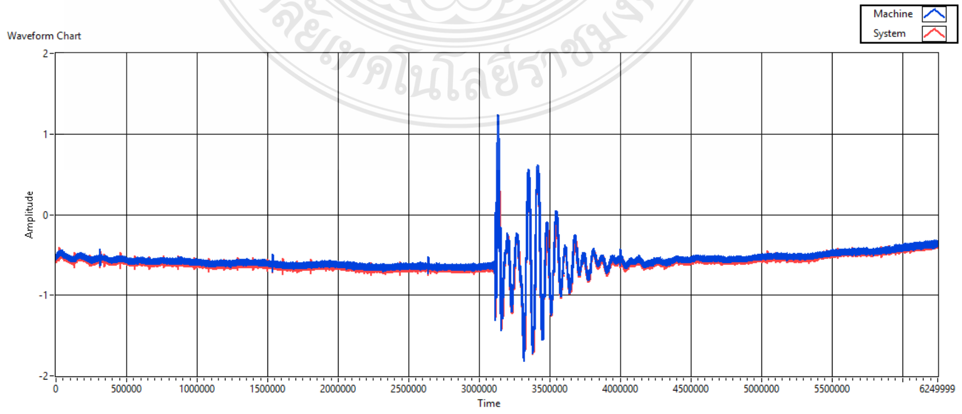
ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 1GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 1



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 1GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 2

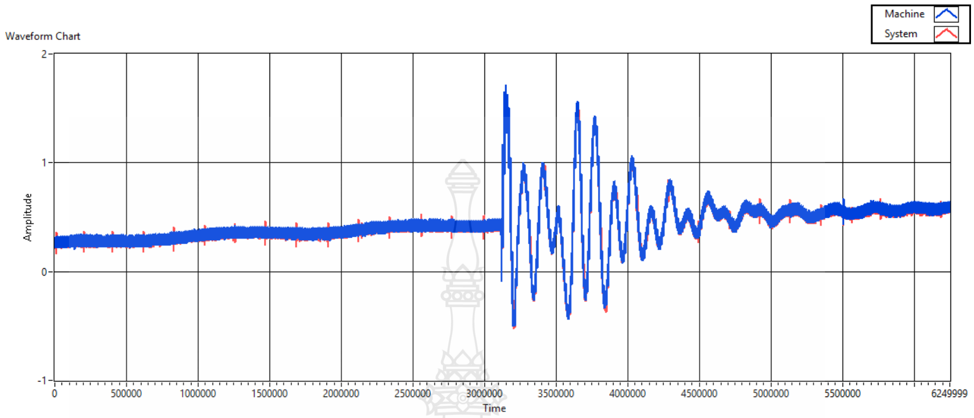


ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 1GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 3

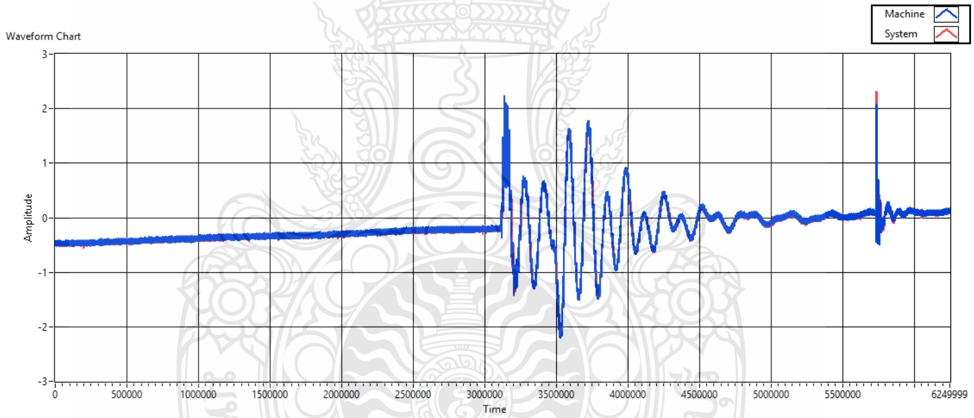


การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส A

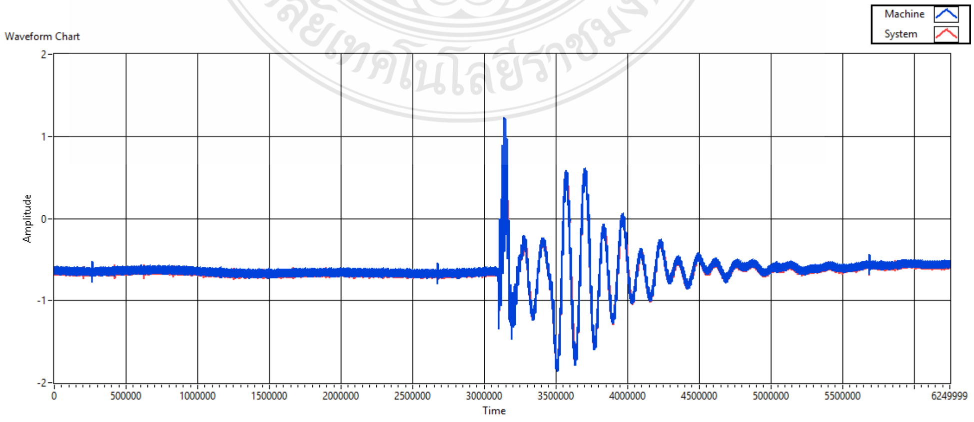
ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 2GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 1



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 2GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 2

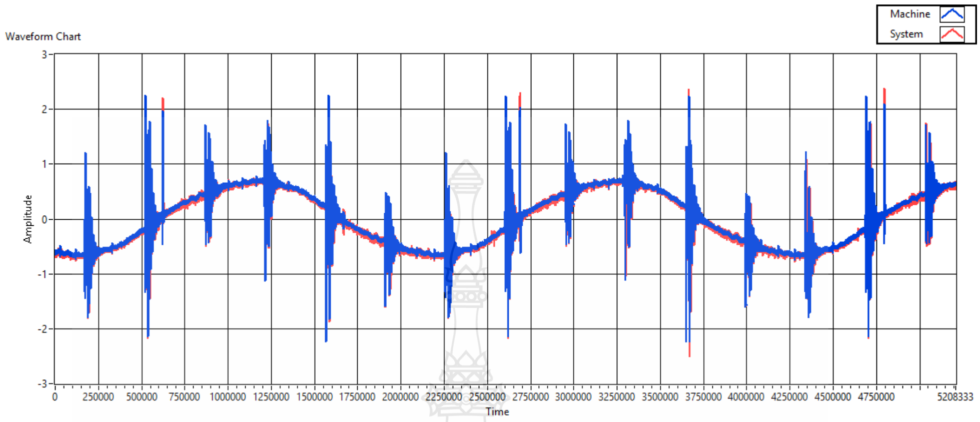


ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 2GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 3

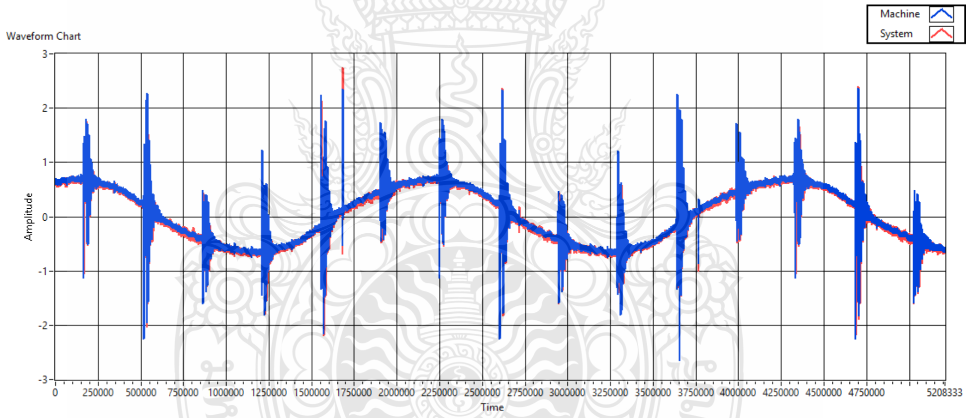


การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส A

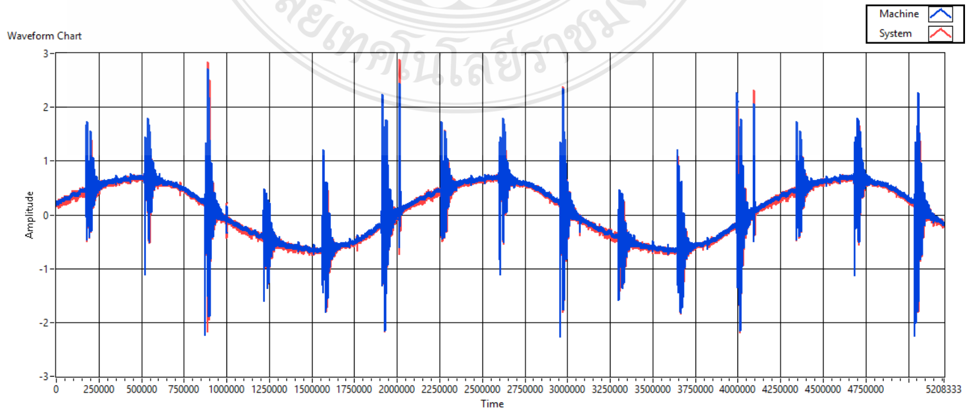
ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 1



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 2

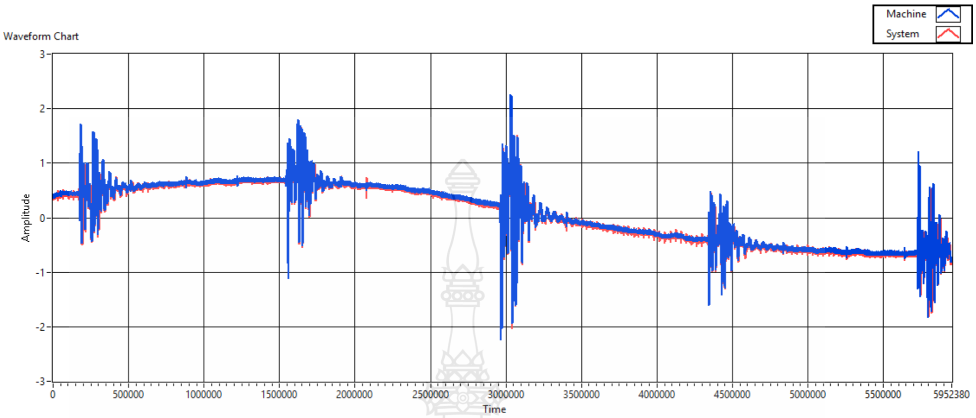


ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 3

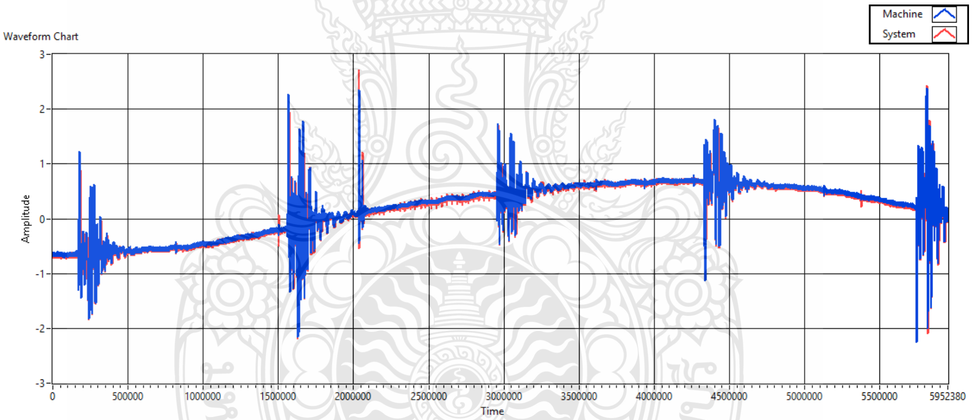


การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส A

ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 10M ครั้งที่ 1

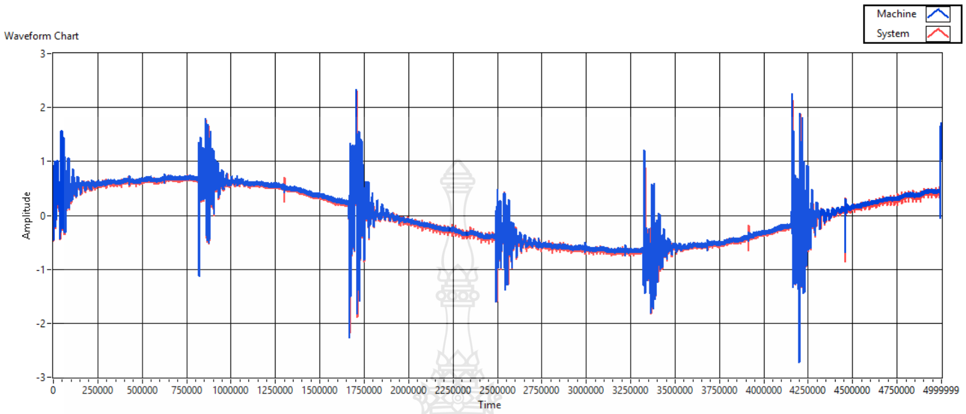


ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 10M ครั้งที่ 2

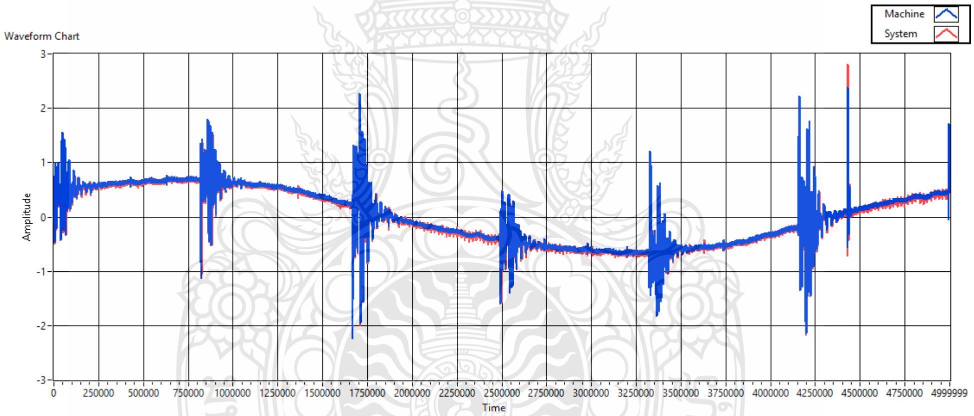


การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส A

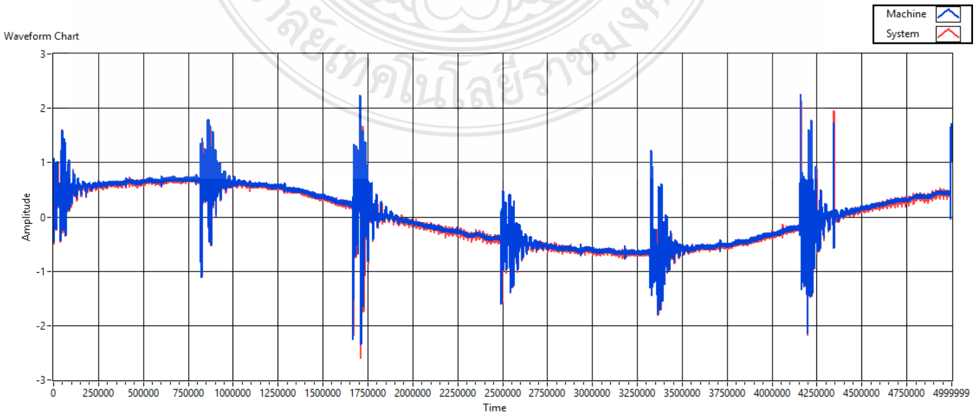
ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 250MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 1



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 250MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 2

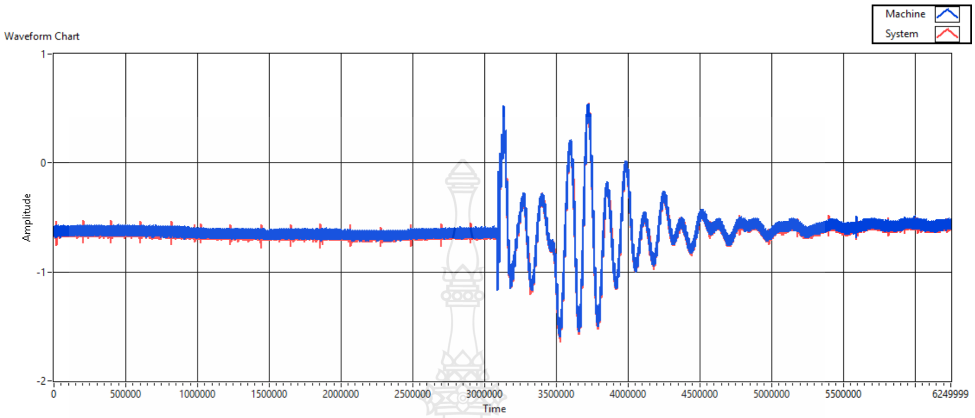


ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 250MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 3

