



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาวิธีการทางสถิติในการแยกแยะรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

The study of statistical method for partial discharge classification of
high voltage apparatus

ผศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
นายแพทย์นิ่มสนอง

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาวิธีการทางสถิติในการแยกแยะรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน
ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

The study of statistical method for partial discharge classification of
high voltage apparatus

ผศ.ดร. นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
นายเพทายนิมสนอง

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ การศึกษาวิธีการทางสถิติในการแยกแยะรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
แหล่งเงิน โครงการวิจัยงบประมาณเงินได้ ประจำปีงบประมาณ 2558

ประจำปีงบประมาณ 2558 **จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน** 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ต.ค. 2557 ถึง 30 ก.ย. 2558

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผู้ร่วมโครงการวิจัย นายเพทาย นิมสนอง ฝ่ายควบคุมระบบไฟฟ้าการไฟฟ้านครหลวง

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการศึกษาวิธีการทางสถิติในการแยกแยะรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยทำการจำลองรูปแบบของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน 5 ประเภทได้แก่ โครนา ดิสชาร์จด้านแรงดันสูงในอากาศ โครนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำในอากาศ โครนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูงใน น้ำมันหม้อแปลง โครนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำในน้ำมันหม้อแปลง และดิสชาร์จตามผิวเพรสบอร์ดในฉนวน น้ำมันหม้อแปลง และทำการวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีดั้งเดิมตาม มาตรฐาน IEC 60270 สัญญาณที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์คุณลักษณะทางสถิติรวม 11 ตัวแปร และใช้เป็นตัวแปรอินพุทของโมเดลจดจำรูปแบบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วน งานวิจัยนี้ศึกษา วิเคราะห์ และ ประดิษฐ์โปรแกรมแยกแยะการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยประยุกต์ใช้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียม 3 โมเดลได้แก่ Self-Organizing Map, Generalized Regression Networks และ Probabilistic Neural Network พบว่าโมเดลที่ศึกษาทั้ง 3 โมเดลสามารถจดจำและแยกแยะ รูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน จากการทดลองได้ถูกต้องมีประสิทธิภาพสูง โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้ดี สะดวกในการวิเคราะห์ลักษณะรูปแบบ ดิสชาร์จบางส่วน และมีความศักยภาพสูงพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการแยกแยะรูปแบบดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

คำสำคัญ : สัญญาณดิสชาร์จบางส่วน การวิเคราะห์คุณลักษณะทางสถิติ การจำแนกการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

Research Title: The study of statistical method for partial discharge classification of high voltage apparatus

Researcher:

1) Asst.Prof.Dr. Norasage Pattanadech

Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

2) Mr. Phethai Nimsanong

Power System Operation and Control Section 2, Power System Control Department, Metropolitan Electricity Authority, Thailand

ABSTRACT

This research work presents the study of a statistical method for partial discharge classification occurring in high voltage equipment. Five partial discharge types, corona at high voltage side in air, corona at low voltage side in air, corona at high voltage side in mineral oil, corona at low voltage side in mineral oil, and surface discharge in mineral oil were simulated and experimented according to IEC 60270. The eleven statistic parameters were extracted from the partial discharge signals and used to be input parameters of the partial discharge classification models. This research work studied, analyzed and invented the partial discharge classification program employing three types of neural network models i.e. Self-Organizing Map, Generalized Regression Networks, and Probabilistic Neural Network for partial discharge classification. It was found that the invented models can classify partial discharge patterns from experimental data with high efficiency. The developed partial discharge classification program was easy to be used to classify partial discharge types and high potential to be applied for partial discharge classification of high voltage apparatus.

Keywords: partial discharge signal, statistical feature analysis, partial discharge classification, neural network model

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการวิจัยงบประมาณเงินได้ลำดับที่ 2558 - 01 - 01009 ประจำปีงบประมาณ 2558 ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องทดสอบและ เครื่องมือวัดต่างๆ ในการทดลอง รวมทั้งขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาตรี และบัณฑิตศึกษา ประจำปีห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงทุกท่านสำหรับความช่วยเหลือในการทำงานวิจัยนี้

ผศ.ดร.นรเศรษฐ์ พัฒนเดช
นายเพทาย นิ่มสนอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	9
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	9
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	9
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	10
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	10
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง.....	17
3.1 การออกแบบสร้างโมเดลการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง.....	17
3.2 วงจรการทดลองการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง.....	20
3.3 ผลการทดลอง.....	21
บทที่ 4 การวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นและการแยกแยะรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	23
4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของสัญญาณ PD.....	23
4.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของสัญญาณ PD จากการทดลองด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น.....	26
4.3 การแยกแยะรูปแบบการเกิด PD.....	31
4.4 การออกแบบโครงสร้างโมเดล NN.....	33
4.5 การประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อใช้ในการแยกแยะการเกิด PD.....	38
4.6 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรมแยกแยะรูปแบบ PD.....	39
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ข้อเสนอแนะ	43
บรรณานุกรม	44
ภาคผนวก	46
ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย	66

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวดำเนินการทางสถิติ	13
ตารางที่ 2.2 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ	15
ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ของดิสซาร์จบางส่วน	31
ตารางที่ 4.2 ผลการฝึกฝนและการทดสอบโมเดล	35
ตารางที่ 4.3 ผลการฝึกฝนโมเดล PCA-PNN	37
ตารางที่ 4.4 การทำนายรูปแบบ PD ของโมเดล PNN.....	37

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1รูปแบบการเกิดของ PD.....	11
ภาพที่ 2.2วงจรการตรวจวัด PD	12
ภาพที่ 2.3ตัวอย่างสัญญาณ PD	12
ภาพที่ 2.4ตัวอย่างรูปแบบของสัญญาณ PD.....	13
ภาพที่ 2.5 ไดอะแกรมการแปลงข้อมูลโดยใช้เทคนิค PCA	14
ภาพที่ 3.1 ไดอะแกรมโครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์โทรด	17
ภาพที่ 3.2 แบบจำลองการเกิด PD.....	18
ภาพที่ 3.3 ไดอะแกรมแบบจำลองการเกิด PD.....	18
ภาพที่ 3.4 การกระจายสนามไฟฟ้าของแบบจำลองการเกิด PD.....	19
ภาพที่ 3.5 ไดอะแกรมและวงจรการทดสอบการเกิด PD.....	20
ภาพที่ 3.6 ผลการทดลอง HV-A ที่ระดับแรงดัน 3.6 kV	21
ภาพที่ 3.7 ผลการทดลอง LV-A ที่ระดับแรงดัน 3.74 kV	21
ภาพที่ 3.8 ผลการทดลอง HV-O ที่ระดับแรงดัน 21.4 kV	21
ภาพที่ 3.9 ผลการทดลอง LV-O ที่ระดับแรงดัน 26.1 kV.....	22
ภาพที่ 3.10 ผลการทดลอง SF-O ที่ระดับแรงดัน 5.4 kV	22
ภาพที่ 4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของสัญญาณ PD.....	23
ภาพที่ 4.2 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้ ซอฟต์แวร์ mtronix MPD600	24
ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างการ run โปรแกรม Feature_Extraction_IEC.m	25
ภาพที่ 4.4 ตัวอย่างผลการ run โปรแกรม	25
ภาพที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของ HV-A.....	26
ภาพที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของ LV-A.....	27
ภาพที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของ HV-O.....	28
ภาพที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของ LV-O	29
ภาพที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของ SF-O.....	30
ภาพที่ 4.10 การแบ่งข้อมูล	32
ภาพที่ 4.11 โครงสร้างโมเดล SOM	33
ภาพที่ 4.12 ผลการฝึกฝนโมเดล	33
ภาพที่ 4.13 ผลการทดสอบโมเดล.....	34

สารบัญภาพ(ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.14 โครงสร้างโมเดล GRNN1 และ GRNN2.....	34
ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตและค่าเป้าหมายของโมเดล GRNN1.....	35
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตและค่าเป้าหมายของโมเดล GRNN2.....	36
ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟ principal components เทียบกับ % variance explained.....	36
ภาพที่ 4.18 โครงสร้างโมเดล PNN	37
ภาพที่ 4.19 ไดอะแกรมการใช้เทคนิค PCA ร่วมกับโมเดล PNN.....	37
ภาพที่ 4.20 ไดอะแกรมโปรแกรมการจำแนกเกิดดิสซาร์จบางส่วน	38
ภาพที่ 4.21 ตัวอย่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น.....	39
ภาพที่ 4.22 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ	40
ภาพที่ 4.23 ผลการจำแนกสัญญาณ PD จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น.....	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเกิดพาร์เซียมลิตัสชาร์จ (PD) เป็นสาเหตุหลักที่สำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดความล้มเหลวในการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ก่อให้เกิดความสูญเสียอย่างต่อเนื่องต่อบุคลากรที่ปฏิบัติงานในขณะนั้นรวมทั้งค่าใช้จ่ายต่างๆในการจัดซ่อม หรือจัดซื้ออุปกรณ์ตัวใหม่มาติดตั้งใช้งานแทนตัวเก่าที่ชำรุด ส่งผลให้เสถียรภาพและความเชื่อถือได้ต่อระบบไฟฟ้าลดลง และเกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจและสังคมตามมา อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่สำคัญมีความจำเป็นที่จะต้องทดสอบวัดค่าการเกิด PD ก่อนนำไปใช้งาน และจะต้องมีการตรวจวัดเป็นระยะในระหว่างการใช้งานอีกด้วยเพื่อช่วยให้สามารถตรวจสอบและแก้ปัญหาอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงก่อนที่จะเกิดความล้มเหลวได้ การเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง สามารถเกิดขึ้นได้ในหลายกรณี ลักษณะรูปแบบการเกิด PD มีหลากหลาย ผู้ที่ทำการทดสอบมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาและแยกแยะหาคุณลักษณะการเกิด PD เพื่อใช้ในการระบุว่าเป็นการเกิด PD ชนิดใดซึ่งจะนำไปแก้ปัญหาได้ถูกต้อง การแยกแยะลักษณะรูปแบบการเกิด PD จำเป็นต้องใช้ผู้ที่ชำนาญและมีประสบการณ์สูงซึ่งมีอยู่จำนวนน้อยมากๆ ในประเทศไทย ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกในการวิเคราะห์ลักษณะรูปแบบการเกิด PD ที่เกิดขึ้นได้ปัญหาหลายรูปแบบงานวิจัยชิ้นนี้จึงพัฒนาวิธีการหาค่าทางสถิติเพื่ออธิบายลักษณะรูปแบบการเกิด PD ที่เกิดขึ้นได้และทำการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นมาจดจำรูปแบบดังกล่าวเพื่อช่วยในการระบุประเภทของการเกิด PD

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
- 2) ศึกษากระบวนการวัดและการทดสอบการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงตามมาตรฐาน IEC
- 3) วิเคราะห์คุณลักษณะรูปแบบการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
- 4) ประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อใช้ในการระบุประเภทการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ออกแบบและประกอบสร้างชุดจำลองการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง จำนวน 5 รูปแบบ ได้แก่ โครนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูงในอากาศ (HV-A) โครนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำในอากาศ (LV-A) โครนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูงในน้ำมันหม้อแปลง (HV-O) โครนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำในน้ำมันหม้อแปลง (LV-O) และดิสชาร์จตามผิวเพอร์สโบริดในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง (SF-O)
- 2) ทำการทดลองหารูปแบบการเกิด PD ของโมเดลที่สร้างขึ้นตามมาตรฐาน IEC60270
- 3) วิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของรูปแบบการเกิด PD ในแต่ละกรณีโดยเน้นวิธีทางสถิติ
- 4) ประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อใช้ในการแยกแยะการเกิด PD

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1) ค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากวารสารทางวิชาการ เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการทำวิจัย
- 2) ศึกษาเทคนิคการวัด PD ตามมาตรฐาน IEC60270 จัดเตรียมวงจรการทดลอง
- 3) จำลองรูปแบบความบกพร่องแบบต่างๆและทดลองวัด PD บันทึกผลการทดลอง
- 4) สร้างโมเดลทางสถิติเรียนรู้จัดจำรูปแบบของการเกิด PD จากการทดลอง
- 5) พัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของสัญญาณ PD
- 6) จัดทำรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติจากสัญญาณ PD ที่วัดได้
- 2) จำแนกประเภท PD ของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้โมเดลทางสถิติได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

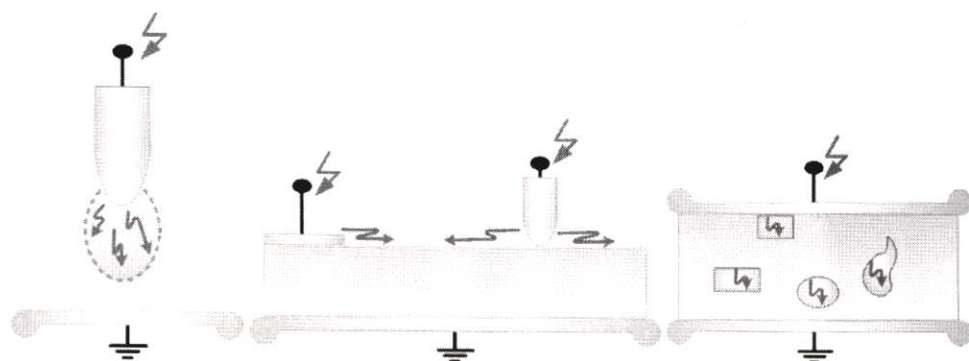
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge, PD) หมายถึงการดีสชาร์จทางไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมโยงถึงกันอย่างสมบูรณ์ระหว่างอิเล็กโทรด [1, 2] ซึ่งอาจเกิดขึ้นในฉนวนก๊าซ ฉนวนเหลว หรือฉนวนแข็ง เมื่อเกิด PD ขึ้นจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ตามมาคือ แสงเสียงกระแสพัลส์ไฟฟ้ากำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่สูงปฏิกิริยาเคมี และความร้อน [3, 4]

2.1.1 ประเภทของการเกิด PD

PD โดยทั่วไปแบ่งตามลักษณะที่เกิดขึ้นได้เป็น 3 แบบคือ โคโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge) ดีสชาร์จตามผิว (Surface discharge) และ ดีสชาร์จภายใน (Internal partial discharge) ดังภาพที่ 2.1

- 1) โคโรนาดีสชาร์จเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงที่บริเวณอิเล็กโทรดปลายแหลมหรือขอบคมในก๊าซ หรือในของเหลว ดังภาพที่ 2.1 (ก)
- 2) ดีสชาร์จตามผิว เกิดขึ้นเมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้า สูงตามแนวขนานกับผิวของไดอิเล็กตริก ดังภาพที่ 2.1 (ข)
- 3) ดีสชาร์จภายในเกิดขึ้นในโพรงก๊าซหรือสิ่งแปลกปลอมที่มีค่าความคงทนไดอิเล็กตริกต่ำภายในเนื้อฉนวน แข็ง หรือฉนวนเหลว ดังภาพที่ 2.1 (ค)



(ก) โคโรนาดีสชาร์จ

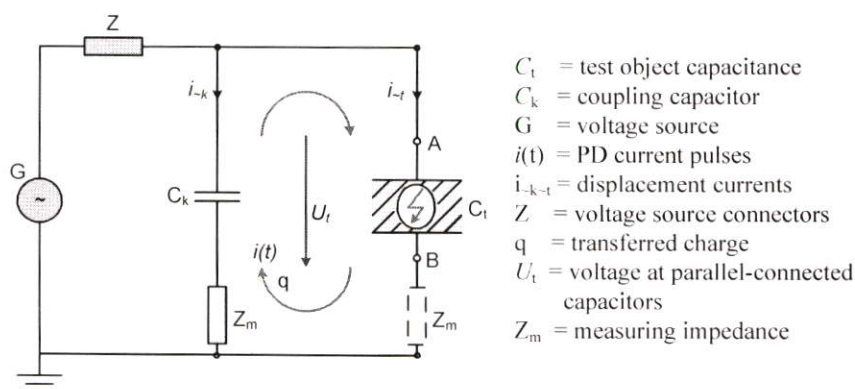
(ข) ดีสชาร์จตามผิว

(ค) ดีสชาร์จภายใน

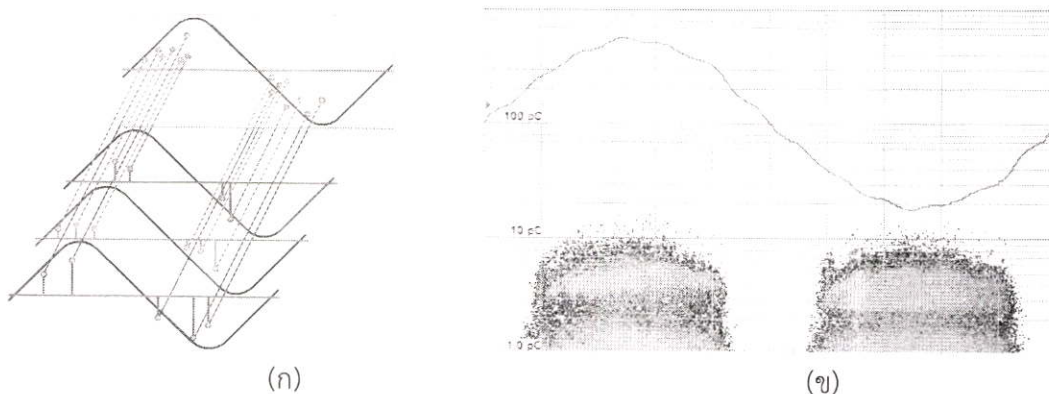
ภาพที่ 2.1 รูปแบบการเกิดของ PD

2.1.3 วงจรพื้นฐานการวัด PD

เทคนิคการตรวจวัด PD ตามมาตรฐาน IEC 60270 วงจรดังภาพที่ 2.2 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันสูง G , วัสดุทดสอบ C_t , ตัวเก็บประจุคัปเปิล C_k และอิมพีแดนซ์วัด Z_m โดยใช้หลักการตรวจจับกระแสพัลส์ความถี่สูง $i(t)$ ที่เกิดขึ้นที่วัสดุทดสอบและไหลวนระหว่าง C_k และ C_t ทำการตรวจจับ $i(t)$ ที่ไหลผ่าน Z_m ซึ่ง Z_m สามารถต่อได้ทั้งอนุกรมกับตัวเก็บประจุคัปเปิล C_k หรืออนุกรมกับวัสดุทดสอบ C_t ระบบวัดมีทั้ง wide-band และ narrow-band [5] สัญญาณที่วัดได้ตัวอย่างดังภาพที่ 2.3 คือ ประจุที่ปรากฏ q ตำแหน่งมุมเฟส Φ และอัตราการเกิดซ้ำ n พารามิเตอร์ q , Φ และ n สามารถนำไปคำนวณและวิเคราะห์ค่าทางสถิติได้ [6]



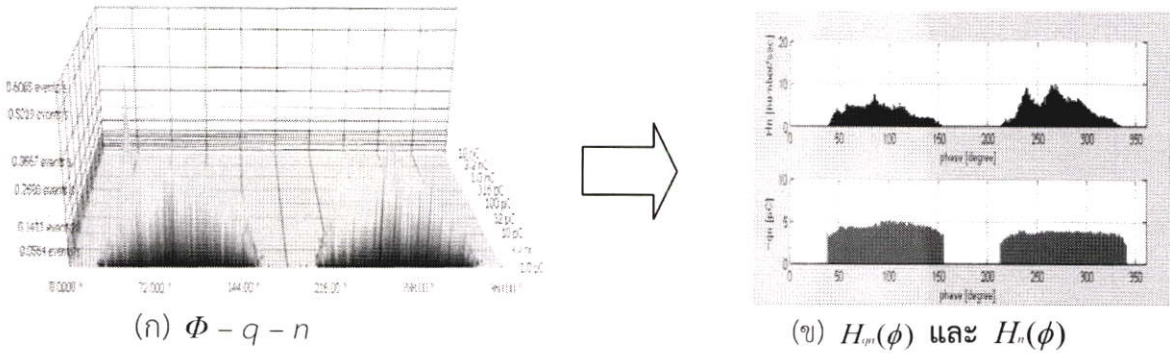
ภาพที่ 2.2 วงจรการตรวจวัด PD



ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างสัญญาณ PD

2.1.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของสัญญาณ PD

การตรวจวัด PD ด้วยวิธีดั้งเดิมแบบ PRPDA (Phase Resolving Partial Discharge Analyzer) แสดงผลการวัด PD ในรูปแบบการกระจาย 3 มิติ $\Phi - q - n$ เมื่อ Φ คือมุมเฟสของแรงดัน, q คือขนาดประจุ, และ n คือจำนวนครั้งการเกิด PD ซ้ำ สามารถแสดงรูปแบบการกระจาย ขนาดประจุเฉลี่ยตามมุมเฟส $H_{qn}(\phi)$ และการกระจายจำนวนครั้งการเกิด PD ซ้ำตามมุมเฟส $H_n(\phi)$ ดังภาพที่ 2.4 ซึ่งนำไปสู่การวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นทางสถิติได้โดยใช้สมการดังตารางที่ 2.1 [7, 8]



ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างรูปแบบของสัญญาณ PD

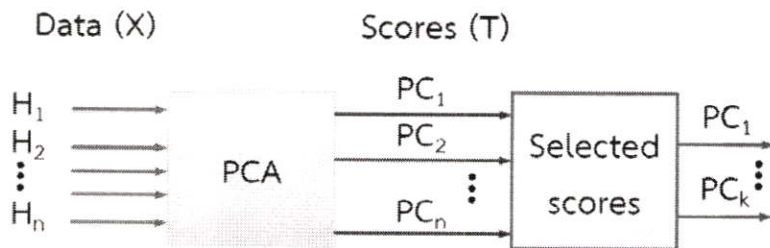
ตารางที่ 2.1 ตัวดำเนินการทางสถิติ

Skewness	$Sk = \frac{E(q - \mu)^3}{\sigma^3}$
Kurtosis	$Ku = \frac{E(q - \mu)^4}{\sigma^4}$
Discharge asymmetry	$Q = (Q_s^- / N^-) / (Q_s^+ / N^+)$
Cross correlation factor	$cc = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i / n}{\sqrt{[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n][\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n]}}$
Modified cross-correlation factor	$mcc = Q \times cc$

โดยที่ q คือ ขนาดประจุตัวอย่าง, μ คือ ค่าเฉลี่ยของการกระจายประจุตัวอย่าง, E คือ ตัวดำเนินการค่าคาดหวัง, σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน, Q_s^+ และ Q_s^- คือ ผลรวมของการกระจายประจุ $H_{qn}(\phi^+), H_{qn}(\phi^-)$, N^+ และ N^- คือ จำนวนของการกระจายประจุ $H_{qn}(\phi^+), H_{qn}(\phi^-)$, x_i คือ ขนาดประจุในแต่ละเฟสทางด้านรูปคลื่นแรงดันบวก, y_i คือ ขนาดประจุในแต่ละเฟสทางด้านรูปคลื่นแรงดันลบ, n คือ จำนวนของมุมเฟสต่อครั้งรูปคลื่น

2.1.5 การวิเคราะห์ตัวประกอบหลัก

การวิเคราะห์ตัวประกอบหลัก (Principal Component Analysis, PCA) คือเทคนิคการลดจำนวนตัวแปร โดยสร้างตัวแปรใหม่จะเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรเดิม และตัวแปรใหม่จะมีรายละเอียดหรือข้อมูลของตัวแปรเดิม จำนวนตัวแปรใหม่จะไม่เกินจำนวนตัวแปรเดิม [9,10,11] การแปลงข้อมูลจากเซตของตัวแปรเดิมไปเซตของตัวแปรใหม่ดังภาพที่ 2.5 และสมการที่ 2.1



ภาพที่ 2.5 ไดอะแกรมการแปลงข้อมูลโดยใช้เทคนิค PCA

$$\mathbf{T}_{mxk} = \mathbf{X}_{mxn} \mathbf{P}_{nxk} \quad (2.1)$$

เมื่อ T คือ เมตริกซ์ของตัวแปรใหม่เรียกว่าเมตริกซ์ score, X คือ เมตริกซ์ของตัวแปรเดิม, P คือเมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลงข้อมูลเรียกว่าเมตริกซ์ loading, m คือ จำนวนค่าสังเกต, n คือ จำนวนตัวแปรเดิม, k คือ จำนวนตัวแปรใหม่

2.1.6 โมเดลโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks, NN) คือ ระบบการคำนวณที่เลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ โดยมีการถ่ายทอดส่งผ่านข้อมูลอินพุตเข้าสู่หน่วยประมวลผลของระบบ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานของระบบคือข้อมูลเอาต์พุตโดยที่หน่วยประมวลผลนี้จะเรียกว่านิวรอน การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมจะขึ้นกับลักษณะการเชื่อมต่อระหว่างนิวรอน (Neural, Node) และค่าน้ำหนัก (Weight) ต่าง ๆ [12, 13]

2.1.7 โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.1 แสดงรูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆซึ่งมีสถาปัตยกรรมและลักษณะของนิวรอนที่แตกต่างกันอัลกอริธึมสำหรับการเรียนรู้ก็มีความแตกต่างกันเช่นบางชนิดเรียนรู้แบบ Supervised Learning บางชนิดเป็น Unsupervised Learning และสำหรับการประยุกต์ใช้งานก็มีความแตกต่างกันไปเช่น Pattern Classification, Regression, Function Approximation, Interpolation, clustering เป็นต้น

ตารางที่ 2.2 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบต่างๆ [12, 13]

รูปแบบ	สถาปัตยกรรม/ ลักษณะเฉพาะของนิวรอน	อัลกอริทึมสำหรับ เรียนรู้	การประยุกต์ใช้งาน
Perceptron	Single-Node, Feedforward/ Binary- Threshold	Supervised, Error- correction	Pattern Classification
Adaline	Single-Node, Feedforward/ Linear	Supervised, Gradient Descent	Regression
Multilayer Perceptron	Multilayered Feedforward/ Nonlinear Sigmoid	Supervised, Gradient Descent	Function Approximation, Pattern Classification, Control Systems, etc.
Reinforcement Learning	Multilayered/ Binary- Threshold	Supervised reward- punishment	Robot Control
Support Vector Machines	Multilayered kernel based/ Binary-threshold	Supervised Quadratic Optimization	Classification, Regression
Radial Basis Function	Multilayered Distance based/ Linear	Supervised Gradient Descent	Interpolation, Regression, Classification
Hopfield Network	Single Layer, Feedback/ Binary- threshold/ Linear	Outer product correlation	Optimization
Boltzmann Machine	Two layered, feedback/ Binary threshold	Stochastic Gradient Descent	Optimization
Bidirectional Associative Memory	Two layered, feedback/ Binary threshold	Outer product correlation	Associative Memory
Adaptive Resonance Theory	Two layered/ Binary, faster-than-linear	Unsupervised competitive	Clustering, Classification
Vector Quantization	Single layered, feedback/ Faster than linear	Supervised- Unsupervised competitive	Quantization, Clustering, Classification
Mexican hat net	Single Layer, Feedback/ Linear Threshold	None, Fixed weights	Activity Clustering
Kohonen Self Organizing Feature Map	Single Layer, Linear Threshold	Unsupervised, Soft-Competitive	Clustering, Topological Mapping, Classification
Pulsed Neuron models	Single/Multilayer, Pulsed IF Neuron	None	Coincidence detection, Temporal Processing

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kreuger และ Gulski [14] ได้ศึกษาการตรวจวัด PD ในระบบฉนวน โดยใช้ระบบ digital computer สามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของ PD และบอกพฤติกรรมที่แตกต่างของ PD ได้ ในปี 1992 ได้พัฒนาการเรียนรู้จำและการจำแนกประเภทของ PD จากแหล่งกำเนิดที่ต่างกัน โดยสร้าง fingerprint เพื่อเปรียบเทียบและช่วยในการจำแนกประเภท PD ที่เกิดขึ้น และต่อมาได้พัฒนาการเรียนรู้จำรูปแบบ PD ที่ไม่ทราบสาเหตุการเกิดมาก่อน โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่ได้วิเคราะห์จากเครื่องตรวจวัด PD และจำแนกรูปแบบการเกิด PD โดยใช้วิธี contour score procedure และใช้ neural network มาช่วยในการจดจำรูปแบบ PD

เกรวิน วิเศษจินดาวัฒน์ และคณะ [15] ได้นำเสนอโปรแกรมวิเคราะห์ PD เรียนรู้และจดจำรูปแบบของการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยหาค่าทางสถิติจากความสัมพันธ์ของ $\phi - q - n$ เมื่อ ϕ คือมุมเฟสของแรงดัน, q คือขนาดประจุ, n คือจำนวนครั้งการเกิด PD ซ้ำ ที่ได้จากเครื่องตรวจวัด PD ซึ่งมีตัวแปรวิเคราะห์ทั้งหมด 11 ตัว และใช้วิธีแฟรกทัลจะได้ตัวแปรทั้งหมด 13 ตัว และใช้โมเดลโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับเจเนติกอัลกอริทึม เพื่อรู้จำรูปแบบของการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้ 3 ประเภทคือ โคโรนาดีสชาร์จ, ดีสชาร์จภายใน และดีสชาร์จตามผิว

ดร.วุฒิชัย ซาติพัฒนานันท์ และคณะ [16-22] ได้นำเสนอวิธีการทางสถิติหลายวิธีมาช่วยในการจำแนกกลุ่ม PD คือการจำแนกกลุ่มโดยใช้ Cluster Analysis, Quick Unbiased and Efficient Statistical Tree, QUEST, การวิเคราะห์ตัวประกอบหลัก (Principal Component Analysis, PCA) และการจำแนกกลุ่ม (Linear Discriminant Analysis), Chi-squared Automatic Interaction Detector (CHAID), Classification and Regression Tree, K-Means ซึ่งจะสามารถจำแนกกลุ่มการเกิด PD ได้โดยใช้ข้อมูลทางสถิติที่ได้จากข้อมูลคุณลักษณะเด่นของ PD แต่ยังไม่ได้พัฒนาในส่วนการเรียนรู้จำรูปแบบการเกิด PD