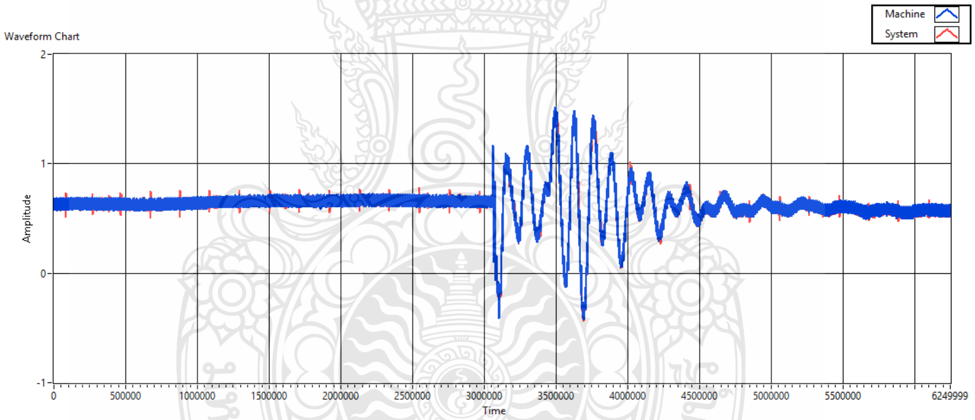


การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส B

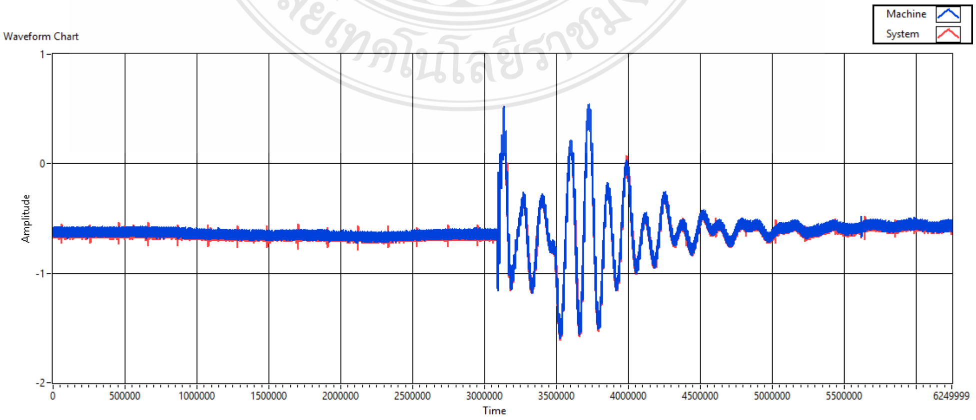
ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 2GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 1



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 2GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 2

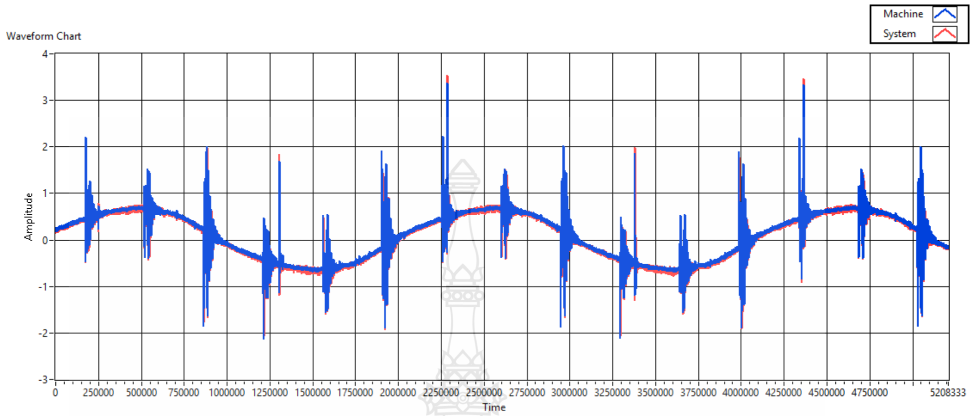


ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 2GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 3

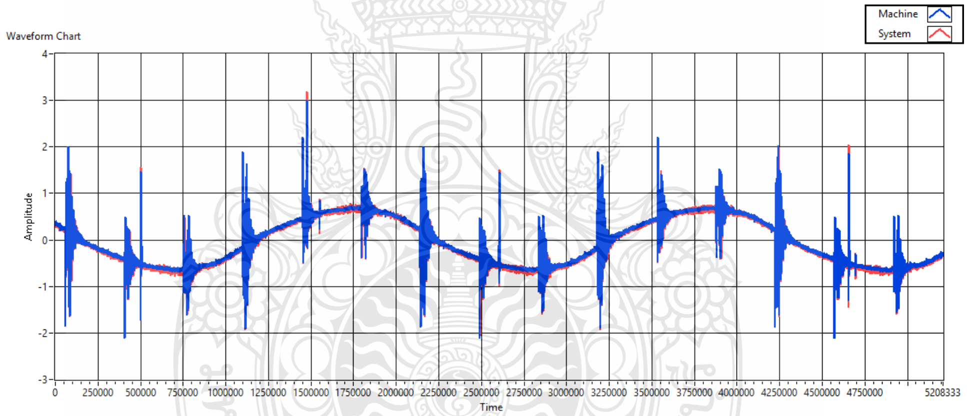


การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส B

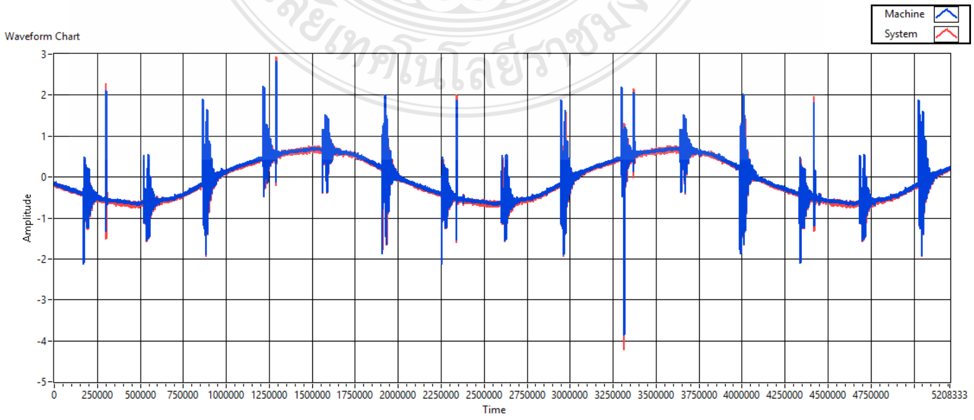
ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 1



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 2

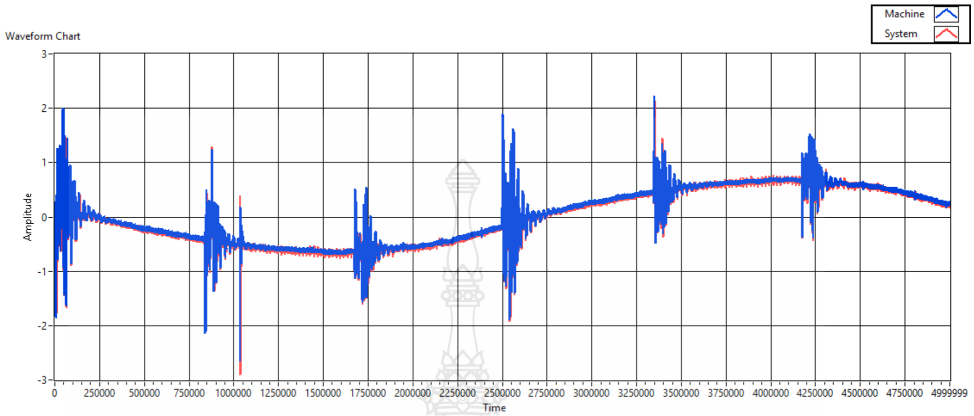


ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 3

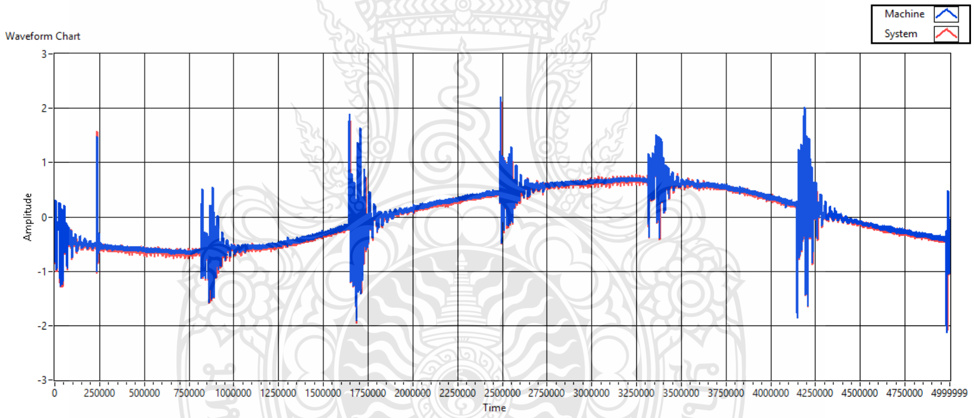


การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส B

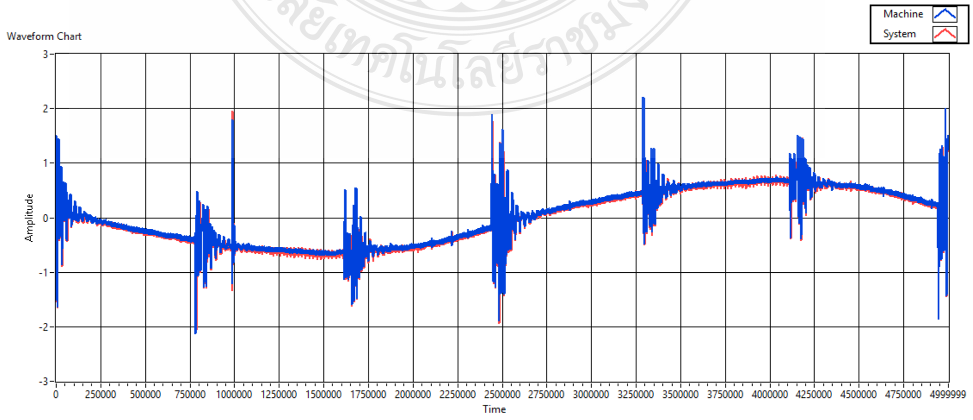
ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 250MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 1



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 250MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 2

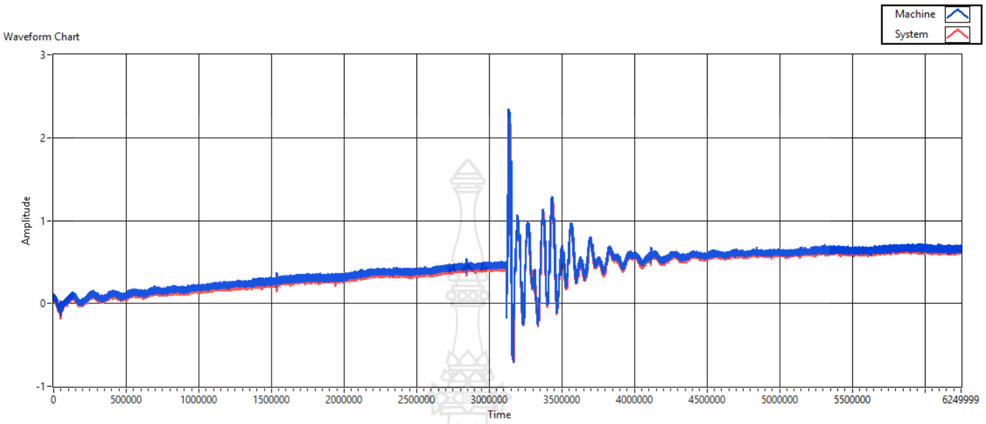


ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 250MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 3

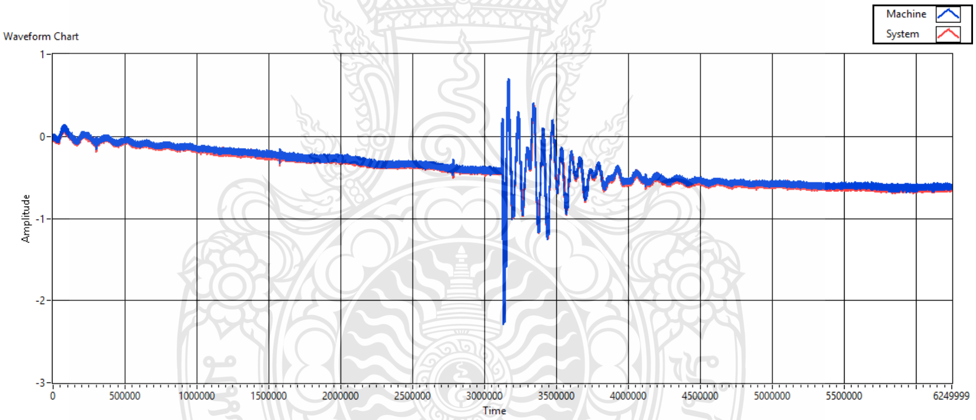


การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส C

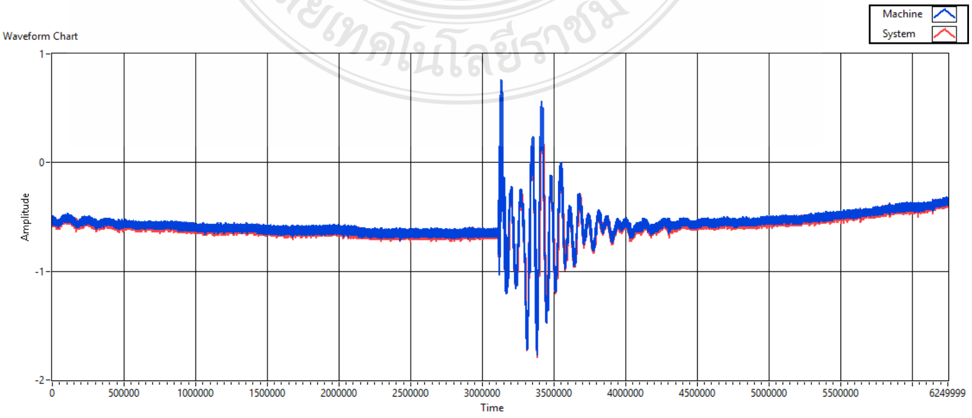
ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 1GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 1



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 1GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 2

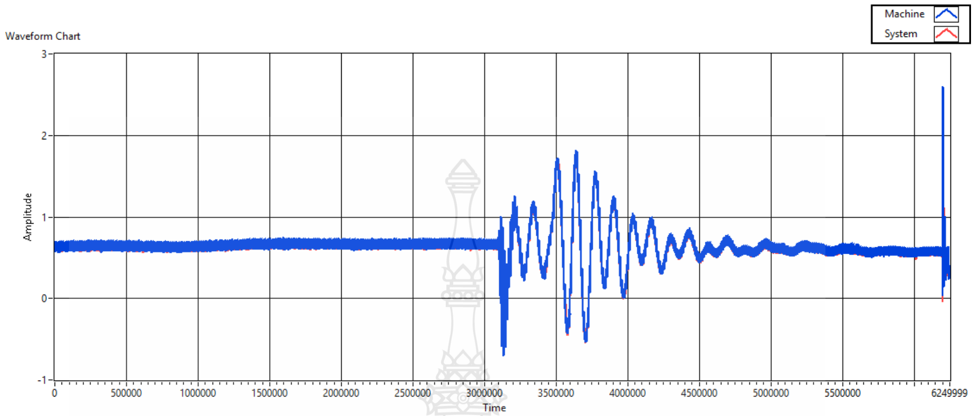


ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 1GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 3

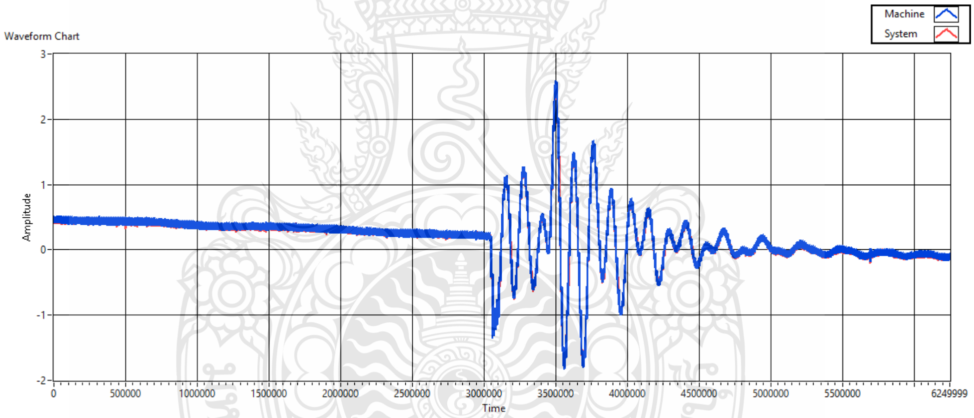


การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส C

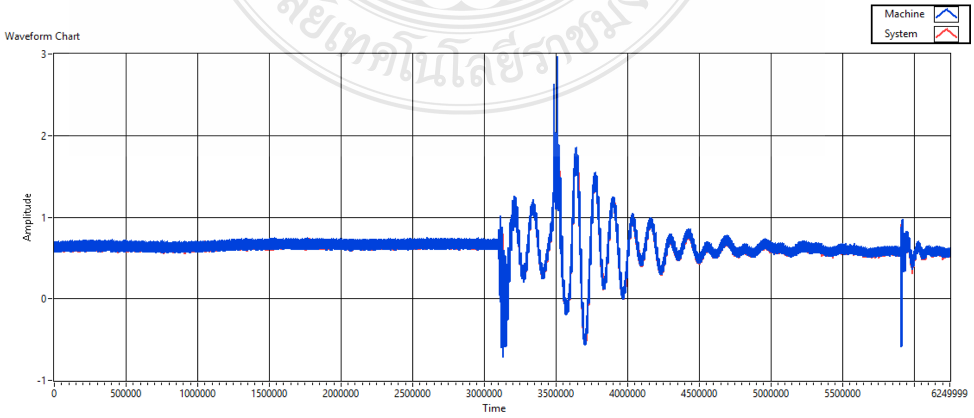
ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 2GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 1