รัชกร ปานหอทอง และคณะ [23] ได้นำเสนอเทคนิคทางสถิติ Kolmogorov-Smirnov One-Sample Test มาวิเคราะห์รูปแบบการเกิด PD และหาคุณลักษณะเฉพาะของรูปแบบการเกิด PD เสมือนเป็นลายนิ้วมือ (fingerprint) และวิเคราะห์สาเหตุการเกิด PD จากผลต่างของรูปร่างลายนิ้วมือ ซึ่งใช้รูปแบบรูปร่างลายนิ้วมือทั้งหมด 15 รูปแบบหรือตัวแปร 15 ตัว มาใช้ในการวิเคราะห์จำแนกประเภทของการเกิด PD

การจำลองรูปแบบการเกิด PD ที่ผ่านมานักวิจัยต่างๆจะเป็นการจำลองการเกิด PD ที่เกิดขึ้นในอากาศหรือล้อมรอบด้วยฉนวนอากาศเป็นหลัก แต่ในงานวิจัยที่นำเสนอจะมีจุดเด่นตรงที่มีการขยายการศึกษาการเกิด PD ในน้ำมันฉนวนซึ่งถือเป็นฉนวนหลักของหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นจะมีประโยชน์เป็นอย่างมากต่ออุตสาหกรรมหม้อแปลงและต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีหม้อแปลงเป็นองค์ประกอบ

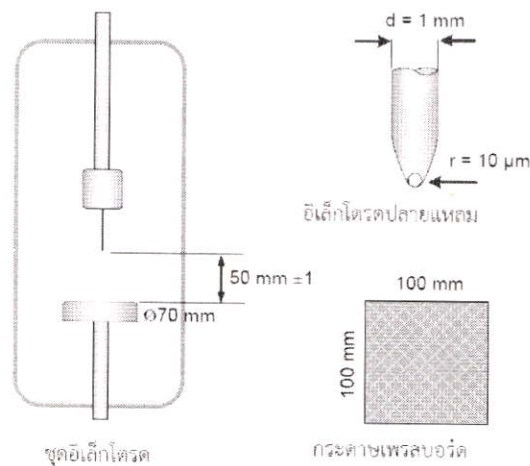
บทที่ 3

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้นำเสนอการเก็บตัวอย่างสัญญาณ พาร์เซียลดิสชาร์จ (PD) จำนวน 5 รูปแบบ ได้แก่ โครนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูงในอากาศ (HV-A) โครนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำในอากาศ (LV-A) โครนาดิสชาร์จด้านแรงดันสูงในน้ำมันหม้อแปลง (HV-O) โครนาดิสชาร์จด้านแรงดันต่ำในน้ำมันหม้อแปลง (LV-O) และดิสชาร์จตามผิวเพอร์สบอร์ดในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง (SF-O) เพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ทางสถิติและนำค่าพารามิเตอร์ทางสถิติฝึกฝนโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมรูปร่างรูปแบบประเภทของ PD

3.1 การออกแบบสร้างโมเดลการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

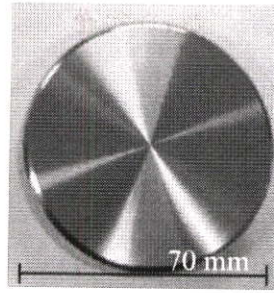
โมเดลจำลอง HV-ALV-A HV-O และ LV-O ออกแบบโดยใช้อิเล็กโตรดปลายแหลมทำจากทังสเตนโดยที่รัศมีปลายแหลมเท่ากับ 10 ไมโครเมตร และอิเล็กโตรดระนาบทำจากทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 70 มิลลิเมตร ในกรณี SF-O ใช้กระดาษเพอร์สบอร์ดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 100x100 มิลลิเมตร ความหนาเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร ไดอะแกรมโครงสร้างอิเล็กโตรดแสดงดัง ภาพที่ 3.1 และแบบจำลองการเกิด PD แสดงดัง ภาพที่ 3.2



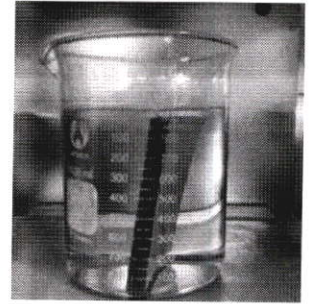
ภาพที่ 3.1 ไดอะแกรมโครงสร้างอิเล็กโตรด



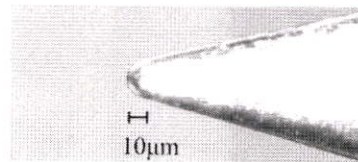
(ก) โมเดลจำลองการเกิด PD



(ข) อิเล็กโตรดระนาบ



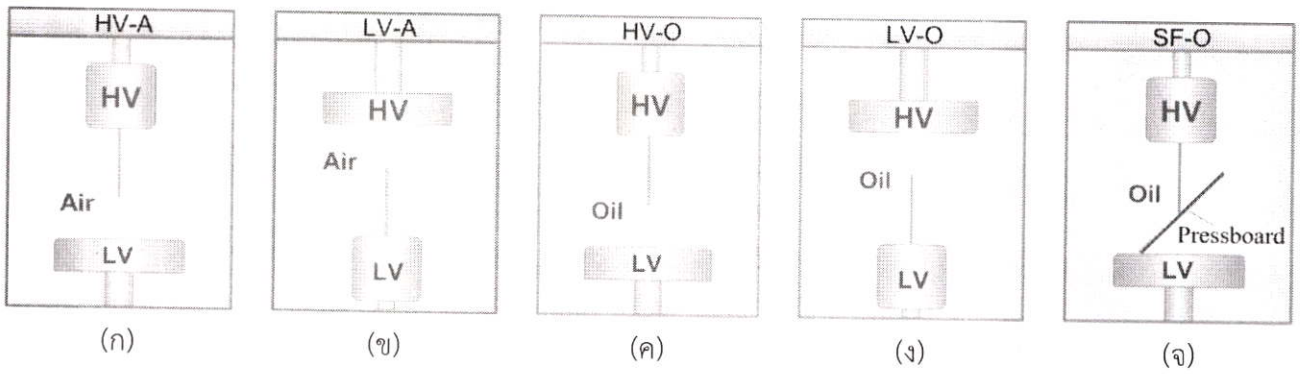
(ค) กระดาษเพรสบอร์ด



(ง) อิเล็กโตรดปลายแหลม

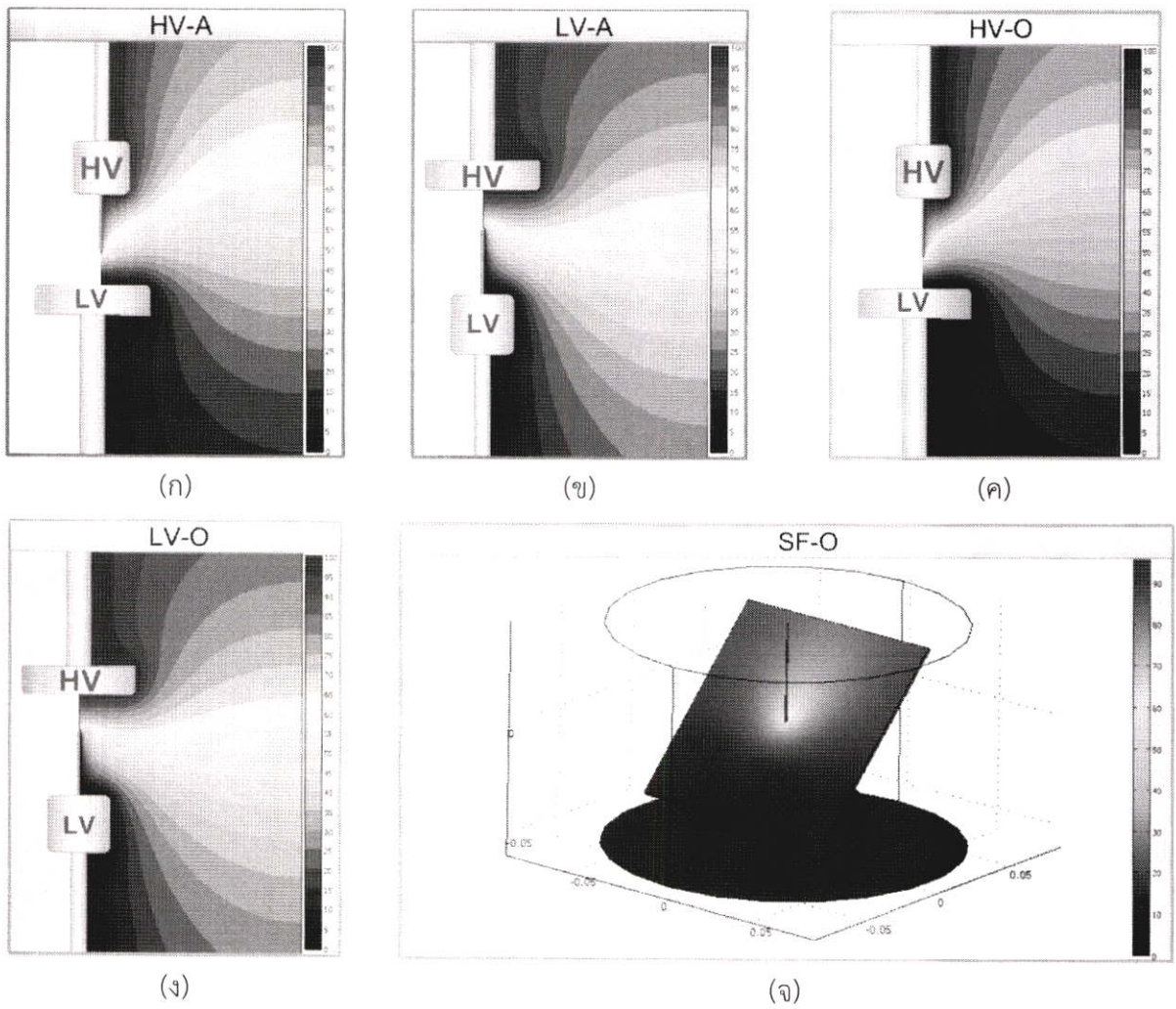
ภาพที่ 3.2 แบบจำลองการเกิด PD

ไดอะแกรมจำลอง HV-ALV-A HV-OLV-O และ SF-O แสดงดังภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 ไดอะแกรมแบบจำลองการเกิด PD

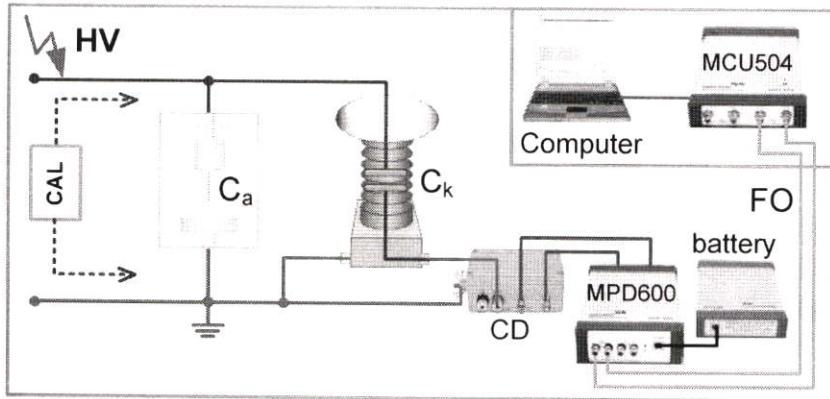
ลักษณะการกระจายสนามไฟฟ้าของแบบจำลอง HV-ALV-A HV-OLV-O และ SF-O ที่ออกแบบ คำนวณ โดยใช้วิธีการระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดังภาพที่ 3.4



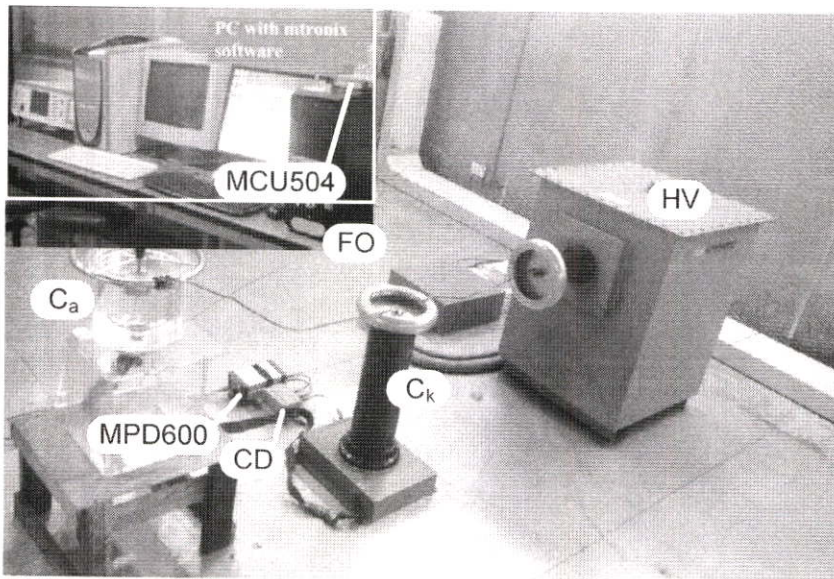
ภาพที่ 3.4 การกระจายสนามไฟฟ้าของแบบจำลองการเกิด PD

3.2 วงจรการทดลองการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

ไดอะแกรมและวงจรการทดสอบการเกิด PD แสดงดังภาพที่ 3.5 ประกอบด้วย HV คือ หม้อแปลงทดสอบ, C_a คือชุดจำลองดีสชาร์จบางส่วน, C_k คือตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว, CD คือ ตัวตรวจจับสัญญาณคาบเกี่ยว, FO คือสายเคเบิลใยแก้วนำแสง, MPD600 คือ Acquisition unit, MCU504 คือ Fiber optic controller



(ก) ไดอะแกรมการตรวจวัด
ดีสชาร์จบางส่วน

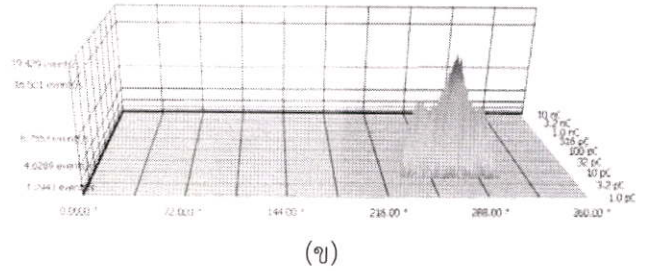
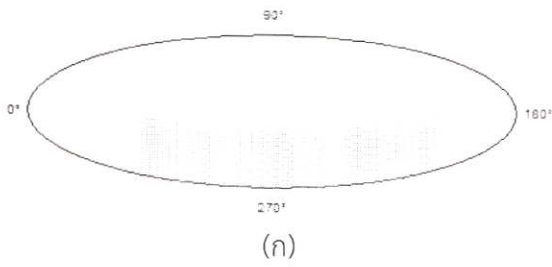


(ข) วงจรการทดลอง

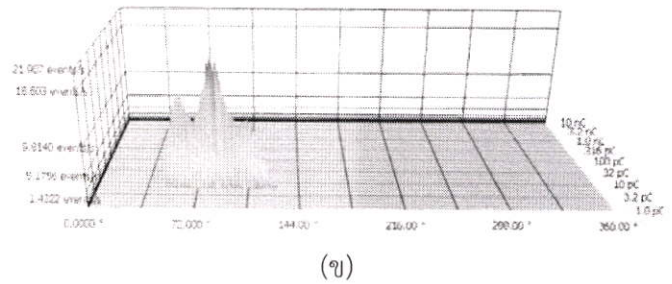
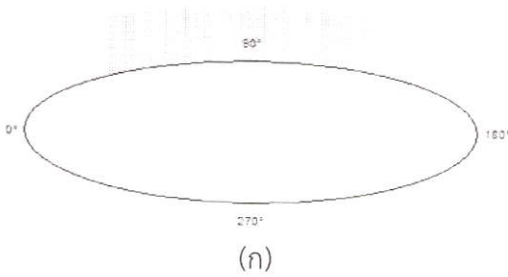
ภาพที่ 3.5 ไดอะแกรมและวงจรการทดสอบการเกิด PD

3.3 ผลการทดลอง

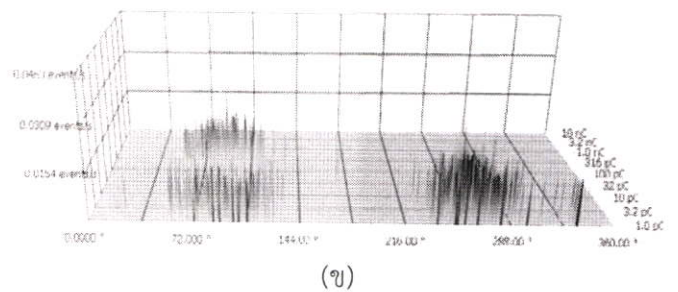
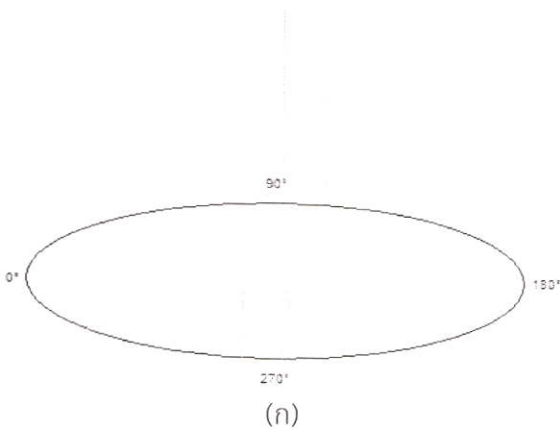
ผลการจำลองHV-ALV-A HV-OLV-O และ SF-O ที่ออกแบบตัวอย่างสัญญาณ PD จากการทดลองในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังแสดงดังภาพที่3.6ถึงภาพที่3.10



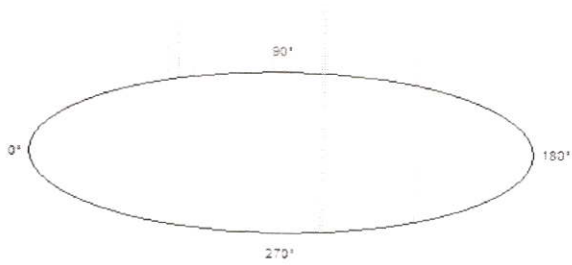
ภาพที่ 3.6 ผลการทดลองHV-A ที่ระดับแรงดัน 3.6 kV



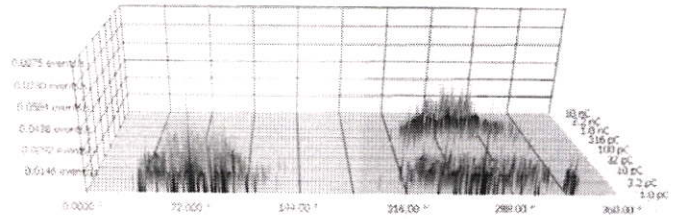
ภาพที่ 3.7 ผลการทดลองLV-A ที่ระดับแรงดัน 3.74 kV



ภาพที่ 3.8 ผลการทดลองHV-O ที่ระดับแรงดัน 21.4 kV

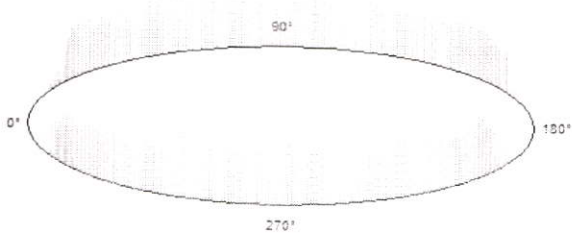


(ก)

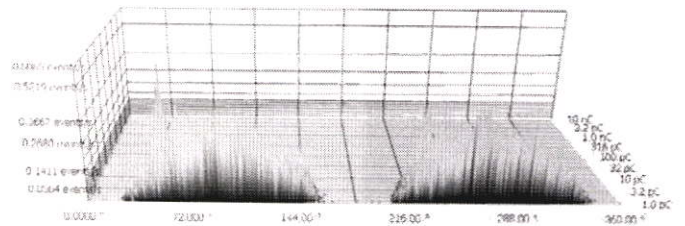


(ข)

ภาพที่ 3.9 ผลการทดลองLV-O ที่ระดับแรงดัน 26.1 kV



(ก)



(ข)

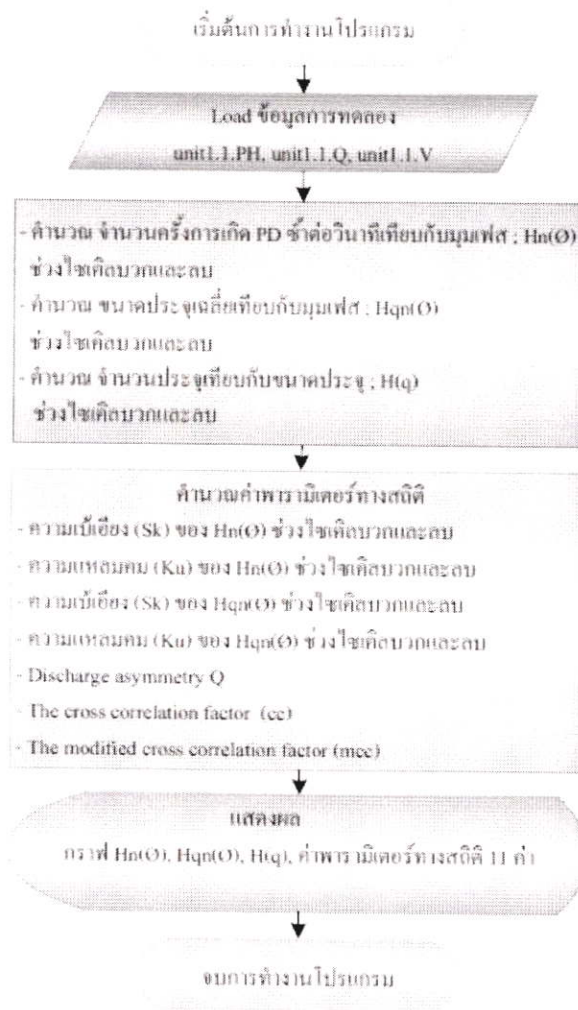
ภาพที่ 3.10 ผลการทดลองSF-O ที่ระดับแรงดัน 5.4 kV

บทที่ 4

การวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นและการแยกแยะ รูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

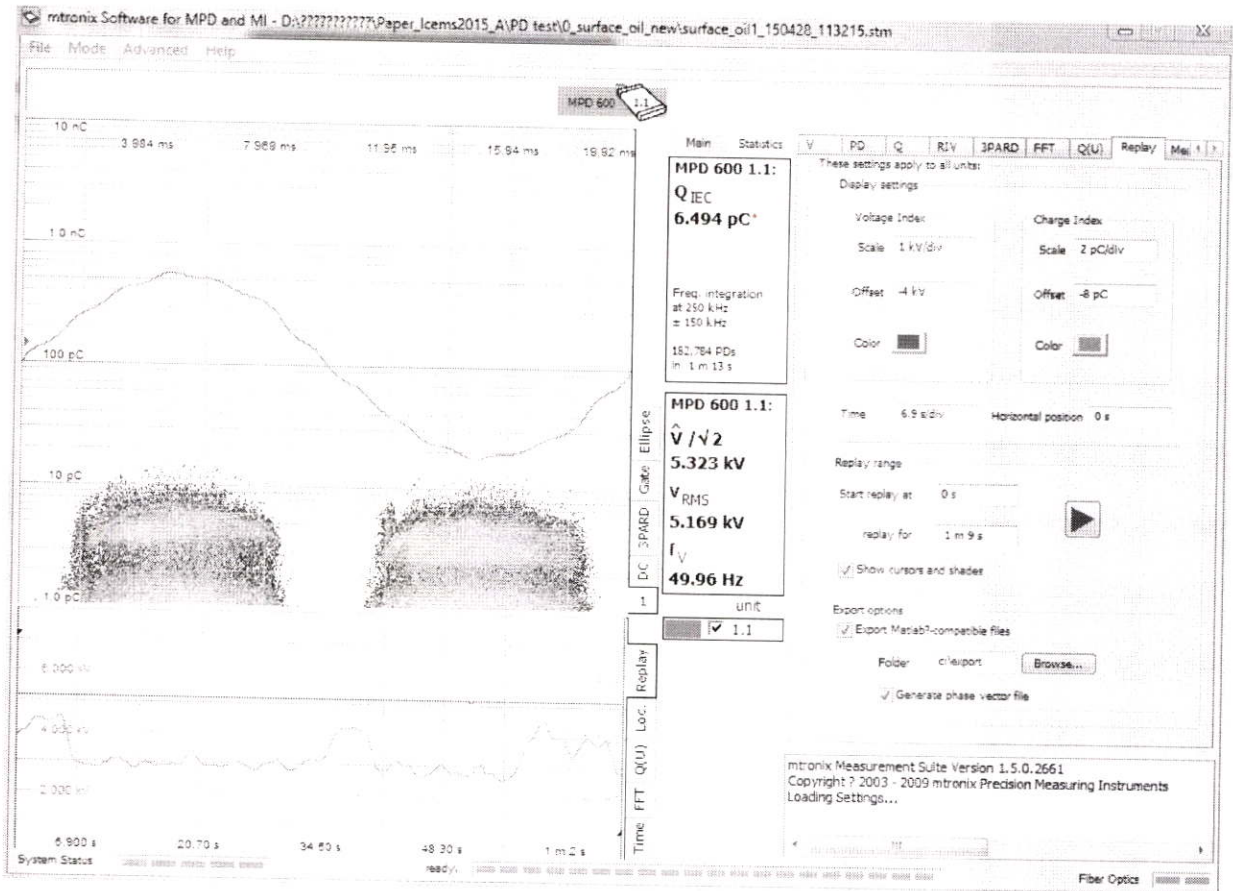
4.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของสัญญาณ PD

สัญญาณ PD ที่ได้จากการทดลองในบทที่ 3 ยังไม่เหมาะที่จะนำไปเป็นข้อมูล ในการออกแบบ โมเดล โครงข่ายประสาทเทียมเนื่องจากมีจำนวนข้อมูลมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของสัญญาณ PD โดยคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ เพื่อลดจำนวนข้อมูล ก่อนนำเข้าโมเดลโครงข่ายประสาทเทียม ขั้นตอนการคำนวณแสดงดังภาพที่ 4.1

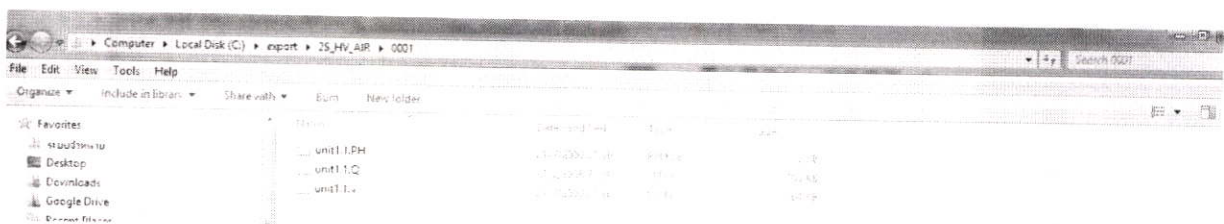


ภาพที่ 4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของสัญญาณ PD

จากการทดลองสัญญาณ PD ที่ได้จากชุดซอฟต์แวร์ mtronix MPD600 สามารถ Export ไฟล์ข้อมูลได้ โดยเลือก mode Expert และเลือก Export Matlab – compatible files, Generate phase vectorfile แสดงดังภาพที่ 4.2 (ก) จะได้ไฟล์ข้อมูล 3 ชุดคือ unit1.1.PH (ข้อมูลมุมเฟส), unit1.1.Q (ข้อมูลขนาดประจุ), unit1.1.V (ข้อมูลแรงดัน) แสดงดังภาพที่ 4.2 (ข)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.2 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้ ซอฟต์แวร์ mtronix MPD600

เมื่อ Export ไฟล์ข้อมูลแล้ว ต่อไปทำการ run โปรแกรม Feature_Extraction_IEC.m ที่พัฒนาขึ้นบนโปรแกรม MATLAB แสดงดังภาพที่ 4.3 โปรแกรมจะให้ใส่ที่อยู่ของไฟล์ข้อมูลที่จะคำนวณ และให้ใส่ขนาด PD เริ่มเกิด จากนั้นโปรแกรมจะคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางสถิติและ แสดงกราฟดังภาพที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่ได้มี 11 ค่า ดังนี้ ค่าความเบ้เอียงของ $H_n(\Phi)$ ช่วงไซเคิลบวกและไซเคิลลบ ($Sk+[Hn]$, $Sk-[Hn]$), ค่าความแหลมคมของ $H_n(\Phi)$ ช่วงไซเคิลบวกและไซเคิลลบ ($Ku+[Hn]$, $Ku-[Hn]$), ค่าความเบ้เอียงของ $H_{qn}(\Phi)$ ช่วงไซเคิลบวกและช่วงไซเคิลลบ ($Sk+[Hqn]$, $Sk-[Hqn]$), ค่าความแหลมคมของ $H_{qn}(\Phi)$ ช่วงไซเคิลบวกช่วงไซเคิลลบ ($Ku+[Hqn]$, $Ku-[Hqn]$), ค่า Discharge asymmetry (Q), ค่า the cross correlation factor (cc), และ ค่า the modified cross correlation factor (mcc)

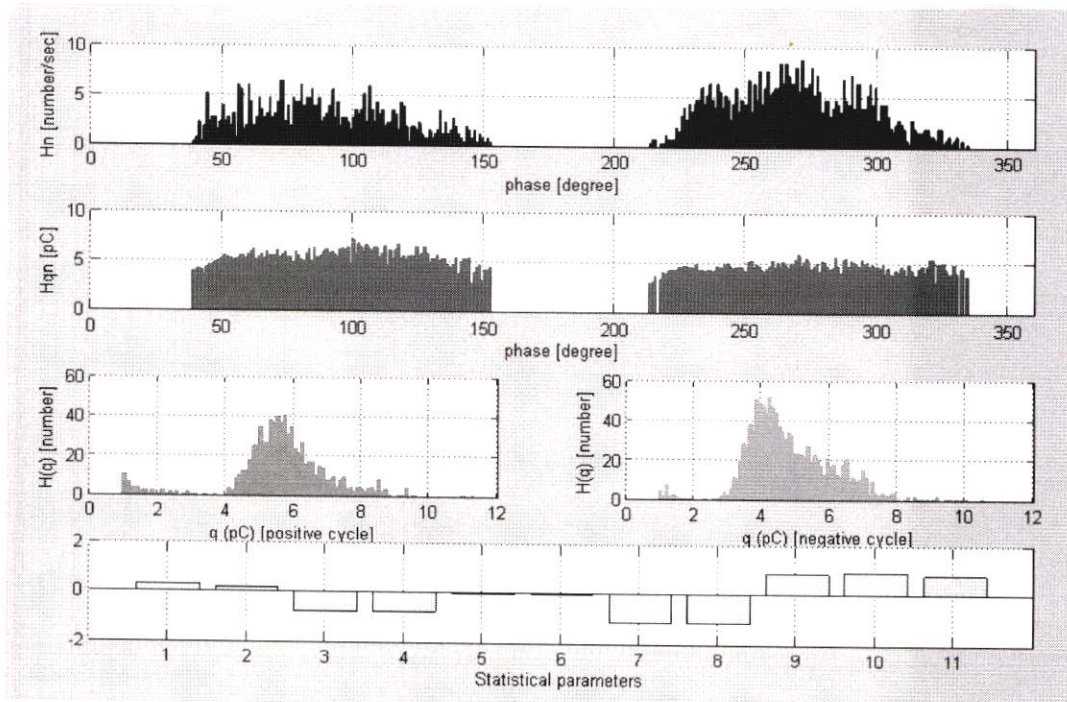
```

Command Window
New to MATLAB? Watch this video, see Demos, or read Getting Started.
>> Feature_Extraction_IEC

*****
***** Feature Extraction *****
*****
Enter directory filename : C:\export\28_SF_0\0001
Enter PD inception (pC) : 1

Please wait .....
>> |
  
```

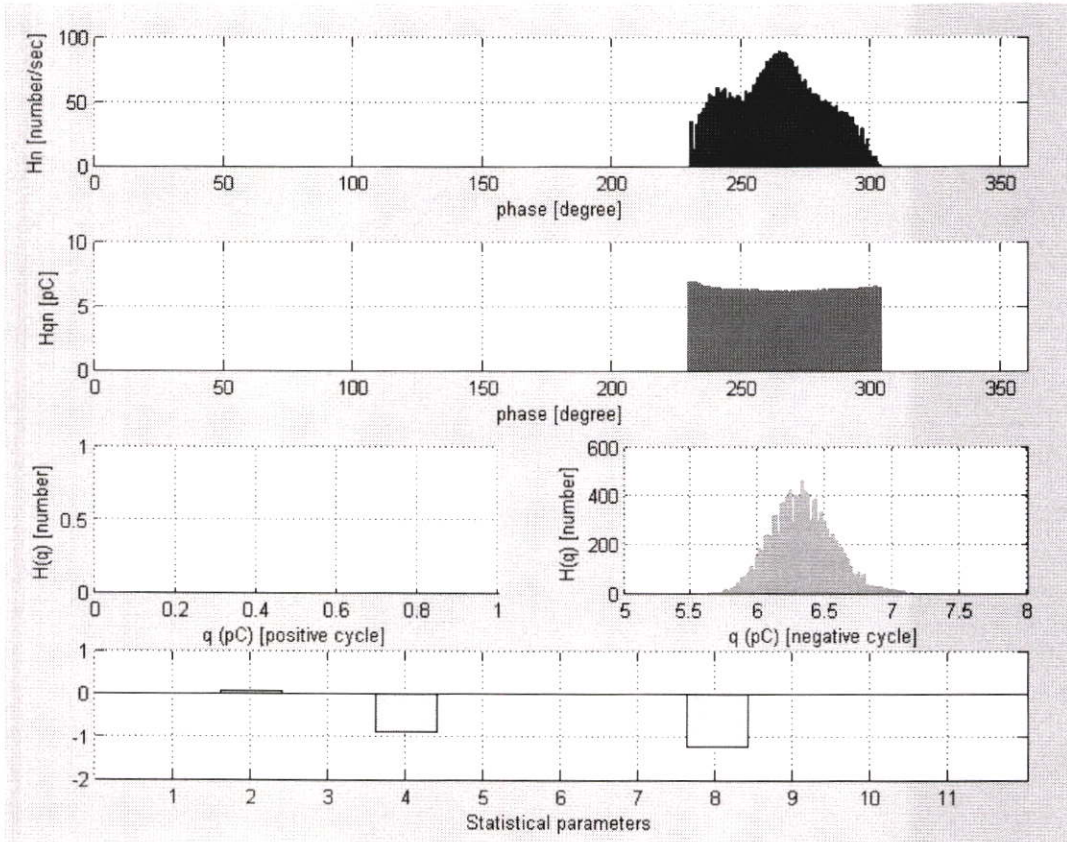
ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างการ run โปรแกรม Feature_Extraction_IEC.m



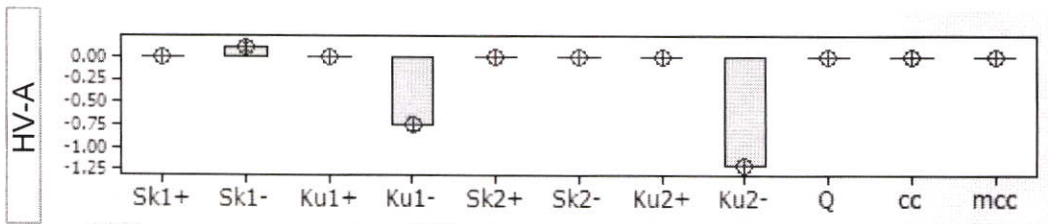
ภาพที่ 4.4 ตัวอย่างผลการ run โปรแกรม

4.2 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของสัญญาณ PD จากการทดลองด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของ PD จากการทดลอง HV-ALV-A HV-OLV-O และ SF-O แสดงดังภาพที่ 4.5 ถึงภาพที่ 4.9

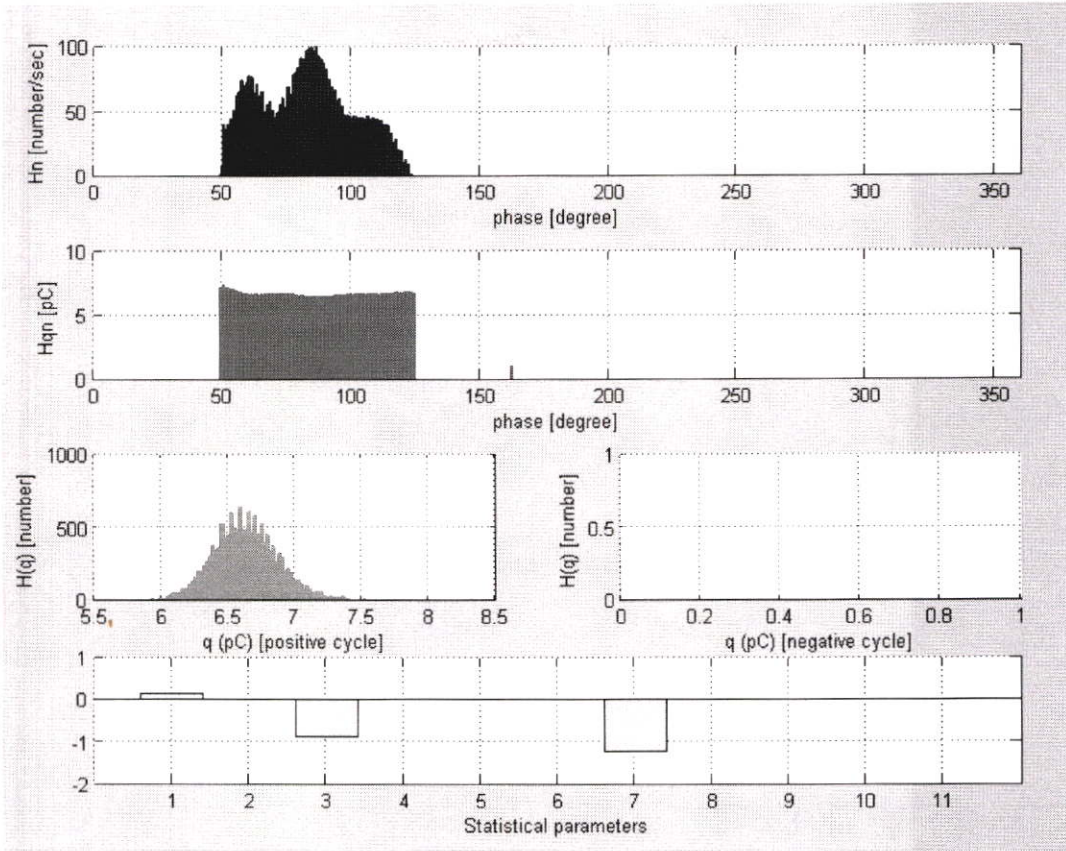


(ก) ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ

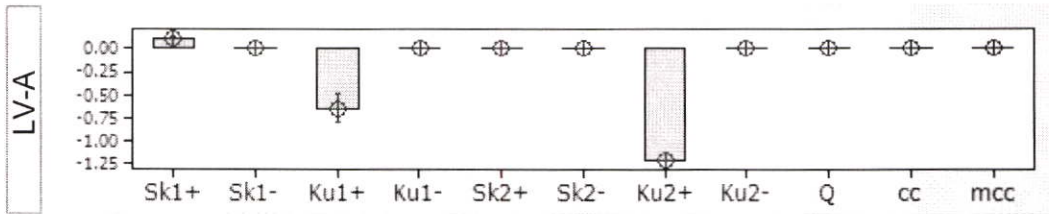


(ข) ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ทางสถิติจาก 20 การทดลอง

ภาพที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของ HV-A

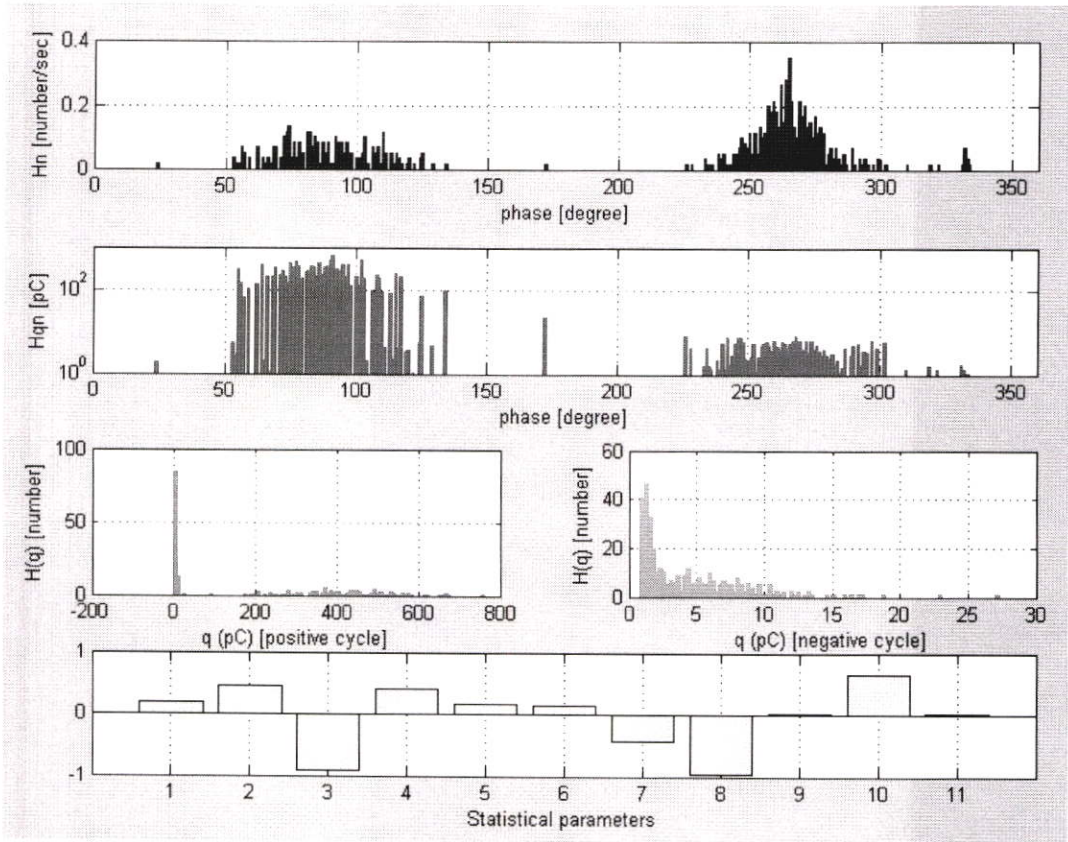


(ก) ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ

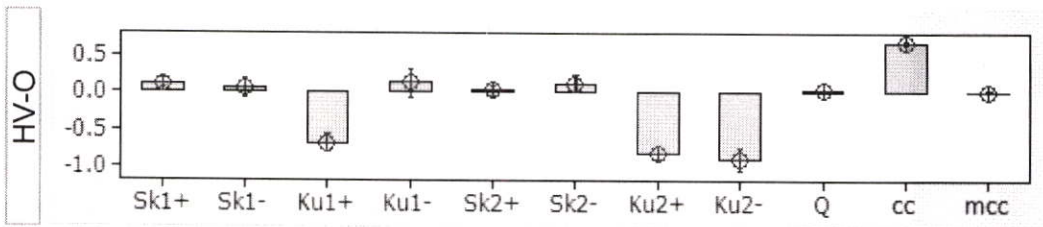


(ข) ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ทางสถิติจาก 20 การทดลอง

ภาพที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของ LV-A

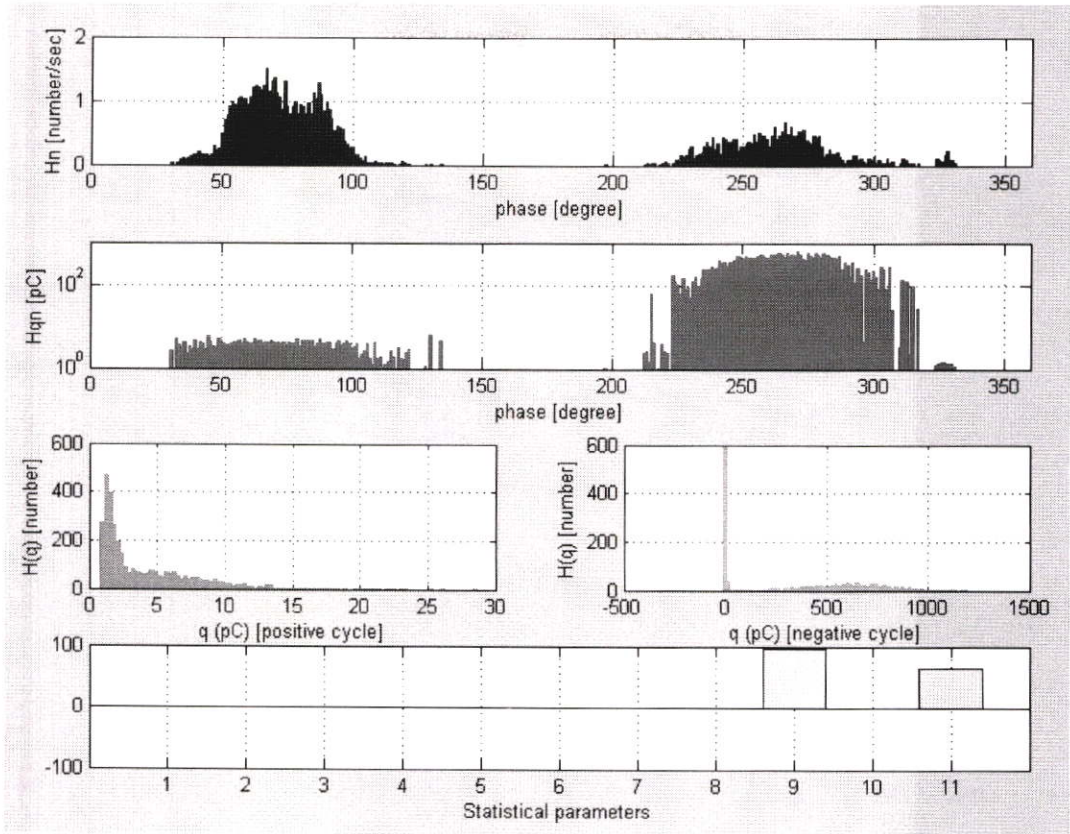


(ก) ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ

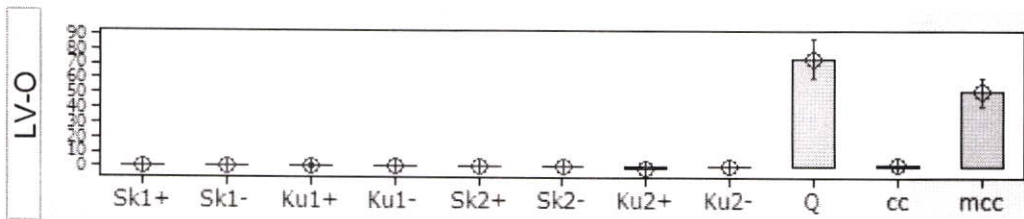


(ข) ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ทางสถิติจาก 20 การทดลอง

ภาพที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของ HV-O

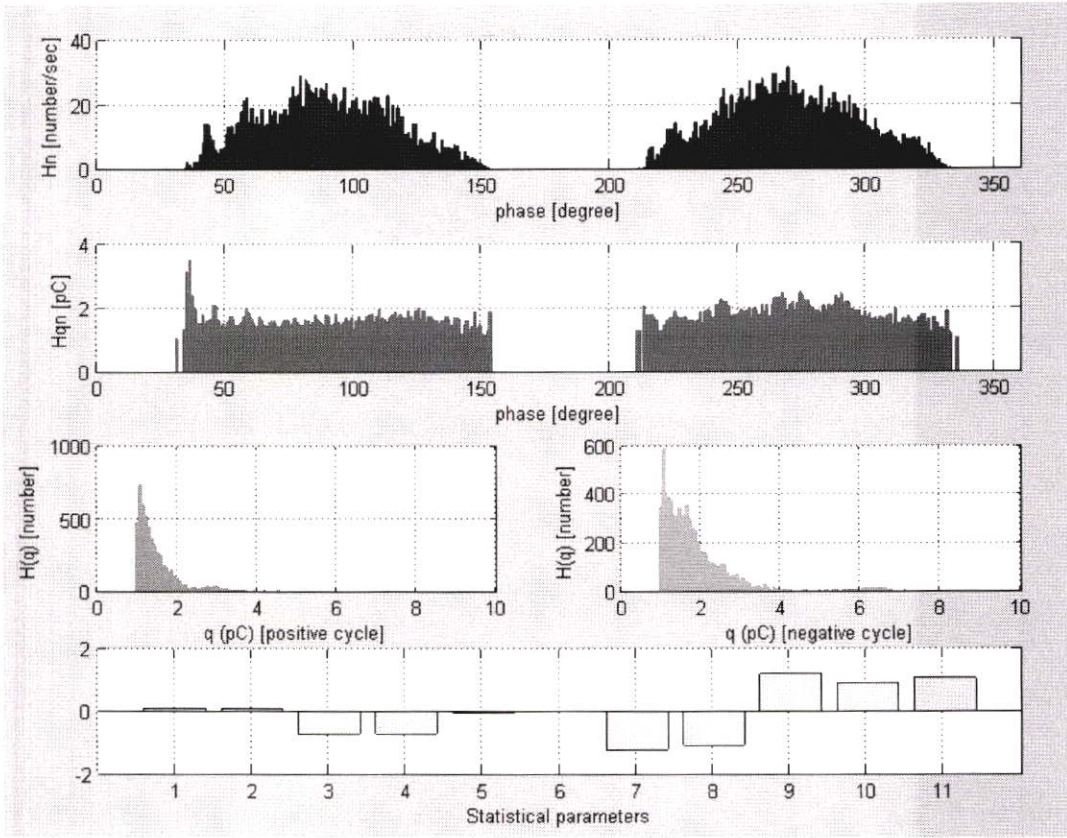


(ก) ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ

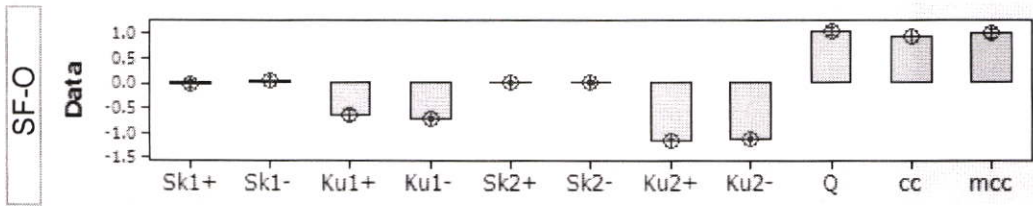


(ข) ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ทางสถิติจาก 20 การทดลอง

ภาพที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของ LV-O



(ก) ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ



(ข) ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ทางสถิติจาก 20 การทดลอง

ภาพที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะเด่นของ SF-O

4.3 การแยกแยะรูปแบบการเกิด PD

ในโครงการวิจัยนี้นำเสนอ การแยกแยะรูปแบบการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network, NN) 3 โครงสร้าง ได้แก่ Self-Organizing Map (SOM), Generalized Regression Networks (GRNN) และ Probabilistic Neural Network (PNN) จัดจำรูปแบบดิสชาร์จบางส่วนที่จำลอง HV-ALV-A HV-OLV-O และ SF-O

4.3.1 การจัดเตรียมข้อมูลสำหรับสร้างโมเดล NN

ตัวแปรพารามิเตอร์ทางสถิติของสัญญาณ PD จากผลการจำลองทั้งหมด (100 ค่าสังเกต) ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ของ PD แต่ละรูปแบบแสดงดังตารางที่ 4.1 สามารถสร้างเมตริกตั้งต้นได้ดังสมการที่ (4-1)

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ของดิสชาร์จบางส่วน

PD type	Hn(Φ)				Hqn(Φ)				Q	cc	mcc
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-			
HV-A	0	0.05	0	-0.86	0	0.01	0	-1.22	0	0	0
LV-A	0.13	0	-0.89	0	0	0	-1.22	0	0	0	0
HV-O	0.3	0.11	-0.83	0.45	0.06	0.07	-0.57	-0.86	0.02	0.65	0.01
LV-O	0.02	0.27	-0.74	-0.21	0.01	0.01	-1.15	-0.61	82.57	0.68	55.8
SF-O	0.22	0.21	-0.81	-0.71	-0.05	-0.01	-1.14	-1.16	0.84	0.92	0.78

$$X = \begin{bmatrix} [HV-A]_{20 \times 11} \\ [LV-A]_{20 \times 11} \\ [HV-O]_{20 \times 11} \\ [LV-O]_{20 \times 11} \\ [SF-O]_{20 \times 11} \end{bmatrix}_{100 \times 20} \quad Y = \begin{bmatrix} [1]_{20 \times 1} \\ [2]_{20 \times 1} \\ [3]_{20 \times 1} \\ [4]_{20 \times 1} \\ [5]_{20 \times 1} \end{bmatrix}_{100 \times 1} \quad (4-1)$$

โดยที่

X	คือ เมตริกซ์ข้อมูล	ตัวแปรพารามิเตอร์ทางสถิติ
แถวที่ 1 ถึง 20	คือ ค่าสังเกตของ	HV-A
แถวที่ 21 ถึง 40	คือ ค่าสังเกตของ	LV-A
แถวที่ 41 ถึง 60	คือ ค่าสังเกตของ	HV-O
แถวที่ 61 ถึง 80	คือ ค่าสังเกตของ	LV-O
แถวที่ 81 ถึง 100	คือ ค่าสังเกตของ	SF-O

Y	คือ เมตริกซ์	ค่าเป้าหมาย
แถวที่ 1 ถึง 20 คือ		ค่าเป้าหมาย HV-A
แถวที่ 21 ถึง 40 คือ		ค่าเป้าหมาย LV-A
แถวที่ 41 ถึง 60 คือ		ค่าเป้าหมาย HV-O
แถวที่ 61 ถึง 80 คือ		ค่าเป้าหมาย LV-O
แถวที่ 81 ถึง 100 คือ		ค่าเป้าหมาย SF-O

ตัวอย่างตัวแปรพารามิเตอร์ทางสถิติ ในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าแต่ละตัวแปร มีขนาดแตกต่างกัน ในการสร้างโมเดลจดจำรูปแบบสัญญาณ PD ตัวแปรอินพุทที่มีขนาดต่างกันหรือมีหน่วยต่างกัน ไม่เหมาะที่จะนำไปฝึกฝนโมเดล NN เนื่องจากอาจจะทำให้ค่าน้ำหนัก (weight) ที่ได้จากการสอนโมเดล NN มีค่าไม่เหมาะสม ดังนั้นก่อนนำข้อมูลไปฝึกฝนโมเดล ควรทำให้ตัวแปรทุกตัว มีความสำคัญเท่ากันคือค่าเฉลี่ยทุกตัวแปรเท่ากับ ศูนย์ และค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1 โดยใช้คำสั่ง ใน MATLAB statistic toolbox ดัง (4-2)

$$Z = \text{zscore}(D) \quad ; \text{เมื่อ } D \text{ คือข้อมูลที่ต้องการแปลง} \quad (4-2)$$

4.3.2 การแบ่งข้อมูลสำหรับฝึกฝนและทดสอบโมเดล NN

ในการฝึกฝนโมเดล NN (Training) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของโมเดล NN จะไม่นำข้อมูลทั้งหมดฝึกฝน โมเดลแต่จะแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ในการแบ่งกลุ่มข้อมูล (Data Set Selection) ทำการแบ่งข้อมูลของ เมตริกซ์ตัวแปรอินพุท(X) และเมตริกซ์ค่าเป้าหมาย(Y) ด้วยวิธีการสุ่ม(Random Method) ดังนี้

ชุดที่ 1: ใช้ข้อมูล 60% สำหรับฝึกฝนโมเดล(Training Set)เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ (เมตริกซ์น้ำหนัก)

ชุดที่ 2: ใช้ข้อมูล 40% สำหรับทดสอบ(Test set)เพื่อทดสอบ ความสามารถ ของโมเดล ในการการแยกแยะ รูปแบบการเกิด PD หลังจากการฝึกฝนโมเดลสำเร็จ



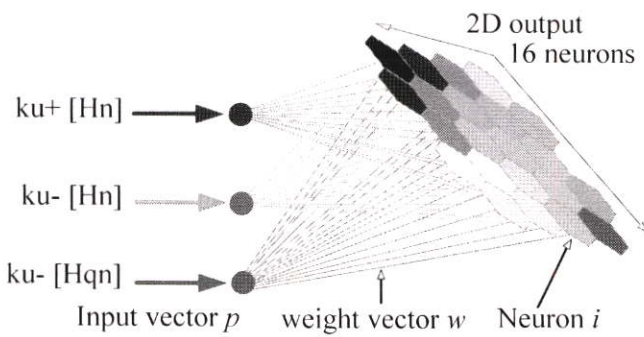
ภาพที่ 4.10 การแบ่งข้อมูล

4.4การออกแบบโครงสร้างโมเดล NN

โครงสร้างโมเดล NN ที่ศึกษาในการจัดจำรูปแบบ PD ที่จำลองได้แก่ SOM, GRNN และ PNN

1) โมเดล Self-Organizing Map(SOM)

โมเดล SOM ที่ออกแบบประกอบด้วย 3 อินพุตโนด 16 เอาต์พุตโนด โครงสร้างโมเดลแสดงดังภาพที่ 4.11 ผลการฝึกฝนโมเดลแสดงดังภาพที่ 4.12 ผลการทดสอบโมเดลแสดงดังภาพที่ 4.13

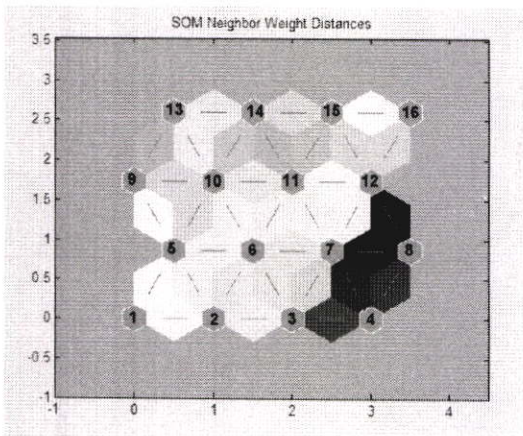


เมื่อ $ku+[Hn]$ คือความแหลมคมของการกระจายจำนวนครั้งการเกิด PD ซ้ำตามมุมเฟสด้านไซเคิลบวก

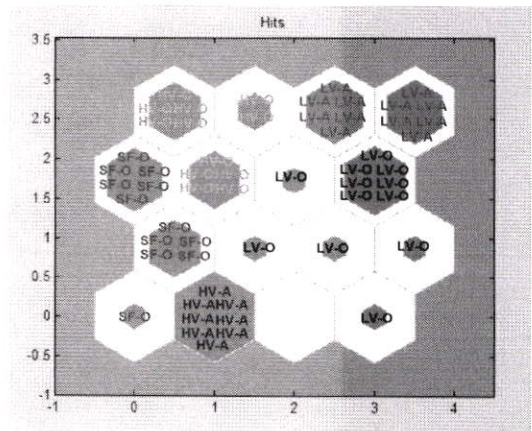
$ku-[Hn]$ คือความแหลมคมของการกระจายจำนวนครั้งการเกิด PD ซ้ำตามมุมเฟสด้านไซเคิลลบ