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 2GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 2

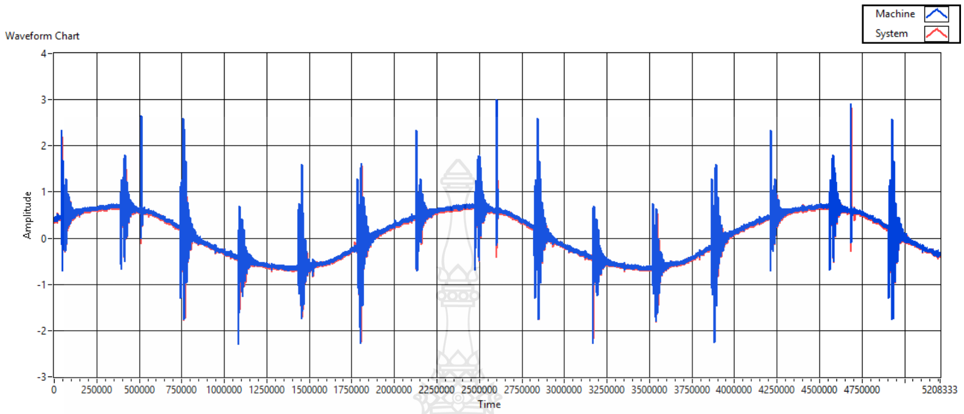


ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 2GS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 3

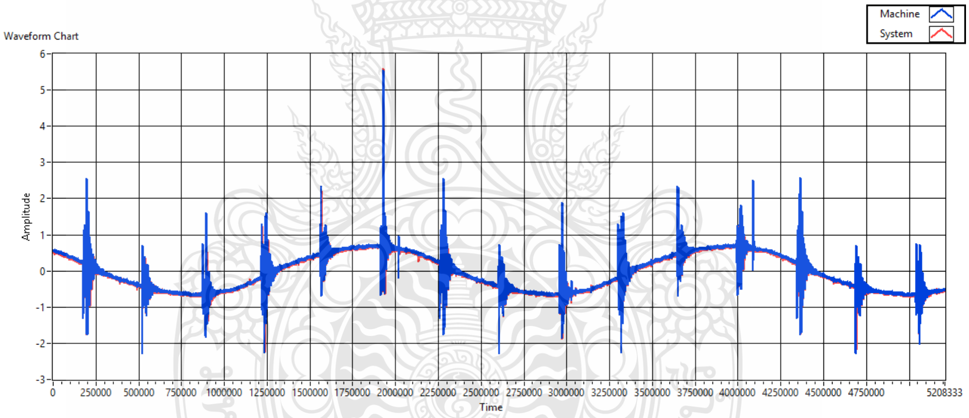


การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส C

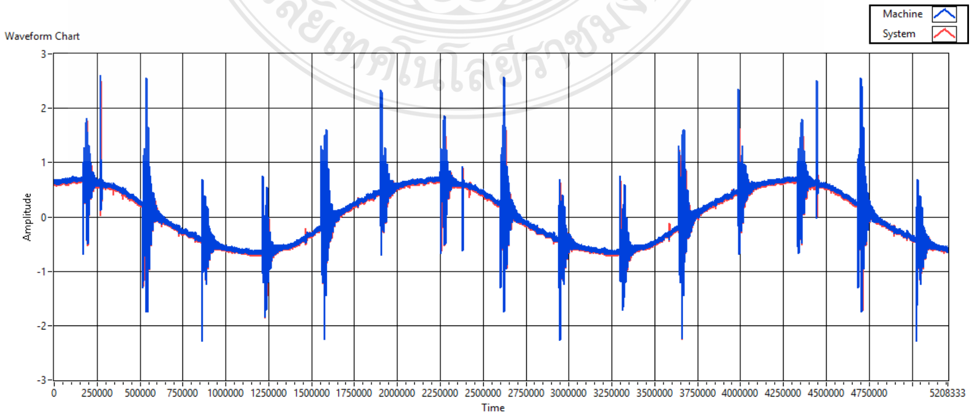
ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 1



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 2

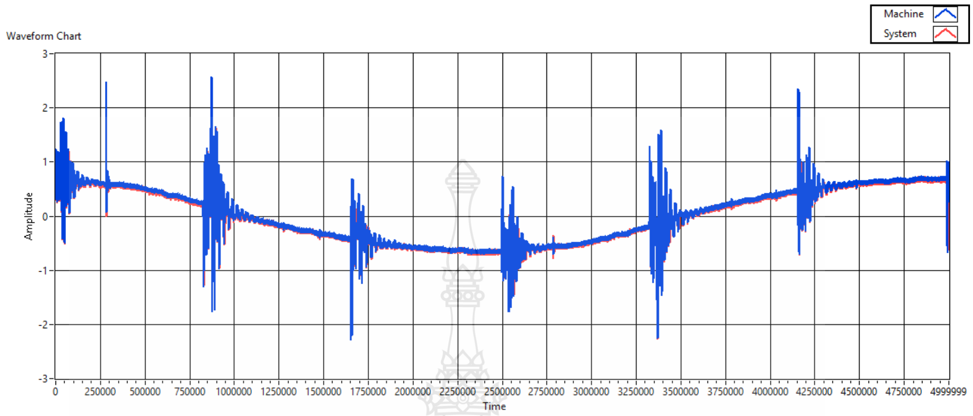


ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 100MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 3

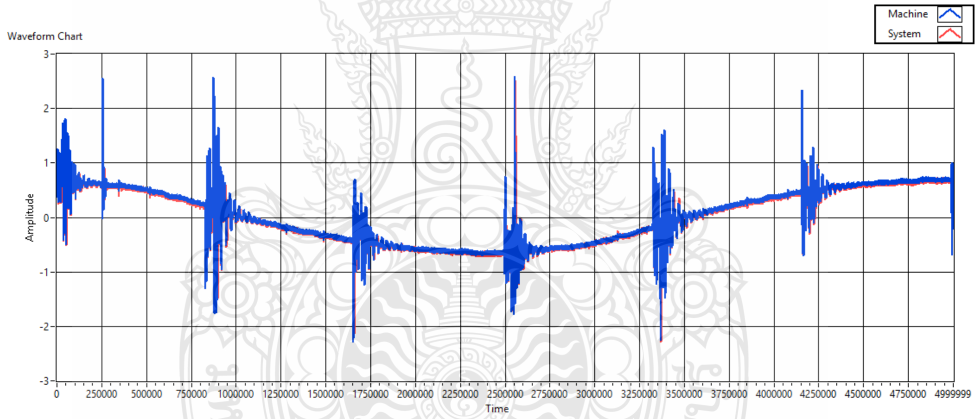


การทดสอบด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงที่ STG10 เฟส C

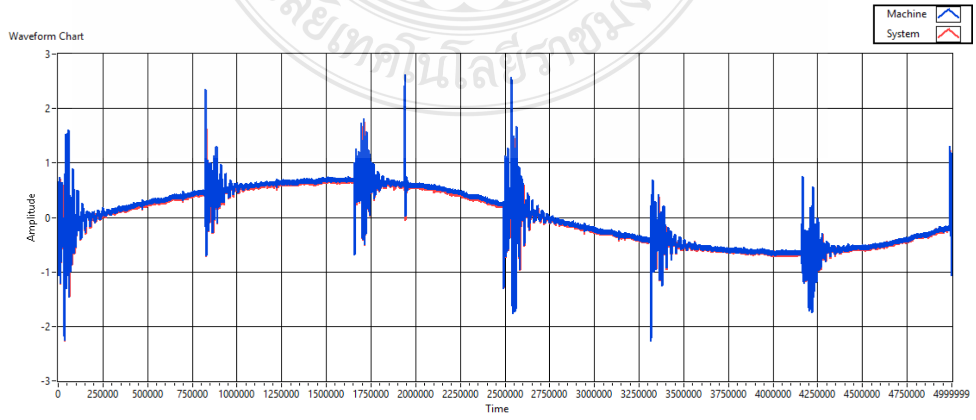
ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 250MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 1



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 250MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 2



ผลการทดสอบด้วยค่า Sample rate ที่ 250MS/s และ Sample to read ที่ 5M ครั้งที่ 3



ภาคผนวก ค

Partial Discharge Report Executive Summary 24th November 2017

Partial Discharge Report
Executive Summary

STG 10

3rd MEASUREMENT (24 November 2017)

PTP

Power Testing Product Co.,Ltd
โทรศัพท์ : 0 2447 6228 โทรสาร : 0 2447 6229
E-mail : sales@ptp.co.th

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

CONTENT

EXECUTIVE SUMMARY 3

PARTIAL DISCHARGE ANALYSIS STG 10 13

Test Result 14

STG 10 PULSE HEIGHT AND PHASE ANALYSIS ABC COMBO FOR C1 ONLY 20

APPENDIX A: PD DATA STATISTIC SUMMARY 22

APPENDIX B: PD CHARACTERISTICS 23

APPENDIX C: PD PATTERNS 25

APPENDIX D: COMPARE TEST RESULT WITH SIMILAR MACHINES 30

APPENDIX E: STANDARD FOR 10 PULSES COUNT PER SECOND (PCS) 31

Executive Summary

Introduction

Partial discharges (PD) are the occurrence of electrical sparks in the insulation of stator windings. PD wills occurs in air gaps or voids inside insulation or on surface of the insulation. The normal stator windings will have low PD value, but because the stator winding will deteriorate along winding vibration, working at high temperature, contamination from oil, moisture and chemicals, will incur a higher PD.

The optimum and most accurate PD measurement way is using on-line PD monitoring system that can detect the main root causes of stator winding failure easily. The on-line PD monitoring systems can alert those disorders that occur in the stator windings, and will very useful for maintenance and operation department of the power plant. Predictive maintenance programs will involve, which will not be a problem caused severe damage to the generator. And not cause down time outage.

Back in 1940s, Westinghouse is the first company that developed PD measurement method in their laboratory. After that Ontario Hydro is the first utility that make the real application of PD measurement for their power plant since 1970. In 1990, Dr. Greg Stone (Chairman of IEEE and IEC Committee of Rotating Machine), had established IRIS company. IRIS company had been affiliated by Ontario Hydro, EPRI, and CEA for developing PD measurement system. Now PD measurement system from IRIS had been installed more than 60,000 sets around the world.

Why Test for Partial Discharge?

The main and most important reason is that in utilities or industrial plant, we must prevent generators and motors from failure in service. For typical of failure in generators and motors can be classified it in three main categories.

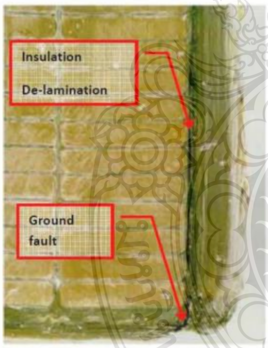
1. 50% due to bearing and vibration problem.
2. 40% due to stator insulation problem
3. 10% due to rotor problem

The most reliable method in order to prevent machine from failure is to use "Predictive Maintenance (Condition Based Maintenance). In case that occur stator insulation failure, the

damage level and repair cost will be very high when compare to vibration or rotor problem. As see in picture below, generator has stator winding insulation failure, and this make a long repairing time and costly machine repair could result.

Cause of Partial Discharge

There are many causes of Partial Discharge, below are few examples.



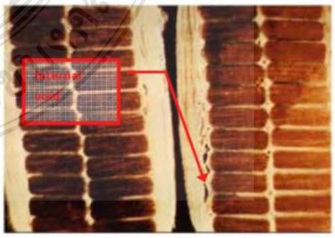
Thermal Deterioration

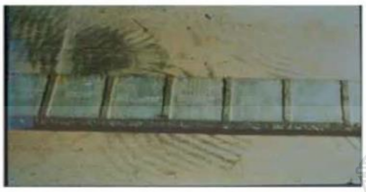
Loss of mechanical strength due to overheat, over loading, defective cooling, unbalance voltage.

This will cause insulation de - lamination, conductor vibration, and PD occurs in voids.

Poor Impregnation

Poor impregnation caused by improper manufacturer. This will form void inside insulator and PD will attack insulation





Loose Winding

Loose winding is caused by magnetic force between bar and between rotor and stator winding. When occur loose winding, bars move relative to core, and PD occur in slot

Inadequate Spacing

With poor design, inadequate spacing will cause phase - to - phase partial discharge. PD will produce ozone and nitric acid as can be seen as white powder in picture.

Partial Discharge Testing – THE NEW TECHNOLOGY FROM IRIS

As partial discharge is flash in voids in insulation, it has extremely fast rise time (1 - 5 ns). It is difficult to measure these PD signals. And the most difficult is how to separate PD signal from noise in system. IRIS has an advance technology that can cover all five main goals as follows:

1.PD measurement system must separate noise from PD signal

2.PD measurement system must tell how many voids in the insulation

3.PD measurement system must tell the size of voids in the insulation

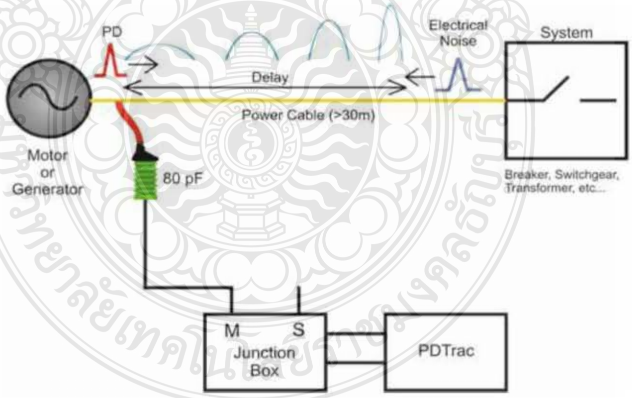
4.PD measurement system must tell where the PD occur

5.PD measurement system must tell how serious of PD in the insulation

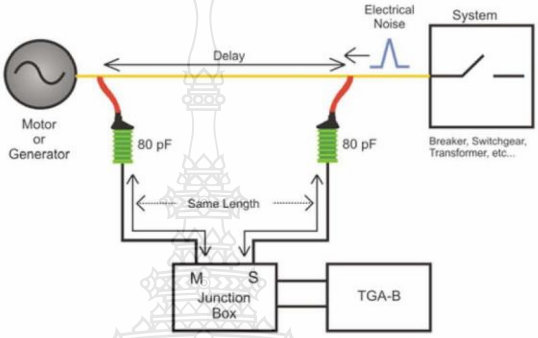
1. PD measurement system must separate noise from PD signal

In the past, when we do not have advance technology, only experts that can interpret PD measurement because of a lot of noise will mix up with PD signal. But with new technology from IRIS, we can separate noise from PD signal. The new technology call "Directional Time of Arrival" and this is Patent to IRIS.

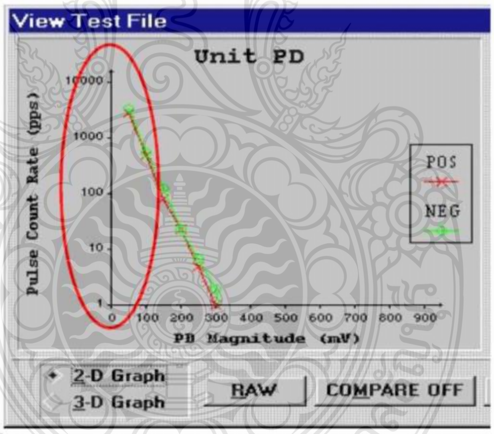
1. One Sensor per phase installation. This shall be used in case that the connection between generator and system (switchgear or gen - transformer) is power cable. If power cable is longer than 30m, noise from system will attenuate in cable. In this case one sensor will be installed at generator terminal as shown in picture below



2. Two Sensors per phase installation. From picture below, if connection between generator and system is bus bar, there will be both PD signal from generator and noise from system. While install two 80pF sensors per phase as shown, the PD signal and noise will arrive the TGA - B measurement instrument at different time. By this method we can separate noise from PD Signal

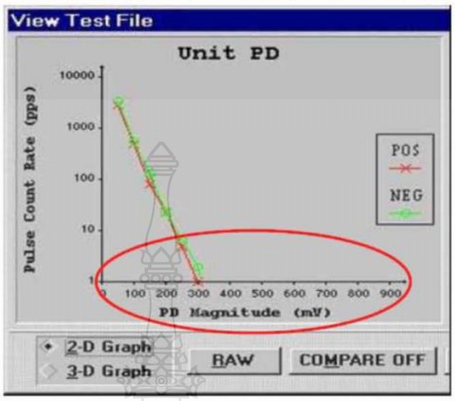


2. PD measurement system must tell how many voids in the insulation



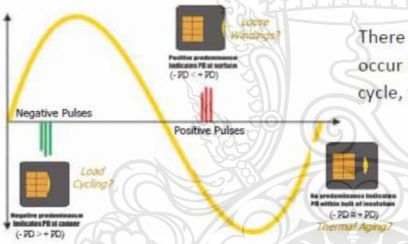
From PD measurement result above, the Y axis refer to pulse count rate or number of flash over in the insulation. This number will tell how many voids in the insulation.

3. PD measurement system must tell the size of voids in the insulation

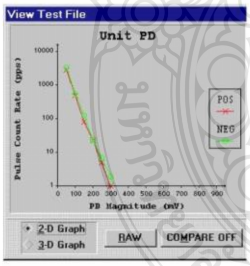


On horizontal axis is PD magnitude. Larger voids will have higher of PD magnitude. This will refer to size of voids in insulation.

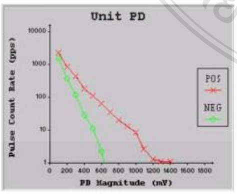
4. PD measurement system must tell Where PD occur



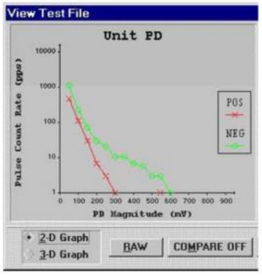
There are two PD categories. On the first half cycle, when occur PD we call Negative PD. When PD occur in second half cycle, we call Positive PD.



If measurement result show that Negative PD (green line) and Positive PD (red line) has the same or almost the same, this mean that majority of PD occur in stator insulation.

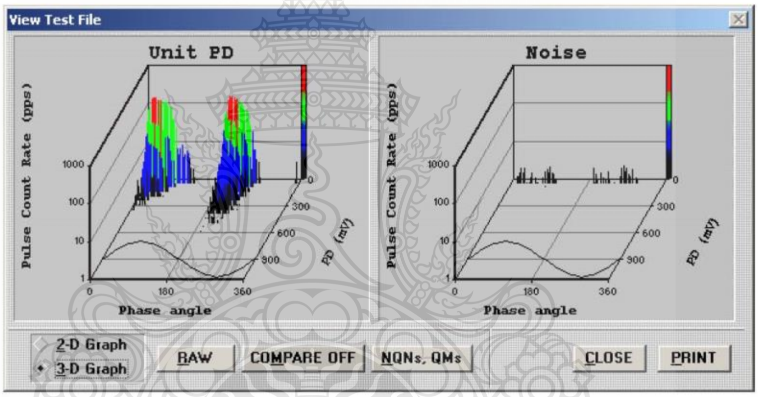


If measurement result show that Negative PD (green line) value is less than Positive PD (red line), this mean that majority of PD occur at stator insulation surface



If measurement result show that Negative PD (green line) value is more than Positive PD (red line), this mean that majority of PD occur at conductor and stator insulation.

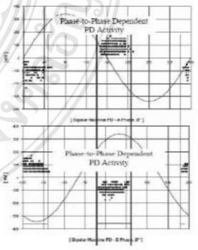
All three interprets above, it is PD that occurs in stator winding and it is phase - to - ground discharge. We call this kind of PD as classical PD. Anyhow, we can further more make an indication of Partial Discharge from our powerful 3D report as shown below: -



From 3D graph, if PD occurs at 45° or 225° , PD will occur in stator winding

If PD occur at 15° or 75° or 195° or 255° it will be phase - to - phase PD that occur at end winding.

From picture below at end winding location, we can see white powder that caused by nitric acid from PD.



If PD occurs at 0° or 180° it will be occur from bad or loose electrical connection.

5. PD measurement system must tell how serious of PD in the insulation

The most importance thing of PD measurement is that, how do we know whether PD in machine is serious or not. IRIS is the only company that have database of more than 400,000 records over past 20+ years. We will compare our PD result with this database and make a justice the condition of our machine.

Table 1: Bus - air-cooled (TGA)

Rated V	2-4kV	6-8kV	10-12kV	13-15kV	16-18kV	> 19kV
Avg	112	112	165	199	239	191
Max	3200	1983	3200	3314	3038	3109
25%	7	16	28	39	47	34
50%	24	49	74	98	98	63
75%	86	129	177	226	210	134
90%	274	276	401	461	540	432

From Table 1, it shows the average PD, maximum PD and percent of machine at each PD level. We can compare our PD test result with this database for determination.

Compliance Standard of Iris's PD Sensor

For on-line partial discharge (PD) monitoring, it is necessary to permanently install sensors on the motor or generator terminals to detect the high frequency PD pulses. The type of sensors used may be epoxy-mica capacitors (EMCs),

Since the EMCs are permanently connected to the terminals, assurance is required that they will not in themselves pose a risk of failure. The following discusses design features incorporated, and the tests performed, to ensure an extremely low risk of failure.

The EMC meets the specifications of ANSI/IEEE C37.20.2, "IEEE Standard for Metal-Clad and Station Type Cubicle Switchgear." In particular, the EMCs have been tested by an independent testing organization to withstand a 10 s- ac hi pot of 87.5 kV rms for 25 kV class, 56 kV rms for 16 kV class (The ANSI requirement is 36 kV rms), and 24.2 kV rms for 6.9 kV class During Iris' in-house testing, 16 kV EMCs withstood 70 kV ac, the maximum output of the Iris test equipment.

In addition to the short-term ac hi pot test (ANSI C37.20.2), long term voltage endurance testing is done according to IEEE 1043 "IEEE Recommended Practice for Voltage Endurance Testing of Form Wound Bars and Coils". For 13.8 kV stator windings, coils are normally expected to endure a minimum of 400 hours at a test voltage of 30 kV rms [IEEE 1553]. Two EMCs were tested at 30 kV rms, and shows that they survived more than 1000 hours with no failures. According to the statistical methods in IEEE 930 "IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Voltage Endurance Data", and using the inverse power model with a constant N=10, these test results correspond to a lifetime of 60,000 years at the normal operating voltage. Thus the risk of failure of the EMC attributable to the operating voltage stress is extremely low.

Independent dc hi pot tests and leakage current measurements performed according to IEEE 95 "IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machines with High Direct Voltage" to 30 kV dc indicated negligible leakage current

---

Each EMC is subjected to an ac hi pot test of 51 kV rms for 25 kV class, 33 kV rms for 16 kV class and 15 kV rms for 6.9 kV class. After the ac hi pot test, each EMC is then subjected to a partial discharge (PD) test, performed according to ASTM D1868 “Standard Method for Detection and Measurement of PD Pulses in Evaluation of Insulation Systems” or IEC 60034-27. Iris requires each EMC to have a discharge extinction voltage of 25 kV rms for 25 kV class, 15 kV rms for 16 kV class and 8 kV rms for 6.9 kV class. This very high discharge extinction voltage (DEV) ensures that there are no tiny flaws within the EMC that might initiate failure many years after the EMCs have been in service

---

The EMC’s excellent electrical properties are due to the use of about 3 inches of mica as its main dielectric. This is significant when we consider that the typical insulation thickness in a 13.8 kV stator coil is only about 1/4”.

The EMC has been independently certified as part of Process Control Equipment for use in UL and ATEX Hazardous Locations

---

An independent review of the materials used in the EMC indicate that they can withstand radiation levels in excess of 30 Mrad prior to any indications of degradation of their mechanical or electrical characteristics

---

The EMC is potted in an epoxy that is highly resistant to electrical tracking. In independent testing using the “inclined - plane” tracking test (ASTM. D2303 - 85) specified in ANSI/IEEE C37.20.2, the average time to track was 302 minutes. This is well beyond the required minimum.

Reference paper from Iris

1) Technical Overview V1
2) Important of Bandwidth in PD Measurement in Operating Motors and Generators

PARTIAL DISCHARGE ANALYSIS

24 November 2017

STG 10

1.Compare magnitude of Partial Discharge (PD) results in page 14 by looking Qm+ or Qm- and choose the highest value to IRIS Data base in Appendix A at page 22, we can summarize that Phase A, B and C have value N/A, N/A and N/A which mean 'Negligible'. According to new measurement after correction , PD still very low same as last time but machine very clean (no PD pulse at all).

Note : N/A mean **" Not Applicable" because pulse less than 10 pulses count per second (pcs), see Appendix E,**

2.NQN+ and NQN- (Normalized Quantity Number) is a partial discharge activity

3.IRIS Recommend for PD result consideration (see Appendix A page 22)

3.1+Qm or –Qm is higher than 95% (206 mV)

3.2And +Qm or –Qm is higher twice with previous measurement

3.3Each measurement conditions should have be same (see "Remark" below)

Operating conditions:

- -Voltage = 21 kV
- -Load = 286 MW,
- -Pressure = 2.97 bars (43.50 psi)
- -Winding Temp. = 53 C

Remark: the operating parameters during testing should be within the following recommended ranges

- -Voltage ±200 V
- -Temperature ±5 ºC
- -Load ±10%
- -Hydrogen Pressure ±5 % PSI

Test Result

A. TERMINAL VOLTAGE MEASUREMENT (By Multi-Meter)

PD Coupler Termination STG 10 (by meter)

ปี 2016		
Terminal	Machine Side (mV)	System Side (mV)
Phase A	538.00	536.00
Phase B	519.00	524.00
Phase C	526.00	523.00
ปี 2017		
Terminal	Machine Side (mV)	System Side (mV)
Phase A	523.30	521.49
Phase B	514.75	518.48
Phase C	521.13	518.46
ปี 2017 (2nd)		
Terminal	Machine Side (mV)	System Side (mV)
Phase A	484.00	483.00
Phase B	475.00	479.00
Phase C	482.00	478.00
ปี 2017 (3rd)		
Terminal	Machine Side (mV)	System Side (mV)
Phase A	533.14	532.06
Phase B	523.63	526.15
Phase C	526.43	520.53

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

B.ON-LINE PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT

ปี 2016					
Phase	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-	Status
A	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
B	N/A	20	N/A	26	Low
C	N/A	11	N/A	N/A	Negligible
ปี 2017					
Phase	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-	Status
A	1103	746	1025	944	High
B	569	709	685	1095	High
C	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
ปี 2017 (2nd)					
Phase	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-	Status
A	328	N/A	N/A	N/A	Negligible
B	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
C	N/A	221	N/A	N/A	Negligible
ปี 2017 (3rd)					
Phase	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-	Status
A	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
B	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible
C	N/A	N/A	N/A	N/A	Negligible

Remark: 1) N/A mean " Not Applicable" because pulse less than 10 pulses count per second (pcs)
2) See PD Data Statistical Summary as in attached page 22

Partial Discharge Report		*PTP*
RPCL	Executive Summary	24 November 2017

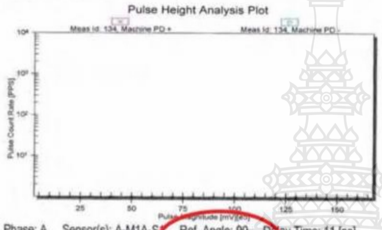
ปี 2016

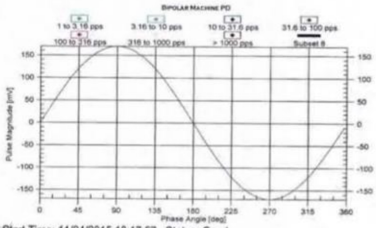
Pulse Height and Pulse Phase Analysis ABC Combo for C1 only

Asset Name: ST10

IRIS POWER
A QUALITROL Company
www.irispower.com

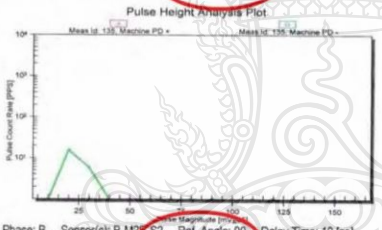
Folder: BLOCK1\, Asset Class: Steam Turbine
Class: Directional BUS (TGA), Sensor Type: Epoxy Mica Capacitor (80pF)
Operating Load: 250.00 MW, Reactive Load: 12.00 MVAr, Operating Asset Temp: 63 deg C, Operating Voltage: 21.10 kV
Ambient Temp: 35 deg C, Ambient Humidity: 58.00 % Freq. (Test Duration): 50 Hz, (1 sec.)
Operating Gas Pressure: 3.01 psi-g

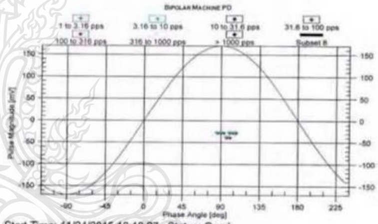




Phase: A, Sensor(s): A-M1A-S[illegible], Ref. Angle: 90, Delay Time: 11 [ns]
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A

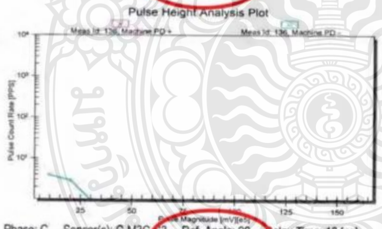
Start Time: 11/24/2015 18:17:57, Status: Good

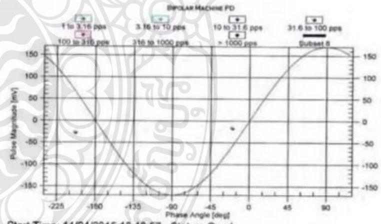




Phase: B, Sensor(s): B-M2[illegible]-S2, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns]
Machine: NQN+ N/A, NQN- 20, Qm+ N/A, Qm- 26

Start Time: 11/24/2015 18:18:27, Status: Good





Phase: C, Sensor(s): C-M3C-S3, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns]
Machine: NQN+ N/A, NQN- 1[illegible], Qm+ N/A, Qm- N/A

Start Time: 11/24/2015 18:18:57, Status: Good

Iris Power LP, 3110 American Dr., Mississauga, On, Canada L4V 1T2, Phone: +1 (905)-677-4824, Fax: +1 (905) 677-8498

Partial Discharge Report		*PTP*
RPCL	Executive Summary	24 November 2017

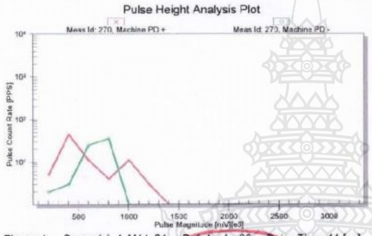
ปี 2017

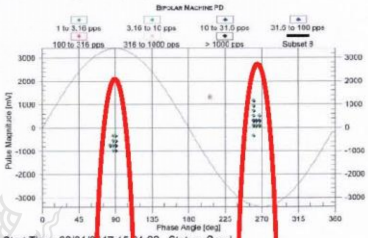
Pulse Height and Pulse Phase Analysis ABC Combo for C1 only
Asset Name: STG10

Folder: Ratchaburi Power\, Asset Class: Combustion Turbine

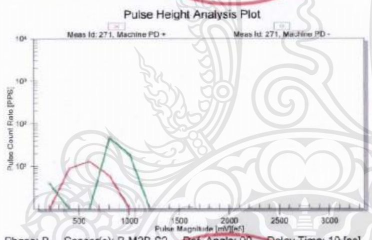
IRIS POWER
A QUALITROL Company
www.irispower.com

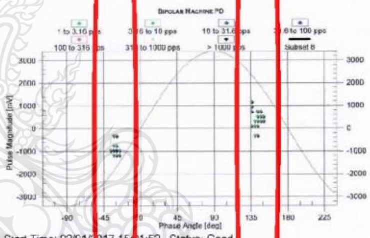
Operating Load: 219.10 MW, Reactive Load: 21.00 MVAr, Operating Asset Temp: N/A, Operating Voltage: 21.00 kV
Ambient Temp: 34 deg C, Ambient Humidity: 42.00 % Freq. (Test Duration): 50 Hz, (1 sec.)
Insulation Type: Unknown Operating Gas Pressure: 44.24 psi-g Gas Pressure Rating: 43.51 psi-g\



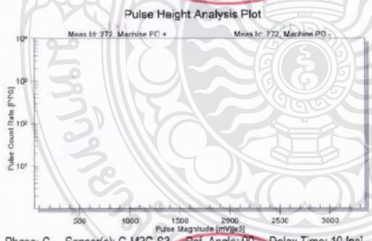


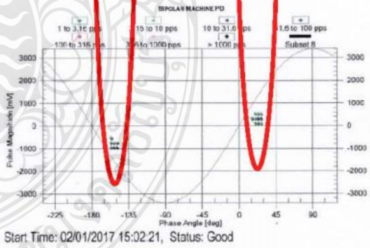
Phase: A, Sensor(s): A-M1A-S1, Ref. Angle: 90, Delay Time: 11 [ns] Start Time: 02/01/2017 15:01:22, Status: Good
Machine: NQN+ 1103, NQN- 746, Qm+ 1025, Qm- 944





Phase: B, Sensor(s): B-M2B-S2, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 02/01/2017 15:01:52, Status: Good
Machine: NQN+ 569, NQN- 709, Qm+ 685, Qm- 1094





Phase: C, Sensor(s): C-M3C-S3, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 02/01/2017 15:02:21, Status: Good
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A