$ku-[Hqn]$ คือความแหลมคมของการกระจายขนาดประจุเฉลี่ยตามมุมเฟสด้านไซเคิลลบ

ภาพที่ 4.11โครงสร้างโมเดล SOM

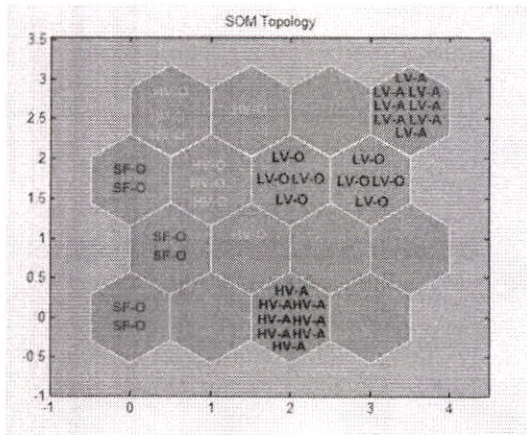


(ก)SOM neighbor weight distances



(ข)SOM sample hits

ภาพที่ 4.12ผลการฝึกฝนโมเดล



ภาพที่ 4.13 ผลการทดสอบโมเดล

เมื่อ

HV-A คือ โครนาตีสชาร์จด้านแรงดันสูงในอากาศ

LV-A คือ โครนาตีสชาร์จด้านแรงดันต่ำในอากาศ

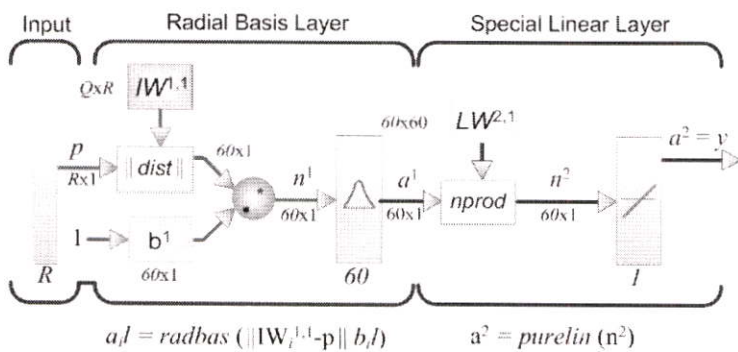
HV-O คือ โครนาตีสชาร์จด้านแรงดันสูงใน น้ำมันหม้อแปลง

LV-O คือ โครนาตีสชาร์จด้านแรงดัน ต่ำในน้ำมันหม้อแปลง

SF-O คือ ดิสชาร์จตามผิวเพอร์สโอบอร์ดในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง

2) โมเดล Generalized Regression Networks (GRNN)

โมเดล GRNN ที่ออกแบบเปรียบเทียบ 2 โครงสร้าง ได้แก่ GRNN1 ประกอบด้วย 11 อินพุต และ GRNN2 ประกอบด้วย 3 อินพุตทั้งสองโมเดลประกอบด้วยชั้น Radial basis มี 60 นิวรอน ชั้น Special linear มี 60 นิวรอนและ 1 เอ้าท์พุทนิวรอน โครงสร้างโมเดลแสดงดังภาพที่ 4.14 ผลการฝึกฝนและการทดสอบโมเดลแสดงตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเอ้าท์พุทและค่าเป้าหมายจากการสอนและการทดสอบโมเดลแสดงดังภาพที่ 4.15 และ 4.16



เมื่อ

P คือ ตัวแปรพารามิเตอร์อินพุต

R คือ จำนวนตัวแปรอินพุต

โมเดล GRNN1=11 อินพุต

โมเดล GRNN = 3 อินพุต

$IW^{1,1}$ คือเมตริกซ์น้ำหนักชั้น Radial basis

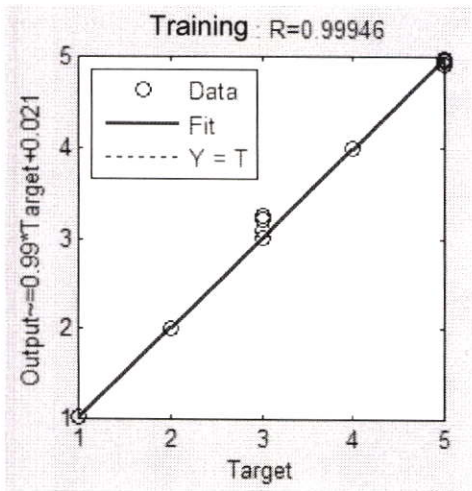
b^1 คือเวกเตอร์ไบอัส

$LW^{2,1}$ คือเมตริกซ์น้ำหนักชั้น Special linear

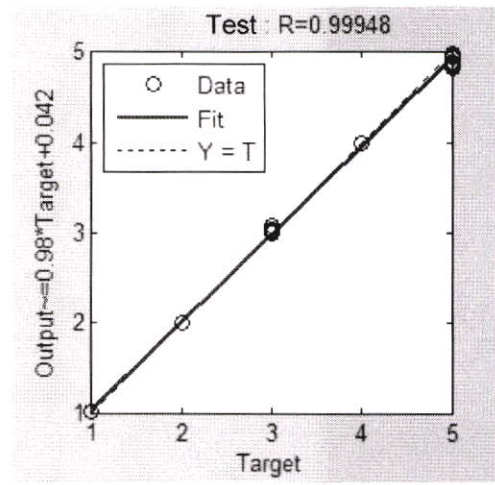
ภาพที่ 4.14 โครงสร้างโมเดล GRNN1 และ GRNN2

ตารางที่ 4.2 ผลการฝึกฝนและการทดสอบโมเดล

ผลการฝึกฝน				
spread parameter	GRNN1		GRNN2	
	% Classification	R-value	% Classification	R-value
0.2	100	1.0	100	0.999
0.4	100	1.0	100	0.983
0.6	100	1.0	67	0.956
0.8	100	0.999	33	0.911
1.0	96	0.996	28	0.861
1.2	95	0.991	14	0.813
ผลการทดสอบ				
0.2	92.5	0.873	97.5	0.949
0.4	97.5	0.949	97.5	0.994
0.6	100	0.999	60	0.956
0.8	100	0.999	50	0.898
1.0	100	0.997	52.5	0.854
1.2	100	0.993	22.5	0.827

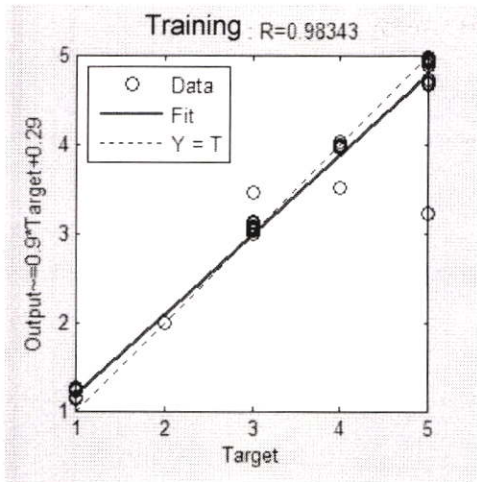


(ก)

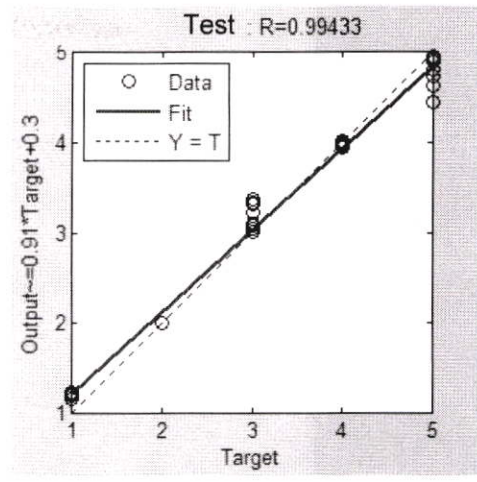


(ข)

ภาพที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตและค่าเป้าหมายของโมเดล GRNN1



(ก)

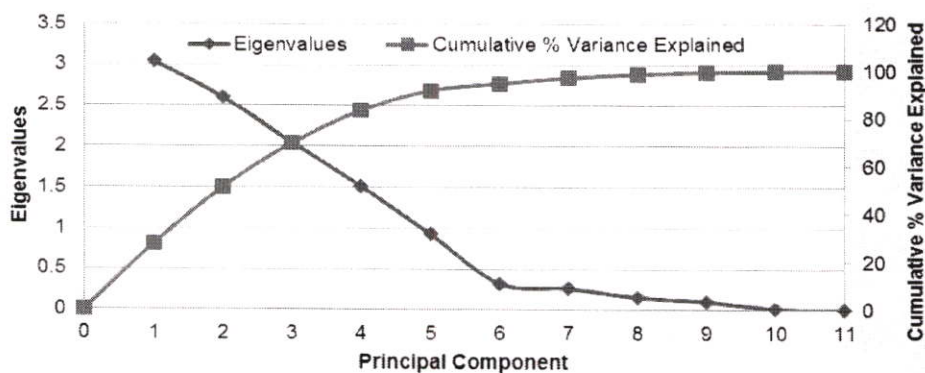


(ข)

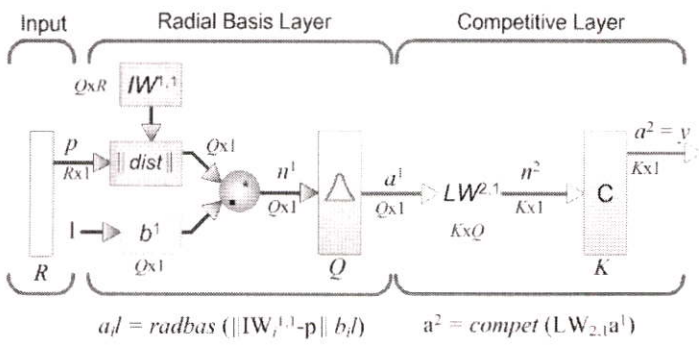
ภาพที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตและค่าเป้าหมายของโมเดล GRNN2

3) โมเดล Probabilistic Neural Network (PNN)

โมเดล PNN ที่ออกแบบโครงสร้างประกอบด้วย 4 อินพุตเนื่องจากใช้เทคนิคการวิเคราะห์ตัวประกอบหลัก (Principle Component Analysis, PCA) ลดจำนวนตัวแปรตั้งต้นจาก 11 ตัวแปร เหลือ 4 ตัวแปรใหม่ โดยที่รายละเอียดของข้อมูลเกือบทั้งหมดยังคงอยู่ ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟ principal components เทียบกับ % variance explained ในส่วนชั้น Radial basis มี 60 นิวรอน และชั้น competitive layer มี 5 นิวรอน โครงสร้างโมเดลแสดงดังภาพที่ 4.18 และ 4.19 ผลการฝึกฝนโมเดล PNN แสดงตารางที่ 4.3 และการทำนายรูปแบบ PD ของโมเดล PNN แสดงตารางที่ 4.4

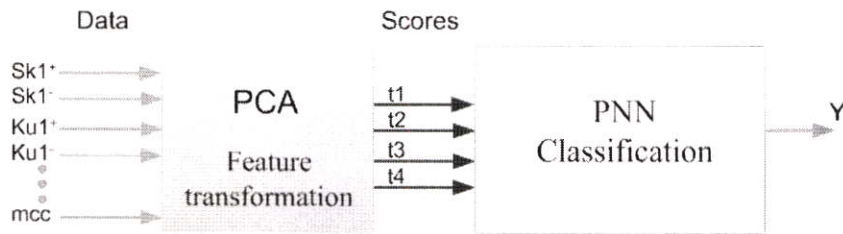


ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟ principal components เทียบกับ % variance explained



เมื่อ
 P คือ ตัวแปรพารามิเตอร์อินพุต
 R คือ จำนวนตัวแปรอินพุต
 $IW^{1,1}$ คือเมตริกซ์น้ำหนักชั้น Radial basis
 b^1 คือเวกเตอร์ไบอัส
 $LW^{2,1}$ คือเมตริกซ์น้ำหนักชั้น competitive layer

ภาพที่ 4.18 โครงสร้างโมเดล PNN



ภาพที่ 4.19 ไดอะแกรมการใช้เทคนิค PCA ร่วมกับโมเดล PNN

ตารางที่ 4.3 ผลการฝึกฝนโมเดล PCA-PNN

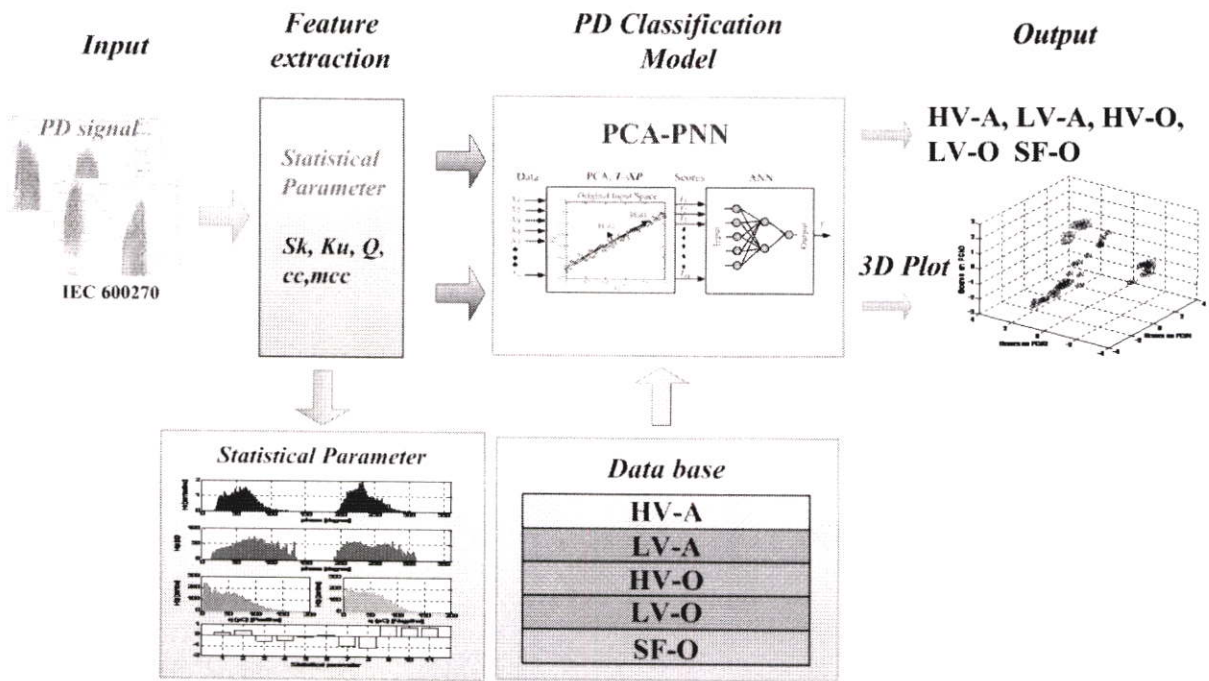
spread parameter	% Classification				
	1PC	2PCs	3PCs	4PCs	5PCs
0.2	62.5	92.5	95	100	100
0.4	60	87.5	95	100	100
0.6	60	80	95	100	100
0.8	60	80	95	100	100
1.0	60	80	90	100	100
1.2	60	80	90	100	97.5
1.4	57.5	77.5	90	95	95
1.6	57.5	75	90	95	95
1.8	55	75	90	95	95
2.0	55	75	90	95	92.5

ตารางที่ 4.4 การทำนายรูปแบบ PD ของโมเดล PNN

Output Class	Target Class					% Classification
	HV-A	LV-A	HV-O	LV-O	SF-O	
HV-A	8					100
LV-A		8				100
HV-O			8			100
LV-O				8		100
SF-O					8	100
% Classification	100	100	100	100	100	100

4.5 การประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อใช้ในการแยกแยะการเกิด PD

จากการศึกษาโมเดลSOM, GRNN และ PNN แยกแยะรูปแบบ PD พบว่าโมเดลที่ออกแบบทั้ง 3 โมเดล สามารถประยุกต์ใช้ในการจำแนกการเกิด PD จากการทดลองได้ดี งานวิจัยนี้ ประดิษฐ์โปรแกรมจำแนกการเกิด PD โดยประยุกต์ใช้โมเดล PNN จัดจำรูปแบบ PD โดยอะแกรมโปรแกรมการแยกแยะ PD แสดงดังภาพที่4.20



ภาพที่ 4.20 โดยอะแกรมโปรแกรมการจำแนกเกิดดิสชาร์จบางส่วน

สัญญาณ PD จากการทดสอบตามมาตรฐาน IEC60270 ถูกนำมาหาคุณลักษณะเด่นของสัญญาณ (Feature extraction) ด้วยการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ (Statistical parameter) รวม 11 ตัวแปร และใช้เทคนิคPCAลดจำนวนตัวแปรตั้งต้นจาก 11 ตัวแปร เหลือ 4 ตัวแปรใหม่ และนำมาเป็นอินพุทของโมเดล PNN จำแนกประเภท PD ซึ่งโมเดล PNN คำนวณโดยใช้ฐานข้อมูล (Data base) ของ PD แต่ละแบบรวมจำนวน 60 ข้อมูล หลังโมเดลคำนวณเสร็จ จะได้เอาท์พุทของโปรแกรมแสดงประเภท PD ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และกราฟ 3 มิติแสดงกลุ่มของ PD

4.6 ตัวอย่างการใช้งานโปรแกรมแยกแยะรูปแบบ PD

โปรแกรมแยกแยะรูปแบบการเกิด PD ที่พัฒนาขึ้นได้แก่ HVES_PD_classification_Program โดยพัฒนามาบนโปรแกรม MATLAB ตัวอย่างแสดงตัวอย่างดังภาพที่ 4.21

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this video, see Demos, or read Getting Started.

*****
                          Feature Extraction
*****
Enter directory filename : C:\export\HV_OIL\0002
Enter PD inception (pC): 2

Please wait .....

*****
                          PCA-FNN PD Classification model
*****
Enter spread parameter for PCA-FNN: 1.2

Corona discharge at HV side in oil

*****

```

ภาพที่ 4.21 ตัวอย่างโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรมดังนี้

1) พิมพ์ HVES_PD_classification_Program ในหน้าต่าง Command Window และ Run โปรแกรม

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this video, see Demos, or read Getting Started.

>> HVES_PD_classification_Program

```

2) โปรแกรมจะให้ป้อน Directory ไฟล์สัญญาณที่จะวิเคราะห์คุณลักษณะเด่น

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this video, see Demos, or read Getting Started.

*****
                          Feature Extraction
*****
Enter directory filename : |

```

3) จากนั้นโปรแกรมจะให้ป้อนขนาดปะจุ PD เริ่มเกิด

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this video, see Demos, or read Getting Started.

*****
                          Feature Extraction
*****
Enter directory filename : C:\export\LV_OIL_0001
Enter PD inception (pC):
  
```

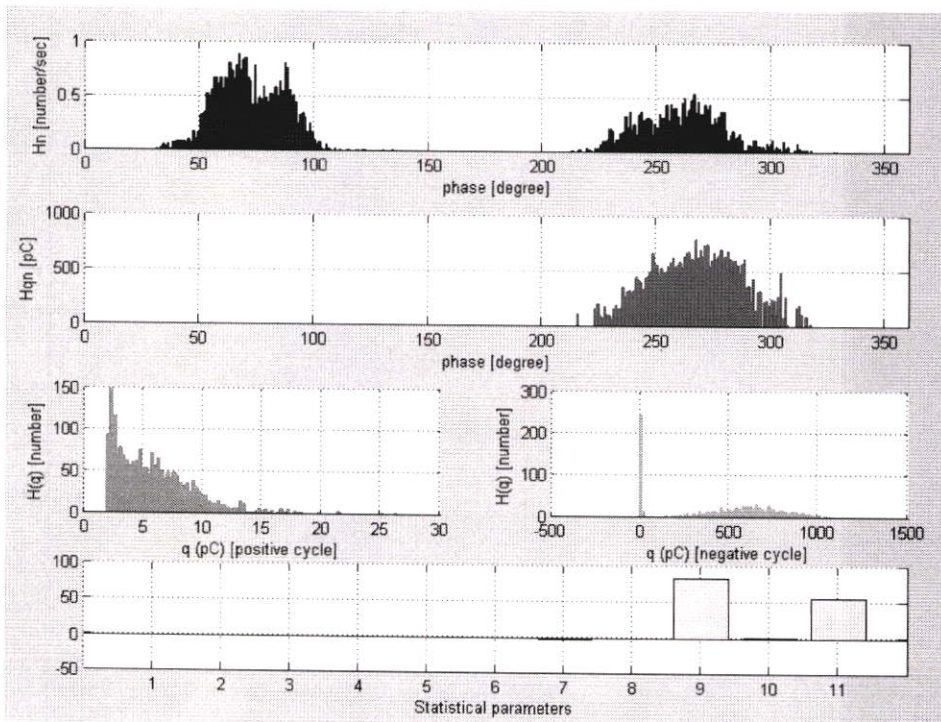
4) โปรแกรมทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางสถิติและแสดงผล

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this video, see Demos, or read Getting Started.

*****
                          Feature Extraction
*****
Enter directory filename : C:\export\LV_OIL_0001
Enter PD inception (pC): 2

Please wait .....
  
```



ภาพที่ 4.22 ตัวอย่างผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ

5) โปรแกรมจะให้ป้อนค่า spread parameter ของโมเดลจำแนก PD(PCA-PNN)ในงานวิจัยนี้ใช้ค่า 1.2 รายละเอียดในบทความ Partial Discharge Classification using Probabilistic Neural Network Model

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

*****
                          Feature Extraction
*****
Enter directory filename : C:\export\LV_OIL\0001
Enter PD inception (pC): 2

Please wait .....

*****
                          PCA-PNN PD Classification model
*****
Enter spread parameter for PCA-PNN:

```

6) โปรแกรมทำการคำนวณและแยกแยะประเภทดิสชาร์จบางส่วน แสดงผลดังภาพที่ 4.23 ในตัวอย่างสัญญาณ ดิสชาร์จบางส่วนที่ทำนายคือ LV-O

```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.

*****
                          Feature Extraction
*****
Enter directory filename : C:\export\LV_OIL\0001
Enter PD inception (pC): 2

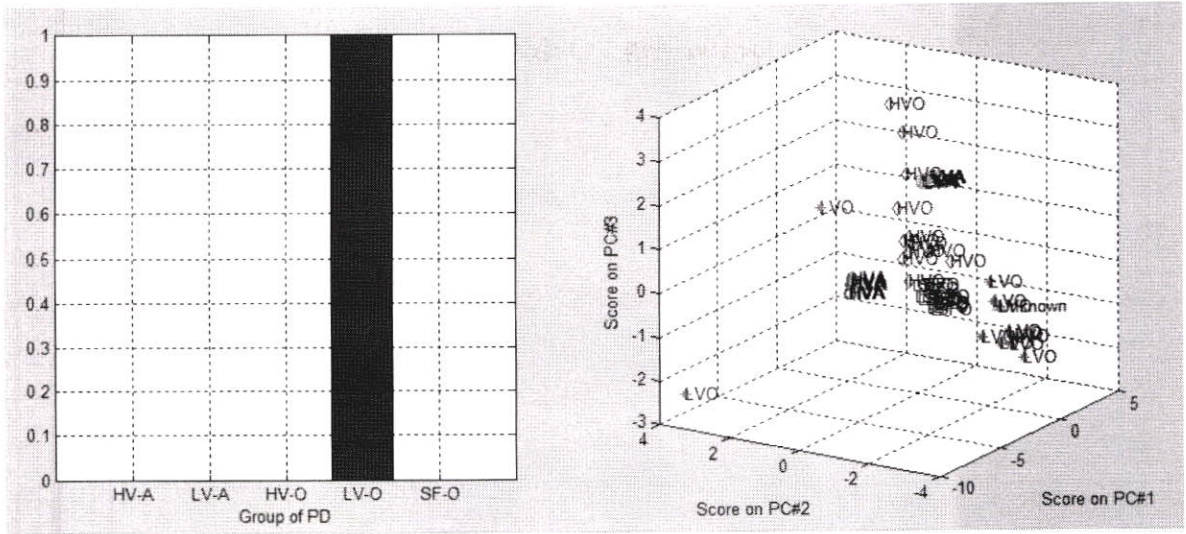
Please wait .....

*****
                          PCA-PNN PD Classification model
*****
Enter spread parameter for PCA-PNN: 1.2

Corona discharge at LV side in oil

*****

```



ภาพที่ 4.23 ผลการจำแนกสัญญาณ PD จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถ คำนวณค่าพารามิเตอร์ทางสถิติได้ดังนี้ 11 ค่า ดังนี้ ค่าความเบ้เอียงของ $Hn(\Phi)$ ช่วงไซเคิลบวกและไซเคิลลบ ($Sk+[Hn]$, $Sk-[Hn]$), ค่าความแหลมคมของ $Hn(\Phi)$ ช่วงไซเคิลบวกและไซเคิลลบ ($Ku+[Hn]$, $Ku-[Hn]$), ค่าความเบ้เอียงของ $Hqn(\Phi)$ ช่วงไซเคิลบวก และช่วงไซเคิลลบ ($Sk+[Hqn]$, $Sk-[Hqn]$), ค่าความแหลมคมของ $Hqn(\Phi)$ ช่วงไซเคิลบวกช่วงไซเคิลลบ ($Ku+[Hqn]$, $Ku-[Hqn]$), ค่า Discharge asymmetry (Q), ค่า the cross correlation factor (cc), และ ค่า the modified cross correlation factor (mcc) ซึ่งค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ถูกใช้เป็นตัวแปรอินพุทของโมเดลจดจำรูปแบบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วน 3 โมเดล ได้แก่ Self-Organizing Map, Generalized Regression Networks และ Probabilistic Neural Network โดยที่โมเดลที่ ออกแบบ ทั้ง 3 โมเดลนั้นสามารถ จดจำและแยกแยะรูปแบบ การเกิดดิสชาร์จบางส่วน จากการทดลองได้ถูกต้องมีประสิทธิภาพสูง โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้ดี สะดวกในการวิเคราะห์ลักษณะรูปแบบ ดิสชาร์จบางส่วน และมีความศักยภาพสูงพอที่จะนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการแยกแยะรูปแบบดิสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงต่อไป

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์และ แยกแยะประเภทของ ดิสชาร์จบางส่วน 5 รูปแบบพื้นฐานโดยใช้โอเล็กโตรดอย่างง่ายไม่ซับซ้อน แต่ในทางปฏิบัติรูปแบบดิสชาร์จบางส่วน ที่เกิดขึ้นมีมากกว่า 5 รูปแบบที่ได้ศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้ งานวิจัยนี้จะมีประโยชน์มากขึ้นถ้ามีการศึกษาและเก็บข้อมูลดิสชาร์จบางส่วนเพิ่มเติม ทั้งจากการทดลอง และที่เกิดขึ้นจริงในหม้อแปลงไฟฟ้า และนำมาใช้ทดสอบ โปรแกรมแยกแยะ ดิสชาร์จบางส่วนที่ ประดิษฐ์ขึ้นมาในงานวิจัยนี้ นี้ นอกจากนั้นแล้วการศึกษาวิจัยชิ้นนี้ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการวิเคราะห์รูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนรูปแบบอื่นๆนอกเหนือจากห้ารูปแบบที่ใช้ในการวิจัย สิ่งที่สำคัญในการสร้างโมเดลทำนายรูปแบบการเกิดดิสชาร์จบางส่วนต่อไป คือคุณลักษณะเด่นของสัญญาณดิสชาร์จบางส่วน แต่ละประเภทต้องมีความแตกต่างกัน ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่ดีในการออกแบบสร้าง โมเดลแยกแยะรูปแบบดิสชาร์จบางส่วนเพื่อ ช่วยในการระบุตำแหน่งจุดบกพร่องของ ระบบการ ฉนวนและการปรับปรุงแก้ไขระบบ ฉนวนต่อไป ซึ่งจะมีประโยชน์มากสำหรับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง ดังนั้นจึงควรมีการพัฒนา งาน วิจัยด้านนี้ต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] Dr. F.H.Kreuger “Partial Discharge Detection in High – Voltage Equipment” Butterworth&Co. (Publishers) Ltd, 1989
- [2] Cigre’ Task Force 15.11/33.03.02 “Knowledge Rules for Partial Discharge Diagnosis in Service” April 2003.
- [3] Muhr Hans Michael, Schwarz Robert, Jaufer Stefan “Electrical Measurements for HV-Insulations as Diagnostic Tool” Institute of High Voltage Engineering and System Management Graz University of Technology, Austria.
- [4] A. Haddad and D.F. Warne “Advances in High Voltage Engineering” The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [5] Univ – Prof.Dr – Ing.Dieter König, Prof.Dr – Ing. Y.Narayana Rao “ Partial Discharge in Electrical Power Apparatus ” vde – verlag gmbh, 1993
- [6] IEC Standard IEC-60270, “High Voltage Techniques Partial Discharge Measurement”, International Electrotechnical Commission 2000.
- [7] N. Pattanadech and P. Nimsanong, PCA-ANN for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment, 6th International Workshop on High Voltage Engineering (IWHV 2008), October 24 – 25, 2008, Kyoto, Japan.
- [8] W.Hauschild and W. Mosch “Statistical Techniques for High-Voltage Engineering” English edition 1992 Peter Peregrinus Ltd.
- [9] J. Wesley Hines, PCA and PCR document, The University of Tennessee, 2000,6,28
- [10] กัลยา วานิชย์บัญชา, ดร. การวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปร. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.2548.
- [11] กัลยา วานิชย์บัญชา, ดร. การวิเคราะห์สถิติขั้นสูงด้วย SPSS for Windows. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.2548.
- [12] J.Wesley Hines “Fuzzy and Neural Approaches in Engineering MATLAB Supplement” Copyright 1997, John Wiley and Sons New York, NY
- [13] Philip D. Wasserman, Advanced Methods in Neural Computing, Copyright 1993 by Van Nostrand Reinhold.
- [14] Kreuger, F.H., Gulski, E and Krida, V. “Classification of Partial Discharge.” IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol 28, no.6, December,1993.