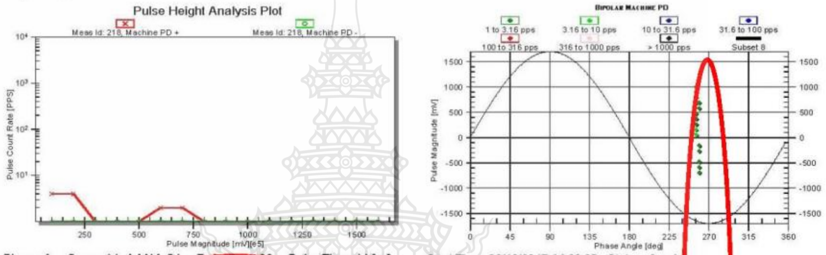
Iris Power LP, 3110 American Dr., Mississauga, On, Canada L4V 1T2, Phone: +1 (905)-677-4824, Fax: +1 (905) 677-8498

ปี 2017 (2nd)

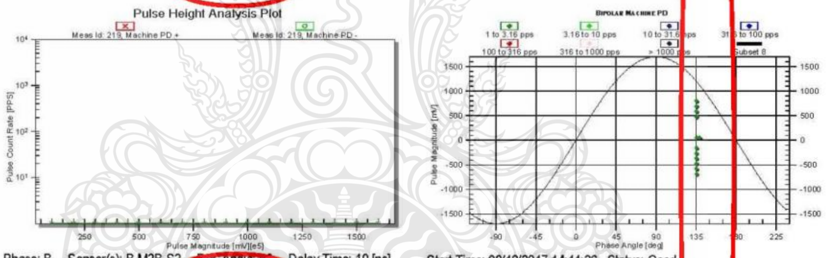
Pulse Height and
Pulse Phase Analysis ABC Combo for C1 only
Asset Name: ST10

Folder: BLOCK1\, Asset Class: Steam Turbine

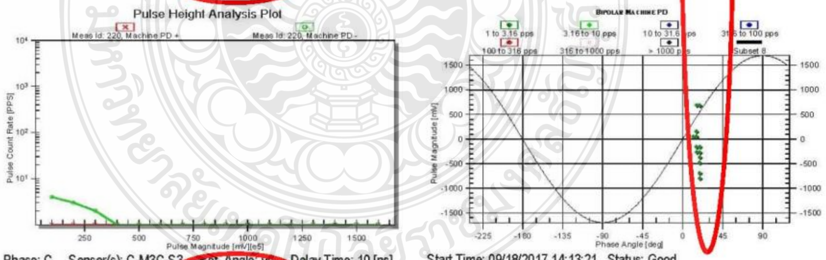
Operating Load: 244.70 MW, Reactive Load: 50.00 MVAr, Operating Asset Temp: 55 deg C, Operating Voltage: 21.30 kV
Ambient Temp: 34 deg C, Ambient Humidity: 58.00 % Freq. (Test Duration): 50 Hz, (5 sec.)
Operating Gas Pressure: 2.90 psi-g



Phase: A, Sensor(s): A-M1A-S1, Ref. Angle: 90, Delay Time: 11 [ns] Start Time: 09/18/2017 14:09:25, Status: Good
Machine: NQN+ 328, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A



Phase: B, Sensor(s): B-M2B-S2, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 09/18/2017 14:11:26, Status: Good
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A



Phase: C, Sensor(s): C-M3C-S3, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 09/18/2017 14:13:21, Status: Good
Machine: NQN+ N/A, NQN- 22, Qm+ N/A, Qm- N/A

Iris Power LP, 3110 American Dr., Mississauga, On, Canada L4V 1T2, Phone: +1 (905)-677-4824, Fax: +1 (905) 677-8498

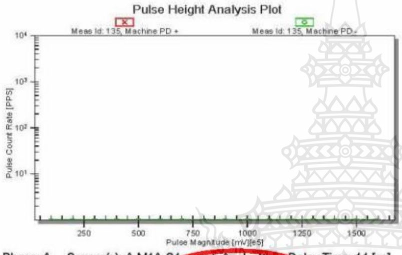
ปี 2017 (3rd)

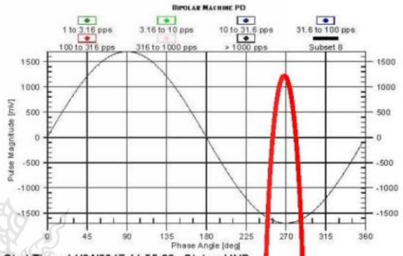
Pulse Height and Pulse Phase Analysis ABC Combo for C1 only

Asset Name: STG10

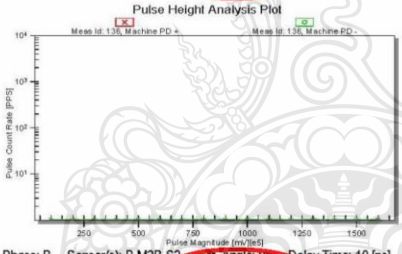
Folder: Ratchaburi Power\, Asset Class: Hydro Generator

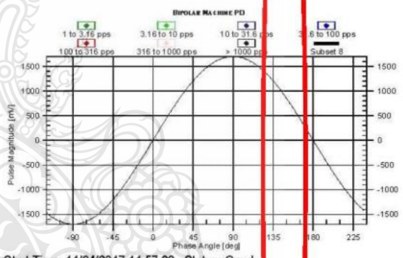
Operating Load: N/A, Reactive Load: N/A, Operating Asset Temp: N/A, Operating Voltage: N/A
Ambient Temp: 30 deg C, Ambient Humidity: 66.00 % Freq. (Test Duration): 50 Hz, (5 sec.)



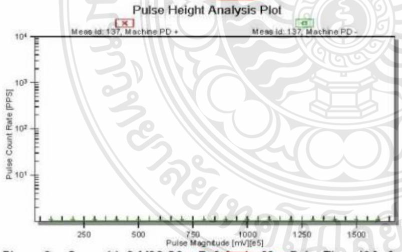


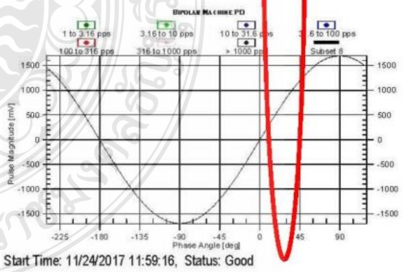
Phase: A, Sensor(s): A-M1A-S1, Ref. Angle: 90, Delay Time: 11 [ns] Start Time: 11/24/2017 11:55:28, Status: UND
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A





Phase: B, Sensor(s): B-M2B-S2, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 11/24/2017 11:57:22, Status: Good
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A





Phase: C, Sensor(s): C-M3C-S3, Ref. Angle: 90, Delay Time: 10 [ns] Start Time: 11/24/2017 11:59:16, Status: Good
Machine: NQN+ N/A, NQN- N/A, Qm+ N/A, Qm- N/A

Iris Power LP, 3110 American Dr., Mississauga, On, Canada L4V 1T2, Phone: +1 (905)-677-4824, Fax: +1 (905) 677-8498

APPENDIX

Appendix A: PD Data Statistic Summary

2014 PD Database Statistical Analysis

Air-cooled Capacitors

		PDA 6-9	PDA 10-12	PDA 13-15	PDA 16-18	PDA >19	BUS 2-5	BUS 6-9	BUS 10-12	BUS 13-15	BUS 16-18	BUS >=19
Negligible	< 25th	12	19	35	26	107	8	28	41	55	41	42
Low	< 50th	31	50	90	83	208	22	75	89	124	72	85
Typical	< 75th	72	114	190	218	698	65	177	196	265	157	165
Moderate	< 90th	184	245	373	543	886	243	353	385	529	310	504
High	< 95th	308	391	562	727	990	391	553	638	778	579	750

Air-cooled SSC - Slot PD

		11-15kV	>=16kV
Negligible	< 25th	0	0
Low	< 50th	15	1
Typical	< 75th	37	13
Moderate	< 90th	87	77
High	< 95th	119	122

Air-cooled SSC - EW PD

11-15kV	>=16kV
0	0
0	0
12	1
41	8
64	22

Variable from 2010 results - be sure to comment in report

Variable from 2012 results - be sure to comment in report

Bus-Hydrogen-Cooled (TGA)

	Rated kV	13-15kV			16-18kV				>=19kV		
	H2 (psi)	11-20	21-30	>=31	11-20	21-30	31-50	>=51	21-30	31-50	>=51
Negligible	< 25th	33	20	16	17	34	24	9	43	23	9
Low	< 50th	91	46	43	31	86	43	18	89	55	28
Typical	< 75th	189	94	81	146	333	85	38	163	108	77
Moderate	< 90th	438	198	198	268	791	194	141	203	161	548
High	< 95th	756	393	485	389	976	307	322	229	206	951

SSC Slot-Hydrogen-Cooled (TGA)

	Rated kV	13-15kV			16-18kV			19-22kV			23-27kV	
	H2 (psi)	11-20	21-30	>=31	11-30	31-50	>=51	11-30	31-50	>=51	31-50	>=51
Negligible	< 25th	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Low	< 50th	9	0	9	0	5	2	9	7	3	8	3
Typical	< 75th	31	14	17	13	15	10	23	19	11	31	9
Moderate	< 90th	48	66	32	56	22	24	97	41	25	66	18
High	< 95th	60	92	47	90	34	32	229	57	39	100	29

SSC EW-Hydrogen-Cooled (TGA)

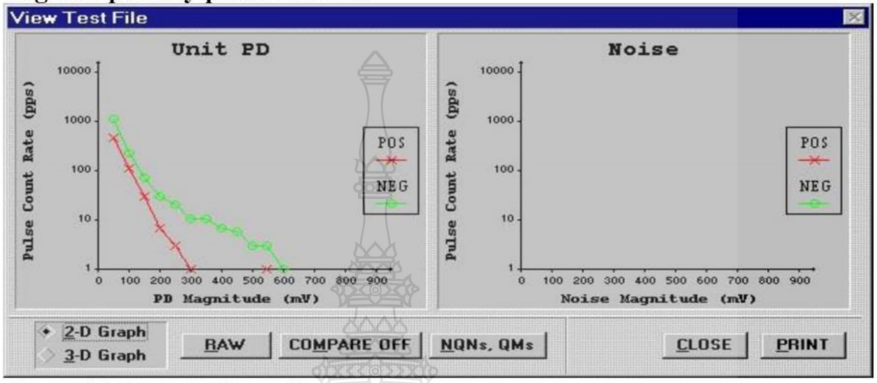
	Rated kV	13-15kV			16-18kV			19-22kV			23-27kV	
	H2 (psi)	11-20	21-30	>=31	11-30	31-50	>=51	11-30	31-50	>=51	31-50	>=51
Negligible	< 25th	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Low	< 50th	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Typical	< 75th	0	0	4	0	2	0	1	1	4	0	0
Moderate	< 90th	20	9	10	14	12	8	9	11	16	3	6
High	< 95th	34	19	15	20	18	29	28	19	35	8	28

Iris Power LP Confidential

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Appendix B: PD Characteristics

Negative polarity predominance

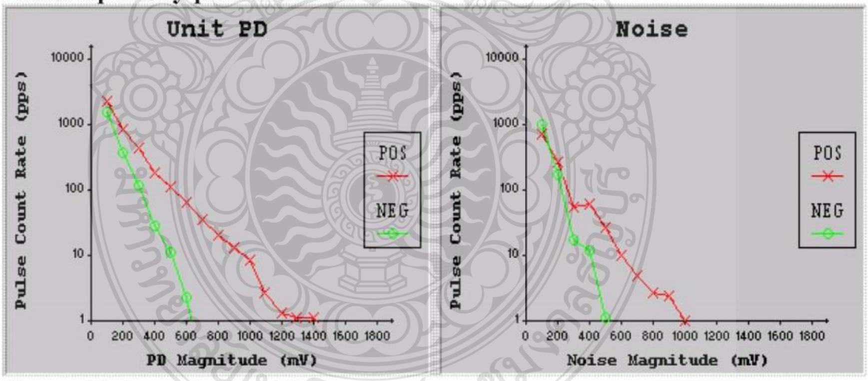


General interpretation rules

- Negative polarity predominance (+PD < –PD)
- Discharge near the copper conductor
- Load cycling
- Overheated develops voids near the copper conductors

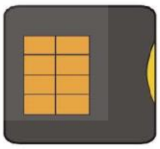
Negative predominance indicates PD at copper

Positive polarity predominance



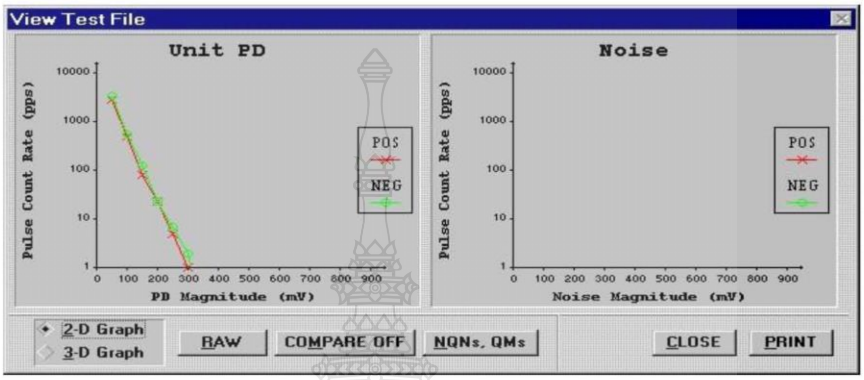
General interpretation rules

- Positive polarity predominance (+PD > –PD)
  - Discharge on surface of coils
  - Loose windings
  - Deterioration of voltage stress coatings



Positive predominance indicates PD at surface

No polarity predominance



General interpretation rules

- No polarity predominance (+PD ~ –PD)
- Internal voids
- Thermal deterioration
- Poor impregnation

No predominance indicates PD within bulk of insulation (-ve PD ~ +ve PD)

Appendix C: PD Patterns

Many failure mechanisms have their own PD pattern; therefore, examination of the pattern can help in determining which failure mechanism may be predominant.

1. Inadequate Bonding

When resins, tapes, the VPI process or other factors come into play during winding manufacturing, voids may be left entrapped within the winding. Like thermal deterioration, these voids are scattered throughout the insulation without dominance of voids at either the copper or the core. There is no noticeable polarity predominance of the PD with activity centered near 45° and 225°. As stated before when describing thermal deterioration, internal voids usually lead to a decrease in PD with an increase in temperature, i.e., a negative temperature effect, but no changes with load.

Failure mechanism	Polarity	Load Effect	Temperature Effect	Phase Location
Improper impregnation	No predominance	No load effect	Negative	45° and 225°

2. Electrical Slot Discharge

Slot discharge is the term given to discharges that occur between the surface of the coil and the stator iron. It can be said that PD caused by a loose winding creates slot discharges, but not all slot discharges are due to loose windings, some are due to problems with the semi-conductive coating , i.e., electrical slot discharges. The PD pattern for electrical slot discharge is very similar to loose windings with positive PD near 225° predominating and a negative temperature effect. Since electrical slot discharge can occur before windings becoming loose, there is no noticeable load effect for electrical slot discharge. Electrical slot discharge can be very intense and in fact be a source of damage itself.

Failure mechanism	Polarity	Load Effect	Temperature Effect	Phase Location
Electrical slot discharge	Positive predominance	No load effect	Negative	225° predominant

3.Stress Coating Interface

PD that occurs at the semicon/grading coating interface is surface-type activity that is phase-to-ground voltage dependent. The activity is predominantly positive and centered near 225°. Unlike loose windings, this activity is not usually affected by load changes; however, the materials involved in this area are primarily conductive by design and conductivity changes with temperature. Therefore, an increase in temperature can lead to an increase in the PD activity resulting from this area. If a PD pattern is predominantly positive, centered near 225°, and increases with temperature, it is most likely from the semicon/grading coating interface deterioration. A severely deteriorated interface may lead to pulses clumped at 0° and 180° typical of an open-air arc.

Failure mechanism	Polarity	Load Effect	Temperature Effect	Phase Location
Semicon/grading coating interface	Positive Predominance	No load effect	Positive increase with temperature	225° predominant

4.Loose Windings

When windings become loose in the slot, the immediate problem is that, if left unattended, the looseness will quickly allow the laminated rough stator core surface to damage the surface coatings on the coil. Damaged coil surfaces create discontinuities on the surface allowing voltage stresses to build up across these isolated locations, or between these and the stator iron. If the voltage stress exceeds the electrical breakdown point of the gas medium, a discharge will occur. As a result, pulses that occur from loose windings are predominantly surface-type activity within the slot portion of the core and therefore positive and centered near 225°. The most obvious sign of loose windings is a noticeable increase in PD activity, especially positive, with an increase in load. Remember that as the load current increases so does the mechanical vibration of the coils. This increase in vibration causes the gap between the side of the coil and the grounded core to also increase. The increase in an air gap results in an increase in positive PD magnitude with the load current.

Be aware, however, that the increase in load current will also have an increase in temperature, which may lead to a reduction in PD due to negative temperature effects. Therefore, when checking for loose windings - run the test with the machine at different loads but at the same voltage, temperature, and hydrogen pressure. Note, for a winding with only a "loose" problem, only the positive PD will change with load; the negative component will change slightly, if at all. Changes in the negative PD with changes in load may be an indication of conductor vibration due to voids near the conductors.

Failure mechanism	Polarity	Load Effect	Temperature Effect	Phase Location
Loose Windings	Positive Predominance	Positive increase with load	Negative	225° predominant

5.Inadequate Spacing

This source of PD, like contamination, results in activity that is phase-to-phase dependent and therefore 30° phase shifted from the classic positions. Since this activity is frequently isolated to a specific area of the machine, the PD pattern may reveal which phases are involved. This is only possible if the two affected phases both have detectable end winding activity and their respective 30° phase shifts correspond to what would be expected according to the machine rotation. Since this PD may be occurring between a top and bottom coil in a slot, visual verification of the activity may be difficult.

Failure mechanism	Polarity	Load Effect	Temperature Effect	Phase Location
Inadequate spacing	No Predominance	No load effec	Unpredictable	45°, 75°, 195° and 255°

6.Endwinding Vibration

PD is not a symptom of end winding vibration. However, one of the results of end winding vibration is the development of a crack in the insulation system several cm (inches) from the end of the slot. It is possible that this crack will develop to the point that PD can be detected as a side effect of end winding vibration.

7.Electrical Connections

PD from electrical connections normally reveals itself as PD that is mechanically dependent and clumps around 0° and 180°. Because poor electrical connections can be impacted by variances in load and temperature, the effects are unpredictable.

Failure mechanism	Polarity	Load Effect	Temperature Effect	Phase Location
Electrical Connections	No Predominance	Unpredictable	Unpredictable	0° and 180°

8.Surges

Repetitive stresses from surges placed on the mechanical bond between the ground wall and either strand or turn insulation can cause the bond to weaken and break. This forms voids within the insulation and in close proximity to the copper conductor. PD occurring in this situation is predominantly negative and centered near 45°. As with all internal voids, there tends to be a negative temperature coefficient. If the voids are fairly large, it is possible for the negative PD to increase with load due to the higher conductor vibration associated with the higher mechanical forces. For multi-turn coils, especially in motors, a turn-to-turn failure becomes likely.

Failure mechanism	Polarity	Load Effect	Temperature Effect	Phase Location
Surges	Negative Predominance	Little change with load	Negative	45° predominant

9. Thermal Deterioration

Thermal deterioration results from operating an insulation system for long periods near its design maximum or for shorter periods above the design limit. As is the usual case with all insulation systems, the damage incurred is cumulative, non-reversible and results in a decrease in the ability of the resin binder (epoxy or polyester) to mechanically bond the layers of insulation together.

The loss of mechanical bonding allows the formation of voids within the layers of tape that make up the insulation thickness. These voids are distributed throughout the insulation and may discharge regardless of the "direction" of electrical stress across them. Because of this, such voids do not exhibit any real PD polarity predominance and the PD clusters near 45° and 225°. Therefore, a more or less equal distribution of positive and negative discharges at the classic positions is indicative of general thermal deterioration or aging.

Due to the thermal coefficient of expansion, the voids originating in the slot portion reduce in size as temperature increases producing a negative temperature effect. This occurs because of the relationship of void size to electrical stress – the smaller voids require less voltage to spark. The extent of this change in PD with temperature is dependent on the degree of delamination that may be present. There is minimal change in PD with load.

Failure mechanism	Polarity	Load Effect	Temperature Effect	Phase Location
Thermal deterioration	No Predominance	No load effect	Negative	45° and 225°

10. Load Cycling

Load cycling is a specific form of thermal deterioration which manifests itself as a deterioration of the bond between the ground wall insulation and either turn insulation (multi-turn coil) or between the ground wall and strand insulation (Roebel Bars). Repetitive stresses from sudden load changes placed on the mechanical bond between the groundwall and either strand or turn insulation can cause the bond to weaken and break. This forms voids within the insulation and in close proximity to the copper conductor. PD occurring in this situation is predominantly negative and centered near 45°. As with "thermal deterioration," there tends to be a negative temperature coefficient. If the voids are fairly large, it is possible for the negative PD to increase with load due to the higher conductor vibration associated with the higher mechanical forces.

Failure mechanism	Polarity	Load Effect	Temperature Effect	Phase Location
Load Cycling	Negative Predominance	Little change with load	Negative	45° predominant

11. Contamination

Since the end winding area of machines is specifically designed to be away from ground planes, PD that occurs due to contamination in the end winding is normally phase-to-phase voltage dependent and will be 30° phase shifted from the classic positions of 45° and 225°. The direction of the shift is dependent on the location of the contamination and the voltages of the affected coils and is therefore unpredictable. Identification or inspection of the site of arcing may be difficult due to limited visibility in the area. Though there may be some effect of temperature or load changes on PD activity from contamination, it is difficult to predict the expected results. However, environmental conditions such as humidity may have a very noticeable effect, especially if the surface contamination becomes partly conductive when damp.

Failure mechanism	Polarity	Load Effect	Temperature Effect	Phase Location
Contamination	No predominance	No load effect	Unpredictable	15°, 75°, 195° and 255°

Appendix D: Compare Test Result with Similar Machines

Iris PD Database

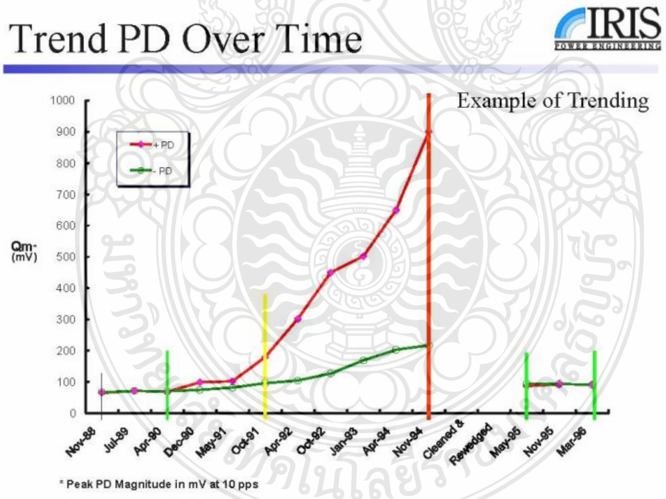
- Over 400,000 test results from thousands of machines for comparison purposes
- Each year Iris publishes the statistical range of Qm (peak PD) for each type of stator
  - Voltage rating
  - Air or hydrogen cooling
  - PD sensor type
- If a stator has a Qm that exceeds 90% of readings, then winding is deteriorated

Three Basic Methods for Interpretation

- Compare graphs from identical machine (stator with highest PD is most deteriorated)
- Compare test result from a machine to a similar machines in Iris database
- Trend PD over time (2 times increase per year is significant rate of deterioration)

Trend PD Over Time

- Most powerful, reliable means of interpreting data
- If Qm low, and constant trend, winding in good condition
- Collect data over the years, if Qm increases slowly, winding is stable
- If Qm doubles in 6 to 12 months, rate of deterioration increasing
- Trending Can also determine if repairs effective



APPENDIX E Standard for 10 pulses count per second (pcs)

1. IEC 60034-27 Clause 5 Measuring Tech & Instruments

TS 60034-27 © IEC:2006 – 25 –

- the transmission function from the PD source to the PD sensor is unknown and depends on the specific design of the machine which determines the frequency response of the stator winding. Therefore, the energy at the source of the PD, which can be taken as a measure of the erosion of the insulation, cannot be measured directly;
- the individual high frequency transmission behaviour of a stator winding produces PD signals at the terminals that are a characteristic of the machine being tested and of the location of the PD source;
- very high frequency components of PD signals are subject to considerable attenuation when travelling through the winding and, depending on the origin of the PD, might not be detectable at the terminals of the test object

As a consequence of the above-mentioned phenomena not only the particular stator winding design but also the specific frequency response of the PD detection system, including coupling devices, will significantly influence the characteristics of the signal detected at the terminals of the winding.

5 Measuring techniques and instruments

5.1 General

In line with IEC 60270, this clause deals solely with electrical methods of measuring partial discharges because the electrical, conductive measurement of partial discharges is the most commonly used method of assessing the winding insulation of rotating machines. Non-electrical methods of measurement and localization are listed in Annex B.

Partial discharge measuring systems can be divided into subsystems: coupling device, transmission system (for example, connecting cable or optical link) and measuring instrument. In general, the transmission system does not contribute to the circuit characteristics, apart from some possible signal attenuation, and will thus not be taken into consideration.

5.2 Influence of frequency response of measurement system

The frequency response of the PD detection system, including the PD coupling unit, determines how much energy of the PD signal from the winding can be detected. Thus, the frequency response of the system, especially the type of coupling unit being used, has a considerable impact on the overall sensitivity of detection. Due to the different values of lower cut-off frequency, the following qualitative relationships are basically applicable when testing complete windings:

- measurement in the lower frequency range ensures good sensitivity not only for partial discharges in bars/coils close to the sensor but also for those that originate from further away in the winding. However, the lower frequency range is more subjected to noise and disturbances;
- measurement in the very high frequency range may acquire only a very small proportion of the total PD energy, which results in sensitivity to signals originating only very close to the sensor. However, this frequency range may be less susceptible to noise and disturbance.

For off-line PD testing to obtain appropriate sensitivity to PD from the whole winding it is advisable to use wide band PD measuring systems. The lower cut-off frequency should be in the range of several tens of kHz in accordance with IEC 60270.

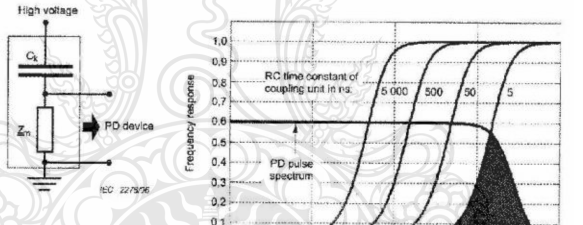
It should be noted that depending on the winding design and the measurement arrangement used, resonance phenomena that are in the frequency range of the PD measuring device may occur and therefore may also influence PD results.

5.3 Effects of PD coupling units

For off-line PD measurements on stator windings and PD tests on winding components capacitive coupling units are often used. These consist of a high voltage capacitor and a low voltage coupling device in series. When testing individual winding components, the coupling device may also be connected in series to the test object (see Figure 5b). The low voltage coupling device is connected to the transmission system.

The high voltage capacitor, the coupling device, the transmission system and the input impedance of the measurement system represent a high-pass filter. Therefore, increased input impedance or higher capacitance values lead to an increased sensitivity.

Figure 1 shows schematically the frequency response of an idealized PD pulse and the transfer functions of different PD coupling units with a high voltage capacitor and a resistive measuring impedance $Z_m = R$ at the low voltage side. The marked overlap of the spectra of the PD pulse and the coupling unit, shown in Figure 1, for an *RC* time constant of 5 ns, determines the signal energy which can be measured. In practical cases, such systems show band pass filter characteristics due to parasitic L and C components.



time constant of PD coupling unit

for $Z_m = R$: $\tau = RC$

lower cut-off frequency:

$f_{lo} = 1/(2\pi RC)$

Components

Z_m measuring impedance

C_k coupling capacitor

Figure 1 – Frequency response of a PD pulse and coupling units of various time constants

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

PD pulses are attenuated and dispersed especially at higher frequencies while propagating through the winding. Therefore, measurement systems with lower cut-off frequency in the lower frequency range usually provide an average good sensitivity to PD from the whole winding.

When taking measurements on individual winding components, the high voltage coupling capacitor is connected to the copper conductor. For PD measurements on complete windings, the coupling unit is connected to the terminals of the machine or inside the frame directly to the winding conductors.

The following low voltage coupling devices are typically combined with the high voltage capacitor:

– RLC filters or four-terminal networks (see IEC 60270) wherein an inductance serves to suppress the power frequency component;

– high-frequency current transformers (RF-CT) which may also serve to galvanically separate the high voltage circuitry from the measuring device.

RF-CT connected with ground wires can also be used as a standalone coupling device. When using fibre optical signal transmitters, the coupling devices can also be installed on the HV side of the capacitor.

5.4 Wide-band and narrow band measuring systems

The principal difference between the various PD measuring systems is their bandwidth. The PD pulses arriving at the terminals have a frequency spectrum characterized by the transmission function of the machine winding. The measured PD signal will be affected to a greater or lesser degree depending on the bandwidth of the measuring system. Furthermore, micaceous insulation systems are characterized by a high repetition rate of PD pulses. Figure 2 shows typical pulse responses of different measuring systems. The upper trace of the oscillograms represents the input pulse, and the lower trace the pulse response of the measuring system:

1) wide band system: (a) low pulse repetition rate, (b) increased rate, (c) high rate leading to superposition of pulses,
2) narrow band system: (a) low pulse repetition rate, (b) increased rate, (c) high rate leading to superposition of pulses.

2. IEEE Std. 1434-2000 Related Pages

useful for locating girth cracks or slot discharge activity involving individual coils/bars. Some disassembly of the machine may be necessary to facilitate the visual inspection. A 50 Hz or 60 Hz variable voltage supply is desirable for applying the test voltage. In order to locate some discharge sources, it will be necessary to be able to energize one phase at a time with the others grounded. No further discussion of the black-out test is provided in this guide.

6. Electrical pulse and RF radiation sensing systems

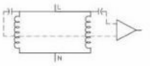
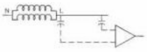
A considerable number of different electrical pulse sensing systems are in use. The machine design and PD activity may define the type of sensors and the installation required.

When a PD event occurs at some location in a winding, the injected charge first flows into the capacitance to ground at the injection site, thereby modifying the local voltage. This voltage change immediately becomes the crest of a wave that propagates in both directions away from the injection site. The nature of the wave at any location away from the injection site depends entirely on the impedance along the path it had to traverse. Because PD pulse rise times may be in the nanosecond range at the injection site, the initial voltage wave has frequencies from the kilohertz to the gigahertz range. However, it should be noted that all components of the test object and the measuring circuit affect the bandwidth of the measurement. The inductance of the sensor's connection to the test object may limit the upper frequency to some tens of megahertz. Specially designed sensors (e.g., see 6.3.3) and test methods are required to extend the upper frequency limit.

Typical electrical pulse sensors and associated detectors are listed in Table 1 for on-line measurements, Table 2 for off-line measurements on complete windings, and Table 3 for measurements on individual coils and bars. These are intended as examples only. Other systems of sensors and detectors are available that may be equally suitable for particular applications.

 Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

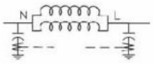
Table 1—On-line discharge measurements (typical systems)

Case	Sensors	Detector/output	Frequency range	Noise rejection	Pros and cons	Data output/ format/ applicability/ bibliography
1	80 pF coupler terminated in 50 Ω and connected either —Differentially with a minimum of one coupler near line end of each of two parallel circuits per phase.  —Directionally with one coupler per phase at line terminal and a second at least 2 m distant on IPB. (In some cases for cable-connected machines, only the coupler at the line terminal is needed per phase.) 	Pulse height analyzer with pulse-phase capability. Hard disk storage. Pulse height plots in terms of two phase windows or multiphase windows.	40–150 MHz (system) or 40–350 MHz (system). For lower –3 dB point of around 7 MHz, see [B30] and [B33].	Noise rejection using 40–150 MHz instrumentation is achieved by a differential connection of a pair of couplers at the detector input. In 40–350 MHz instruments, noise rejection is achieved based on time of arrival of pulses from the two couplers. This is especially important for directional couplers. Noise reduction is also achieved by attenuation when differential couplers are installed within a winding.	Differential couplers are sensitive primarily to PD at the line end of the circuits in which they are installed. This is especially true when the couplers are installed within the winding such as at an end cap. Differential coupler connection is usually limited to hydrogenerators because of the need for >2 m between pairs of couplers. Directional couplers do not attribute PD to a particular stator circuit. Directional couplers are vulnerable to internal noises, such as shaft grounding brushes and back of core sparking, which are prevalent, especially in large turbo alternators. Completely computerized system.	Color LCD; serial and parallel printer ports. Floppy disk. Differential: H [B28], [B32], [B72], [B74], [B80] Directional: T, S, H [B10], [B30], [B59], [B60], [B62], [B80]

Applicability:
H = hydrogenerator
T = thermal generator
S = synchronous condenser
M = motor

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

Table 1—On-line discharge measurements (typical systems) (continued)

Case	Sensors	Detector/output	Frequency range	Noise rejection	Pros and cons	Data output/ format/ applicability/ bibliography
2	—10 nF capacitive coupler with broadband high-frequency current transformer at line terminals. —RFCT with or without 10 nF capacitor between machine neutral and ground.  	Narrow-band and broadband data acquisition in time and frequency domain. Trending of 30 significant characteristic values fingerprints (phase resolved pulse height analysis, histograms, time domain pattern, etc.).	10 kHz–≥30 MHz	—Subtracting signals (two couplers/phase necessary). —Time and frequency windowing. —Automatic interference elimination based on statistical disturbance recognition determines setting of time and frequency windows.	Combination of different measuring methods to increase the interpretation and confidence level. Completely computerized system. Analysis of uninfluenced signals (sampling rate ≥40 MB/s without stretcher).	M, T, S, H [B68]
3	Stator slot coupler installed under wedge in existing windings opposite air gap bar closest to line end, or in new windings between air gap bar and back bar, where at least one bar is in a line end position. 	Pulse height analyzer with pulse-phase capability, as in Case 1.	30 MHz–>1 GHz (sensor) 20–800 MHz (detector).	Pulsewidths >20 ns considered to be noise. Can discriminate between pulses traveling from end windings toward slot and vice versa.	Excellent noise immunity. Response limited to one slot. Requires rotor removal for sensor installation. If gas cooled, requires penetration of gas seal.	As for Case 1. T, S [B46], [B47], [B60], [B62]

Applicability:
H = hydrogenerator
T = thermal generator
S = synchronous condenser
M = motor

Copyright © 2000 IEEE. All rights reserved.