- [15] เกรวริน วิเศษจินดาวัฒน์. “การรู้จำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง .” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2544.
- [16] V.Chatpattananan, N. Pattanadech and P.Yutthagowith “Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment with K-Means” Proceeding of Icpadm 2006 8th International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, Indonesia, vol.1, June, 2006, pp. 191-194
- [17] V.Chatpattananan, N. Pattanadech “Partial Discharge Classification on High voltage Equipment by CHAID Classification Free” 13th Asian Conference on Electrical Discharge, Japan, October 16-19 ,2006.
- [18] V.Chatpattananan, N. Pattanadech “PCA-LDA for Partial Discharge Classification on High voltage Equipment” Proceeding of Icpadm 2006 8th International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, vol.1, June, 2006.
- [19] V.Chatpattananan, N. Pattanadech “Quest Tree Model for Partial Discharge Classification on High voltage Equipment” Proceeding of Icpadm 2006 8th International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, vol.1, June, 2006.
- [20] N. Pattanadech V.Chatpattananan., P.Yutthagowith and S.Phamvuthisarn. “Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment by Hierarchical Cluster Analysis” 13th Asian Conference on Electrical Discharge, October,2006.
- [21] V.Chatpattananan, N. Pattanadech “Fuzzy C-Means Clustering for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment” 13th Asian Conference on Electrical Discharge,October 16-19,2006.
- [22] N. Pattanadech, V.Chatpattananan,P.Yutthagowith. “Classification and Regression Tree for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment” 13th Asian Conference on Electrical Discharge, October 16-19,2006.
- [23] รัชกร ปานหอทอง. “การวินิจฉัยการปล่อยประจุบางส่วนโดยใช้วิธีทดสอบโคโมโกรอฟ -สมเนียนอพชนิดหนึ่งตัวอย่าง ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2550.

ภาคผนวก

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- 1) N. Pattanadech and P. Nimsanong, “**Self-Organizing Map Performance for Partial Discharge Classification**”, ISLH 2015 Bangkok, Thailand 12-13 June 2015.
- 2) N. Pattanadech, P. Nimsanong, S. Potivejkul, P. Yuthagowith, S. Polmai, “**Generalized Regression Networks for Partial Discharge Classification**”, ICEMS Pattaya 2015, Thailand 25-28 October 2015.
- 3) N. Pattanadech, P. Nimsanong, S. Potivejkul, P. Yuthagowith, S. Polmai, “**Partial Discharge Classification using Probabilistic Neural Network Model**”, ICEMS Pattaya 2015 , Thailand 25-28 October 2015.

ISLH 2015

The 2015 ISLH International Conference



ISLH | KMITL ²⁰¹⁵

Proceedings of the International Symposium on Lightning Protection
and High Voltage Engineering 2015 (ISLH 2015)

June 12 – 13, 2015

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, Thailand



ISLH Steering Committee

A.Ametani	(Ecole Polytechnique de Montreal)
B.T. Phung	(University of New South Wales)
N. Nagaoka	(Doshisha University)
Y. Baba	(Doshisha University)
K. Yamabuki	(Wakayama National College of Technology)
K. Yamamoto	(Chubu University)
H. T. Tran	(Tsuruoka National College of Technology)
M. Kando	(Tokai University)
S. Sangkasaad	(Outstanding Graduate Fellow, Thailand)
S. Pothivejkul	(KMITL, Thailand)
A. Kunakorn	(KMITL, Thailand)
N. Pattanadech	(KMITL, Thailand)
P. Yutthagowith	(KMITL, Thailand)

Technical Program Committee

N. Pattanadech, <i>Chairperson</i>	(KMITL, Thailand)
P. Yutthagowith	(KMITL, Thailand)
B. Techaumnat	(CU, Thailand)
T. Suwanasri	(TGGs, KMUTNB, Thailand)
A. Pruksanubal	(KMUTNB, Thailand)
C. Lothongkam	(MUT, Thailand)
S. Chotigo	(KMUTT, Thailand)
B. Marungsri	(SUT, Thailand)
N. Tanthanuch	(TU, Thailand)

Local Organizing Committee

S. Polmai, <i>Chairperson</i>	(KMITL, Thailand)
P. Chaisiri, <i>Secretary</i>	(KMITL, Thailand)
N. Pattanadech	(KMITL, Thailand)
P. Yutthagowith	(KMITL, Thailand)

Self-Organizing Map Performance for Partial Discharge Classification

N. Pattanadech^{1*}, and P. Nimsanong²

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

² Power System Operation and Control Section 2, Power System Control Department,
Metropolitan Electricity Authority, Thailand
e-mail: norasage@yahoo.com

Abstract

This research work presents a statistical partial discharge (PD) classification model employing Self Organizing Map (SOM) technique. The developed model classified PD patterns into 5 categories which were corona at high voltage side in air, corona at low voltage side in air, corona at high voltage side in mineral oil, corona at low voltage side in mineral oil and surface discharge in mineral oil. PD signals were simulated and measured by the conventional PD measurement technique. Statistical parameters of the PD patterns were analyzed. SOM model was constructed. Then, 60% of the experimented data were used as a training data and the rest of 40% of the data were used as a testing data to evaluate the performance of SOM PD classification model. It was found that the developed SOM model has clearly clustered the test data correctly into five groups of PD patterns.

Keywords: statistical classification, statistical parameter, partial discharge pattern, self-organizing map

1. Introduction

Partial discharge (PD) is an important problem existing normally in high voltage equipment. PD may develop and lead to the failure of high voltage apparatus eventually. Therefore, performing the PD testing is important to detect problems before the failure of such equipment occurring [1-2].

The measured PD patterns from the experiment can be used to classify the problems of the high voltage equipment; however, it is quite difficult to analyze the patterns especially by a nonexperienced staff. This research work simulated five PD types generally occurring in high voltage equipment which comprised of corona discharge at high voltage side in air (HV-A), corona discharge at low voltage side in air (LV-A), corona discharge at high voltage side in mineral oil (HV-O), corona discharge at low voltage side in mineral oil (LV-O) and surface discharge in mineral oil (SF-O). These simulated PD models were experimented and the Self Organizing Map (SOM) technique was applied to categorize the PD types.

2. Theory

2.1 PD measurement

Partial discharge test circuit is shown in Fig.1 according to IEC 60270 [3]. The discharge activity can be measured in pC or μV . The PD level in pC or μV and PD patterns are very important information to evaluate the insulation characteristic of a high voltage component. Then, some measures may be employed when the defective insulation is found.

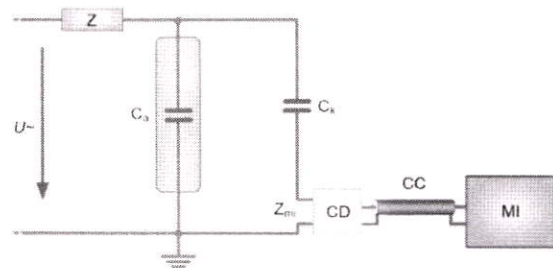


Fig.1. PD Measurement [3]

Where: U^- : high-voltage supply, Z : filter, C_s : test object, C_k : coupling capacitor, Z_m : input impedance of measuring system, CD : coupling device, CC : connecting cable, and MI : measuring instrument

2.2 Partial Discharge Quantity

Partial discharge quantity obtained from PD signals can be divided into three main groups, basic quantities, derived PD quantities, and phase amplitude-related derived quantities [4]. The original statistic variables used in this classification model are skewness, kurtosis, asymmetry, cross correlation, and modified cross-correlation factor following the $\Phi - q - n$ PD patterns. Those independent variables are listed as follow. $H_{qn}(\Phi)$ is the mean pulse height distribution. $H_n(\Phi)$ is pulse count distribution, $Q = (Q_s^2/N)/(Q_s^2/N)$ is the discharge asymmetry of $H_{qn}(\Phi^+)$ and $H_{qn}(\Phi^-)$ where Q_s^+ and Q_s^- are the sums of pulse height distributions of $H_{qn}(\Phi^+)$ and $H_{qn}(\Phi^-)$, CC is the cross correlation factor of $H_{qn}(\Phi^+)$ and $H_{qn}(\Phi^-)$, $mcc = \Phi Q.CC$ which is the modified cross-correlation factor. In this work, Φ is determined as 1.

Each of the factors of $Hqn(\Phi)$ and $Hn(\Phi)$ is also separated into four variables in Sk^+ for the skewness for the positive voltage side, Sk^- for the skewness for the negative voltage side, Ku^+ for the kurtosis for the positive voltage side, and Ku^- for the kurtosis for the negative voltage side.

2.3 Architecture of self-organizing map

SOM is a typical unsupervised neural network, which maps the multidimensional space onto a two dimensional space, preserving the original order [5]. Architecture of SOM is illustrated in Fig.2. For input and the SOM layer, the distance between the input vector p and the weight vector w of all neurons in the grid is computed with the *dist* function which can be calculated as below [6]:

$$\sum_{k=1}^n (p_{1,k} - w_{j,k}(t))^2 \tag{1}$$

A winning neuron is determined by the competitive transfer function. The weight vector of the winner including the weight vectors of its neighboring neurons is adjusted in accordance with some learning rate as:

$$w_j(t + 1) = w_j(t) + \eta(t)(p_i - w_j(t)) \tag{2}$$

Where p is the input vector, w is the weight vector, and η is the learning rate. Then, the final output can be interpreted. After enough number of iterations, each input vector is mapped onto a certain neuron in the Kohonen network in the way that the weight vector of the neuron is closer to the input vector.

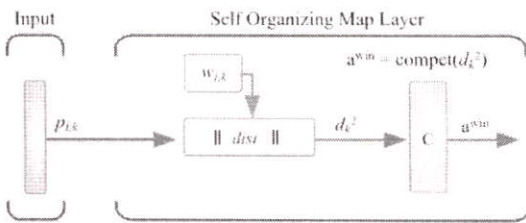


Fig.2. Architecture of self-organizing map

3. Experimentation

3.1 PD Models

The PD models for simulating five different PD patterns which are HV-A, LV-A, HV-O, LV-O and SF-O are illustrated in Fig.3 (a) – (e) respectively. Fig.3 (a), (b), (c) and (d) show a needle with tip radius of 10µm and plane electrode with diameter of 50mm in air and mineral oil to create corona at high voltage and low voltage side respectively. Fig.4 (e) illustrates the needle positioned on the impregnated pressboard employing to simulate the surface discharge.

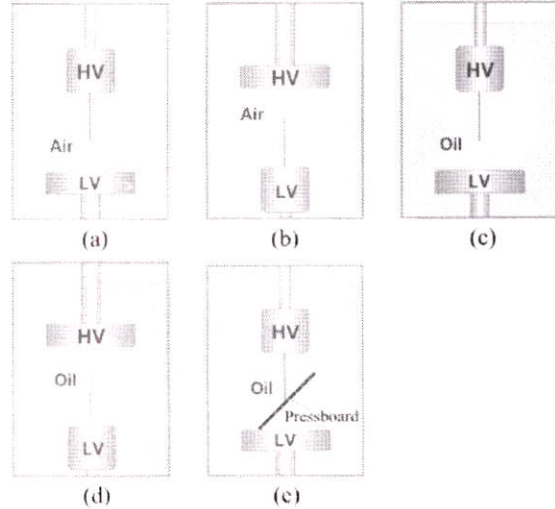


Fig.3. Artificial partial discharge model

3.2 PD Measurement System

The experiments were performed in High Voltage Laboratory, faculty of engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. A test circuit diagram and the test circuit arrangement for PD activity investigation was set up according to IEC 60270 as shown in Fig.4 – 5 respectively. The measurement system comprises high-voltage supply, coupling capacitor, coupling device, test object, fiber optical cable and PC with mtronix software.

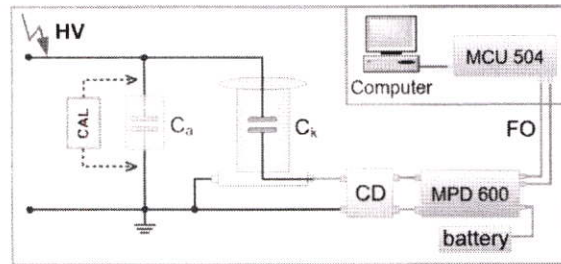


Fig.4. Test circuit diagram for the experiment

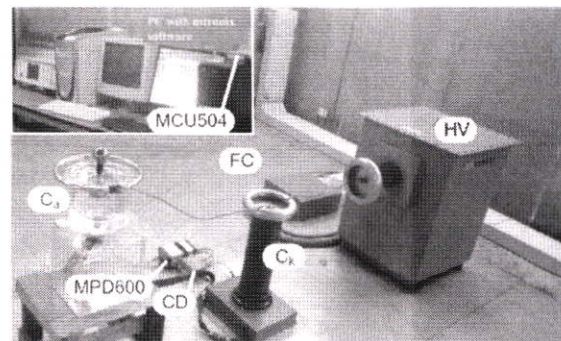


Fig.5. Test circuit set-up

Where HV: High-Voltage supply 75 kV, C_a : Test vessel, C_k : Coupling capacitor 1 nF, CD: Coupling device, FO: Fiber optics cable, MPD600: Acquisition unit, MCU504: Fiber optic controller

At first, the PD model was set up in the test circuit. Then, the background noise was measured. After that, the ac voltage was applied to the PD model until the inception voltage could be detected and then the test voltage was increased at the 120% of the PD inception voltage in order to obviously observe the PD signals and finally recording the PD pattern. The experiment was performed with all PD models which generated 100 experiments in total.

3.3 Test Results

The examples of the PD patterns of type of PD obtained from the conventional PD measuring system are illustrated in Fig. 6 – 10 respectively.

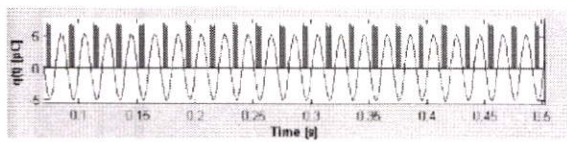


Fig.6. PD pattern for corona at HV side in air

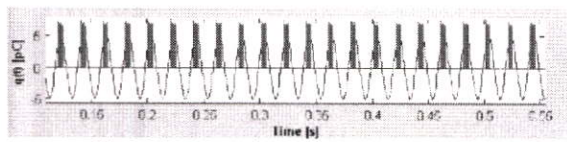


Fig.7. PD pattern for corona at LV side in air

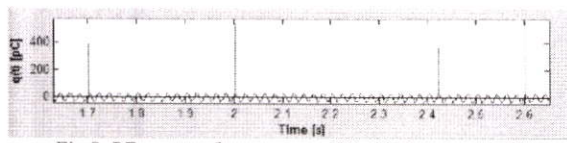


Fig.8. PD pattern for corona at HV side in mineral oil



Fig.9. PD pattern for corona at LV side in mineral oil

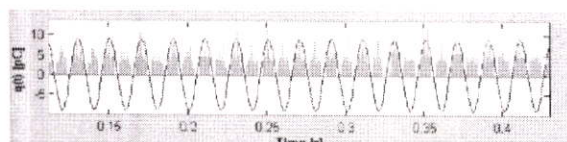


Fig.10. PD pattern for surface in mineral oil

3.4 Feature extraction

To extract the characteristic of the PD signals, the statistical parameters of the PD signals, skewness, kurtosis, asymmetry, cross correlation, and modified cross-correlation factor were calculated from the developed program. Diagram of calculated PD parameter of SF-O is depicted in Fig.11. Examples of a data set of the statistic parameters of each PD type are shown in Table I.

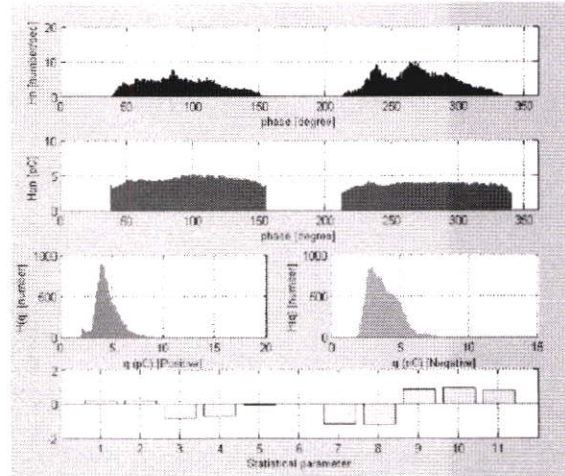


Fig.11. Example of $H_n(\Phi)$, $H_{qn}(\Phi)$, $H(q)$ and statistical parameters of surface discharge in mineral oil

TABLE I
Examples of statistic parameters of PD experiment

PD type	Hn(phase)				Hqn(phase)				Q	cc	mcc
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-			
HV-A	0	0.05	0	-0.86	0	0.01	0	-1.22	0	0	0
LV-A	0.13	0	-0.89	0	0	0	-1.22	0	0	0	0
HV-O	0.3	0.11	-0.83	0.45	0.06	0.07	-0.57	-0.86	0.02	0.65	0.01
LV-O	0.02	0.27	-0.74	-0.21	0.01	0.01	-1.15	-0.61	82.57	0.86	55.8
SF-O	0.22	0.21	-0.81	-0.71	-0.05	-0.01	-1.14	-1.16	0.84	0.92	0.78

4. Self-Organizing Map

4.1 Data Preparation

The self-organizing map was used in this research. The original data from 11 variables were normalized to set their average values and variance to be 0 and 1 respectively and then plotted the 11 variables against on another to select the variables that distinguish the PD pattern. 3 independent statistical variables, kurtosis of $H_n(\Phi)$ at positive cycle, kurtosis of $H_n(\Phi)$ at negative cycle, kurtosis of $H_{qn}(\Phi)$ at negative cycle, were selected to be the input data of the designed SOM model. The 3D plot of the selected independent statistical variables for distinguishing the PD patterns as shown in Fig. 12.

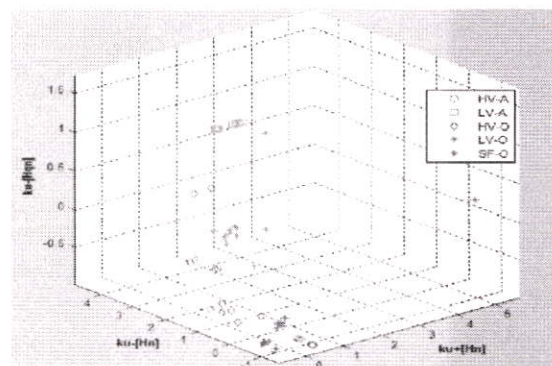


Fig.12. the selected statistic variables plotted against on another

4.2 Self-organizing map design

The SOM PD classification model was investigated with 3 input nodes as selected before. According to Yu Han and Y.H. Song, the size of Kohonen network tended to saturation of mapping error when the grid size was more than seven times of the number of the input vector p [7]. In this research work, the network size was determined by $4p$ with $100 \times 4p$ iterations. The number of nodes on the mapped 2D grid was 16 output nodes. The $dist$ function was applied to compute the distance between input vector and weight vector of all neurons in the grid before they were input to competitive transfer function node to find the winning neuron, the PD classification model architectures investigated in this research are shown in Fig.13. For training process, 60% from experimented data was used as a training data for SOM model, the rest data of 40% was employed for testing the model. The venetian blinds technique was used for setting the data for training and testing the models. The training and testing flowchart of SOM is depicted in Fig. 14 with 1600 iterations. After the completion of the training process, the SOM can divide PD patterns into 5 groups as shown in Fig. 15. Then, the weight values were saved in the designed PD classification models.

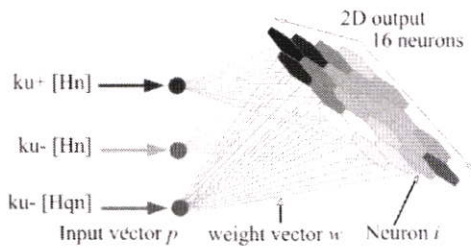


Fig.13. System structure of SOM

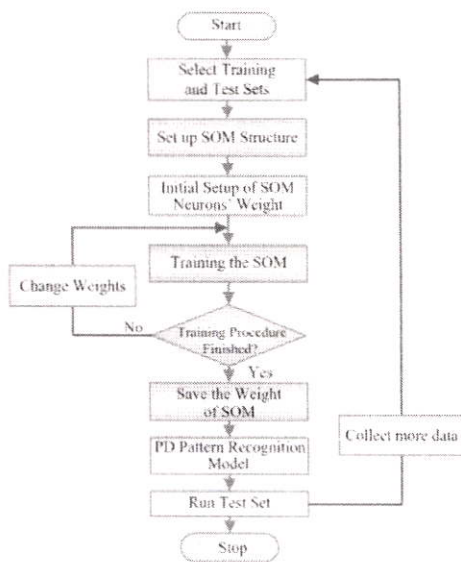
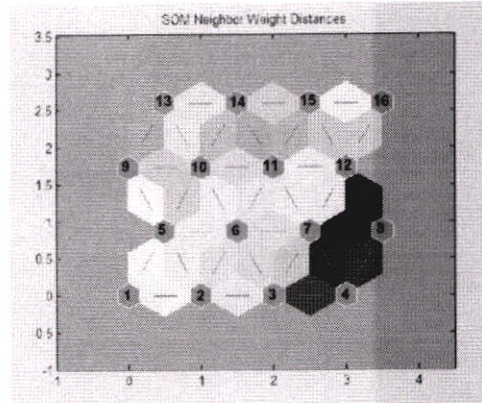
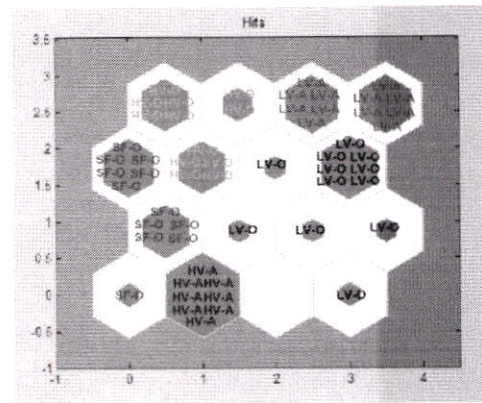


Fig.14. Self-organizing map training flow chart



(a) SOM neighbor weight distances



(b) SOM sample hits

Fig.15. Results from SOM training process

4.3 Test results

The performance of the SOM for PD classification is illustrated in Fig.16.

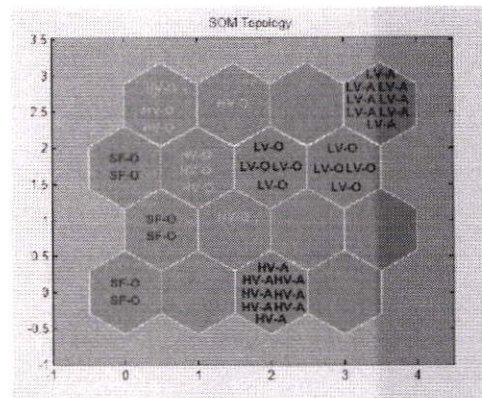


Fig.16 Classification results of test data

5. Conclusion

In this document, the statistic parameters were extracted the characteristic of the original PD signals from the developed program. 3 independent statistical variables, kurtosis of $H_p(\Phi)$ at positive cycle, kurtosis of $H_n(\Phi)$ at negative cycle, kurtosis of $H_{qm}(\Phi)$ at negative cycle, were selected to be the input data of the designed SOM model. The designed SOM model was used to classify PD patterns into five categories listed as corona at high voltage side in air, corona at low voltage side in air, corona at high voltage side in mineral oil, corona at low voltage side in mineral oil and surface discharge in mineral oil. It was found that the developed SOM model has clearly clustered the test data correctly into five groups of PD patterns.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to give the special acknowledgement to Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for providing the facility in this research work and the Reasearch Funding No. 2558-01-01009 for financial support.

References

- [1] V. Chatpattananan, N. Pattanadech and K. Vicitjindavat, "PCA-LDA for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment", Proceeding of ICPADM 2006, Vol.2, 26 - 30 June, 2006, Grand Bail Beach Hotel Denpasar, Bali, Indonesia, pp. 479-481.
- [2] Masayuki HIKITA, Shinya OHSUKA and Satoshi MATSUMOTO, "Recent Trend of Partial Discharge Measurement Technique using UHF Electromagnetic Wave Detection Method", IEEE-EIT Joint Symposium on High Voltage Power Technology, November 14-15, 2006, Rama Garden Hotel, Thailand, pp 13-18.
- [3] IEC Standard IEC-60270, "High Voltage Techniques Partial Discharge Measurement", International Electrotechnical Commission 2000.
- [4] E.H.Kreuger, E.Gulski, and V.Krida, "Classification of Partial Discharge." IEEE Transactions on Electrical Insulation., vol 28, no.6, December,1993.
- [5] Wen-Yeau Chang, "Application of Self-Organizing Map Approach for Partial Discharge Pattern Recognition of Insulators", Proceeding of the 9th International conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, July 19-23, 2009, Harbin, China, pp. 449-452.
- [6] K.Mohan, C.K.Mehotra, and S.Ranka, "Elements of Artificial Neural Networks", PWS Publishing Company, 1997, pp. 187-202.
- [7] Yu Han and Y.H. Song, "Using Improved Self-Organizing Map for Partial Discharge Diagnosis of Large Turbogenerators", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.18, No.3, September 2003, pp 392-399.



The 18th International Conference on Electrical Machines and Systems

Pataya City, Thailand

25-28 October 2015

Camera Ready Submission

List of Papers

Code	Title	Status	Full Manuscript	IEEE PDF eXpress Confirmation Letter	Copyright Form	Edit
0760	Generalized Regression Networks for Partial Discharge Classification <i>TOPICS : Magnetic and Insulation</i> <i>MEMBERS</i>	Accepted	No Upload File.	No Upload File.	No Upload File.	Edit
0763	Partial Discharge Classification using Probabilistic Neural Network Model <i>TOPICS : Magnetic and Insulation</i> <i>MEMBERS</i>	Accepted	No Upload File.	No Upload File.	No Upload File.	Edit

Menu

- Home
- Personal Information
- Paper Submission
- Logout
- ✧ Invitation Letter
- ✧ Registration Status
- ✧ Registration Information
- ✧ Upload Transferred payment's bill

Conference Registration

Committee

Honorary Chair

- Hee-Jun Kim, *President of KIEE*
- Dave Durocher, *IEEE-IAS*
- Blake Lloyd, *Past IEEE-IAS President*
- Hiroyuki Ohsaki, *Tokyo University*
- Guobiao Gu, *Chinese Academy of Sciences*
- Somboon Sangwongwanich, *Chulalongkorn University*

International Steering Committee

- Hyun-Gyo Jung, *President Elect of KIEE*
- Jin-Woo Ahn, *President of KIEE EMECS*
- Heung-Kyo Shin, *Gyeongsang National University, Past President of KIEE EMECS*
- Robert D. Lorenz, *University of Wisconsin-Madison, IEEE-IAS*
- Shoji Nishikata, *Tokyo Denki University*
- Ichiro Miki, *Meiji University*
- Chenglin Gu, *Huazhong University of Science and Technology*
- Dianguo Xu, *HIT Shenzhen University*
- Chaiwut Chat-uthai, *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*
- Viboon Chunkag, *King Mongkut's University of Technology North Bangkok*

Conference Chairman

- Vijit Kinares, *Chairman of IEEE IAS/IES/PELS Joint Chapter Thailand Section, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang*

Conference Co-Chairman

- Katsumi Yamazaki, *Chiba Institute Technology*
- Gyu-Tak Kim, *Changwon National University*
- Zhengming Zhao, *Tsinghua University*
- Athikom Roeksabutr, *President of Electrical Engineering Academic Association (Thailand)*

Generalized Regression Networks for Partial Discharge Classification

N. Pattanadech^{1*}, P. Nimsanong^{1,2}, S. Potivejkul¹, P. Yuthagowith¹, S. Polmai¹

¹ Electrical Engineering department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

² Power System Operation and Control Section 2, Power System Control Department, Metropolitan Electricity Authority, Thailand
E-mail: norasage@yahoo.com

Abstract — This document represents a partial discharge (PD) classification by using Generalized Regression Networks (GRNN) model. Two PD classification models, GRNN1 with 11 input variables and GRNN2 with 3 selected derived statistic parameters, were investigated for classification of PD signals into 5 patterns, corona at high voltage side in air, corona at low voltage side in air, corona at high voltage side in mineral oil, corona at low voltage side in mineral oil and surface discharge in mineral oil. The conventional PD measurement was performed for measuring PD signals of the artificial PD models. The statistical parameters of the PD signals such as skewness, kurtosis, asymmetry, cross correlation and so on were calculated from the developed computer program. Then, 60% of the experimented data was used as a training data for the developed PD classification models. Another 40% experimented data was used to evaluate the performance of the designed PD classification models. It was found that the GRNN1 model can classify PD patterns better than GRNN2 model. The accuracy for PD classification of GRNN1 model was 100% while the accuracy of GRNN2 model was 97.5% of 40 testing data.

Keywords: partial discharge measurement, statistical classification, statistical parameter, partial discharge pattern, generalized regression neural network

I. INTRODUCTION

Partial discharge (PD) is one of a crucial problem of high voltage equipment. PD occurring in the equipment can propagate and may cause the failure of high voltage apparatus eventually. Therefore, to detect PD especially at the partial discharge inception voltage level can schedule an appropriate maintenance program of such equipment to lengthen the life time of the equipment and also reduce the maintenance cost. According to the mentioned reasons, PD testing is commonly performed with a new and in serviced high voltage equipment. Various techniques that can be applied to determine the presence of PD activity are as follows [1]:

Electrical technique: PD charges from PD pulse currents can be measured according to IEC 60270.