ภาคผนวก ง

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐

The 40th Electrical Engineering Conference (EECON-40)

วันที่ ๑๕-๑๗ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๖๐

โรงแรม เดอะ ซายน์ (The Zign Hotel) อ.บางละมุง จ.ชลบุรี

555/65 Moo 5, 12 Naklua Rd., Banglamung, Chonburi, 20150, Thailand

KMUTNB

CALL FOR PAPERS

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Conference หรือ EECON) เป็นการประชุมทางวิชาการระดับชาติที่มีมาตรฐานทางวิชาการเป็นที่ยอมรับในระดับสากล มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ คณาจารย์ นิสิต นักศึกษา นักวิจัย รวมถึงวิศวกรและผู้ปฏิบัติงานในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งจากสถาบันการศึกษา และหน่วยงานต่าง ๆ ทั้งจากภาครัฐและเอกชน ได้นำเสนอผลงานวิจัย รวมทั้งได้มีโอกาสแลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางด้านงานวิจัยและประสบการณ์ระหว่างกัน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้านี้ดำเนินการโดยคณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย คณะกรรมการสภาวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า ผู้แทนจากสถาบันกรรมการสามัญ ผู้แทนจากสถาบันกรรมการสมทบ และคณะกรรมการดำเนินการจัดการประชุมจากสถาบันที่ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพในแต่ละปี การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าได้จัดขึ้นทุกปีตั้งแต่ปี พ.ศ. ๒๕๒๑ เป็นต้นมา และในปี พ.ศ. ๒๕๖๐ นี้นับเป็นครั้งที่ ๔๐ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ โดยภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพหลัก จากอัตลักษณ์ของมหาวิทยาลัยที่มุ่งเน้นในการสร้างเครือข่ายการพัฒนางานวิจัยและวิชาการแบบสหสาขาวิชา และมุ่งเน้นให้การนำผลงานวิจัยไปแก้ปัญหาให้กับอุตสาหกรรม ดังนั้นการเป็นเจ้าภาพในครั้งนี้จึงเกิดมิติใหม่ในการที่จะทำงานร่วมกันของ ๔ หน่วยงานภายในของมหาวิทยาลัยได้แก่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ (ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์) คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ (ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ ภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรมและอุปกรณ์การแพทย์) คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม (ภาควิชาครุศาสตร์ไฟฟ้า) และวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม (ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) เพื่อแสดงถึงอัตลักษณ์ที่โดดเด่นและเข้มแข็งของมหาวิทยาลัย รวมทั้งนับเป็นโอกาสที่ดีเนื่องจากเป็นวาระครบรอบ ๓๐ ปี ของภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ อีกทั้งเป็นวาระครบรอบ ๕๐ ปี ของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

หมายเหตุ ***ผู้เข้าร่วมการประชุมครั้งนี้ สามารถนำไปนับเป็นกิจกรรม "การพัฒนาวิชาชีพวิศวกรรมอย่างต่อเนื่อง (CPD)" จำนวน ๑๒ ชั่วโมง รหัสกิจกรรม ๓๐๑-๐๓-๒๐๒๕-๐๐-๖๐๑๑***

คณะกรรมการจัดการประชุม

๑. คณะกรรมการสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย)

EEAAT
Electrical Engineering Academic Association (Thailand)

๒. สถาบันกรรมการสามัญ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยศรีปทุม
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยสยาม
มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
มหาวิทยาลัยรังสิต
มหาวิทยาลัยนเรศวร
มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์
มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
มหาวิทยาลัยพะเยา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

สาขาของบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DS)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

การส่งบทความ

จัดทำบทความเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษจำนวนไม่เกิน ๔ หน้ากระดาษขนาด A4 (21 cm x 29.7 cm) ตามแบบที่กำหนด ส่งผ่านระบบออนไลน์ โดยขั้นตอนและรายละเอียดในการส่งบทความสามารถเข้าดูได้ที่เว็บไซต์ของการประชุมที่ http://www.ece.eng.kmutnb.ac.th/eecon-40

การพิจารณาและการนำเสนอบทความ

การพิจารณาบทความดำเนินการโดยผู้พิจารณาบทความระดับวิชาชีพขั้นสูงทางวิศวกรรมไฟฟ้า (Professional reviewers) ที่ได้รับการคัดเลือกตรงตามสาขาจากสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) (EEAAT) และจากสถาบันกรรมการทั่วประเทศ บทความที่ผ่านการพิจารณาจะได้รับการตีพิมพ์ในเอกสารการประชุม (Proceedings) ของ EECON-40 และต้องมีการนำเสนอในที่ประชุม บทความดีเด่นในแต่ละสาขาจะได้จากการคัดเลือกในขั้นตอนแรกจากผู้พิจารณาบทความและจะได้รับการพิจารณาตัดสินในขั้นตอนสุดท้ายโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่ได้รับการเสนอชื่อจากสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า (ประเทศไทย) และจากสถาบันที่เป็นกรรมการสามัญทั่วประเทศ

กำหนดการสำคัญ

หมดเขตรับบทความ	๑๘ มิถุนายน ๒๕๖๐
แจ้งผลการพิจารณาบทความ	๓๐ กรกฎาคม ๒๕๖๐
หมดเขตรับบทความฉบับสมบูรณ์	๒๒ สิงหาคม ๒๕๖๐
วันสุดท้ายของการลงทะเบียนของผู้นำเสนอบทความ	๕ กันยายน ๒๕๖๐
วันสุดท้ายของการลงทะเบียนล่วงหน้า	๓ ตุลาคม ๒๕๖๐
การนำเสนอบทความ	๑๕-๑๗ พฤศจิกายน ๒๕๖๐

ต้องการข้อมูลเพิ่มเติมกรุณาติดต่อ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
๑๕๑๘ ถนนประชาราษฎร์ ๑ แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กทม. ๑๐๘๐๐
อีเมล์: eecon-40@eng.kmutnb.ac.th
โทรศัพท์: ๐๒ ๕๕๕ ๒๐๐๐, ต่อ ๘๕๑๙, ๘๕๒๐ โทรสาร: ๐๒ ๕๘๕ ๗๓๕๐

คณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิแต่ละสาขา

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๔๐

สาขา	ประธานภายใน			หน่วยงาน	ประธานภายนอก			หน่วยงาน
	คำนำหน้า	ชื่อ	สกุล		คำนำหน้า	ชื่อ	สกุล	
PW	ดร.	นพดล	ฉาบแก้ว	มจพ.	ดร.	ธรรมวฤทธิ์	สิงหวิลัย	ม.มหิดล
PE	รศ.ดร.	นิสัย	เฟื่องเวโรจน์สกุล	มจพ.	ผศ.ดร.	สุรพงศ์	สุวรรณกวิน	จุฬาฯ
CM	ดร.	พิสิฐ	วนิชชานันท์	มจพ.	รศ.ดร.	ภูมิพัฒ	แสงอุดมเลิศ	ม.กรุงเทพฯ
CT	ดร.	นที	ทองอุ่น	มจพ.	รศ.ดร.	ชนินทร์	บุญลักษณานุสรณ์	สจล.
EL	รศ.ดร.	มนตรี	ศิริปรัชญานันท์	มจพ.	รศ.ดร.	พิพัฒน์	พรหมมี	สจล.
DS	ผศ.ดร.	เอกรัฐ	บุญภูงา	มจพ.	ดร.	มนตรี	โพธิโสโนทัย	สจล.
PH	ผศ.ดร.	อมรินทร์	รัตนะวิศ	มจพ.	ดร.	นพดล	นันทวงศ์	*NECTEC* สวทช.
BE	ผศ.	พยุง	เดชอยู่	มจพ.	ผศ.ดร	ปิยะมาศ	เสือเพ็ง	ม.รังสิต
CP	ดร.	อัครา	ประโยชน์	มจพ.	รศ.ดร.	มงคล	เอกปัญญาพงศ์	*AIT*
GN	ผศ.ดร.	พงศธร	ชมทอง	มจพ.	ดร.	ศุภกิจ	พฤกษอรุณ	ม.ธรรมศาสตร์
SS	ผศ.ดร.	กฤษณ์	อ่างแก้ว	มจพ.	ผศ.ดร	ชูธรรม	สาวิกัน	ม.เทคโนฯมหานคร

9.	056	การประมาณการใช้พลังงานไฟฟ้ารวมของเครื่องปรับอากาศในอาคารที่พักอาศัยในเขตกรุงเทพมหานคร	ธนโชติ จิรวัลลภ, ธนภัทร พรพงศ์รุ่งเรือง, ศุจินันท์ ชื่นชม, จักราวุธ เดชวิเศษ, ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
10.	059	การวางแผนสั่งการถ่ายเทโหลดของระบบจำหน่าย 22 *kV* โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม	ณัฐชาติ คำขันตี, วิชัย ผดุงศิลป์, ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกลุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
11.	062	การนำพลังงานจากรถยนต์ไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับที่พักอาศัย	ชวิน หฤหรรษพงศ์, รศ.ดร.สุรินทร์ คำฝอย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
12.	064	การจัดสรรหน่วยผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวร่วมกับอุปกรณ์ควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบยืดหยุ่นที่เหมาะสมสำหรับการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียโดยใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	ศตวรรษ บูรณา, ปณดิา ธารารักษ์, พีรพล จิราพงศ์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
13.	089	การวิเคราะห์การกระจายสนามไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าบนลูกถ้วยฉนวนแยกสายในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทย	ชัยรัตน์ วฑิยธรรมเจริญ, พิสุทธินี ภูษา, ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
14.	099	การวิเคราะห์สมรรถนะทางไฟฟ้าและฮาร์มอนิกส์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแทนหลอดฟลูออเรสเซนต์ด้วยหลอดแอลอีดี(*T8*) เพื่อการประหยัดพลังงานไฟฟ้า	คณิศร บุญรัตน์, กัญญาภัค ศรีสุข มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง
15.	109	ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมอินทรีย์ที่ได้จากเปลือกหอยเชอรี่ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนยางซิลิโคน	ศุจิรัตน์ เทพศิลา, อำนาจ สุขศรี มหาวิทยาลัยขอนแก่น
16.	110	การรักษาแรงดันไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์โหลดคอนโทรลเลอร์ถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าและบั๊คอินเวอร์เตอร์ปรับอัตราการอัดประจุของแบตเตอรี่	ธนพงศ์ ประทิพพรกุล, ไพรินทร์ เพงไพที, พิชัย อารีย์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
17.	126	ความคงทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซผสมระหว่างก๊าซ SF_6 และก๊าซ N_2	จาตุรนต์ สินธุคุณากร, นรเศรษฐ พัฒนเดช สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
18.	131	การลดแรงบิดสั่นสะเทือนในแกนเพลาของมอเตอร์เหนี่ยวนำด้วยการหน่วงเวลาจ่ายแรงดัน	นิธิชัย แก้วขำ, พิชัย อารีย์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
19.	138	การศึกษาออกแบบระบบเฝ้าระวังและเตือนภัย การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังฉนวนน้ำมันและแสดงผลผ่านทางเว็บไซต์	พินิจ จิตจริง, สิริชัย ประกอบธรรม, อภิสิทธิ์ เมฆะ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
20.	140	การตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด21 *kV* : กรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของบริษัทราชบุรีเพาเวอร์จำกัด	วรัญญู บุญเพ็ญ, ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล, พินิจ จิตจริง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
21.	145	การสร้างแบบจำลองเครื่องกังหันแก๊สสำหรับใช้ศึกษาในระบบไฟฟ้ากำลัง	กรสิทธิ์ สินสมบูรณ์, ศิวพล ศรีสนพนธุ์, คมสันต์ หงส์สมบัติ, บุศรา พิริยะอนนท์

การตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV: กรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของบริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด

Partial Discharge Signals Detecting in 21 kV Generator: Case Study of a Generator at the Combined Cycle Power Plant of Ratchaburi Power Company Limited

วรัญญู บุญเพ็ญ ฉัตรชัย ศุภพิทักษ์สกุล และพินิจ จิตจริง

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

39 หมู่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110 โทรศัพท์: 0-2549-3229 โทรสาร 0-2549-3422

E-mail: warunyu_b@mail.rmutt.ac.th, chatchai.s@en.rmutt.ac.th, pinit.j@en.rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการตรวจจับและวิเคราะห์สัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV เพื่อใช้ในการวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า การศึกษานี้ทำโดยการตรวจวัดและเก็บข้อมูลสัญญาณจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน ที่ติดตั้งภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของบริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด ด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูงร่วมกับชุดจัดเก็บข้อมูล จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B (Turbine Generator Analyzer – Bus Coupler) จากผลการตรวจวัดด้วยวิธีที่นำเสนอ สามารถตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนได้ และมีผลการวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกับผลที่ได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน

คำสำคัญ: สัญญาณดีสชาร์จบางส่วน พีดีเซ็นเซอร์ ออสซิลโลสโคปความเร็วสูง

Abstract

This paper presents a method for detection and analysis of partial discharge signals in generator 21 kV for preventive maintenance planning. In this study were performed at the combined cycle power plant of Ratchaburi Power Co., Ltd., where the generator has installed the partial discharge sensors. The signals were measured and collected using a high speed oscilloscope module with data acquisition. The data is analyzed and compared with the results obtained from the standard instrument Turbine Generator Analyzer – Bus Coupler, TGA-B. As the results, it is found that the partial discharge signals can be captured with the proposed method and the analyzed results tend to be the same as results obtained from the standard instrument.

Keywords: Partial discharge signals, PD sensor, High speed oscilloscope

1. บทนำ

จากสถิติความเสียหายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประมาณ 40% เกิดจากปัญหาที่ฉนวนของสเตเตอร์ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการติดตั้ง Partial Discharge Monitoring และสาเหตุหลักของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้านั้น คือ การเสื่อมสภาพด้วยความร้อน การเคลือบฉนวนที่ไม่ดี การคลายตัวของขดลวด ช่องว่างระหว่างเฟสไม่เพียงพอ และความสกปรกในปลายขดลวด

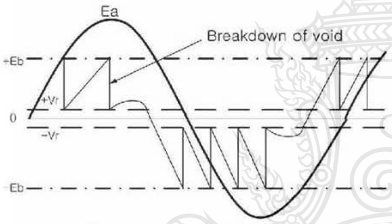
ปัจจุบันเทคโนโลยีในการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนแบบทันท่วงทีมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การตรวจวัดด้วย Capacitor Couplers, การตรวจวัดด้วยวิธี RFCT (Radio Frequency Current Transformer) [1] และการวิเคราะห์ยังสามารถแบ่งออกเป็นหลากหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น การวิเคราะห์รูปแบบ PRPDP (Phase Resolved Partial Discharge Pattern) ในรูปแบบสองมิติ และสามมิติแต่ต้องแปลความหมายโดยผู้มีประสบการณ์ [2] และยังได้มีการพัฒนาโปรแกรมดังกล่าว ซึ่งสามารถแปลผลรูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนในเชิงคุณภาพ เน้นที่ความบกพร่องของฉนวนซึ่งแบ่งตามมาตรฐานสากล [3] และยังมีการตรวจสอบดิสชาร์จบางส่วนในขดลวดแรงดันสูงในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยี GVPI (Global Vacuum Pressure Impregnation) ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นเป็นไปตามมาตรฐาน IEC60270 [4] นอกจากนี้ยังมีเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B (Turbine Generator Analyzer – Bus Coupler) ของ บริษัท IRIS ทำการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อคาดการณ์เวลาวิกฤตของขดลวดสเตเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าโดยใช้วิธี VAR (Vector Autoregressive) [5] ผลการวิเคราะห์ต่างๆเหล่านี้จะช่วยให้สามารถวางแผนการบำรุงรักษาหรือซ่อมแซมตามสภาพจริงของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยไม่ต้องรอการบำรุงรักษาตามเวลา และยังสามารถหาสาเหตุได้ก่อนที่ความเสียหายจะเกิดขึ้น โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมราชบุรี ได้มีการติดตั้งเซ็นเซอร์และทำการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และใช้เครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B ของ บริษัท IRIS ทำการวิเคราะห์ ซึ่งทำปีละ 2 ครั้ง และมีค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดแต่ละครั้ง อีกทั้งต้องรอผลการวิเคราะห์ของบริษัท ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดความสนใจที่ทำการศึกษาการ

ตรวจจับสัญญาณการเกิดดีสชาร์จบางส่วน โดยใช้ออสซิลโลสโคปความเร็วสูงร่วมกับชุดจัดเก็บข้อมูล เพื่อให้ได้ข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ตามมาตรฐานต่อไป