Antenna technique: The electromagnetic wave generated by PD can be detected with an antenna.

Acoustic technique: The pressure wave emitted from the PD phenomena can be detected with an acoustic sensor.

Thermograph technique: The emitted light from the PD phenomena can be detected with a streak camera.

Chemical technique: By products from PD activity can be detected by DGA method.

II. THEORY

A. PD measurement

The basic equivalent circuit for PD measurements based on the detection of PD pulse current $i(t)$ circulating in the parallel-connected capacitors, C_k (coupling capacitor) and C_t (test object capacitance), via measuring impedance Z_m is shown in Fig.1 [2]. The discharge activity can be measured in pC or μV . The PD level in pC or μV and PD patterns are very important information to evaluate the insulation characteristic of a high voltage component. Then, some measures may be employed when the defective insulation is found.

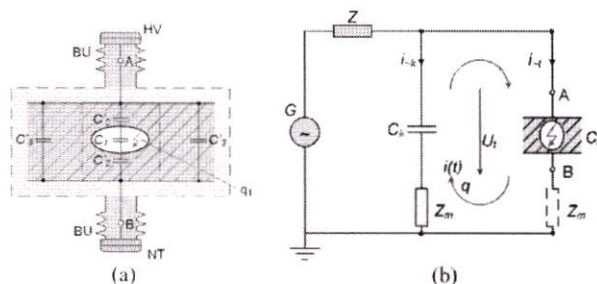


Fig.1. Equivalent circuit for PD measurement

Where: C_t : test object capacitance, C_k : coupling capacitor, G : voltage source, $i(t)$: PD pulse current, $i_{k,t}$: displacement currents, Z : voltage source connectors, q : transferred charge, U_t : voltage at parallel-connected capacitors, Z_m : measuring impedance

B. Partial Discharge Quantity

Partial discharge quantity obtained from PD signals can be divided into three main groups, basic quantities, derived PD quantities, and phase amplitude-related derived quantities [3]. The original statistic variables used in a designed classification model are skewness, kurtosis, asymmetry, cross correlation, and modified cross-correlation factor following the $\Phi - q - n$

PD patterns. Those independent variables are listed as follow. $H_{qn}(\Phi)$ is the mean pulse height distribution. $H_p(\Phi)$ is pulse count distribution, $Q = (Q^+/N^+)(Q^-/N^-)$ which is the discharge asymmetry of $H_{qn}(\Phi^+)$ and $H_{qn}(\Phi^-)$ where Q^+ and Q^- are the sums of discharges of $H_{qn}(\Phi^+)$ and $H_{qn}(\Phi^-)$ distributions, CC is the cross correlation factor of $H_{qn}(\Phi^+)$ and $H_{qn}(\Phi^-)$, $mcc = \Phi Q.CC$ which is the modified cross-correlation factor. In this work, Φ is determined as 1. Each of the factors of $H_{qn}(\Phi)$ and $H_n(\Phi)$ is also divided into four variables as Sk^+ , Sk^- , Ku^+ , and Ku^- . Sk^+ and Sk^- are designated the skewness of the positive voltage side and the negative voltage side respectively. Ku^+ and Ku^- indicate the kurtosis of positive voltage side and negative voltage side respectively.

C. Architecture of Generalized regression neural networks

A generalized regression neural network (GRNN) is mostly used for function approximation and for recognizing different types of patterns. It has a radial basis layer and a special linear layer. The architecture of the GRNN is shown in Fig.2. [4]

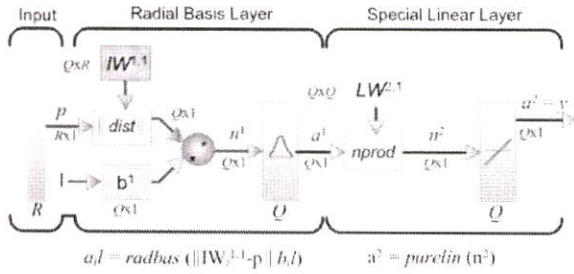


Fig. 2. Architecture of GRNN network

Where: R : no. of elements of input vector, Q : no. of input/target pairs

The radial basis layer has as many neurons as input/target vectors in $IW^{1,1}$ which is set as the weighted matrix. Each neuron's weighted input is the distance between the input vector (p) and training weight vectors, computed with the *dist* function which can be calculated as (1).

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^Q (IW_i^{1,1} - p_i)^2} \quad (1)$$

The bias b^1 is set to a column vector of $0.8326/spread$. The different *spread* parameters were used in this research to compare the performance of the designed models. Each neuron's net input is the product of its weighted input with its bias, calculated with *netprod* function. Each neuron's output is its net input passed through *radbas* function which can be calculated as (2).

$$a^1 = radbas(n^1) = e^{-n^1/spread} \quad (2)$$

The special linear layer having neurons as input/target vectors, $LW^{2,1}$ is set to create a target vector. The *nprod* box (code function of normprod) generates Q elements in vector n^2 . Each

element is the dot product of a row of $LW^{2,1}$ and the input vector a^1 which are normalized by the sum of the elements of a^1 , then passed through *purelin* function to produce the output y of GRNN model.

III. EXPERIMENTATION

A. PD Models

The PD models were simulated as follows: (a) corona at high voltage side in air (HV-A) (b) corona at low voltage side in air (LV-A) (c) corona at high voltage side in mineral oil (HV-O) (d) corona at low voltage side in mineral oil (LV-O) and (e) surface discharge in mineral oil (SF-O) as illustrated in Fig.3 (a) – (e) respectively. The needle with tip radius of 10 μ m and the plane electrode with diameter of 70 mm were used as the electrode of the PD models. The gap distance between high voltage and grounded electrode was set up for 25 mm. Furthermore, the impregnated pressboard with dimension of 100x100 mm and of 3.2 mm thick was utilized in case of surface discharge investigation.

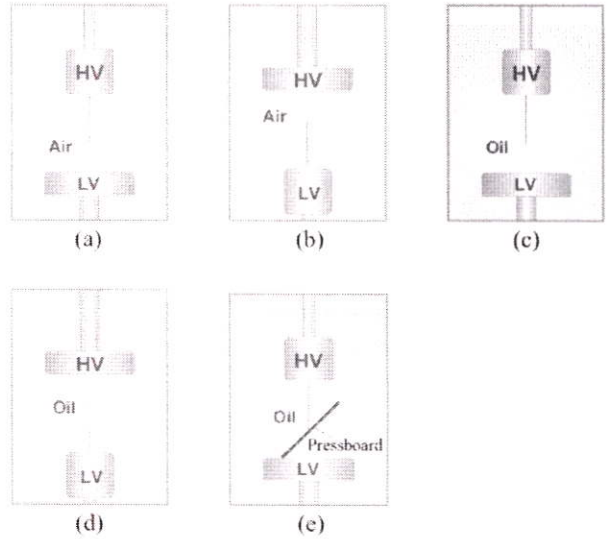


Fig. 3. Artificial partial discharge models

B. PD Test circuit

The experiments were performed in accordance with IEC 60270[5] in the high voltage laboratory, faculty of engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. A test circuit diagram and the test circuit arrangement for PD activity investigation are shown in Fig.4 – 5 respectively. The test circuit for PD investigation comprised high-voltage supply, coupling capacitor, coupling device, test object, fiber optical cable and PC with mtronix software.

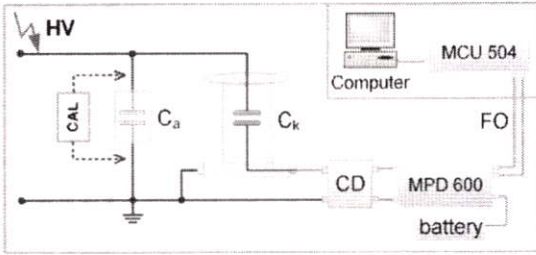


Fig. 4. Test circuit diagram for the experiment

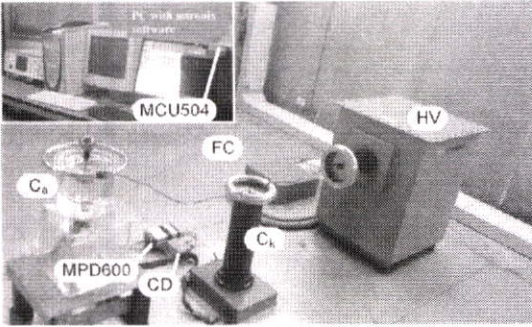


Fig. 5. Test circuit set-up

Where: HV: High-Voltage supply 75kV, C_a : Test vessel, C_k : Coupling capacitor 1nF, CD: Coupling device, FO: Fiber optics cable, MPD600: Acquisition unit, MCU504: Fiber optic controller

C. Test Procedure

At first, the test circuit was set up. Then, the background noise was measured. After that, the ac voltage was applied to the PD model until the inception voltage could be detected. The test voltage was increased at the 120% of the PD inception voltage in order to obviously observe the PD signals. These signals were recorded finally. 20 experiments of each PD were performed for each PD model.

D. Test Results

The examples of the PD patterns of each PD type are illustrated in Fig. 6 – 10 respectively.

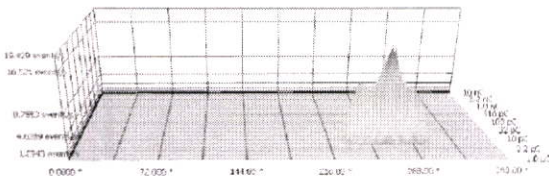


Fig. 6. PD pattern for corona discharge at HV side in air at 3.7 kV test voltage

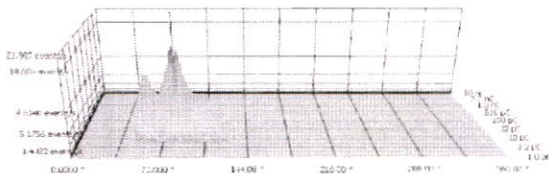


Fig. 7. PD pattern for corona discharge at LV side in air at 3.85 kV test voltage

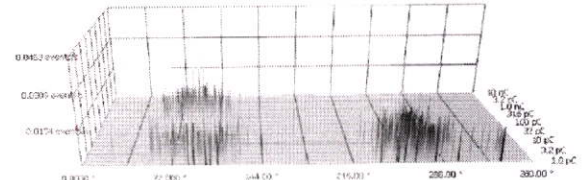


Fig. 8. PD pattern for corona discharge at HV side in mineral oil at 21.4 kV test voltage

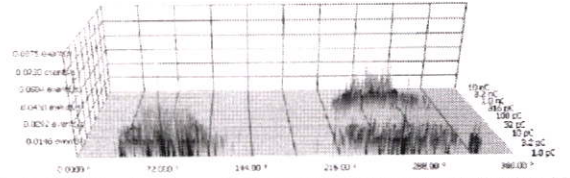


Fig. 9. PD pattern for corona discharge at LV side in mineral oil at 26.1 kV test voltage

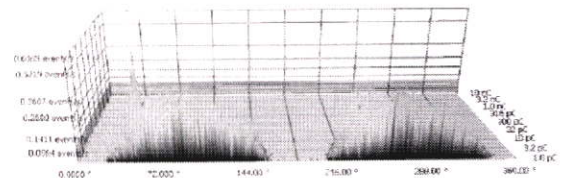


Fig. 10. PD pattern for surface discharge in mineral oil at 5.4 kV test voltage

E. Feature extraction

To extract the characteristics of the PD signals, the statistical parameters of the PD signals, skewness, kurtosis, asymmetry, cross correlation, and modified cross-correlation factor were calculated from the developed computer program. Diagram of calculated PD parameter of surface discharge in mineral oil is depicted in Fig.12. Examples of the data set of the statistic parameters of each PD type are shown in table I.

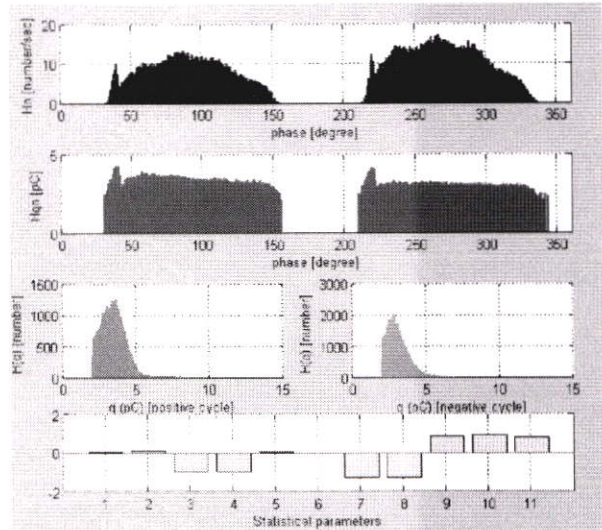


Fig. 11. Example of $H_s(\Phi)$, $H_{-s}(\Phi)$, $H(q)$ and statistical parameters of surface discharge in mineral oil

TABLE I
Examples of the statistical parameters of PD signal

PD type	Diphasic				Biphasic				σ^2	σ	mic
	SI-	SK-	Ku+	Ku-	SI+	SK+	Ku+	Ku-			
HV-A	0	0.05	0	-0.36	0	0.01	0	-1.22	0	0	0
LV-A	0.13	0	-0.8	0	0	0	-1.22	0	0	0	0
HV-O	0.3	0.11	-0.8	0.45	0.06	0.07	-0.57	-0.86	0.02	0.65	0.01
LV-O	0.02	0.27	-0.7	-0.21	0.01	0.01	1.15	-0.61	82.5	0.68	55.8
SF-O	0.22	0.21	-0.1	-0.71	-0.05	-0.01	1.14	-1.16	0.81	0.92	0.78

IV. GENERALIZED REGRESSION NEURAL NETWORK

A. Input/Out Data preparation

The original variables and selected variables were used to design the neuron models (NN) in this research. The 11 original variables extracted from feature extraction were normalized to set their average values and variance to be 0 and 1 respectively. Then these variables were used as input of the designed GRNN1 model. Furthermore, the aforementioned 11 variables were plotted against on another to select the variables that clearly distinguished between each type of the simulated PD patterns. Three variables, kurtosis of $H_p(\Phi)$ at positive cycle, kurtosis of $H_n(\Phi)$ at negative cycle, and kurtosis of $H_{qm}(\Phi)$ at negative cycle were selected to be used as the input of the designed GRNN2 model for PD classification. The 3D plot of the selected independent statistical variables for distinguishing the PD patterns as shown in Fig. 12.

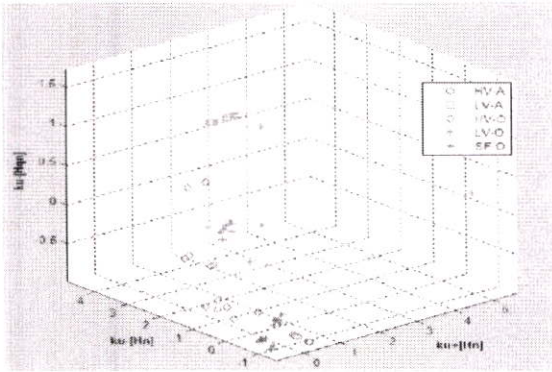


Fig. 12. the selected statistic variables plotted against on another

The set of original input data, both all variable data and selected variable data, was composed of five types of PD patterns, HV-A, LV-A, HV-O, LV-O and SF-O, each type of PD pattern contained 20 observations. The original data matrix for classification models were created as shown in (3). The output target was coded for the target vector as shown in (4).

$$X1 = \begin{bmatrix} [HV-A]_{20 \times 11} \\ [LV-A]_{20 \times 11} \\ [HV-O]_{20 \times 11} \\ [LV-O]_{20 \times 11} \\ [SF-O]_{20 \times 11} \end{bmatrix}_{100 \times 11} \quad X2 = \begin{bmatrix} [\text{selected HV-A}]_{20 \times 3} \\ [\text{selected LV-A}]_{20 \times 3} \\ [\text{selected HV-O}]_{20 \times 3} \\ [\text{selected LV-O}]_{20 \times 3} \\ [\text{selected SF-O}]_{20 \times 3} \end{bmatrix}_{100 \times 3} \quad (3)$$

$$Y = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5]^T \quad (4)$$

Where:

X1 is the entire variable data matrix.

X2 is the selected variable data matrix.

Y is the target vector 1 for HV-A, 2 for LV-A, 3 for HV-O, 4 for LV-O, and 5 for SF-O.

B. Generalized regression neural network design

The Generalized regression neural network, or GRNN, was utilized in this research. Two GRNN models, GRNN1 and GRNN2, were investigated. The first proposed GRNN architecture (GRNN1) used 11 derived statistical parameters as the input nodes. The second proposed GRNN architecture (GRNN2) utilized three selected statistical parameters as the input node as explained before. Both models had two layers, the radial basis layer with 60 neuron's weight vector and the special linear layer with 60 neuron's weight vector with the output node. Moreover, the *round* () function was used to make the integral number code outputs for the test sets.

C. Training and Testing Data Set Selection

To train and test the designed PD classification models, the variable data matrix (X1, X2) was divided into two subsets. The first subset was the training set, which was used for computing the distance in radial basis layer and normalized dot product in special linear layer. The second subset was the test set. The test set was not used during training, but it was used to verify the performance of the designed models. The block method was used to divide all the data with 60% into training set and the rest of 40% for testing set. The designed model was trained with different spread parameter, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 and 1.2 in the radial basis layer.

V. PD CLASSIFICATION RESULTS

The training and testing result is illustrated in Table II. It was found that the optimal spread parameter of GRNN1 and GRNN2 model were 0.8 and 0.4 respectively. The linear regression between the network outputs and the corresponding targets is represents in Fig.13 - 14 respectively. It is clearly observed that the designed GRNN1 model provides better the PD classification property than the designed GRNN2 model especially when the spread parameter value are higher than their optimal values.

TABLE II
The training and testing results of GRNN1 and GRNN2

spread parameter	Training results			
	GRNN1		GRNN2	
	% Classification	R-value	% Classification	R-value
0.2	100	1.0	100	0.999
0.4	100	1.0	100	0.983
0.6	100	1.0	67	0.956
0.8	100	0.999	33	0.911
1.0	96	0.996	28	0.861
1.2	95	0.991	14	0.813
Testing results				
0.2	92.5	0.873	97.5	0.949
0.4	97.5	0.949	97.5	0.994
0.6	100	0.999	60	0.956
0.8	100	0.999	50	0.898
1.0	100	0.997	52.5	0.854
1.2	100	0.993	22.5	0.827

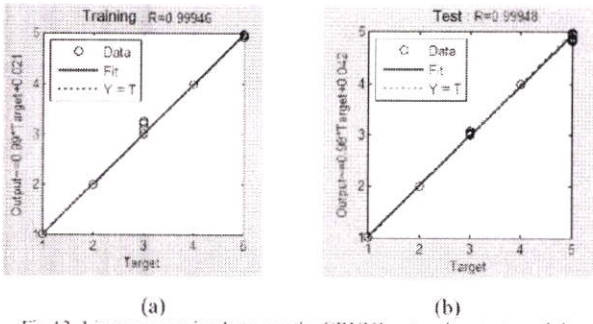


Fig.13. Linear regression between the GRNN1 network outputs and the corresponding targets at the spread parameter of 0.8

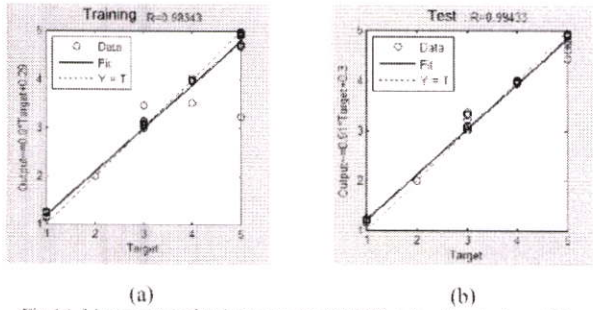


Fig.14. Linear regression between the GRNN2 network outputs and the corresponding targets at the spread value of 0.4

The performance of the proposed PD classification models is illustrated in Table III.

TABLE III
Confusion table for proposed models

GRNN1 model with 0.8 spread parameter						
PD Type	%Predicted Group					Total
	HV-A	LV-A	HV-O	LV-O	SF	
HV-A	8					100
LV-A		8				100
HV-O			8			100
LV-O				8		100
SF-O					8	100
Total	100	100	100	100	100	100

GRNN2 model with 0.4 spread parameter						
PD Type	%Predicted Group					Total
	HV-A	LV-A	HV-O	LV-O	SF	
HV-A	8					100
LV-A		8				100
HV-O			8			100
LV-O				8		100
SF-O					1	87.5
Total	100	100	100	100	87.5	97.5

VI. CONCLUSION

In this document, the statistic parameters of the PD signals were extracted by using the developed program. Two PD classification models, GRNN1 and GRNN2, were constructed and investigated. All the original variables were used to be the input data of the GRNN1 while the three selected variables were used as the input data of the GRNN2 model. Both designed GRNN models were applied to classify PD patterns into five categories listed as corona at high voltage side in air,

corona at low voltage side in air, corona at high voltage side in mineral oil, corona at low voltage side in mineral oil and surface discharge in mineral oil. It was found that the designed GRNN1 model have a better PD classification compared with the designed GRNN2 model. The accuracy for PD classification of GRNN1 model was 100% while the accuracy of GRNN2 model was 97.5% of the 40 testing data.

VII. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to give the special acknowledgement to Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for providing the facility in this research work and the research funding No. 2558-01-01009 for financial support.

VIII. REFERENCES

- [1] A.Haddad and D.Warne, "Advance in High Voltage Engineering", First edition, 2004, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom.
- [2] Ake Carlson, Jitka Fuhr, Gottfried Scheml, and Franz Wegscheider, "Testing of Power Transformer" First edition, 2003, Pro Print GmbH, Düsseldorf.
- [3] V. Chatpattananan, N. Pattanadach, and K. Vicetjindavat, "PCA-LDA for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment", Proceeding of ICPADM 2006, Vol.2, 26 - 30 June, 2006, Grand Bail Beach Hotel Denpasar, Bali, Indonesia, pp. 479-481.
- [4] MATLAB, "Neural Network Toolbox and Function Reference", 1894-2007.
- [5] IEC Standard IEC-60270, *High Voltage Techniques Partial Discharge Measurement*. International Electrotechnical Commission, 2000.

Partial Discharge Classification using Probabilistic Neural Network Model

N. Pattanadech^{1*}, P. Nimsanong^{1,2}, S. Potivejkul¹, P. Yuthagowith¹, S. Polmai¹

¹Electrical Engineering department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

²Power System Operation and Control Section 2, Power System Control Department, Metropolitan Electricity Authority, Thailand
E-mail:norasage@yahoo.com

Abstract— The aim of this paper is to propose the probabilistic neural network (PNN) model for classification partial discharge (PD) patterns, which comprised of corona discharge at high voltage side and at low voltage side in air, corona discharge at high voltage side and at low voltage side in mineral oil and surface discharge in mineral oil. Partial discharge signals were investigated by conventional method according to IEC60270. Independent parameters such as skewness, kurtosis, asymmetry, and cross correlation of the Φ -q-n PD patterns were analyzed. The PNN PD classification model was constructed. Moreover, the principal component analysis (PCA) was utilized to reduce the input dimension of the developed PD classification model. After that, 60% of the experimented data was used as a training data for the PD classification models. Another 40% experimented data was used for evaluation the performance of the designed PD classification models. Effects of spread parameters and input neuron numbers on the PD classification performance were examined. It was found that the first four score variable was appropriate to be used to construct the designed PNN model with the optimal spread value of 1.2. The proposed PD classification model can classify PD types with the accuracy of 100% of 40 tested data.

Keywords: partial discharge measurement, statistical classification, statistical parameter, partial discharge pattern, probabilistic neural network

I. INTRODUCTION

Partial discharge (PD) is a localized electrical discharge occurring in the insulation system without completely bridging the electrodes. PD occurring in high voltage apparatus gradually deteriorates the integrity of the insulation system which may lead to the failure of high voltage equipment at the end. The consequence may cause the injury of people, damaging of equipment, power shortage and so on. Hence, PD testing is very important to indicate the incipient fault in high voltage equipment before they fail [1]. Classification of PD patterns is a highly-skill task needed to perform by an expertise. Simple PD patterns generally could be classified by an experienced staff. However, the combination or PD patterns may occur in practice. This paper proposes the PD patterns classification model employing probabilistic neural network (PNN) technique. The PD signals were created from the PD models experimented by employing the conventional PD

measurement according to IEC60270 [2]. Five types of PD models, corona discharge at high voltage side in air (HV-A), corona discharge at low voltage side in air (LV-A), corona discharge at high voltage side in mineral oil (HV-O), corona discharge at low voltage side in mineral oil (LV-O) and surface discharge in mineral oil (SF-O), were simulated and investigated.

II. THEORY

A. PD measurement

A basic partial discharge measuring circuit is shown in Fig.1. An apparent charge (q) and other PD quantities, such as the PD inception (PDIV) and extinction voltage (PDEV), the pulse repetition rate (n), the pulse repetition frequency (N), the phase angle (Φ), the average discharge current (i) were measured to evaluate the quality of insulation of a high voltage component.

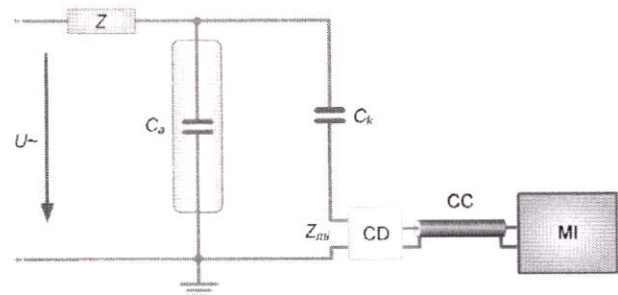


Fig. 1. PD measurement

Where: $U\sim$: high-voltage source, Z : low pass filter, C_a : test object, C_c : coupling capacitor, Z_{mi} : input impedance of measuring system, CD : coupling device, CC : connecting cable, and MI : measuring instrument

B. Partial Discharge Quantity

The PD quantity comprising of Φ , q , n and voltage V is obtained from PD measurement. The PD statistic variables composing of skewness, kurtosis, asymmetry, cross correlation, and modified cross-correlation factor were calculated from mean pulse height distribution, or $H_{qn}(\Phi)$ and

pulse count distribution, or $H_{qn}(\Phi)$ as equations in table I [3]. Each of the $H_{qn}(\Phi)$ and $H_n(\Phi)$ is divided into four variables which are Sk^+ , Sk^- , Ku^+ , and Ku^- . Sk^+ and Sk^- represent the skewness for the positive voltage side and the negative voltage side respectively, whereas Ku^+ and Ku^- stand for the kurtosis of the positive voltage side and negative voltage side respectively.

TABLE I
Statistical operators

Skewness	$Sk = \frac{E(q-\mu)^3}{\sigma^3}$
Kurtosis	$Ku = \frac{E(q-\mu)^4}{\sigma^4}$
Discharge asymmetry	$Q = (Q^+/N)/(Q^-/N')$
Cross correlation factor	$cc = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i / n}{\sqrt{[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n][\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n]}}$
Modified cross-correlation factor	$mcc = Q \times cc$

Where:

q represents the mean discharge magnitude in a phase window.

μ represents the mean of q .

σ represents the standard deviation of q .

E represents the expectation operator.

Q^+ and Q^- stand for the sums of discharges of $H_{qn}(\Phi^+)$ and $H_{qn}(\Phi^-)$ distributions.

N and N' stand for the number of discharges of the $H_{qn}(\Phi^+)$ and $H_{qn}(\Phi^-)$ distributions.

x is designated for the mean discharge magnitude in a phase window in the positive half of the voltage cycle.

y is designated for the mean discharge magnitude in the congruent phase window in the negative half of the voltage cycle.

n represents the number of phase positions per half cycle.

C. Principal Component Analysis (PCA)

PCA is a statistical technique which is used for transformation a correlated variable set to a new variable set, called principal components. Each principal component is a linear combination of the original variables which are uncorrelated or orthogonal with each other as illustrated in (1).

$$T_{q \times s} = X_{q \times r} P_{r \times s} \quad (1)$$

Where: T is a new set of variables (score matrix), X is the original data matrix, P is the principal component matrix (PC coordinates), q is the number of observations, s is dimensionality of the PC space, r is dimensionality of original space

The full set of principal components is as large as the original set of variables. However, the sum of the variances of the first few principal components (s components) commonly exceeds 80% of the total variance of the original data [4].

D. Architecture of probabilistic neural network

A probabilistic neural network (PNN) was used for PD classification problems in this research. It had a radial basis layer and a competitive layer. The architecture of the PNN is shown in Fig.2. [5]

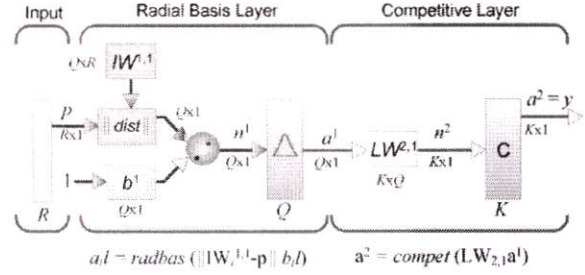


Fig. 2. Architecture of PNN network

Where R : number of elements in input vector, Q : number of neurons in the first layer, K : number of classes of input in the second layer

When an input is presented, the first layer calculates distances, $dist$ function as shown in (2), between the input vector (p) and the training input vectors ($IW_i^{1,1}$) and creates a vector whose element indicates how close the input is to a training set. These elements are multiplied, element by element, by the bias b^1 and sent to the $radbas$ transfer function as calculated in (3). The bias b^1 is set to a column vector of $0.8326/spread$.