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

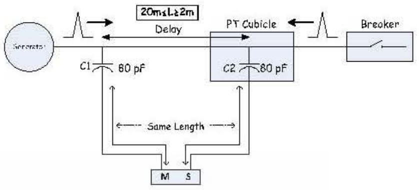
โดยปกติแล้วในฉนวนของ Stator Winding จะมีโพรงของอากาศปะปนอยู่ถึงแม้ว่าจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเครื่องใหม่ก็ตาม ถ้าโพรงอากาศนั้นมีขนาด 1 มิลลิเมตร เมื่อแรงดันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตกคร่อมโพรงอากาศมีค่าสูงกว่า 3 kV/mm (Vair/Dair) จะเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นภายในโพรงอากาศ ดังรูปที่ 1 และในทุกๆ 1 ไซเคิลจะเกิดการเบรกดาวน์ 2 ครั้ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน คือ การมีฉนวนบางส่วนเกิดสภาพการนำไฟฟ้าแต่ไม่ทำให้ฉนวนโดยรวมล้มเหลวในการเป็นฉนวน โดยขณะที่มีแรงดันตกคร่อมโพรงอากาศเรียกว่า "ภาวะการชาร์จ" และขณะที่โพรงอากาศเกิดการเบรกดาวน์ เรียกว่า "ภาวะการดิสชาร์จ" ซึ่งจะเกิดทั้งลูกคลื่นบวก และลูกคลื่นลบ ของแรงดันรูปคลื่นซายน์เวฟ และจะเป็นเช่นนี้ไปตลอดจนกว่าจะได้รับการแก้ไข หรือจนกว่าฉนวนนั้นจะเกิดการล้มเหลว [5-6]



รูปที่ 1 การเกิด Breakdown ในโพรงช่องว่างของอากาศ

3. กรณีศึกษา

บริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วม ตั้งอยู่ในพื้นที่ จังหวัดราชบุรี มีกำลังการผลิตรวมทั้งสิ้น 1,400 เมกะวัตต์ โดยแบ่งออกเป็น 2 บล็อก โดยที่แต่ละบล็อก นั้นจะประกอบด้วย Gas Turbine 2 ยูนิต และ Steam Turbine 1 ยูนิต รวมทั้งหมดแล้ว บริษัท ราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด มีเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งหมด 6 ยูนิต ได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนของ IRIS POWER ENGINEERING, INC. เป็นการติดตั้งด้วยวิธี Capacitor Couplers แบบ Direction 2PD /Phase ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การติดตั้งแบบ Direction 2PD Sensor/Phase

3.1 ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด PD

การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนของ IRIS POWER ENGINEERING, INC จะประกอบด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ

1) Partial Discharge Sensor ประกอบด้วย High Volt Cable & EMCs (Epoxy Mica Capacitors) มีหลายขนาด ขึ้นอยู่กับแรงดันแต่จะมีค่า Capacitance เท่ากันคือ 80 pF ดังรูปที่ 3

2) Terminal Box เป็นจุดที่นำเครื่องมือวัดมาตรฐานไปต่อเพื่อวัดสัญญาณ ภายใน Terminal Box จะมีแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วย แผงวงจรสำหรับติดตั้ง Resistor ขนาด 1,500 โอห์ม, 0.5 วัตต์ ขึ้นไป จำนวน 6 ชุด Varistor ขนาด 90 V จำนวน 6 ชุด และ BNC Jack จำนวน 6 ชุดดังรูปที่ 4

3) Partial Discharge Analyzer ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ เครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B (Turbine Generator Analyzer – Bus Coupler) และเทคนิคการติดตั้ง Capacitor couplers แบบ Directional 2PD Sensor/Phase ซึ่งการติดตั้งแบบ 2 PD Sensor/Phase นั้น สำหรับ Generator ที่มี Lead เป็น IPB หรือ NPB การติดตั้งระยะห่างระหว่าง PD Sensor จะต้องห่างกันไม่น้อยกว่า 2 เมตร โดย PD Sensor C1 ด้าน M (Machine) ควรติดตั้งใกล้ Generator ให้มากที่สุด และ PD Sensor C2 ด้าน S (System) ติดตั้งห่างจาก C1 ไม่น้อยกว่า 2 เมตร แต่ไม่ควรเกิน 20 เมตร เพราะจะทำให้สายนำสัญญาณ Coaxial Cable มีความยาวมากเกินไป ทำให้มีผลลดทอนสัญญาณที่วัดได้ ซึ่งเป็นวิธีการจำกัดสัญญาณรบกวนโดยให้มี Delay Time ระหว่าง PD Sensor C1 และ C2 ไม่น้อยกว่า 5 ns โดยจัดให้สายนำสัญญาณ Coaxial Cable C1 และ C2 มีความยาวเท่ากัน เมื่อมีสัญญาณ PD เกิดขึ้นมาจาก Generator สัญญาณ PD จะมาถึง PD Sensor C1 ก่อนแล้วจึงมาถึง PD Sensor C2 ทีหลัง โดยห่างกันไม่น้อยกว่า 5 ns ซึ่งเครื่องมือวัด มาตรฐาน (TGA-B) สามารถรับรู้ว่าสัญญาณที่ได้รับนั้นมาจากด้าน Generator คือ PD ที่เกิดขึ้นมาจากภายใน Generator โดยจะต้องนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับ Voltage Reference ในช่วงของมุมเฟสที่วัดได้ โดยทำการติดตั้งที่ Gas Turbine และที่ Steam Turbine จำนวน 6 ชุด ตามลำดับ

รูปที่ 3 High Volt Cable & Epoxy Mica Capacitors 80 pF

รูปที่ 4 Terminal Box

(ก) (ข)

รูปที่ 5 (ก) เครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B (ข) เครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย

4. ขั้นตอนการทดสอบ

หลังจากที่ได้ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเป็นที่เรียบร้อยแล้วทางบริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด ได้ดำเนินการให้ผู้เชี่ยวชาญทำการวัดและวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B (Turbine Generator Analyzer–Bus Coupler) และ เก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์สัญญาณดังแสดงรูปที่ 5 (ก) ซึ่งเครื่องมือดังกล่าว เป็นเครื่องมือที่มีฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์สำเร็จรูปซึ่งมีราคาค่อนข้างสูงโดยในระยะเวลา 1 ปี เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแต่ละตัวจะมีการวิเคราะห์ข้อมูลปีละ 2 ครั้ง ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดแต่ละครั้ง อีกทั้งต้องรอผลการวิเคราะห์ของบริษัท ด้วยเหตุนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่ทำการศึกษาการตรวจจับสัญญาณการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ในการศึกษาเบื้องต้นทีมวิจัยได้ใช้โมดูลออสซิลโลสโคปความเร็วสูง รุ่น NI PXIe – 5160 (2.5GS/s, 10-Bits Digitizer) ร่วมกับชุดเก็บข้อมูล (Data Acquisition, DAQ) สำหรับการวัดและบันทึกสัญญาณการเกิด PD ดังแสดงรูปที่ 5 (ข) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นจากสัญญาณที่ได้ นำมาเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน เพื่อนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบต่อไป

5. ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

ทางทีมผู้วิจัยได้ทำการทดสอบและเฝ้าติดตามการเกิดดีสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหลังจากที่ได้ทำการติดตั้ง Capacitor Couplers ไประยะหนึ่งแล้ว สามารถตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนได้ที่ Steam Turbine 10 ที่เฟส A ดังแสดงในรูปที่ 6-7 และจากข้อมูลของ IRIS POWER ENGINEERING,INC. ได้ทำการสรุปลักษณะเฉพาะรูปแบบของการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนดังนี้ [8]

1) สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุม 45° หรือ 225° เป็น PD ที่เกิดในฉนวนของ Stator Winding Generator
2) สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุม 15°, 75° ,195° หรือ 255° เป็น PD ชนิด Phase to Phase หรือ End Winding
3) สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นที่มุม 0° หรือ 180° เป็น PD ที่เกิดขึ้นจากปัญหา Electrical Connection บกพร่อง

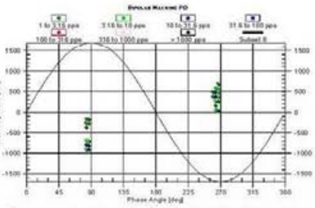
5.1 ผลการทดสอบด้วยเครื่องมือมาตรฐาน

จากข้อมูลรายงานผลการวิเคราะห์การเกิดดิสชาร์จบางส่วน ด้วยเครื่องมือมาตรฐานจาก IRIS POWER ENGINEERING,INC. เมื่อวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2017 ดังรูปที่ 6 ซึ่งหลังจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ ตั้งแต่ปลายปี 2015 ทางผู้เชี่ยวชาญจาก IRIS POWER ENGINEERING, INC. ได้ดำเนินการเก็บข้อมูลครั้งแรกใน วันที่ 8 กรกฎาคม 2016 มีผลการรายงานว่าไม่พบความผิดปกติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ถัดมาครั้งที่สองได้ดำเนินการเก็บข้อมูลในวันที่ 6 กุมภาพันธ์ 2017 พบความผิดปกติของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนขึ้นที่เฟส A ทางบริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด จึงได้มีการวางแผนร่วมกับทางทีมผู้วิจัยและทางตัวแทน IRIS POWER ENGINEERING, INC. ว่าจะต้องมีการเก็บข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อความถูกต้อง โดยมีกำหนดการในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2017 ได้ทำการตรวจวัดและบันทึกข้อมูลอีกครั้ง พบว่ายังมีความผิดปกติของการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า [7] และจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่ามุมเฟสของสัญญาณการเกิดดิสชาร์จนั้น เกิดขึ้นที่มุม 90° และ 270° ของเฟส A ซึ่งมุมเฟสที่เกิดขึ้นนั้นไม่เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

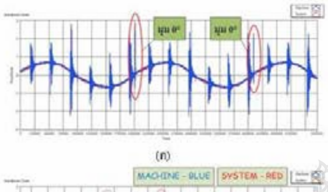
5.2 แสดงผลการวัดด้วยออสซิลโลสโคปความเร็วสูง

ผลการวัดสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วย ออสซิลโลสโคปความเร็วสูง ในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2017 ดังแสดงรูปที่ 7 (ก) โดยทำการตั้งค่าอัตราการเก็บตัวอย่างสัญญาณ (Sampling rate) ที่ 100M/s และตั้งค่าการอ่านตัวอย่างสัญญาณ (Sample to read) ที่ 5M พบสัญญาณผิดปกติเกิดขึ้นที่มุม 0° ของเฟส A และเกิดขึ้นซ้ำกันทุกๆ 1 ไซเคิล ซึ่งเป็นมุมที่แตกต่างจากลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน

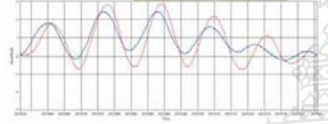
จากการขยายสัญญาณดังกล่าวให้เห็นชัดเจนดังแสดงรูปที่ 7 (ข) จะเห็นได้ว่าสัญญาณทางด้าน System มีค่าสูงกว่าทางด้าน Machine โดยมีค่า Delay time ประมาณ 11 ns และสัญญาณที่เกิดขึ้นมีความถี่ 25 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่จัดอยู่ในช่วงของสัญญาณรบกวน เมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดมาตรฐาน พบว่ามีผลการวิเคราะห์ไปในทิศทางเดียวกัน



รูปที่ 6 สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่ตรวจวัดด้วยเครื่องมือวัดมาตรฐาน TGA-B at Steam Turbine 10 Phase A [7]



(ก)



(ข)

รูปที่ 7 สัญญาณดิสชาร์จบางส่วนจากเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัยที่เฟส A at Steam Turbine 10 เมื่อ (ก) การเกิด PD ที่มุม 0° และ (ข) ภาพขยายการเกิด PD

6. สรุป

จากการศึกษาและทดสอบการเกิดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV ด้วยวิธีการติดตั้งแบบ Directional 2 PD Sensor/Phase at Gas Turbine & Steam Turbine จะเห็นได้ว่าผลการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนที่ Steam Turbine 10 จากเครื่องมือวัดแบบมาตรฐานนั้นมีมุมเฟสการเกิด PD ที่มุม 90° และ 270° ซึ่งทาง IRIS POWER ENGINEERING, INC. ได้สรุปข้อมูลดังกล่าวว่า เป็นมุมการเกิดที่แตกต่างจากรูปแบบปกติและได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเกิดดิสชาร์จบางส่วนดังกล่าวว่า เกิดจาก Open air arc หรือ Corona [8] และเมื่อเปรียบเทียบผลการวัดสัญญาณจากเครื่องมือวัดออสซิลโลสโคปความเร็วสูง ซึ่งเกิดขึ้นที่มุม 0° อันเป็นผลเนื่องมาจากคุณสมบัติของ Capacitor load นั้นกระแสไฟฟ้าจะนำหน้าความต่างศักย์เป็นมุม 90° จาก EMC Reference [9] ได้มีข้อแนะนำให้ทำการเลื่อนมุมเฟสไป 90° ตามทฤษฎี ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า มุมของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่วัดได้จากชุดวัดและบันทึกผลที่นำเสนอ เป็นมุมเดียวกันกับผลการวิเคราะห์จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน คือมุม 90° และ 270° และสัญญาณที่เกิดขึ้นมีความถี่ 25 MHz ซึ่งเป็นความถี่ที่จัดอยู่ในช่วงของสัญญาณรบกวน จากผลสรุปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การตรวจสอบสัญญาณการเกิดดิสชาร์จบางส่วนด้วยชุดวัดและบันทึกผลที่นำเสนอนั้นสามารถนำไปใช้ทดแทนการตรวจสอบด้วยเครื่องมือมาตรฐานได้ อีกทั้งยังเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน เหมาะสำหรับนำไปใช้เพื่อการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน และ สามารถลดจำนวนครั้งการใช้เครื่องมือวัดแบบมาตรฐาน สามารถลดค่าใช้จ่าย อีกทั้งยังลดเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อีกด้วย ในลำดับต่อไปทางบริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด มีแผนงานสำหรับขั้นตอน Shutdown Minor Inspection เพื่อการวางแผนตรวจสอบหาสาเหตุการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในอุปกรณ์ประกอบแต่ละส่วนต่อไป

เอกสารอ้างอิง

[1] นรเศรษฐ พัฒนเดช และธเนศ วอทอง "การตรวจสอบเฝ้าติดตามการเกิดดิสชาร์จบางส่วนของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับแบบซิงโครนัส ขนาด 15.75 kV 211.75 MVA" The 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31).

[2] G. Ujvari, et al, "Partial Discharge Pattern Recognition Algorithm for Turbo Generator Monitoring" 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Sept 2005.

[3] Gert Pascoli, et al, " Partial Discharge Diagnosis of Generator Insulation System–Measurement, Simulation and Picture Recognition" IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electrical and Drives, Sept 2007.

[4] P. G. S. Kumar, et al, " Partial Discharge in Stator Winding Insulation of Turbine Generators–A case study and remedies" , International Conference on Power and Energy System, Dec 2011.

[5] Djoko Darwanto, et al, " Statistical analysis of partial discharge characteristics for predictive maintenance of generator of geothermal power plant" IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Dec 2011.

[6] Hee-Sang Shin, et al, " A study on partial discharge signals and noises at on-line generator stator windings" Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia, Oct 2009.

[7] Power Testing Product "Partial Discharge Report" 24 Feb 2017.

[8] IRIS POWER. PD Seminar – Module 1: Basic PD Theory, Detection and Characteristics.

[9] IRIS POWER PD Seminar – Module 4: Data Collection Using TGA/PDA-IV Instruments.

[10] IEEE 1434:2014, "IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electrical Machinery."

[11] G.C. Stone et al, "On-line Partial Discharge Measurement in Hydrogen-cooled Machines", IEEE EIC Conference, June, 2016.

KMUTNB

EECON XL

EEAAT Electrical Engineering Academic Association (Thailand)

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐ (EECON-40)

ระหว่างวันที่ ๑๕-๑๗ พฤศจิกายน ๒๕๖๐

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ขอมอบเกียรติบัตรนี้ให้ไว้เพื่อแสดงว่า

นายวรัญญู บุญเพ็ญ

ได้นำเสนอผลงานในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐

เรื่อง

การตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพิกัด 21 kV: กรณีศึกษาเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ณ โรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมของบริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไกรสร ไชยชาววงศ์
ประธานคณะกรรมการจัดงาน
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐

พิสิษฐ์ ลิ่วธนกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.พิสิษฐ์ ลิ่วธนกุล
ประธานคณะกรรมการฝ่ายพิจารณาบทความ
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๐

รองศาสตราจารย์ ดร.อธิคม ฤกษบุตร
นายกสมาคมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
(ประเทศไทย)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวรัญญู บุญเพ็ญ
วัน เดือน ปีเกิด	28 สิงหาคม 2520
ที่อยู่	106 หมู่ 3 ตำบลท่าราบ อำเภอเมือง ราชบุรี 70000
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง วิทยาลัยเทคนิคราชบุรี ปี พ.ศ. 2540 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง มหาวิทยาลัยศรีปทุม ปี พ.ศ. 2556 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี พ.ศ. 2560
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2550-พ.ศ. 2561 แผนกระบบบริหารงานเดินเครื่องและบำรุงรักษา กองพัฒนามาตรฐานงานเดินเครื่องและบำรุงรักษาไฟฟ้า ฝ่ายประสิทธิภาพการผลิต การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ปฏิบัติงานประจำที่บริษัทราชบุรีเพาเวอร์ จำกัด