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^Q (IW_i^{1,1} - p_i)^2} \quad (2)$$

$$a^1 = radbas(n^1) = e^{(-n^1)^2} \quad (3)$$

The sum of these contributions for each class of inputs is done in the second layer to generate its net output as a vector of probabilities. Finally, a $compete$ transfer function on the output of the second layer selects the maximum of these probabilities, and creates a 1 for that class and a 0 for the other classes.

III. EXPERIMENTATION

A. PD Models

The PD models were constructed with various electrode types are illustrated in Fig.3 to simulate PD patterns: HV-A, LV-A, HV-O, LV-O, and SF-O, respectively as shown in Fig.4. A tungsten needle with tip radius of $10\mu m$ and a plate electrode with 70 mm. diameter were used to simulate corona discharge in air and in mineral oil as well. The gap distance between high voltage and grounded electrode was 25 mm. While the needle positioned on the impregnated pressboard setting on the ground plane electrode was employed to simulate the surface discharge.

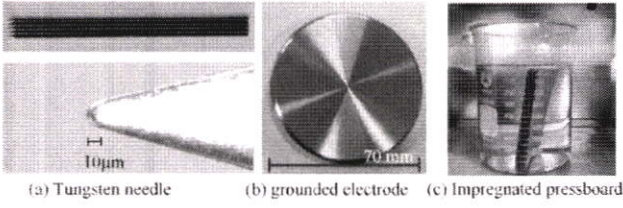


Fig. 3. Electrodes for PD model

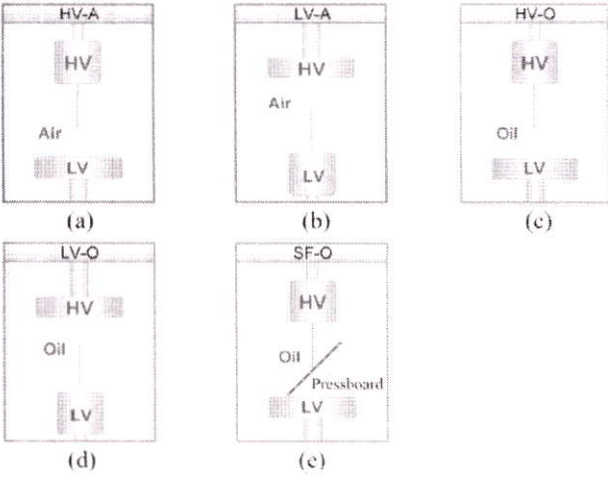


Fig. 4. Artificial partial discharge models

B. PD experiment

To investigate the PD patterns of each PD model, the PD test circuit was set up as shown in Fig.5 according to IEC 60270. The background noise was firstly measured. Then, AC voltage was applied to the PD model at the 120% of the PD inception voltage. The PD signal was measured and recorded. The experiment was done with all PD models for 100 experiments in total.

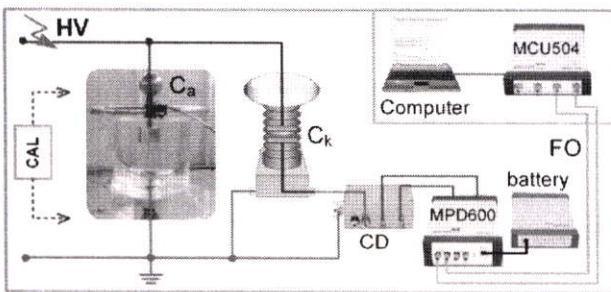


Fig.5. Test circuit diagram for the experiment

Where HV: High-Voltage supply, C_a : PD test model, C_k : Coupling capacitor, CD: Coupling device, FO: Fiber optic cable, MPD 600: Acquisition unit, MCU504: Fiber optic controller

C. Test Results

The examples of the PD patterns of each PD type obtained from the conventional PD measuring system are represented in Fig. 6.

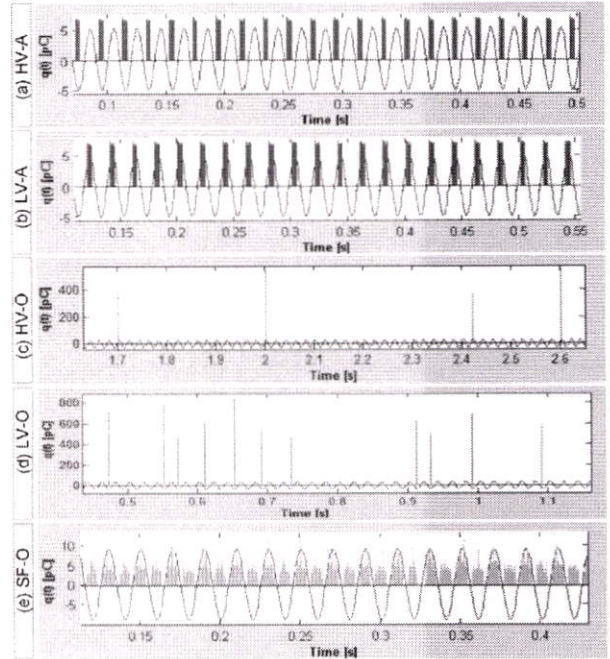


Fig. 6. Experimental results of PD patterns

- (a) Corona discharge at HV side in air at 3.58 kV test voltage
- (b) Corona discharge at LV side in air at 3.72 kV test voltage
- (c) Corona discharge at HV side in mineral oil at 21.2 kV test voltage
- (d) Corona discharge at LV side in mineral oil at 25.4 kV test voltage
- (e) Surface discharge in mineral oil at 5.6 kV test voltage

D. Feature extraction

The phase-resolved $H_n(\Phi)$ and $H_{qn}(\Phi)$ were analyzed from the collected PD pattern data. Then, the PD characteristic of each PD type such as skewness, kurtosis, asymmetry, cross correlation, and modified cross-correlation factor was computed. The example of $H_n(\Phi)$ and $H_{qn}(\Phi)$ distribution of corona discharge at HV side in mineral is depicted in Fig.7. The example of statistic variables of each PD type is shown in Fig.8.

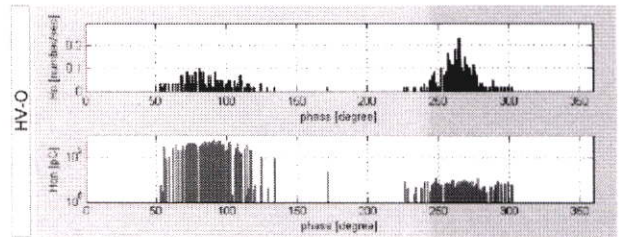


Fig. 7. Example of $H_n(\Phi)$ and $H_{qn}(\Phi)$ distribution of corona discharge at HV side in mineral

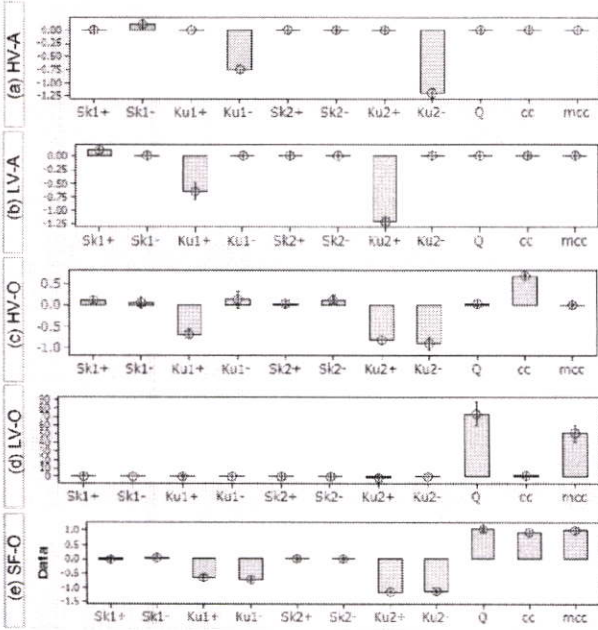


Fig. 8. Statistical variables of PD experiment

Where: $Sk1^+$, $Sk1^-$, $Ku1^+$ and $Ku1^-$ belong to the statistical variables of $H_n(\Phi)$ distribution. $Sk2^+$, $Sk2^-$, $Ku2^+$ and $Ku2^-$ belong to statistical variables of $H_{qn}(\Phi)$ distribution.

IV. PROBABILISTIC NEURAL NETWORK

PD signals from various PD types, as previously discussed, can be classified by using the statistic variables extracted from $H_n(\Phi)$ and $H_{qn}(\Phi)$ distribution. To recognize the PD patterns, the probabilistic neural network, or PNN model, was used in this research. Besides, the original variables acquired from the feature extraction process were transformed to a new set of variables before input to the proposed PD classification model as depicted in Fig.9.

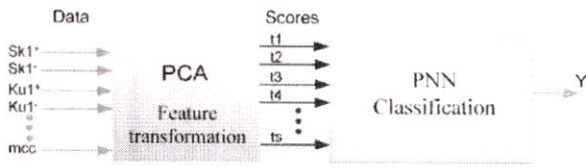


Fig. 9. Principle Component Neural Network

A. Feature transformation

The statistical variables were set to be the original matrix X and transformed to a new score matrix T as depicted in (4).

$$X = \begin{bmatrix} [HV-A]_{20 \times 11} \\ [LV-A]_{20 \times 11} \\ [HV-O]_{20 \times 11} \\ [LV-O]_{20 \times 11} \\ [SF-O]_{20 \times 11} \end{bmatrix}_{100 \times 11} \xrightarrow{\text{PCA transformation}} T = \begin{bmatrix} [\text{Score HV-A}]_{20 \times 11} \\ [\text{Score LV-A}]_{20 \times 11} \\ [\text{Score HV-O}]_{20 \times 11} \\ [\text{Score LV-O}]_{20 \times 11} \\ [\text{Score SF-O}]_{20 \times 11} \end{bmatrix}_{100 \times 11} \quad (4)$$

First, the original matrix X was normalized by eq. (5) to set their average values and variance to be 0 and 1 respectively. Then, the original matrix X was transformed to new features, or new score matrix, by using PCA technique which was implemented by using MATLAB statistic toolbox function as eq. (6).

$$Z = (x - \mu) / \sigma \quad (5)$$

Where μ is the mean value and σ is the standard deviation along each column of X .

$$[PC, \text{Latent}, \text{Explained}] = PCACOV(XC) \quad (6)$$

Where XC is the covariance matrix of the original matrix (X), PC is the principal component matrix, Latent is the eigen values of XC , and Explained is the vector of variance in each PC [5].

The relationship of principal components and their cumulative percentage variance explained are illustrated in Fig. 10. It can be seen that the summation of the first 5 PCs contains about 92% variance explained of the original information. PC6 to PC11 contain only the small percent of variance explained compared to the first 5 PCs. Therefore, the first five PCs should be implemented to create the initial PD classification model. The PC matrix with 5 PCs is illustrated in table II.

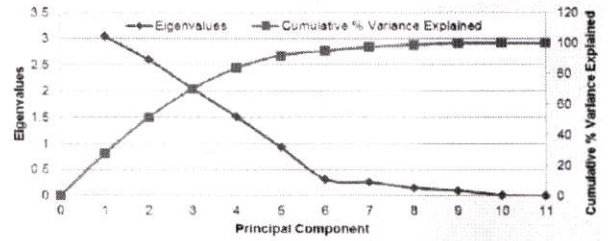


Fig.10. Plot of principal components and cumulative % variance explained versus eigenvalues.

TABLE II
Principal component matrix

		Principal Component (PC)				
		1	2	3	4	5
Halfphase)	Sk1-	-.496	.025	-.205	.075	.230
	Sk1-	-.229	-.017	-.165	-.499	-.579
	Ku1+	-.495	-.057	.252	.124	.005
	Ku1-	-.224	.076	-.570	-.040	-.038
	Sk2-	-.505	.032	.032	.018	.389
	Sk2-	-.072	-.382	-.331	-.397	-.040
	Ku2+	-.351	-.255	.386	.066	-.278
	Ku2-	-.001	.171	-.515	.464	-.040
	Q	-.109	.581	.090	-.048	-.209
	cc	.052	.266	.052	-.588	.537
	mcc	-.092	.583	.090	-.052	-.215

B. Probabilistic Neural Network design

The PNN classification model was created by using MATLAB neural network toolbox function [5]. The architecture of designed PNN model had the input node, a radial basis layer and a competitive layer. The numbers of input node were designated as 1n, 2n, 3n, 4n and 5n in conformity with the first five PCs respectively. The mentioned PCs were applied to radial basis layer which was composed of 60 neuron's weight vector. The competitive layer had five classes in which each class composed of 12 neurons. Finally, a *compete* transfer function produced a 1 for the class that composed maximum probability.

C. Training and Testing Data Set Selection

To train and test the designed model, the score matrix T was first divided into two subsets. The former subset was the training set, which was used for computing the distance in radial basis layer and probabilities in competitive layer. The latter subset was the test set for testing the performance of the developed PD classification model. The block method was used to divide the data with 60% as the training set and the rest of 40% as the test set. The designed model was trained with various input node numbers and different spread parameters, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 and 2.0 in radial basis layer.

V. PD CLASSIFICATION RESULTS

The test result is depicted in Table III. The PNN models with different architecture were evaluated their performance with the testing data set. It was found that the accuracy of the PNN model increased with the increasing of the number of PCs. Nevertheless, the accuracy of the model decreased with increasing of the spread parameter. Thus, the first four score variables (4PCs) were suitable more than using 5 PCs for construction of the PD classification model. Besides, the designed PNN model should utilize the optimal spread value of 1.2. The proposed PD classification model with 4 PCs input was proved that it can classify PD types with the accuracy of 100% of 40 tested data as shown in table IV.

TABLE III
Testing results of PNN models

spread parameter	% Classification				
	1PC	2PCs	3PCs	4PCs	5PCs
0.2	62.5	92.5	95	100	100
0.4	60	87.5	95	100	100
0.6	60	80	95	100	100
0.8	60	80	95	100	100
1.0	60	80	90	100	100
1.2	60	80	90	100	97.5
1.4	57.5	77.5	90	95	95
1.6	57.5	75	90	95	95
1.8	55	75	90	95	95
2.0	55	75	90	95	92.5

TABLE IV

Confusion table for the proposed PNN model

		Target Class					% Classification
		HV-A	LV-A	HV-O	LV-O	SF-O	
Output Class	HV-A	8					100
	LV-A		8				100
	HV-O			8			100
	LV-O				8		100
	SF-O					8	100
% Classification		100	100	100	100	100	100

VI. CONCLUSION

In this document, the statistic parameters of the PD signals were extracted. All the original variables were transformed to the new variables by PCA technique to be the input variables for the PNN model. The designed PNN model were used to classify PD patterns into five categories listed as corona at high voltage side in air, corona at low voltage side in air, corona at high voltage side in mineral oil, corona at low voltage side in mineral oil and surface discharge in mineral oil. It was found that the accuracy of the PNN model depended on the number of PCs. Moreover, the accuracy of the PD classification model is affected from the spread parameter. According to this investigation, the first four score variables (4PCs) were suitable to build up the designed PNN model with optimal spread value of 1.2. The proposed PD classification model can classify PD types with the accuracy of 100% of 40 tested data

VII. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to give the special acknowledgement to Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for providing the facility in this research work and the research funding No. 2558-01-01009 for financial support.

VIII. REFERENCES

- [1] V. Chatpattananan, N. Pattanadech and K. Vicitjindavat, "PCA-LDA for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment", Proceeding of ICDPAM 2006 Vol.2, 26 – 30 June, 2006, Grand Bail Beach Hotel Denpasar, Bali, Indonesia, pp. 479-481.
- [2] IEC Standard IEC-60270, *High Voltage Techniques Partial Discharge Measurement*, International Electrotechnical Commission 2000.
- [3] Kreuger, E.H., Gulski, E. and Krida, V., "Classification of Partial Discharge", IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol 28, no.6, December, 1993.
- [4] J. Wesly Hines, *PCA and PCR document*, The University of Tennessee, 2000, 6, 28
- [5] MATLAB, "Neural Network Toolbox and Function Reference", 1894-2007.

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว(หัวหน้าโครงการวิจัย)

ชื่อ-สกุลนายนครเศรษฐ พัฒนเดช

เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด 21เมษายน 2518อายุ.... 40 ปี

สถานภาพ โสด สมรส

ตำแหน่งปัจจุบันผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.บ.	สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2541
วศ.ม.	สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2545
Dr. techn.	Engineering Sciences Electrical Engineering	Graz University of Technology,Austria	2556

ประสบการณ์งานวิจัย

- 2551-2552 หัวหน้าโครงการวิจัย “การศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูง กระแสสลับพิกัด 50 kV โดยรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สาย ”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2551-2552 หัวหน้าโครงการวิจัย “การออกแบบและวิเคราะห์ตัวนำล่อฟ้า”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2551-2552 หัวหน้าโครงการวิจัย“กรณีศึกษาเพื่อแก้ปัญหาการเกิด Overshoot ของแรงดันสูงอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงของบริษัท PRECISE Electric MFG.co” สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2551-2552 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการวิจัย “เครื่องกระตุ้นการเจริญเติบโตของข้าวด้วยสนามไฟฟ้า ” สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2551 หัวหน้าโครงการวิจัย การออกแบบและสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันและกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น ผสม6kV 3 kAคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- 2551 หัวหน้าโครงการวิจัย เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 6kV ทับซ้อนบนแรงดันกระแสสลับ 220v คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2550-2551 หัวหน้าโครงการวิจัย “การศึกษาและออกแบบตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์รับสัญญาณ เพื่อใช้ในการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน ”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2550-2551 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการวิจัย “การออกแบบสร้างเคเบิลสเปซเซอร์สำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2550-2551 หัวหน้าโครงการวิจัย “การศึกษาการวัดดีสชาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศ UHF”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2550-2551 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการวิจัย “การออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดแรงดันสูงแบบผสม พิกัด 300kV”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2550-2551 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการวิจัย “การทดสอบและออกแบบครอบเอาท์พิวส์ ”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2550 หัวหน้าโครงการวิจัย อุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์ชนิดความต้านทานทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2550 หัวหน้าโครงการวิจัยอุปกรณ์วัดกระแสอิมพัลส์โดยขดลวดโรกออฟสกี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 2549-2550 หัวหน้าโครงการวิจัย “การศึกษาการออกแบบลูกถ้วยฉนวนที่ใช้กับสภาวะเปรอะเปื้อน ”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2549-2550 หัวหน้าโครงการวิจัย“การออกแบบสร้างหม้อแปลงทดสอบ 200kV 10 kVA และชุดควบคุม”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2549-2550 หัวหน้าโครงการวิจัย“การศึกษาและออกแบบกับดักฟ้าผ่า”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2549-2550 อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการวิจัย “การศึกษาและพัฒนา connector สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ฝ่ายอุตสาหกรรมโครงการ IRPUS
- 2548 นักวิจัยระยะสั้น โครงการวิจัย “Combine Electrical Power Source” Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Tokai University, ประเทศญี่ปุ่น
- 2542-2544 ผู้ช่วยนักวิจัยศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานตีพิมพ์ที่ผ่านมา

National Papers (in Thai)

- [1] N. Pattanadech and S. Sangkasaad, **Electrical Characteristics of Polluted Semiconducting glazed Insulator**, 23rd Electrical Engineering Conference (EECON-23), 23-24 November, 2000, Chaing Mai University.
- [2] N. Pattanadech and S. Sangkasaad, **Alternating Shed Long rod Insulator for 33 kV System Voltage**, 24th Electrical Engineering Conference (EECON-24), 23-24 November, 2001, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.
- [3] N. Pattanadech, **Leakage Current Measurement by Current Transformer**, 26th Electrical Engineering Conference (EECON-26), 6-7 November, 2003, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, pp. 489-494.
- [4] N. Pattanadech, **Humidity Effect on Electrical Breakdown of Suspension String Insulator**, 26th Electrical Engineering Conference (EECON-26), 6-7 November, 2003, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, pp. 500-504.
- [5] P. Keaddonfag, U. Samanmitr and N. Pattanadech, **Development of DC High Voltage Source with Changeable Polarities of for Laboratory**, 26th Electrical Engineering Conference (EECON-26), 6-7 November, 2003, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, pp. 402-405.
- [6] P. Yutthagowith and N. Pattanadech, **The Effect of Water Resistivity on Wet Flashover Voltage of Cable Spacer**, 27th Electrical Engineering Conference (EECON-27), 11-12 November, 2004, Khonkean University, pp 37-40.
- [7] N. Pattanadech, **Data Logger for Leakage Current Measurement of An Insulator**, 27th Electrical Engineering Conference (EECON-27), 11-12 November 2004, Khonkean University, pp. 45-48.
- [8] P. Yutthagowith and N. Pattanadech, **Design and Construction of A Impulse Voltage Generator for Triggering at Any Phase Angle of 50 Hz AC Reference Voltage**, 27th Electrical Engineering Conference (EECON-27), 11-12 November, 2004, Khonkean University, pp. 61-64.

- [9] AmornchaiKarn, SiriwatPotivejkul,NorasagePattanadech and PearawutYutthagowith, **Behavior Comparison of Corona Inception and Flashover Voltage of AC and DC Insulator**, 28th Electrical Engineering Conference (EECON-27), 20-21 October, 2005, Thammasat University, pp. 429-432.
- [10] RonnakornManosngiam, MonthonLeelajindakrairerkand NorasagePattanadech, **Analysis of Corona Phenomena in Substations using Matlab**, 28th Electrical Engineering Conference (EECON-28), 20-21 October, 2005, Thammasat University, pp. 509-512.
- [11] P.Chomlim,P.Yuttagowith,N.Pattanadech and S. Phumvuttisan, **Impulse Current Generation from Conventional Impulse Voltage Generator**, 28th Electrical Engineering Conference (EECON-28), 20-21 October, 2005, Thammasat University, pp. 457- 460.
- [12] P. Pingrit, S. Potivejkul,N.Pattanadech and Ch. Lawthongkam, **The Simulation of Impulse Voltage Generator System for Testing and Education in HV Engineering**, 28th Electrical Engineering Conference (EECON-28), 20-21 October, 2005, Thammasat University, pp. 461-464 .
- [13] P.Chomlim,P.Yuttagowith,N.Pattanadech, A. Kunakornand S. Phumvuttisan, **Impulse Current Measurement by Rogowski's Coil with Digital Integrator**, 28th Electrical Engineering Conference (EECON-28), 20-21 October 2005, Thammasat University, pp. 465-468.
- [14] P. Sakjirarat, S. Potivejkul and N. Pattanadech,**Case Study Pattern of Wave Form Failure in Transformer during Impulse Tests**,29th Electrical Engineering Conference (EECON-29), 9-10 November, 2006, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, pp. 237-240.
- [15] A. Pinjom, T. Chuchnapipat, E. Wassanasong, N. Pattanadechand P.Yutthagowith,**Improvement of Standard Suspension Type Insulator by The Semiconducting Glaze for Pollution Condition**,29th Electrical Engineering Conference (EECON-29), 9-10 November, 2006, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, pp. 245-248.

- [16] P.Chomlim,P.Yuttagowith,N.Pattanadech, P. Preuksanubal, A. Kunakornand S. Phumvuttisan,**Improvement of The Capacitive Voltage Divider Response Time**, 29th Electrical Engineering Conference (EECON-29), 9-10 November, 2006, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, pp. 249-252.
- [17] P.Chomlim,P.Yuttagowith,N.Pattanadech, P. Preuksanubaland S. Phumvuttisan,**Steep Impulse Current and Switching Impulse Current Generation**, 29th Electrical Engineering Conference (EECON-29), 9-10 November, 2006, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, pp. 253-256.
- [18] P.Chomlim,P.Yuttagowith,N.Pattanadech, A. Limseemaratand S. Phumvuttisan,**Validation of Impulse Voltage Measuring System from Step Response**, 29th Electrical Engineering Conference (EECON-29), 9-10 November, 2006, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, pp. 257-260.
- [19] P. Sakjirarat, S. Potivejkul and N. Pattanadech,**Analysis Impulse Test of Transformer with Transfer Function Method**,29th Electrical Engineering Conference (EECON-29), 9-10 November, 2006, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, pp. 261-264.
- [20] NorasagePattanadech,**“Preventive Investigation Methods of Using Insulation in Electrical Power System (Part I)**, Electrical Engineering Magazine, March– April, 2007, pp. 78-84.
- [21] NorasagePattanadech,**“Problem Solving for Using Porcelain Insulators in Contaminated Areas (Part I)**, Electrical Engineering Magazine, March–April, 2007, pp. 85 -91.
- [22] NorasagePattanadech, **“Preventive Investigation Methods of Using Insulation in Electrical Power System (Part II)**, Electrical Engineering Magazine, May–June, 2007, pp. 36-43.
- [23] NorasagePattanadech, **“Problem Solving for Using Porcelain Insulators in Contaminated Areas (Part II)**,Electrical Engineering Magazine, May–June, 2007, pp. 44-48.

- [24] K. Klongchongsan, A. Kunakorn, P. Yutthagowith and N. Pattanadech, **Construction of A Circuit for Superimposed Impulse Voltage on AC Voltage 50Hz Control with Microcontroller**, 30th Electrical Engineering Conference (EECON-30), 25-26 October, 2007, King Mongkut's University of Technology Thonburi, pp. 189-192.
- [25] Phoochit Boontho, Norasage Pattanadech, Pearawut Yutthagowith and Monthol Leelajindakraierk, **The Study of Composite Voltage Generating Simulation Using PSpice Program Compared with Matlab and Electronics Workbench**, 9th National Grad Research Conference, 14 – 15 March, 2008, Burapha University.
- [26] Buarian Chalee, Norasage Pattanadech and Monthol Leelajindakraierk, **EMTP Model for Analysis of Neutral Grounding Resister Failures**, 9th National Grad Research Conference, 14 – 15 March, 2008, Burapha University.
- [27] B. Chalee, N. Pattanadech and M. Leelajindakraierk, **Analysis of Neutral Grounding Resister Failures in PEA Substation**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 41-44.
- [28] P. Bunto, N. Pattanadech, P. Yutthagowith and M. Leelajindakraierk, **The Study of Electrical Insulation Property after Receive Composite Voltage**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 161-164.
- [29] P. Chomlim, N. Pattanadech, P. Yutthagowith, and A. Kunakorn, **Design of a High Voltage Measuring System with High Resolution Digitizers**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 207-210.
- [30] S. Phuphasuk, N. Pattanadech and M. Leelajindakraierk, **Electrical Characteristic Comparison of Porcelain Insulators and Polymer Insulators Polluted Condition for Distribution System 33kV of PEA**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 211-214.
- [31] N. Pattanadech, P. Nimsanong, T. Penthong and P. Yutthagowith, **Design and Construction of Coupling Capacitor and Coupling Device for Partial Discharge Measurement**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 227-230.

- [32] N. Pattanadech and T. Worthong, **Partial Discharge On Line Monitoring of Synchronous Generator of 15.75 kV 211.75 MVA**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31),29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 243-246.
- [33] N. Pattandech, **The Study of Partial Discharge Simulation of a Stator of a Rotating Machine**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31),29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 247-250.
- [34] S. Chevataveesub,N. Pattanadech and P. Janjareunsuk,**Electrical Characteristic of Various Design of Air Terminals**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31),29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 251-254.
- [35] N. Pattandech and P.Nimsanong, **The Electrical Characteristics of Contaminated Transformer Oil under Direct Current Voltage**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31),29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 291-294.
- [36] P. Nimsanong, N. Pattanadech and S. Khamfoi, **Classification of Partial Discharge of High Voltage Equipment by Using Probabilistic Neural Networks**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31),29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 295-298.
- [37] P.Tuengsook, N. Pattanadech, S. Khamfoi and K. Tongkamkawe,**Frequency Response Analysis for Transformer Diagnosis**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31),29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 311-314.
- [38] A.Nimtien, N. Pattanadech, P. Prisuvanna and K.Tongkamkawe, **The Measurement Technique of Moisture Content in Oil-Paper Insulations of A Transformer**,31st Electrical Engineering Conference (EECON-31),29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 315-318.

- [39] N. Pattanadech, K. Keawdam, K. Visitsil, P. Thongkeaw, P. Suwanmajo, P. Sa-ngaun, P. Deangrak, S. Klanreungsang and S. Aun-ar-char, **The feasibility Study of Design and Construction of Data Transfer System of AC Voltage Divider via Wireless System**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 319-322.
- [40] C. Ruttanapun, S. Siridejachai, S. Vannarat, T. Penthong, N. Aim-ood, S. Gakavand and N. Pattanadech, **Simulation of Electric Field in Stator Bar by Using Finite Element Method**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 323-326.
- [41] S. Ludpa, N. Pattanadech and M. Leelajindakraierk, **The Comparison of Pattern Classification of Partial Discharge in High Voltage Equipment by Regression Analysis and Principal Component Regression Analysis**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 403-406.
- [42] S. Somboon, S. Potivejkul and N. Pattanadech, **Operation Characteristics of Zinc Oxide Arrester with Arcing Horn**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 157-160.
- [43] N. Pattanadech, **The Feasibility Study of Using Long Flashover Arrester in Distribution System**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 399-402.
- [44] N. Boonsaner, N. Pattanadech, P. Yuttagowith and A. Kunakorn, **The effect of Floating Object on Electrical Discharge of Pressurized air, N₂ and SF₆**, 31st Electrical Engineering Conference (EECON-31), 29-31 October, 2008, Srinakharinwirot University and Sripatum University, pp. 419-422.
- [45] P. Thongkeaw, A. Kunakorn and N. Pattanadech, **Electrical and Dielectric Characteristics of Used Vegetable Oil**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32), 28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 111-114.

- [46] S. Aun-ar-char, A.Kunakorn and N. Pattanadech, **Experimental Studies of Breakdown Characteristics of Rod- Rod Gaps with Negative Lightning impulses superimposed on AC Supply Voltage**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 115-118.
- [47] N. Pattanadech, N. Tanbun, K. Senanuch, N. Suraporn, P. Wongsaroj and P.Yuttagowith, **Case Study for Solving The Overshoot Problem of Impulse Voltage in the High Voltage Equipment Industrial**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 127-130.
- [48] P. Viriyakitikul,A.Kunakorn and N. Pattanadech, **A Simulator for Partial Discharge Pulses in Power Transformer**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 143-146.
- [49] N. Pattanadech, Ch. Soseepar, Ch. Changtong, N. Wongkamkao, P. Thongkeaw, P. Dangruk and S. Samol, **The Study of Voltage Distribution on Porcelain Insulator Surface of High Voltage Equipment**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 167-170.
- [50] N. Pattanadech,N. Suraporn,N. Tanbun,K. Senanuch,P. Wongsaroj and P.Yuttagowith, **A 6-kV, 3kVA Combination Wave Generator**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 187-190.
- [51] P. Nimsanong, N. Pattanadech and S. Khamfoi, **The Comparison of Neural Network Models for Partial Discharge Classification**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 215-218.
- [52] N. Pattanadech,P.Tuengsook and S. Chevataveesub, **The Study and Analysis of Electrical Characteristic of Air Terminal Part 1**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 323-326.
- [53] N. Pattanadech,P.Tuengsook and S. Chevataveesub, **The Study and Analysis of Electrical Characteristic of Air Terminal Part 2**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp 327-330.

- [54] A.Nimtien, N. Pattanadech and K.Tongkamkawe, **The Measurement Technique Response in Oil-Paper Insulations of A Transformer by Analyzing Polarization and Depolarization Current**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 363-366.
- [55] A.Nimtien, N. Pattanadech and K.Tongkamkawe, **The Study of Oil Impregnated Paper Characteristics Influenced by Moisture Content and Oil's Acidity under AC Voltage**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 367-370.
- [56] N. Pattanadech, A.Nimtien and P. Nimsanong, **The Study of Design of Underground Cable up to 24 kV Deal with Mechanical Strength Determination of Installed Cables**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 375-378.
- [57] P.Tuengsook, N. Pattanadech and K.Tongkamkawe, **Sweep Frequency Response Analysis: Background and Application Example of A Transformer Diagnosis**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 387-390.
- [58] N. Pattanadech, P. Nimsanong and A.Nimtien, **The Study of Underground Cable Defect rate 12/20(24) kV**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 395-398.
- [59] N. Pattanadech, P. Nimsanong,P.Tuengsook and N. Suraporn, **The Study of Unit Step Response of An Impulse Voltage Divider Using ATดิสชาร์จบางส่วนraw**, 32nd Electrical Engineering Conference (EECON-32),28-30 October, 2009, Mahidol University, pp. 411-414.
- [60] K. Wangsaad, P. Prisuvanna and N. Pattanadech, **Study of Behavior Electrical Tree in Insulation**, 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33),28-30 October, 2009, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chiang Mai University and Mahanakorn University of Technology, pp. 269-272.

- [61] S. Potivejkul, N. Pattanadech, P. Thongkeaw and P. Keaddonfag, **A Prototype of Mini Rice Seed Stimulation using Electric Field**, 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33), 28-30 October, 2009, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chiang Mai University and Mahanakorn University of Technology, pp. 269-272.
- [62] P. Thongkeaw, A. Kunakorn, N. Pattanadech and Ch. Chompu-in-wai, **Effects of Partial Discharges on AC Breakdown Voltage Characteristics of Vegetable and Transformer Insulating Oils**, 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33), 28-30 October, 2009, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chiang Mai University and Mahanakorn University of Technology, pp. 293-296.
- [63] P. Tuengsook, N. Pattanadech and P. Thongkeaw, **Electric Field Controlling Technique under Alternating Current Voltage**, 33rd Electrical Engineering Conference (EECON-33), 28-30 October, 2009, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chiang Mai University and Mahanakorn University of Technology, pp. 473-476.

International Papers

- [1] S. Sangkasaad, B. Staub, B. Marangsree and N. Pattanadech, **Investigation on Electrical Performance of Semiconducting Glazed Insulators under Natural Pollution in Thailand**, 2000 International Conference on Power System Technology, PowerCon 2000, The University of Western Australia, Perth, Australia, 4-7 Dec, 2000, pp. 1229-1232,
- [2] N. Pattanadech, **The Measurement Technique for Distributed Voltage of A String Insulator Using a Standard Sphere Gap**, 2004 International Conference on Power System Technology, Power Con 2004, Singapore, Nov 21-24, 2004, pp. 1043-1048.
- [3] N. Pattanadech and P. Yutthagowit, **Punctured Insulator Examination of A String Insulator**, 2005 IEEE St. Petersburg Power Tech, Russia, June 27-30, 2005.
- [4] A. Karn, S. Potivejkul, N. Pattanadech and P. Yutthagowith, **Behavior Comparison of Corona Inception and Flashover Voltage between HVAC and HVDC Insulator**, IPEC 2005 Singapore, 29 Nov–2 Dec, 2005.
- [5] P. Yutthagowit, N. Pattanadech, A. Kunakorn and S. Phoomvuthisarn, **Accuracy Verification of Impulse Voltage Measuring Systems by Convolution Methods**, IPEC 2005 Singapore, 29 Nov–2 Dec, 2005.

- [6] S. Inthala, P. Yutthagowit, A. Ngaopitakkul, A. Kunakorn, N. Pattanadech and M. Kando, **Computer-aided Analysis Tools for Step Response Parameters of High Voltage Dividers**, ECTI-CON 2005, The 2005 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology(ECTI) International Conference, 12-13 May, 2005 Pattaya, Cholburi, Thailand, pp. 153-156.
- [7] N. Pattanadech and P. Yutthagowit, **Problems, Investigation Methods, and Solution of Using String Suspension Insulators**, Proc.of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power System, High Voltages, Electric Machine. Tenerife, Spain, December 16-18, 2005,pp 194-198.
- [8] P. Yutthagowit, S. Phoomvuthisarn and N. Pattanadech, **Computer Aided- Program for Validation of HV Impulse Measuring Systems from Unit Step Response**,Proc.of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power System, High Voltages, Electric Machine. Tenerife, Spain, December 16-18, 2005, pp 619-624.
- [9] Jaiwong Prayat, Saenggumyoun Sambhop, Pattanadech Norasage and Yutthagowith Pearawut, **HVDC Test for Live- Line Washing on EGAT's HVDC Transmission Line**, CMD 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Changwon, Korea, April 2-5, 2006.
- [10] Jaiwong Prayat, Saenggumyoun Sambhop, Pattanadech Norasage, and Yutthagowith Pearawut, **The Behavior of Corona Phenomena on AC and DC Polluted Insulator**, CMD 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Changwon, Korea, April 2-5, 2006.
- [11] Amornchai. Karn, Siriwat. Potivejkul, Norasage Pattanadech and Pearawut Yutthagowith, **Corona Phenomena of AC Semi-Conducting Glazed Insulators under DC Test Condition**, CMD 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Changwon, Korea, April 2-5, 2006.
- [12] Ronnakorn Manosngiam, Monthon Leelajindakrairerkand Norasage Pattanadech, **Identification of Corona Phenomena in Substations Detected by Ultraprobe Using Computer Programming**, CMD 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Changwon, Korea, April 2-5, 2006.

- [13] Yutthagowith Pearawut, Phoomvuthisarn Sukumvit and Pattanadech Norasage, **Design and Construction of A resistive Impulse Voltage Divider for Steep-Front Impulse Voltage Measurement**, CMD 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Changwon, Korea, April 2-5, 2006.
- [14] Chatpattananan Vuttichai, Pattanadech Norasage and Yutthagowith Pearawut, **Nonlinear Regression for Sphere Gap Voltage with Gap Diameter and Gap Spacing**, CMD 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Changwon, Korea, April 2-5, 2006.
- [15] Chatpattananan Vuttichai, Pattanadech Norasage and Yutthagowith Pearawut, **AIC Model Selection Criteria for Hidden Layers in Neural Networks to Predict Breakdown Voltage**, CMD 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Changwon, Korea, April 2-5, 2006.
- [16] Chatpattananan Vuttichai, Pattanadech Norasage and Yutthagowith Pearawut, **A Prediction of The Breakdown Voltage with Radial Basis Function Networks**, CMD 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Changwon, Korea, April 2-5, 2006.
- [17] Chatpattananan Vuttichai, Pattanadech Norasage and Yutthagowith Pearawut, **A Prediction of The Breakdown Voltage with Principal Component Analysis**, CMD 2006 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Changwon, Korea, April 2-5, 2006.
- [18] V. Chatpattananan, N. Pattanadech and K. Vicetjindavat, **PCA – LDA for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment**, ICPADM 2006 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Vol. 2, 26-30 June, 2006, Grand Bali Beach Hotel Denpasar, Bali, Indonesia, pp. 479-481.
- [19] V. Chatpattananan, N. Pattanadech and P. Yutthagowith, **Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment with K-Means**, ICPADM 2006 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Vol. 2, 26-30 June, 2006, Grand Bali Beach Hotel Denpasar, Bali, Indonesia, pp. 191-194.

- [20] V. Chatpattananan, N. Pattanadech and K. Vicetjindavat, **Quest Tree Model for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment**, ICPADM 2006 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Vol. 2, 26-30 June, 2006, Grand Bali Beach Hotel Denpasar, Bali, Indonesia, pp. 476-478.
- [21] N. Pattanadech, V. Chatpattananan, P. Yutthagowith and S. Phoomvuthisan, **Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment by Hierarchical Cluster Analysis**, ACED 2006, 13th Asian Conference on Electrical Discharge, October 16-19, 2006, Sapporo, Japan, P-1-37.
- [22] V. Chatpattananan and N. Pattanadech, **Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment by CHAID Classification tree**, ACED 2006, 13th Asian Conference on Electrical Discharge, October 16-19, 2006, Sapporo, Japan, P-1-38.
- [23] V. Chatpattananan and N. Pattanadech, **Fuzzy C- Means Clustering for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment**, ACED 2006, 13th Asian Conference on Electrical Discharge, October 16-19, 2006, Sapporo, Japan, P-1-39.
- [24] N. Pattanadech, V. Chatpattananan and P. Yutthagowith, **Classification and regression tree for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment**, ACED 2006, 13th Asian Conference on Electrical Discharge, October 16-19, 2006, Sapporo, Japan, P-1-41.
- [25] Norasage Pattanadech, Siritwat Potivetkul and Pearawut Yutthagowith, **Corona Phenomena of Various High Voltage Shielding Types**, 2006 International Conference on Power System Technology, PowerCon 2006, 22-26 October, 2006, Chongqing, China, AP2-01.
- [26] P. Yutthagowith, N. Pattanadech, V. Chatpattananan and S. Phoomvuthisan, **The Effect of Convexity of Lightning Impulse Voltage Waveforms on Accuracy of HV Measuring System**, 2006 International Conference on Power System Technology, PowerCon 2006, 22-26 October, 2006, Chongqing, China, AP2-01.
- [27] Apisit Chaisaengsukkul, Norasage Pattanadech and Siritwat Potivetkul, **The Hydrophobic of Polymeric Insulator under Dust Pollution and A Comparison with Artificial**, ECTI-CON 2007, 2007 Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) International Conference, Mae FahLuang University, Chiang Rai, Thailand, May 9-12, 2007, pp 349-352.

- [28] Apisit Chaisaengsukkul, Siriwat Potivetkul and Norasage Pattanadech, **A Comparison of Corona Inception Phenomena between Porcelain and Polymeric Insulators under Dust Pollution in Thailand**, ECTI-CON 2007, 2007 Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) International Conference, Mae FahLuang University, Chiang Rai, Thailand, May 9-12, 2007, pp 353-356.
- [29] Chaisaengsukkul Apisit, Potivetkul Siriwat and Pattanadech Norasage, **Corona Inception Phenomena of Porcelain Insulators and A Comparison with Polymeric Insulators under Salt Fog Pollution in Thailand**, The International Conference on Electrical Engineering, Intelligent Clean Efficient Electricity for the 21st Century with Focus on Sustainability and Reliability, 8-12 July 2007, Hotel Nikko, Hong Kong, ICEE-332.
- [30] Chaisaengsukkul Apisit, Pattanadech Norasage and Potivetkul Siriwat, **The Study of Ageing of Polymeric Insulator under Industrial Dust Pollution in Thailand and A Comparison with Artificial Pollution**, The International Conference on Electrical Engineering, Intelligent Clean Efficient Electricity for the 21st Century with Focus on Sustainability and Reliability, 8-12 July 2007, Hotel Nikko, Hong Kong, ICEE-465.
- [31] P. Petchphung, M. Leelajindakraierk, N. Pattanadech, P. Yutthagowith and K. Aunchaleevarapan, **The Study of Disc Monopole Antenna for Partial Discharge Measurement**, The 8th International Power Engineering Conference IPEC 2007, Singapore, 3–6 Dec, 2007, pp 1292-1296..
- [32] U. Samanmit, S. Chusanapiputt, S. Phoomvuthisarn, A. Vassanasong, A. Pinjom, N. Pattanadech, P. Yutthagowith and N. Bunsaner, **Improvement of Standard Suspension Type Insulator by The Semiconducting Glaze for Pollution Condition**, The 8th International Power Engineering Conference IPEC 2007, Singapore, 3–6 Dec, 2007, pp 1297-1300.
- [33] P. Yutthagowith, N. Pattanadech, A. Kunakorn and M. Leelajindakraierk, **Design and Construction of A Rogowsk's Coil with Compensated RC Integrators for Measuring Impulse Current**, The 8th International Power Engineering Conference IPEC 2007, Singapore, 3–6 Dec, 2007, pp. 189-192.

- [34] S.Ludpa,N. Pattanadech, M. Leelajindakraierk and P. Yutthagowith, **The Pattern Classification of Partial Discharge in High Voltage Equipment by Regression Analysis**, ECTI-CON 2008, Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications, and Information Technology (ECTI) International Conference,Krabi, Thailand, May 14-17, 2008, pp. 921-924.
- [35] N. Pattanadech and P. Nimsanong, **PCA-ANN for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment**, 6International Workshop on High Voltage Engineering (IWHV 2008), Doshisha University, Kyoto, Japan, October 24 -25, 2008, HV-08-37.
- [36] N. Pattanadech and P.Yutthagowith, **The Effect of Disturbance Signal on Conventional Partial Discharge Measurement**, 6International Workshop on High Voltage Engineering (IWHV 2008), Doshisha University, Kyoto, Japan, October 24 -25, 2008, HV-08-38.
- [37] N.Pattanadech,P. Petchphung,P.Yutthagowith,M.Leelajindakraierk, and N. Boonsaner, **The Study of Partial Discharge Measurement According to Conventional Method Compared with VHF Antenna Measurement Technique**, 6International Workshop on High Voltage Engineering (IWHV 2008), Doshisha University, Kyoto, Japan, October 24 - 25, 2008, HV-08-40.
- [38] P.Chomlim, N. Pattanadech,P.Yutttagowith and A.Kunakorn, **Application of High Resolution Digitizer in High Voltage Measuring Systems**, 6International Workshop on High Voltage Engineering (IWHV 2008) Doshisha University, Kyoto, Japan, October 24 -25, 2008,HV-08-41.
- [39] N. Pattanadech and P. Nimsanong, **Partial Discharge Classification by Using Multilayer Perceptron Neural Network**, IEEJ-EIT Symposium on Advance Technology in Power System, Rama Garden Hotel, Bangkok, Thailand, 4-5 November, 2008.
- [40] N. Pattanadech and P. Nimsanong, **Partial Discharge Classification Using Neural Networkfor A Conventional and UHF Measurement Technique**, IEEJ-EIT Symposium on Advance Technology in Power System, Rama Garden Hotel, Bangkok, Thailand, 26-27 November, 2009.

- [41] N. Pattanadech et al, “**Partial Discharge Characteristics in Oil of Different Electrode Systems**”, ISH 2011, 17th International Symposium on High Voltage Engineering, August 22-26, 2011, Hannover, Germany.
- [42] N. Pattanadech et al, “**The Study of Partial Discharge Characteristics of Mineral Oil Using Needle-Plane Electrode Configuration**”, ICHVE 2012: The 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Sept. 17-20, 2012, China.
- [43] N. Pattanadech et al, “**The Study of Partial Discharge Characteristics of Mineral Oil Using Needle-Plane Electrode Configuration Base on Partial Discharge Pulse Current Measurement**”, ICHVE 2012: The 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application, Sept. 17 - 20, 2012, China.
- [44] N. Pattanadech et al, “**SEM and EDX Analysis of The Needle-Plane and The Rod-Plane Electrodes for The Partial Discharge Inception Voltage Measurement and The Arcing Test of The Mineral Oil**”, CMD 2012: 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring, Sept. 23-27, 2012, Bali, Indonesia, pp. 353-356.
- [45] N. Pattanadech et al, “**The Influence of The Test Methods on The Partial Discharge Inception Voltage Value of The Mineral Oil Using The Needle-Plane Electrode Configuration**”, CMD 2012: 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring, Sept. 23-27, 2012, Bali, Indonesia, pp. 597-600.
- [46] N. Pattanadech et al, “**The Study of The Arcing Phenomena of The Mineral Oil Using The Rod-Plane Electrode Configuration**”, CMD 2012: 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring, Sept. 23-27, 2012, Bali, Indonesia, pp. 1059-1062.
- [47] N. Pattanadech et al, “**The Partial Discharge Characteristics of Mineral Oil Using Needle-Plane and Needle-Sphere Electrode Configuration Base on Pulse Current Measurement**”, CEIDP 2012: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2012), Oct. 14-17, 2012, Montreal, Quebec, Canada, pp. 64-67.
- [48] N. Pattanadech et al, “**Effect of Mineral Oil Condition on Partial Discharge Inception Voltage Characteristics**”, ISH 2013, 18th International Symposium on High Voltage Engineering, August 25-30, 2013, Seoul, Korea.

- [49] N. Pattanadech et al, “**Partial Discharge Inception Voltage Characteristics of Mineral Oil of Different Electrode Arrangement**”, ISH 2013, 18th International Symposium on High Voltage Engineering, August 25-30,2013, Seoul,Korea.
- [50] N. Pattanadech et al, “**The Possibility of Using A Needle-Plane Electrode for Partial Discharge Inception Voltage Measurement**”, CEIDP 2013: Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP 2013), Oct. 20-23, 2013, Shenzhen, China.
- [51] N.Pattanadech and P. Nimsanong,**Partial Discharge Classification Using Principal Component Analysis Combine with Self-Organizing Map**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.
- [52] N.Pattanadech and P. Nimsanong,**Partial Discharge Classification Using Learning Vector Quantization Network Model**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.
- [53] N.Pattanadech and P. Nimsanong,**Effect of Training Methods on The Accuracy of PCA-KNN Partial Discharge Classification Model**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.
- [54] N.Pattanadech and P. Nimsanong,**Effect of Noise Signals on Partial Discharge Classification Models**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.
- [55] Peerawut Yutthagowithand Norasage Pattanadech,**Fast and Accurate Curve Fitting Method for Base Curve Extraction in Lighting Impulse Test Techniques**, 17th Asian Conference on Electrical Discharge(ACED2014), Bangkok, Thailand, 8-9 December, 2014, pp. 45-48.
- [56] N.Pattanadech and P. Nimsanong,**Partial Discharge Classification Using LVQ Model Compared with PNN Model**, 17th Asian Conference on Electrical Discharge(ACED2014), Bangkok, Thailand, 8-9 December, 2014, pp. 94-97.
- [57] P. Thonginta, N. Pattanadech, P. Yuthagowit and T. Worthong,“**Rotating Machine Insulation Analysis by means of Polarization and Depolarization current**”, ISLH 2015, 1st International Symposium on Lightning Protection High Voltage Engineering, June 12-13,2015, Bangkok,Thailand, pp 35-38.

- [58] K. Jariyanurat, G. Harnmetta, S. Noimor, P. Yuthagowit, and N. Pattanadech, “**The Study of Electrical Characteristics of Pressboard Impregnated with Mineral Oil and Ester**”, ISLH 2015, 1st International Symposium on Lightning Protection High Voltage Engineering, June 12-13,2015, Bangkok,Thailand, pp 75-78.
- [59] N. Pattanadech and P. Nimsanong,“**Self-Organizing Map Performance for Partial Discharge Classification**”, ISLH 2015, 1st International Symposium on Lightning Protection High Voltage Engineering, June 12-13,2015, Bangkok,Thailand, pp 85-89.
- [60] S. Noimor, N. Pattanadech, and P. Yuthagowit,“**Lightning Impulse Voltage Generation Circuit for Low Inductive Loads**”, ISLH 2015, 1st International Symposium on Lightning Protection High Voltage Engineering, June 12-13,2015, Bangkok,Thailand, pp 91-94 .
- [61] S. Krirapee, S. Potivejkul ,and N. Pattanadech “**Surface Tracking Resistance Investigation for Space Aerial Cable**”, ISLH 2015, 1st International Symposium on Lightning Protection High Voltage Engineering, June 12-13,2015, Bangkok,Thailand, pp 95-97.
- [62] N. Pattanadech and P. Yutthagowith, “ **Induce Electric Field and Magnetic Field inside A Car Struck by Lightning Impulse**”, APL 2015, 9th Asia-Pacific International Conference on Lightning, June 23-27,2015, Nagoya, Aichi, Japan.
- [63] P. Yutthagowith, N. Pattanadech and S. Pothivejkul, “ **Fast Technique for Parasitic Impedance Extraction in An Impuls Voltage Generator Circuit**”, APL 2015, 9th Asia-Pacific International Conference on Lightning, June 23-27,2015, Nagoya, Aichi, Japan.

National journals

- [1] P. Sakjirarat, S. Potivejkuland N. Pathanadech, **Case Study of the ImpulseTest Results with Transformer Failure**, Ladkrabang Engineering Journal, Volume 23 Number 4, December 2006, pp. 1 – 6, ISSN 0125-1724.

International journals

- [1] N. Pattanadech and P. Yutthagowit, **Problems, Investigation Methods, and Solution of Using String Suspension Insulators in Transmission System**, WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEM, Issue 2, Volume 1, February 2006 issn 1790-5079, pp. 430-437.

- [2] P. Yutthagowith, S. Phoomvuthisarn and N. Pattanadech, **Computer Aided- Program for Validation of HV Impulse Measuring Systems from Unit Step Response in Time Domain and Frequency Domain**, WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEM, Issue 2, Volume 1, February 2006 issn 1790-5079, pp 438-445.
- [3] F. Pratomosiwi, N. Pattanadech, B. Wieser, G. Pukel, M. Stössl, M. Muhr **“Considerations for Dielectric Properties Measurement Of Oil Immersed Pressboard”**, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Volume 4, Number 3, October, 2012, pp. 508-522.
- [4] N. Pattanadech, F. Protomosiwi, Martin A. Baur. Michael Muhr **“SEM and EDX analysis of the electrode system for the partial discharge inception voltage measurement and arcing test of the mineral oil”**, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Volume 4, Number 4, December, 2012, pp. 633-645.
- [5] Ferdinand Sipahutar, Suwarno, Ahmad Azhari Kemma, Norasage Pattanadech, Fari Protomosiwi. Michael Muhr, **“The Implementation of Needle-Plane Electrode Configuration and Test Methods for Partial Discharge Inception Voltage Characteristic Measurement of Mineral Oil”**, International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Volume 5, Number 2, June, 2013, pp. 205-216.
- [6] T.F. Sipahutar, A. A. Kemma, N. Pattanadech, F. Protomosiwi, Suwarno, M. Muhr, **“Effect of Test Method and Needle Plane Configuration on Partial Discharge Inception Voltage Measurement of Mineral oil Based on Weibull Analysis”**, The 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics(ICEEI 2013), Procedia Technology 11(2013) 411-418, Available online at www.sciencedirect.com.
- [7] A. A. Kemma, T.F. Sipahutar, N. Pattanadech, F. Protomosiwi, Suwarno, M. Muhr, **“Ramp Rates Effect in Ramp Method for Partial Discharge Inception Voltage Measurement in Mineral Oil”**, The 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics(ICEEI 2013), Procedia Technology 11(2013) 608-613, Available online at www.sciencedirect.com

ประวัติส่วนตัว(ผู้วิจัยร่วม)

ชื่อ-สกุลนายเพทาย นิมสนอง

เพศ ชาย หญิง วันเดือนปีเกิด 22เมษายน 2526อายุ.... 32ปีสถานภาพ โสด สมรส

ตำแหน่งปัจจุบันวิศวกรไฟฟ้า 6, การไฟฟ้านครหลวง

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.บ.	สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2549
วศ.ม.	สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2554

ผลงานทางวิชาการ

- [1] N. Pattanadech and P.Nimsanong, **Partial Discharge Classification by Using Multilayer Perceptron Neural Network** , IEEJ-EIT Joint Symposium Advanced Technology in Power Systems, November 4 – 5, 2008, Bangkok, Thailand.
- [2] N. Pattanadech and P.Nimsanong ,**PCA-ANN for Partial Discharge Classification on High Voltage Equipment**, 6th International Workshop on High Voltage Engineering (IWHV 2008), October 24 – 25, 2008, Kyoto, Japan.
- [3] N.Pattanadech and P. Nimsanong, **Partial Discharge Classification Using Principal Component Analysis Combine with Self-Organizing Map**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.
- [4] N.Pattanadech and P. Nimsanong, **Partial Discharge Classification Using Learning Vector Quantization Network Model**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.
- [5] N.Pattanadech and P. Nimsanong, **Effect of Training Methods on The Accuracy of PCA-KNN Partial Discharge Classification Model**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.

- [6] N.Pattanadech and P. Nimsanong, **Effect of Noise Signals on Partial Discharge Classification Models**, IEEE TENCON-2014, Bangkok, Thailand, 22-25 October, 2014.
- [7] N. Pattanadech and P. Nimsanong, **“Self-Organizing Map Performance for Partial Discharge Classification”**, ISLH 2015, 1st International Symposium on Lightning Protection High Voltage Engineering, June 12-13,2015, Bangkok,Thailand, pp 85-89.
- [8] นรเศรษฐ พัฒนเดช , เพทาย นิมสนอง , อภิชาติ นิ่มเทียน **“การศึกษาความบกพร่องของสายเคเบิลใต้ดินพิกัด 12/20(24) kV”** การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 32 (EECON-32)
- [9] นรเศรษฐพัฒนเดช, เพทาย นิมสนอง, ภูชิต ถึงสุข, นิจธนกร สุระพร**“การศึกษาผลตอบสนองทางเวลาของโวลเตจดีไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโปรแกรม ATPDraw”**การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 32(EECON-32)
- [10] เพทาย นิมสนอง, นรเศรษฐ พัฒนเดช,สุรินทร์ คำฝอย **“การเปรียบเทียบโมเดลนิวรอลเน็ตเวิร์คในการจำแนกรูปแบบดีสชาร์จบางส่วน”**การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 32 (EECON-32)
- [11] นรเศรษฐ พัฒนเดช ,อภิชาติ นิ่มเทียน , เพทาย นิมสนอง **“การศึกษาและออกแบบสายเคเบิลใต้ดินที่ระดับแรงดันสูงสุดไม่เกิน 24 kV เพื่อแก้ปัญหาการรองรับแรงทางกลภายหลังการติดตั้ง”**การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 32 (EECON-32)
- [12] เพทาย นิมสนอง, นรเศรษฐ พัฒนเดช,สุรินทร์ คำฝอย **“การแยกประเภทสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้ Probabilistic Neural Networks”** การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 31 (EECON-31),
- [13] นรเศรษฐ พัฒนเดช ,เพทาย นิมสนอง **“การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงที่มีสิ่งเจือปนภายใต้แรงดันกระแสตรง”** การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 31 (EECON-31)
- [14] นรเศรษฐ พัฒนเดช,เพทาย นิมสนอง, ธนากร เพ็ญทอง, พีรภูมิ ยุทธโกวิท **“การออกแบบสร้างตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์รับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน”**การประชุมทางวิชาการครั้งที่ 31 (EECON-31)
- [15] จักรพันธ์ ประรณานฤดี , นันทวัฒน์ วิวรรณะพงส์ , ยุทธสิทธิ์ ฤกษ์นิรันดร , นาย สุทธิศักดิ์ วัฒนานคร , นรเศรษฐ พัฒนเดช ,เพทาย นิมสนอง **“การศึกษาการออกแบบลูกถ้วยฉนวนที่ใช้กับสภาวะเปรอะเปื้อน”** บทความโครงการงาน IPUS2 ปี 2549, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [16] วิชชา เกตุสิงห์น้อย , ศรายุทธ แก้วเนียม , ศุภธร เป็นมั่นคงอำนาจ ทองศรี , นรเศรษฐพัฒนเดช,พีรภูมิ ยุทธโกวิท, เพทาย นิมสนอง, ภูชิต ถึงสุข **“การศึกษาการวัดดีสชาร์จบางส่วนด้วยสายอากาศ UHF”** บทความโครงการงาน IPUS2 ปี 2550, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

- [17] นฤพลธ์ ดีจริง , อภิชาติ ศรีพานิชเจริญ , อาณัติ เล็กเกาะทวด , รัฐพงศ์ ธรรมเจริญ , พีรวุฒิ ยุทธโกวิท , นรเศรษฐ พัฒนเดช , ภูชิต ถึงสุข , เพทาย นิมสนอง “การออกแบบสร้างเคเบิลสเปซเซอร์สำหรับระบบไฟฟ้ากำลัง” บทความโครงการงาน IPUS2 ปี 2550, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [18] ณัฐพงษ์ ดรละคร , ธนสิทธิ์ หล่มสิริอนุสรณ์ , ธนากร เพ็ญทอง , นฤพนธ์ ดีจริง ,นรเศรษฐ พัฒนเดช , พีรวุฒิ ยุทธโกวิท , เพทาย นิมสนอง , และสาวิณี หลุดพา “การศึกษาและออกแบบตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวและอุปกรณ์รับสัญญาณเพื่อใช้ในการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน” บทความโครงการงาน IPUS2 ปี 2550, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี