

การพัฒนาระบบรู้จำแบบรูปของดีสซาร์จบางส่วน  
โดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์

นายสุภชัย บุญปก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2553

**DEVELOPMENT OF PARTIAL DISCHARGES  
PATTERN RECOGNITION SYSTEMS BY USING  
ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES**

**Suphachai Boonpoke**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the  
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2010**

## การพัฒนาระบบรู้จำแบบรูปของดีสซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันต์ อุ่นศิริวิไลย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)

กรรมการ

(อ. ดร.วุฒิ คำนกิตติกุล)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศุภชัย บุญปก : การพัฒนาระบบรู้จำแบบรูปของคิซซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิค  
ปัญญาประดิษฐ์ (DEVELOPMENT OF PARTIAL DISCHARGES PATTERN  
RECOGNITION SYSTEMS BY USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE  
TECHNIQUES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี, 183 หน้า.

ในปัจจุบันระบบการส่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยใช้หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากระดับแรงดันหนึ่งไปสู่อีกระดับแรงดันหนึ่งที่ความถี่เดียวกัน หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังถูกใช้ในการเพิ่มหรือลดระดับแรงดัน และถูกใช้เป็นส่วนประกอบหลักของโครงข่ายการส่งจ่ายกำลังที่มีประสิทธิภาพ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังนับเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพงและมีความสำคัญเป็นอย่างมากในบรรดาอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในระบบส่งจ่าย น้ำมันหม้อแปลงเป็นหนึ่งในฉนวนที่มีความสำคัญสำหรับใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง คิซซาร์จบางส่วนเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่สามารถนำไปสู่ความผิดปกติของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง ยิ่งไปกว่านี้คิซซาร์จบางส่วนสามารถทำลายระบบฉนวน และทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของระบบฉนวน ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า จึงต้องมีการดูแลรักษาหรือทำการซ่อมบำรุง การตรวจวัดคิซซาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการดูแลรักษาหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานหม้อแปลงทราบถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานและเป็นการป้องกันความเสียหายรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นได้ ด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัยวิทยานิพนธ์เรื่อง การพัฒนาระบบรู้จำแบบรูปของคิซซาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ โดยมีวัตถุประสงค์คือการประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์เพื่อรู้จำแบบรูปของคิซซาร์จบางส่วน เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ดังกล่าวประกอบด้วยเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียม โดยชุดคำสั่งถูกดำเนินการด้วยโปรแกรม MATLAB ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ สัญญาณคิซซาร์จบางส่วนซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดคิซซาร์จบางส่วนจำลอง และถูกตรวจวัดด้วยวิธีการตรวจวัดคิซซาร์จทางไฟฟ้า โดยเป็นการตรวจวัดกระแสอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากคิซซาร์จบางส่วน แหล่งกำเนิดคิซซาร์จบางส่วนจำลองประกอบด้วย โคโรนาคิซซาร์จในอากาศ โคโรนาคิซซาร์จในน้ำมันหม้อแปลง คิซซาร์จภายใน และคิซซาร์จตามผิว แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อหาค่าคุณลักษณะของคิซซาร์จบางส่วน และถูกใช้เป็นข้อมูลสำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภท ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ทั้งเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเทคนิคโครงข่ายประสาทเทียมในการรู้จำรูปแบบของคิซซาร์จบางส่วนได้เป็นอย่างดี

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2553

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

SUPHACHAI BOONPOKE : DEVELOPMENT OF PARTIAL  
DISCHARGES PATTERN RECOGNITION SYSTEMS BY USING  
ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES. THESIS ADVISOR :  
ASST. PROF. BOONRUANG MARUNGSRI, D.Eng., 183 PP.

PARTIAL DISCHARGES/PD PATTERN RECOGNITION/SIMPLIFIED FUZZY  
ARTMAP/SUPPORT VECTOR MACHINES

Presently, power transformers which transform voltage level from one voltage level to another voltage level with the same frequency are used for transmission and distribution systems in Thailand. Power transformers are used to step up or step down voltage and are used as an integral component of any efficient power transmission and distribution network. Power transformers are the most expensive and important equipment in electrical power system. Transformer oil is one of important insulations for power transformer. Partial discharge is one of main factors that can lead to failure of power transformers. Also, partial discharges can destroy insulation system and can cause ageing of insulation systems. Preventive maintenances are the best way for protection of power transformers. In addition, partial discharge detection in transformer is significant method that can know unusual things and can prevent transformer from failure. In this thesis, development of partial discharges pattern recognition systems by using artificial intelligence techniques was conducted. The objective of this work is to applying artificial intelligence techniques, simplified fuzzy ARTMAP (SFAM) and support vector machines (SVM), to recognize the pattern of partial discharges. Simplified fuzzy ARTMAP and support vector machines algorithm were developed and were operated via MATLAB. In this thesis, partial discharges

signals were generated by four types of artificial partial discharge source and were detected by electrical signal detection method. Artificial partial discharge source are included corona discharge in air, corona discharge in transformer oil, internal discharge, and surface discharge. PD measurement signals were characterized by using statistical tool and were used as a data base for pattern recognition and classification. The effectiveness of simplified fuzzy ARTMAP and support vector machines for apply to partial discharges pattern recognition and classification was confirmed.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2010

Student's Signature \_\_\_\_\_

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีก็เนื่องมาจากผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ทั้งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย รวมถึงคำปรึกษา คำแนะนำซึ่งมีประโยชน์ต่องานวิจัย ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำและชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และเป็นแบบอย่างที่ดีในการศึกษาเล่าเรียน พร้อมทั้งดูแลเอาใจใส่ ให้กำลังใจ ช่วยเหลือผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และให้ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ อาจารย์ นักศึกษาและห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดีในการทดลองและเอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลองให้กับผู้วิจัย

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณครู อาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ทั้งทางด้านวิชาการและอบรมสั่งสอนแก่ผู้เขียนตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเพ็ง บุญปก และคุณแม่บุญโฮม บุญปก ผู้เป็นบิดามารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรักความอบอุ่น ความห่วงใย และอบรมเลี้ยงดู ให้กำลังใจผู้วิจัยด้วยความรักมาโดยตลอด พร้อมทั้งส่งเสริมและสนับสนุนให้ได้รับการศึกษามาเป็นอย่างดี ทั้งยังเป็นแรงใจอันยิ่งใหญ่ให้กับผู้วิจัย ใช้ในการทำงานและดำเนินชีวิต จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

ศุภชัย บุญปก

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฉ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น.....	5
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	5
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	6
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.3 สรุป.....	11
<b>3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b> .....	12
3.1 บทนำ.....	12
3.2 น้ำมันหม้อแปลงและคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง.....	12
3.3 ดิซซาร์จบางส่วน.....	16
3.3.1 ประเภทของดิซซาร์จบางส่วน.....	17



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.2	ผลของดีสซาร์จบางส่วน.....	22
3.3.3	วงจรสมมูลของดีสซาร์จบางส่วน.....	22
3.3.4	ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้.....	24
3.3.5	ธรรมชาติของการเกิดดีสซาร์จ.....	26
3.3.6	การตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน.....	27
3.3.7	วงจรพื้นฐานการวัดดีสซาร์จบางส่วนโดยวิธีการ ตรวจวัดทางไฟฟ้า.....	35
3.4	หลักการการวัดกระแสอิมพัลส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี.....	41
3.4.1	วงจรต่อต้านเอาต์พุตของขดลวดโรกอฟสกี.....	42
3.4.2	การประยุกต์ใช้งานขดลวดโรกอฟสกี.....	44
3.5	วัตถุประสงค์ของการตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน.....	46
3.6	สรุป.....	47
<b>4</b>	<b>การตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน.....</b>	<b>48</b>
4.1	บทนำ.....	48
4.2	แบบจำลองการเกิดดีสซาร์จบางส่วน.....	49
4.3	วงจรทดสอบการเกิดดีสซาร์จบางส่วน.....	52
4.3.1	การเปรียบเทียบวงจรทดสอบการตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน.....	53
4.4	การทดสอบการตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน.....	54
4.5	ผลการทดสอบการตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน.....	57
4.6	สรุป.....	62
<b>5</b>	<b>คุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนในทางสถิติ.....</b>	<b>63</b>
5.1	บทนำ.....	63
5.2	การคำนวณค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วน.....	63
5.2.1	ปริมาณพื้นฐาน.....	64
5.2.2	ปริมาณอนุมาน.....	64

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.3 ตัวดำเนินการทางสถิติ.....	67
5.2.3 ตัวอย่างการคำนวณค่าคุณลักษณะ .....	72
5.3 สรุป.....	77
<b>6 เทคนิคขบวนการ.....</b>	<b>78</b>
6.1 บทนำ.....	78
6.2 Fuzzy ARTMAP.....	78
6.3 Simplified Fuzzy ARTMAP (SFAM).....	80
6.3.1 การทำอินพุตให้เป็นมาตรฐาน.....	82
6.3.2 การกระตุ้นโนคเอาต์พุต.....	83
6.3.3 หลักการทำงานของ SFAM.....	84
6.3.4 การประยุกต์ใช้ SFAM.....	96
6.4 เครื่องเวกเตอร์เกี่ยวหนุ่น.....	97
6.4.1 การประยุกต์ใช้เครื่องเวกเตอร์เกี่ยวหนุ่น .....	118
6.5 สรุป.....	118
<b>7 การประยุกต์ใช้เทคนิคขบวนการในการรู้จำดีสซาร์จบางส่วน .....</b>	<b>119</b>
7.1 บทนำ.....	119
7.2 ค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วน.....	119
7.3 การประยุกต์ใช้เทคนิค SFAM ในการรู้จำดีสซาร์จบางส่วน.....	119
7.4 การประยุกต์ใช้เทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกี่ยวหนุ่นในการรู้จำ ดีสซาร์จบางส่วน.....	122
7.5 สรุป.....	129
<b>8 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>130</b>
8.1 สรุปงานวิจัย.....	130
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	131
รายงานอ้างอิง.....	132

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก.....	137
ภาคผนวก ก. โปรแกรมสำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภท คีสซาร์จบางส่วน.....	137
ภาคผนวก ข. ข้อมูลคุณลักษณะของคีสซาร์จบางส่วน.....	148
ภาคผนวก ค. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	168
ประวัติผู้เขียน.....	183

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 คุณสมบัติของน้ำมันที่ใช้เป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้า.....	13
3.2 ผลการทำ DGA สำหรับดิสชาร์จพลังงานต่ำและโคโรนาดิสชาร์จ ในฉนวนน้ำมัน.....	29
3.3 รหัสอัตราส่วนแก๊ส (gas ratio codes).....	30
3.4 รหัสอัตราส่วนโรเจอร์ (Roger ratio codes).....	30
3.5 ผลลัพธ์รหัสอัตราส่วนโรเจอร์สำหรับดิสชาร์จบางส่วน.....	31
3.6 ความเร็วของเสียงในน้ำมันหม้อแปลง.....	34
5.1 ตัวอย่างข้อมูลการเกิดโคโรนาดิสชาร์จในอากาศ.....	72
5.2 ตัวอย่างข้อมูลการเกิดโคโรนาดิสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง.....	74
5.3 ตัวอย่างข้อมูลการเกิดดิสชาร์จภายใน.....	75
5.4 ตัวอย่างข้อมูลการเกิดดิสชาร์จตามผิว.....	76
6.1 การรู้จำรูปภาพवादคำที่ไม่มีการรบกวน.....	97
6.2 ข้อมูลตัวอย่างสำหรับการจำแนกแบบเชิงเส้นด้วยเทคนิคเครื่อง เวกเตอร์เกือหนุน.....	104
6.3 ข้อมูลตัวอย่างที่ไม่สามารถแบ่งแยกด้วยตัวจำแนกแบบเชิงเส้น.....	111
7.1 การเรียงลำดับค่าคุณลักษณะสำหรับเทคนิค SFAM.....	120
7.2 ผลการรู้จำและการจำแนกประเภทดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค SFAM.....	122
7.3 การเรียงลำดับค่าคุณลักษณะสำหรับเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน.....	123
7.4 ผลการรู้จำและการจำแนกประเภทดิสชาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค เครื่องเวกเตอร์เกือหนุน.....	128
7.5 ตารางเปรียบเทียบเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน.....	128
ข.1 ค่าคุณลักษณะของโคโรนาดิสชาร์จในอากาศ.....	156
ข.2 ค่าคุณลักษณะของโคโรนาดิสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง.....	159

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.3 ค่าคุณลักษณะของดีสชาร์จตามผิว.....	162
ข.4 ค่าคุณลักษณะของดีสชาร์จภายใน.....	165

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเฟสและแบบสามเฟส.....	2
1.2	หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและ ส่วนประกอบของหม้อแปลง.....	3
1.3	การชำรุดของขดลวดหม้อแปลง.....	4
3.1	การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากฟองแก๊สในฉนวนเหลว.....	15
3.2	การเกิดเบรกดาวน์เนื่องจากอนุภาคของแข็งเรียงตัวต่อกันในฉนวนเหลว.....	16
3.3	การเกิดดิสชาร์จภายใน.....	18
3.4	การเกิดโคโรนาดีสชาร์จ.....	19
3.5	การเกิดดิสชาร์จตามผิว.....	20
3.6	ลักษณะการเกิดหรือিংทางไฟฟ้าของอีพอกซีเรซิน.....	21
3.7	การเปรียบเทียบลักษณะของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน.....	21
3.8	วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงแก๊สและเกิดดิสชาร์จบางส่วนภายใน.....	23
3.9	ดิสชาร์จบางส่วนในโพรงแก๊สในวัสดุฉนวน.....	25
3.10	แรงดันตกคร่อมโพรงแก๊สและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD.....	27
3.11	ผังสำหรับการวิเคราะห์วิธีสามเหลี่ยมควัด.....	32
3.12	ระบบการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการตรวจวัดทางคลื่นเสียง.....	35
3.13	วงจรพื้นฐานการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	35
3.14	วงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนแบบอุปกรณ์คาบเกี่ยวต่ออนุกรม กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว.....	37
3.15	วงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนแบบอุปกรณ์คาบเกี่ยวต่ออนุกรม กับวัสดุทดสอบ.....	37
3.16	วงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนแบบวงจรทดสอบแบบสมดุล.....	38
3.17	วงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนแบบวงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณ.....	38
3.18	วงจรสำหรับการปรับเทียบวงจรตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน.....	39
3.19	การแสดงดิสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปวงรี.....	40

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.20	การแสดงคีสซาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์.....	41
3.21	ขดลวดโรกอฟสกี.....	42
3.22	ขดลวดโรกอฟสกีต่อด้วย LR อินทิเกรเตอร์.....	42
3.23	ขดลวดโรกอฟสกีต่อด้วย RC อินทิเกรเตอร์.....	43
3.24	วงจรการทดลองการเกิดคีสซาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง.....	44
3.25	แผนผังเส้นเดียวสำหรับระบบการตรวจวัดคีสซาร์จบางส่วนด้วยขดลวด โรกอฟสกีแบบออนไลน์.....	45
3.26	สัญญาณ ณ ตำแหน่ง $P_1$ ของรูปที่ 3.23.....	45
3.27	สัญญาณ ณ ตำแหน่ง $P_2$ ของรูปที่ 3.23.....	46
4.1	การจำลองการเกิดโคโรนาคีสซาร์จ.....	49
4.2	การจำลองการเกิดคีสซาร์จตามผิว.....	49
4.3	การจำลองการเกิดคีสซาร์จภายในฉนวนแข็ง.....	50
4.4	แบบจำลองการเกิดคีสซาร์จบางส่วน.....	51
4.5	วงจรทดสอบการตรวจวัดคีสซาร์จบางส่วน.....	52
4.6	วงจรสำหรับการเปรียบเทียบวงจรตรวจวัดคีสซาร์จบางส่วน.....	54
4.7	ลักษณะการเกี่ยวไม้ตะขอกราวค์ในวงจรทดสอบไฟฟ้าแรงสูง.....	55
4.8	อุปกรณ์และเครื่องมือในวงจรทดสอบการตรวจวัดคีสซาร์จบางส่วน.....	56
4.9	ตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรทดสอบการตรวจวัดคีสซาร์จบางส่วน.....	56
4.10	การเกิดโคโรนาคีสซาร์จในอากาศแสดงบนฐานเวลารูปวงรี.....	57
4.11	การเกิดโคโรนาคีสซาร์จในอากาศแสดงบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์.....	58
4.12	การเกิดโคโรนาคีสซาร์จในน้ำมันแสดงบนฐานเวลารูปวงรี.....	58
4.13	การเกิดโคโรนาคีสซาร์จในน้ำมันแสดงบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์.....	59
4.14	การเกิดคีสซาร์จตามผิวแสดงบนฐานเวลารูปวงรี.....	59
4.15	การเกิดคีสซาร์จตามผิวแสดงบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์.....	60
4.16	การเกิดคีสซาร์จภายในแสดงบนฐานเวลารูปวงรี.....	60
4.17	การเกิดคีสซาร์จภายในแสดงบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์.....	61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1	ขนาดประจุและมุมเฟสของการเกิดดีสซาร์จบางส่วนในหนึ่งเฟสวิน โดวส์..... 65
5.2	การพิจารณาของปริมาณอนุมาณ..... 67
5.3	รูปแบบการกระจายของค่าความเบ้เอียง และความแหลมคม..... 69
5.4	ค่าคุณลักษณะของการกระจาย..... 69
5.5	แผนผังของการวิเคราะห์ข้อมูลดีสซาร์จบางส่วนเพื่อการรู้จำและ การจำแนกประเภท..... 71
5.6	แผนผังลำดับการคำนวณค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนในทางสถิติ..... 77
6.1	สถาปัตยกรรมหรือโครงสร้างของ Fuzzy ARTMAP..... 79
6.2	สถาปัตยกรรมหรือโครงสร้างของ Simplified Fuzzy ARTMAP..... 80
6.3	Simplified Fuzzy ARTMAP..... 81
6.4	ข้อมูลที่อยู่ภายในวงกลมและภายนอกวงกลม..... 84
6.5	การฝึกสอน SFAM ด้วยข้อมูล (0.7, 0.7) ประเภท IN..... 95
6.6	การฝึกสอน SFAM ด้วยข้อมูล (0.3, 0.8) ประเภท IN..... 86
6.7	การฝึกสอน SFAM ด้วยข้อมูล (0.9, 0.9) ประเภท OUT..... 87
6.8	การฝึกสอน SFAM ด้วยข้อมูล (0.7, 0.9) ประเภท OUT..... 89
6.9	การฝึกสอน SFAM ด้วยข้อมูล (0.2, 0.3) ประเภท IN..... 90
6.10	การฝึกสอน SFAM ด้วยข้อมูล (0.1, 0.9) ประเภท OUT..... 92
6.11	แผนผังการฝึกสอนของ SFAM..... 93
6.12	การอนุมานประเภทของข้อมูล (0.2, 0.5) ด้วย SFAM..... 95
6.13	การอนุมานประเภทของข้อมูล (0.9, 0.75) ด้วย SFAM..... 96
6.14	รูปภาพเครื่องบินสำหรับการฝึกสอนด้วย SFAM..... 99
6.15	รูปภาพรถถังสำหรับการฝึกสอนด้วย SFAM..... 100
6.16	รูปภาพเฮลิคอปเตอร์สำหรับการฝึกสอนด้วย SFAM..... 101
6.17	รูปภาพเครื่องบินที่มีการเลื่อนตำแหน่งสำหรับการจำแนกด้วย SFAM..... 105
6.18	รูปภาพเฮลิคอปเตอร์ที่มีการหมุน การเพิ่มขนาด การเลื่อนตำแหน่ง สำหรับการจำแนกด้วย SFAM..... 106



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
6.19	รูปภาพพลาตังที่มีการเพิ่มขนาด การเลื่อนตำแหน่ง สำหรับการจำแนกด้วย SFAM.....	107
6.20	การจำแนกข้อมูล 2 คลาส.....	108
6.21	ระนาบเกิน $\langle w, x \rangle + b = 0$ .....	109
6.22	เครื่องเวกเตอร์เกือหนุน.....	110
6.23	ระนาบเกินคั่นเหมาะสมที่สุดของตัวจำแนกเชิงเส้น.....	113
6.24	ข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนที่ไม่สามารถแบ่งแยกได้แบบเชิงเส้น.....	114
6.25	การส่งปริภูมิอินพุตไปยังปริภูมิลักษณะที่มีมิติสูงกว่า.....	115
6.26	การส่งข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนจากปริภูมิสองมิติไปยังปริภูมิสามมิติ.....	116
6.27	ข้อมูลเวกเตอร์ที่ไม่สามารถแบ่งแยกด้วยตัวจำแนกแบบเชิงเส้น.....	117
7.1	ขั้นตอนการใช้อัลกอริทึมของเทคนิค SFAM ในการรู้จำดีสซาร์จบางส่วน.....	121
7.2	ขั้นตอนการใช้อัลกอริทึมของเทคนิค SFAM ในการรู้จำดีสซาร์จบางส่วน.....	122
7.3	แผนผังการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิคเครื่อง เวกเตอร์เกือหนุน.....	125
7.4	ขั้นตอนการใช้อัลกอริทึมของเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนของแต่โมเดล ในการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วน.....	126
7.5	ขั้นตอนการประยุกต์ใช้เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนเพื่อการรู้จำและการจำแนก ประเภทดีสซาร์จบางส่วน.....	127
ข.1	การเกิดโคโรนาดีสซาร์จในอากาศ.....	149
ข.2	การเกิดโคโรนาดีสซาร์จในอากาศ.....	149
ข.3	การเกิดโคโรนาดีสซาร์จในอากาศ.....	150
ข.4	การเกิดโคโรนาดีสซาร์จในอากาศ.....	150
ข.5	การเกิดโคโรนาดีสซาร์จในน้ำมันหม้อแปลง.....	151
ข.6	การเกิดโคโรนาดีสซาร์จในน้ำมันหม้อแปลง.....	151
ข.7	การเกิดดีสซาร์จตามผิว.....	152
ข.8	การเกิดดีสซาร์จตามผิว.....	152

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.9	การเกิดดีสซาร์จตามผิว.....	153
ข.10	การเกิดดีสซาร์จตามผิว.....	153
ข.11	การเกิดดีสซาร์จภายใน.....	154
ข.12	การเกิดดีสซาร์จภายใน.....	154
ข.13	การเกิดดีสซาร์จภายใน.....	155
ข.14	การเกิดดีสซาร์จภายใน.....	155

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสสลับจากระดับแรงดันหนึ่งไปสู่อีกระดับแรงดันหนึ่งที่มีความถี่เดียวกัน หรือเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้ากระแสสลับที่มีแรงดันไฟฟ้าต่างกัน โดยจะทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (step up voltage) หรือลดแรงดันไฟฟ้า (step down voltage) ให้เหมาะกับระบบการส่งจ่ายและการใช้กำลังงานไฟฟ้า ฉะนั้นหม้อแปลงไฟฟ้าจึงนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า การเกิดขัดข้องหรือเกิดการชำรุดเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้าก็มักจะมีผลกระทบต่อการใช้กำลังงานไฟฟ้า หรือมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตด้านอุตสาหกรรมอย่างมาก ฉะนั้นหม้อแปลงไฟฟ้านอกจากจะต้องถูกออกแบบและผลิตอย่างถูกต้องพร้อมทั้งมีคุณภาพแล้ว การใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างเหมาะสมและการดูแลรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าก็เป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่จะช่วยป้องกันการขัดข้องหรือการชำรุดเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้าได้ หม้อแปลงไฟฟ้าถูกแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้หลายชนิด เช่น แบ่งตามโครงสร้าง ได้แก่ ชนิดแกน (core type) และชนิดเปลือกกรอบ (shell type) หรือแบ่งตามตัวกลางที่ใช้เป็นฉนวนและตัวระบายความร้อน ได้แก่ แก๊ส SF<sub>6</sub> และน้ำมันหม้อแปลง หรือแบ่งตามกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกไปได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง (power transformer) ซึ่งจะอยู่ตามสถานีไฟฟ้าย่อย หม้อแปลงจำหน่าย (distribution transformer) หม้อแปลงสำหรับเครื่องมือวัด (instrument transformer) หม้อแปลงสำหรับความถี่สูง (high frequency transformer) ลักษณะของหม้อแปลงกำลังแสดงในรูปที่ 1.1

สำหรับระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศไทยนั้นทั้งสามการไฟฟ้าไม่ว่าจะเป็นการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและการไฟฟ้านครหลวงได้มีการนำเอาหม้อแปลงไฟฟ้าแบบฉนวนน้ำมันมาใช้ในระบบเป็นจำนวนมาก เนื่องจากหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายที่มีความสำคัญมาก ฉะนั้นการบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าจึงเป็นสิ่งสำคัญมาก และมีความจำเป็นเพื่อการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าให้คงสภาพปกติ และยังทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น ในระบบฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีส่วนประกอบหลัก คือ น้ำมันฉนวน กระดาษฉนวน ซิลิคาต ยาง ฉนวนเคลือบทองแดง โดยฉนวนเหล่านี้จะเกิดการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากการใช้งานหรือสาเหตุอื่น ตัวอย่างเช่นน้ำมันหม้อแปลงมีความชื้น น้ำ เขม่า สิ่งเจือปน

อื่น ๆ และแก๊สปะปนอยู่จะทำให้ค่าความเป็นฉนวนลดลง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้หม้อแปลงไฟฟ้าเสียหายได้ ดังนั้น จึงควรทำการตรวจสอบสภาพ และบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ เพื่อเป็นการลดปัจจัยอันจะก่อให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลงไฟฟ้า อีกทั้งยังทำให้ได้ประโยชน์และประสิทธิภาพสูงสุดจากการใช้งาน



รูปที่ 1.1 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังแบบหนึ่งเฟสและแบบสามเฟส (<http://www.made-in-china.com>)

สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าชนิดระบายความร้อนด้วยน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ทั่วไปนั้น ฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้าถือได้ว่าเป็นสิ่งสำคัญต่อการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพและความปลอดภัยของหม้อแปลงไฟฟ้า เช่น กระดาษฉนวน น้ำมันหม้อแปลง เป็นต้น หน้าที่สำคัญของน้ำมันหม้อแปลงคือทำหน้าที่เป็นฉนวนทางไฟฟ้าและระบายความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงไฟฟ้า สาเหตุส่วนใหญ่ที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดการชำรุดเสียหายคือน้ำมันหม้อแปลงเกิดการเสื่อมสภาพ ซึ่งการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลง เกิดจากการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้า สิ่งเจือปนและการเกิดสิ่งผิดปกติ ที่มีผลต่อคุณสมบัติความเป็นฉนวนของน้ำมันหม้อแปลง ตัวอย่างเช่นการเกิดดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง เป็นต้น การดูแลรักษาในเชิงป้องกันปัญหาน้ำมันหม้อแปลงเสื่อมสภาพ ทำได้โดยการตรวจสอบวิเคราะห์น้ำมันทั้งในทางไฟฟ้า ฟิสิกส์

และเคมี ซึ่งจะทำให้ทราบความผิดปกติที่เกิดขึ้นภายในว่าเกิดจากสิ่งใด และมีสาเหตุจากอะไร ทำให้สามารถหาทางป้องกันแก้ไขได้ทันที่



รูปที่ 1.2 หม้อแปลงไฟฟ้ากำลังและ ส่วนประกอบของหม้อแปลง

(<http://www.mechanical-writings.com/>

[tags/transformers/1/3/](http://www.mechanical-writings.com/tags/transformers/1/3/))

ดิสชาร์จบางส่วนเป็นหนึ่งในปัจจัยหลัก ที่สามารถส่งผลให้เกิดการทำลายฉนวนที่ใช้ในหม้อแปลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันหม้อแปลง เมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง ก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติความเป็นฉนวน เกิดความร้อน เกิดปฏิกิริยาทางเคมี เกิดฟองอากาศ ดังนั้นเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนบ่อยครั้งในน้ำมันหม้อแปลง หรือเกิดเป็นเวลานาน ก็จะเกิดเป็นกำลังสูญเสียจากการไอออไนเซชัน (ionization loss) ในลักษณะของดิสชาร์จบางส่วนซึ่งกำลังสูญเสียนี้อาจแปรสภาพเป็นความร้อนภายในฉนวน ถ้าความร้อนที่เกิดขึ้นระบายออกไปได้ยาก และเมื่อกำลังสูญเสียเพิ่มขึ้น ความร้อนก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ถ้าอัตราการระบายความร้อนออกยังสูงกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อน ฉนวนก็จะยังคงอยู่ในสภาพสมดุลไม่เกิดความเสียหาย แต่ถ้าอัตราการระบายความร้อนออกยังต่ำกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความร้อน นั่นคือการระบายความร้อนที่เกิดขึ้นออกไม่ทัน ก็จะทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนได้ ฉะนั้นการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดความเสียหายได้

หม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกใช้งานตลอด 24 ชั่วโมงทุกวัน เป็นเดือน เป็นปี ไม่มีการหยุด นั่นคือหม้อแปลงมีการจ่ายโหลดตลอดเวลา เมื่อใช้งานเป็นเวลานานประกอบกับสภาพบริเวณที่ติดตั้ง ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 1.3 และลักษณะการจ่ายโหลด อาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายแก่หม้อแปลง ตัวอย่างเช่น ตัวถังหม้อแปลงรั่วซึม เกิดสนิมหรือการกัดกร่อนของตัวถัง น้ำมันหม้อแปลงเสื่อมสภาพ ขดลวดเกิดชำรุดเสียหาย ฯลฯ อันจะนำไปสู่ความเสียหายที่รุนแรงและการซ่อมแซมที่ราคาแพง



เกิดการชำรุดของขดลวด

รูปที่ 1.3 การชำรุดของขดลวดหม้อแปลง (<http://www.transformerthailand.com/repair/repair.html>)

ความผิดพลาดของหม้อแปลงกำลังสามารถแบ่งได้ 3 ประการคือ

- ประการแรก* คือความผิดพลาดอุปกรณ์ประกอบ (auxiliary equipment) ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหม้อแปลง เช่น ฟิวส์ (fuse) ถ่อฟ้า (lightning arrester) และอาร์คชิ่งฮอร์น (arcing horn) เป็นต้น
- ประการที่สอง* คือความผิดพลาดในขดลวดหม้อแปลงและการเชื่อมต่อ
- ประการที่สาม* คือการจ่ายโหลดเกินและการลัดวงจรภายนอก

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติของฉนวน และจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลง และนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ของหม้อแปลงในที่สุด ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงไฟฟ้า จึงต้องมีการดูแลรักษาหรือซ่อมบำรุง การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง ก็เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการดูแลรักษาหม้อแปลง ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานหม้อแปลงทราบถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นในการใช้งาน รวมทั้งเป็นการป้องกันความเสียหายรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นได้กับ ด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นที่มาซึ่งของงานวิจัยวิทยานิพนธ์เรื่อง การพัฒนาระบบรู้จำแบบรูปของดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์

## 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อพัฒนาการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง
2. เพื่อพัฒนาการรู้จำรูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ในการรู้จำ และจำแนกประเภทของดิสชาร์จบางส่วน

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. กำหนดให้การเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง โดยใช้ไอเล็กโตรดปลายแหลมกับระนาบ ไอเล็กโตรดทรงกลมกับระนาบ ไอเล็กโตรดระนาบกับระนาบ
2. ก่อสภาพขณะที่ใช้บรรจุน้ำมันหม้อแปลงนั้นเป็นพลาสติก และชิ้นส่วนอื่นของกล่องก็ต้องเป็นอลูมิเนียม
3. น้ำมันหม้อแปลงที่ใช้ทดสอบเป็นน้ำมันหม้อแปลงที่ใช้งานจริง
4. ทำการทดสอบที่สภาพอากาศ ณ ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง มหาลัษเทคโน โลยีสุรนารีและห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ตรวจวัดสัญญาณดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง โดยวิธีวัดกระแสพัลส์ (pulse current method)
2. สร้างและพัฒนาอัลกอริทึมการรู้จำรูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง

## 1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. หม้อแปลงทดสอบพิกัด 75kV 40kVA PD< 2 pC
2. ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

3. อิเล็กโทรดแบบปลายแหลมระนาบ (rod-plan electrode)
4. อิเล็กโทรดแบบระนาบ-ระนาบ (plan-plan electrode)
5. อิเล็กโทรดแบบทรงกลม-ระนาบ (sphere-plan electrode)
6. แผ่นอะคริลิก  $14 \times 14 \times 2$  cm
7. แผ่นอะคริลิก  $14 \times 14 \times 2$  cm (มีโพรงอากาศภายใน)
8. น้ำมันหม้อแปลง
9. เครื่องมือวัดดิสชาร์จบางส่วน MPD 600
10. ออสซิลโลสโคป
11. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์
12. สายเคเบิลสำหรับวัดสัญญาณ (coaxial cable)
13. เครื่องทดสอบน้ำมันหม้อแปลง
14. เครื่องวัดความดันบรรยากาศ เครื่องวัดอุณหภูมิ เครื่องวัดความชื้น
15. คอมพิวเตอร์แสดงผลและบันทึกผล

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงและดิสชาร์จบางส่วนในอากาศ
2. สามารถตรวจรู้ว่าเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงและดิสชาร์จบางส่วนในอากาศเพื่อหาทางป้องกันการเกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าได้
3. เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงและดิสชาร์จบางส่วนในอากาศ
4. เกิดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการรู้จำรูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงและดิสชาร์จบางส่วนในอากาศ
5. ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยเรื่องการพัฒนากระบวนการรู้จำรูปแบบของดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงในที่ประชุมวิชาการหรือวารสารวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศ

## 1.7 รูปเล่มวิทยานิพนธ์

รูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาทั้งหมด 8 บทและภาคผนวก

**บทที่ 1** กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย โดยมีรายละเอียดของเนื้อหาในแต่ละบทดังนี้



**บทที่ 2** กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ทราบถึงแนวทางการศึกษาระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัยและเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง โดยนำผลการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยมาใช้เป็นแนวทางและประยุกต์พร้อมทั้งพัฒนาให้เหมาะสมกับงานวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้

**บทที่ 3** เป็นการนำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ โดยมีเนื้อหาประกอบไปด้วย น้ำมันหม้อแปลงและคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง ดิสซาร์จบางส่วน วิธีการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วน หลักการการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี

**บทที่ 4** เป็นการเสนอเนื้อหาเกี่ยวกับการทดลองและการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วน

**บทที่ 5** เป็นการอธิบายวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลดิสซาร์จบางส่วนในทางสถิติ

**บทที่ 6** เป็นการเสนอเนื้อหาเกี่ยวกับเทคนิคขดลวดที่ใช้ในการรู้จำและการจำแนกประเภทของดิสซาร์จบางส่วน ได้แก่ Simplified fuzzy ARTMAP และ เครื่องเวกเตอร์เกื้อหนุน

**บทที่ 7** เป็นการนำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิค simplified fuzzy ARTMAP และ เครื่องเวกเตอร์เกื้อหนุน มาใช้ในการรู้จำและการจำแนกประเภทของดิสซาร์จบางส่วน

**บทที่ 8** เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

ภาคผนวก ข. โปรแกรมสำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภทดิสซาร์จบางส่วน

ภาคผนวก ค. ข้อมูลค่าคุณลักษณะของดิสซาร์จบางส่วน

## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยวิทยานิพนธ์เรื่อง การพัฒนาระบบรู้จำแบบรูปของดีสชาร์จ บางส่วนโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ คือการประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ เพื่อทำการรู้จำ และการจำแนกประเภทของดีสชาร์จบางส่วน โดยในการดำเนินงานนั้น ขั้นแรกทำการออกแบบ และสร้างแบบจำลองการเกิดดีสชาร์จบางส่วน จากนั้นทำการวัดสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนแล้วนำ ข้อมูลมาทำการคำนวณวิเคราะห์ ขั้นตอนที่สุดท้ายคือทำการรู้จำสัญญาณดีสชาร์จแบบต่าง ๆ เพื่อให้ การวิจัยในครั้งนี้มีความสมบูรณ์ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและ งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางการวิจัย รวมถึงวิธีการในการคำนวณและวิเคราะห์ ตลอดจนข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะวิจัยที่ผ่านมาก็ได้ถูกนำมาใช้ โดยอาศัยตำราและใช้ฐานข้อมูล ที่เป็นแหล่งสะสมของวรรณกรรม และรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องอาทิเช่น IEEE WSEAS และ Science Direct เป็นต้น จากผลการค้นคว้าวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะถูกใช้เป็นข้อมูล อ้างอิง และเป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัยต่อไป

#### 2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากผลการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการรู้จำรูปแบบดีสชาร์จ บางส่วน สามารถสรุปโดยย่อ เรียงตามลำดับได้ดังนี้

Gulski and Krivda (1993) ทำการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียม (neural network) 3 ชั้นได้แก่ เครือข่ายการเรียนรู้แบบแพร่กลับ (back - propagation) เครือข่าย โคโฮเนน (Kohonen self-organizing map) และเครือข่ายการเรียนรู้เวกเตอร์ควอนไทเซชัน (learning vector quantization : LVQ) โดยในการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนนั้นใช้วิธีการตรวจวัดดีสชาร์จแบบ คั้งเดิม (conventional discharge detection) และนำข้อมูลดีสชาร์จบางส่วนมาประมวลผลด้วยวิธีทาง สถิติ เพื่อให้ได้ค่าคุณลักษณะของดีสชาร์จบางส่วน จากนั้นนำค่าคุณลักษณะของดีสชาร์จบางส่วน มาใช้ในกระบวนการรู้จำรูปแบบ

Jin et al. (1999) ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียม 2 ชั้น ที่มีความ แตกต่างกันคือเครือข่ายการเรียนรู้แบบแพร่กลับ และเครือข่ายการเรียนรู้เวกเตอร์ควอนไทเซชัน เพื่อรู้จำรูปแบบดีสชาร์จบางส่วนของหม้อแปลงกำลัง โดยมีแบบจำลอง 11 แบบ ได้แก่

- การจำลองคีสซาร์จอิเล็กโตรคปลายแหลม - อิเล็กโตรครระนาบในน้ำมัน
- การจำลองคีสซาร์จตามผิวของท่อกระเบื้อง (porcelain tube) ในน้ำมัน
- การจำลองคีสซาร์จตามผิวของแผ่นกระดาษอัด (pressboard) ในน้ำมัน
- การจำลองคีสซาร์จอิเล็กโตรคปลายแหลม - อิเล็กโตรคปลายแหลมในน้ำมัน โดยมีแผ่นกระดาษอัดคั่นระหว่างอิเล็กโตรค
- การจำลองคีสซาร์จอิเล็กโตรคปลายแหลม - อิเล็กโตรครระนาบในน้ำมัน โดยมีแผ่น pressboard คั่นระหว่างอิเล็กโตรค
- การจำลองคีสซาร์จตามผิวของขดลวด
- การจำลองคีสซาร์จของ high voltage insulation lead
- การจำลองคีสซาร์จตามผิวของ tap – changing switch
- การจำลองคีสซาร์จอิเล็กโตรคปลายแหลม- อิเล็กโตรครระนาบในอากาศ
- การจำลองคีสซาร์จตามผิว ในอากาศ

Vicetjindavat (2001) ศึกษาเกี่ยวกับการรู้จำรูปแบบของคีสซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้ค่าคุณลักษณะทางสถิติมาเป็นข้อมูลในการรู้จำ ใช้เครือข่ายประสาทเทียมในกระบวนการเรียนรู้และจดจำรูปแบบ และใช้การค้นหาแบบจินเนติกอัลกอริทึม (Genetic Algorithm : GA) มาปรับค่าน้ำหนักให้กับเครือข่ายประสาทเทียม

Chatpattananan and Pattanadech (2006) อธิบายถึงการแบ่งรูปแบบของคีสซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์แรงดันสูง ใช้การวิเคราะห์แบบ Multinomial Logistic Regression มาทำการแบ่งรูปแบบของคีสซาร์จบางส่วนออกเป็น 4 ประเภท ซึ่งได้แก่ (1) โครโนาด้านแรงสูงในอากาศ (2) โครโนาด้านแรงต่ำในอากาศ (3) คีสซาร์จตามผิว (4) คีสซาร์จภายใน แล้วนำข้อมูลทางสถิติของคีสซาร์จมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ 10 ค่า ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์  $Sk^+$ ,  $Sk^-$ ,  $Ku^+$ ,  $Ku^-$  ของ  $H_n(\varphi)$  ค่าพารามิเตอร์  $Sk^+$ ,  $Sk^-$ ,  $Ku^+$ ,  $Ku^-$  ของ  $H_{qn}(\varphi)$  ค่า  $Q$  และ ค่า  $CC$

Ludpa et al. (2008) อธิบายถึงการแบ่งรูปแบบของคีสซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์แรงดันสูง ใช้การวิเคราะห์แบบถดถอย (regression analysis) ในการแบ่งรูปแบบของคีสซาร์จบางส่วนออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่ (1) โครโนาด้านแรงสูงในอากาศ (2) โครโนาด้านแรงต่ำในอากาศ (3) คีสซาร์จตามผิว (4) คีสซาร์จภายใน แล้วนำข้อมูลทางสถิติของคีสซาร์จในแต่ละประเภทมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกกลุ่มของพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด 5 พารามิเตอร์ ( $Sk^+$ ,  $Sk^-$ ,  $Ku^+$ ,  $Ku^-$  ของ  $H_n(\varphi)$  และ  $Q$  ของ  $H_{qn}(\varphi)$ ) เพื่อใช้ในการรู้จำ

Chang (2009) ทำการศึกษาและประยุกต์ใช้จินเนติกอัลกอริทึม และเทคนิคการจับกลุ่ม fuzzy c-means (FCM) ในการรู้จำรูปแบบคัสซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงกระแสแคสเรซิน (cast-resin current transformer :CRCT) ประกอบด้วย 5 รูปแบบ ได้แก่

- 1) คัสซาร์จบางส่วนปกติใน CRCT มาตรฐาน (normal PD activity :NM)
- 2) คัสซาร์จโพรงอากาศหรือช่องว่างภายใน (internal cavity discharge : VM) โดยโพรงอากาศที่อยู่ภายในลูกถ้วยอีพอกซีเรซิน (epoxy resin insulation) ของด้านแรงดันสูงเป็นสาเหตุของการเกิดคัสซาร์จบางส่วน
- 3) คัสซาร์จโพรงอากาศหรือช่องว่างภายใน (internal cavity discharge : VL) โดยโพรงอากาศ 2 โพรง ซึ่งอยู่ภายในลูกถ้วยอีพอกซีเรซินของด้านแรงดันต่ำ เป็นสาเหตุของการเกิดคัสซาร์จบางส่วน
- 4) คัสซาร์จรอยแยกภายใน (internal fissure discharge : FH) โดยรอยแยกอากาศภายในลูกถ้วยอีพอกซีเรซินของด้านแรงดันสูง เป็นสาเหตุของการเกิดคัสซาร์จบางส่วน
- 5) คัสซาร์จภายใน (internal discharge : MH) โดยสารเจือปนเส้น โลหะ (metal – line impurity) ภายในลูกถ้วยอีพอกซีเรซินของด้านแรงดันสูง เป็นสาเหตุของการเกิดคัสซาร์จบางส่วน

ขั้นตอนในการศึกษาเริ่มด้วยการตรวจวัดคัสซาร์จบางส่วน จากนั้นใช้วิธีทางสถิติหาค่าคุณลักษณะของคัสซาร์จบางส่วน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในกระบวนการจับกลุ่ม หรือจำแนกประเภท ลำดับขั้นตอนต่อมาเป็นการใช้จินเนติกอัลกอริทึมเพื่อเลือกคุณลักษณะที่เหมาะสมที่สุด ดังนั้นรูปแบบของคัสซาร์จบางส่วนจะถูกแทนที่ด้วยค่าลักษณะที่เหมาะสมที่สุด ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการจับกลุ่มคัสซาร์จบางส่วนของ CRCT

Hao and Lewin (2010) ทำการศึกษาการแบ่งแยกประเภทของแหล่งกำเนิดคัสซาร์จบางส่วน ซึ่งมี 3 แบบ ประกอบด้วย โครนาคัสซาร์จ คัสซาร์จตามผิวและคัสซาร์จภายใน โดยในขั้นตอนการตรวจวัดคัสซาร์จบางส่วนได้เลือกใช้ระบบการตรวจวัดการตรวจวัดคัสซาร์จบางส่วนที่แบนด์วิดท์กว้างแบบออนไลน์ (wide bandwidth PD on-line measurement system) ซึ่งประกอบด้วย เซนเซอร์ตัวแปลงกระแสความถี่วิทยุ (radio frequency current transducer: RFCT) ออสซิลโลสโคป ดิจิตอลและคอมพิวเตอร์สมรรถสูง จากนั้นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดจะถูกวิเคราะห์ด้วยเวฟเลต (wavelet) และข้อมูลที่ถูกวิเคราะห์ด้วยเวฟเลต จะเป็นค่าลักษณะของคัสซาร์จบางส่วนเพื่อใช้ในการจำแนกประเภทของคัสซาร์จบางส่วน โดยในขั้นตอนการระบุและจำแนกประเภทของคัสซาร์จได้ประยุกต์ใช้เทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน (SVM)

## 2.3 สรุป

จากผลการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการรู้จำรูปแบบดิศขาร์จบางส่วน โดยขั้นตอนหลักสำคัญ 3 ขั้นตอนคือ *ขั้นตอนที่หนึ่ง* เป็นการตรวจวัดดิศขาร์จบางส่วนที่ต้องการจัดกลุ่มหรือการจำแนกประเภท *ขั้นตอนที่สอง* เป็นการคำนวณหาค่าคุณลักษณะของดิศขาร์จบางส่วนในแต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในกระบวนการรู้จำและจำแนกประเภท ในบางวรรณกรรมมีการใช้เทคนิคในการเลือกลักษณะที่เหมาะสมเพื่อลดจำนวนค่าคุณลักษณะให้น้อยลง *ขั้นตอนที่สาม* เป็นการใช้จำแนกประเภทของดิศขาร์จบางส่วนและมีการใช้เทคนิคในการรู้จำต่าง ๆ เช่น เครือข่ายประสาทเทียม เทคนิคการจัดกลุ่ม fuzzy c-means (FCM) เครื่องเวกเตอร์เกือหนุน เป็นต้น หรืออาจมีการใช้เทคนิคอื่น ๆ รวมด้วย

## บทที่ 3

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 3.1 บทนำ

ในการศึกษาและการทำงานวิจัย สิ่งที่จะช่วยให้ผู้วิจัยเกิดความรู้ความเข้าใจ และสามารถนำไปใช้ในการศึกษาทำงานวิจัยให้ได้ผลดีก็คือ การศึกษาให้เข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อใช้เป็นความรู้พื้นฐานในการดำเนินงานวิจัยให้กับผู้วิจัย ดังนั้นในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์เรื่องการพัฒนากระบวนการรู้จำแบบรูปดีสซาร์จบางส่วน โดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งได้แก่ คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดดีสซาร์จบางส่วน การตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นเนื้อหาที่เป็นประโยชน์ หรือถูกกล่าวอ้างถึงการดำเนินงานวิจัย

#### 3.2 น้ำมันหม้อแปลงและคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง

น้ำมันหม้อแปลงถูกใช้เป็นฉนวนระหว่างขดลวดกับแกนเหล็กและระหว่างขดลวดกับขดลวด และยังใช้ระบายความร้อนของแกนเหล็กและขดลวดในหม้อแปลงด้วย ทำให้หม้อแปลงสามารถจ่ายโหลดได้เกิน (rated capacity) และสามารถทนต่อแรงดันชั่วครู่ (transients voltage) เนื่องจากฟ้าผ่าหรือสวิตชิงเสิร์จ (switching surge) ได้ นอกจากนี้ น้ำมันหม้อแปลงยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของฉนวนแข็งได้ โดยการแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของฉนวนที่พันไว้

เนื่องจากการสูญเสียทางไฟฟ้าจะทำให้เกิดความร้อน ซึ่งส่งผลให้ฉนวนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ถ้าไม่มีการระบายความร้อนออกจากฉนวนอย่างมีประสิทธิภาพ ก็จะส่งผลให้ฉนวนมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนถึงจุดที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อฉนวนและอุปกรณ์ได้ ชีตจำกัดของอุณหภูมิใช้งานของหม้อแปลงขึ้นอยู่กับฉนวนแข็งที่ใช้ ดังนั้นอัตราการระบายความร้อนของหม้อแปลงจะต้องมีประสิทธิภาพ น้ำมันหม้อแปลงจึงเป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนออกจากแกนเหล็กและขดลวดไปสู่ภายนอก

เนื่องจากน้ำมันหม้อแปลงมีความสำคัญยิ่งสำหรับหม้อแปลง คุณสมบัติที่สำคัญของน้ำมันหม้อแปลง มีดังนี้

1. มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดี มีค่าความเป็นฉนวนสูง (high dielectric strength)
2. มีสภาพระบายความร้อนได้ดี มีความหนืดต่ำ (low viscosity)

3. มีจุดไหล (pour point) ต่ำ ไม่แข็งตัวในฤดูหนาว
4. ระเหยได้น้อย มีจุดวาบไฟ (flash point) สูง
5. คงทนต่อปฏิกิริยาทางเคมี ไม่มีสารไปกัดกร่อนส่วนที่เป็นโลหะ มีค่าความเป็นกรดต่ำ
6. สะอาดปราศจากความชื้น หรือสิ่งเจือปนต่าง ๆ เช่น ฝุ่นละออง

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของน้ำมันที่ใช้เป็นฉนวนในอุปกรณ์ไฟฟ้า

ชนิดน้ำมัน คุณสมบัติ	น้ำมันฉนวน หม้อแปลง	น้ำมันฉนวน เคเบิล	น้ำมันฉนวน ตัวเก็บประจุ
จุดวาบไฟ	130 – 180 °C	-	-
ความคงทนต่อการเบรกดาวน์ ณ 20 °C บนช่องว่างทรงกลมมาตรฐาน 25 mm	10-25 kV/mm	30 kV/mm	20 kV/mm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (50 Hz)	2.2 – 2.3	2.3 – 2.6	2.1
สภาพต้านทาน (ohm - cm)	$10^{12} - 10^{13}$	$10^{12} - 10^{13}$	$10^{13} - 10^{14}$
ความถ่วงจำเพาะ ที่ 20 °C	0.89	0.93	0.88 – 0.89
ความหนืด ที่ 20 °C (CS)	30	30	30
ค่าความเป็นกรด (mg/gm of KOH)	Nil	Nil	Nil
ครรชนีหักเห	1.482	1.470	1.474
ค่าความเป็นด่าง (mg of KOH/gm of oil)	0.01	0.01	0.01
การขยายตัว (20 – 100 °C)	$7 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	$7 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$	$7 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$
ความปนเปื้อนน้ำที่ยอมรับได้สูงสุด (ppm)	50	50	50
สภาพนำความร้อน mw/cm °C	1.6	-	-

ค่าความหนืดของน้ำมันฉนวนแสดงถึงประสิทธิภาพของการเย็นตัวของน้ำมันฉนวน ถ้าค่าความหนืดยิ่งต่ำ แสดงว่าประสิทธิภาพการเย็นของน้ำมันก็จะยิ่งสูง การระบายความร้อน จะทำได้ดีและรวดเร็ว สำหรับค่าจุดไหลของน้ำมันมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่น และเป็นอณูหภูมิค่าที่ต่ำที่น้ำมันยังคงไหลได้ นอกจากนี้ถ้าในน้ำมันหม้อแปลงมีสิ่งเจือปน (impurity) อยู่มีผลทำให้ความสามารถในการทนต่อแรงดันไฟฟ้าลดลง

น้ำมันหม้อแปลงจะมีการเสื่อมสภาพลงเรื่อย ๆ ถ้าหากมีการใช้งานเป็นระยะเวลานาน สาเหตุคือการดูดความชื้นในอากาศ หรือมีสิ่งแปลกปลอมเข้าไปปนอยู่ในน้ำมันหม้อแปลง และน้ำมันหม้อแปลงจะมีการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเมื่อสัมผัสกับอากาศ นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นอาจมีผลทำให้น้ำยารวาร์นิช (varnish) ที่เคลือบขดลวดหรือที่แกนละลายออกมาได้

โครงสร้างและองค์ประกอบของฉนวนเหลว อาจแบ่งออกได้ 2 ประเภทคือ ฉนวนเหลวบริสุทธิ์ และฉนวนเหลวเชิงการค้า ฉนวนเหลวที่ใช้กันอยู่ในทางปฏิบัติ ส่วนใหญ่เป็นฉนวนเหลวเชิงการค้า ฉะนั้นจะกล่าวถึงกระบวนการการเกิดเบรกดาวน์ของฉนวนเหลวเชิงการค้า

กลไกเบรกดาวน์ของฉนวนเหลว อาจเนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้ (สำรวย สังข์สะอาด, 2547)

(1) โพรงและฟองแก๊สในฉนวนเหลว ซึ่งโพรงและฟองแก๊สมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า น้อยกว่าฉนวนเหลว จะเป็นจุดเริ่มต้นของการเบรกดาวน์ในฉนวนเหลว โดยฉนวนเหลวอาจมีฟองแก๊สเกิดขึ้นได้อันเนื่องมาจากหลายสาเหตุ เช่น มีโพรงแก๊สอยู่ที่ผิวอิเล็กโตรด หรือเกิดแก๊สจากการแตกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลว เนื่องจากการชนของอิเล็กตรอนหรือโคโรนาดีสชาร์จทำให้ฉนวนเหลวระเหยเป็นไอ เมื่อมีฟองแก๊สเกิดขึ้นก็จะขยายตัวยึดในแนวสนามไฟฟ้าเพื่อลดพลังงานศักย์ในสนามไฟฟ้า สมมติว่าปริมาตรของฟองแก๊สมีค่าคงตัวขณะที่ยึดออก เบรกดาวน์จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันตกคร่อมความยาวของฟองแก๊สมีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของเส้นโค้งพาสเชน (Paschen's curve) ของฟองแก๊สนั้น

สำหรับค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของฟองแก๊ส  $E_g$  ในฉนวนเหลว

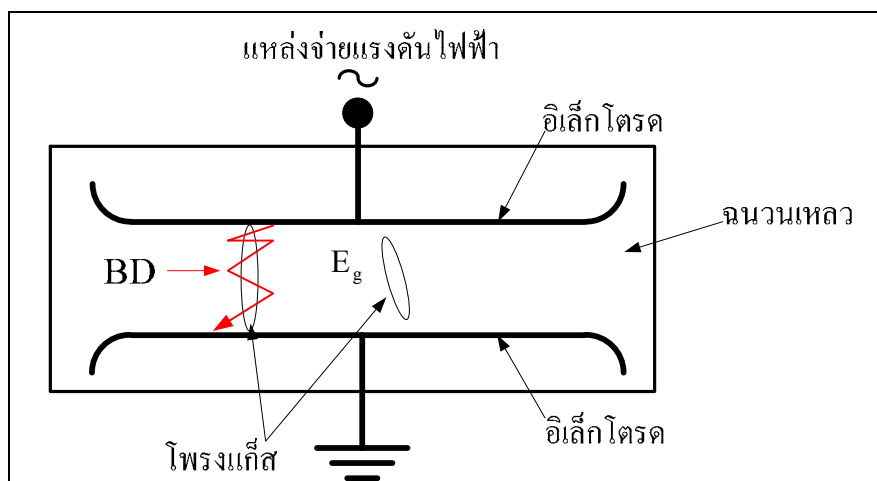
$$E_g = \frac{3\varepsilon_1 E_0}{2\varepsilon_1 + 1} \quad (3.1)$$

โดยที่  $E_0$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนเหลวเมื่อไม่มีฟองแก๊ส

$\varepsilon_1$  คือ ค่าสภาพยอม (Permittivity) ของฉนวนเหลว

เมื่อ  $E_g$  มีค่าเท่ากับค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตของแก๊สนั้น และจะเกิดดีสชาร์จผ่านฟองแก๊ส ทำให้เกิดการแยกตัวของโมเลกุลฉนวนเหลว แล้วนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1





รูปที่ 3.1 การเกิดเบรกคาวน์เนื่องจากฟองแก๊สในฉนวนเหลว

(2) สิ่งเจือปนของแข็ง เป็นต้นเหตุทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในของเหลวเพิ่มสูงขึ้น เฉพาะแห่ง นำไปสู่การเกิดเบรกคาวน์

สิ่งเจือปนของแข็งที่อาจมีอยู่ในฉนวนเหลวอาจจะเป็นผงฝุ่นหรือรูปเส้นใย ถ้าสิ่งเจือปนมีค่าสภาพยอมต่างไปจากค่าสภาพยอมของฉนวนเหลวและอยู่ในสนามไฟฟ้า ( $E$ ) จะส่งผลให้เกิดแรงกระทำบนอนุภาคของแข็งที่มีลักษณะทรงกลมดั่งสมการ

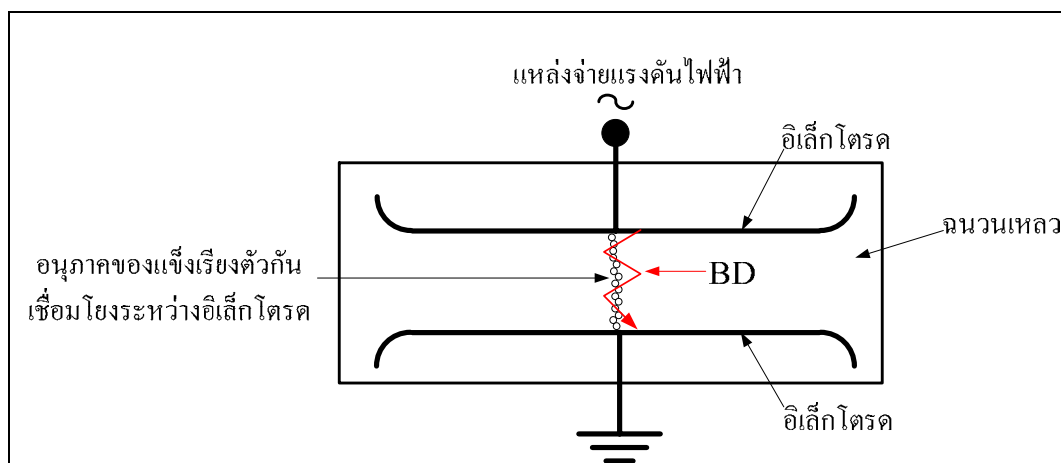
$$F = \frac{1}{2}(r^3) \frac{(\epsilon_2 \times \epsilon_1)}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} \text{grad } E^2 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $r$  คือ รัศมีของอนุภาคของแข็ง

$\epsilon_1$  คือ ค่าสภาพยอมของฉนวนเหลว

$\epsilon_2$  คือ ค่าสภาพยอมของอนุภาคของแข็งเจือปน

ถ้า  $\epsilon_2 > \epsilon_1$  แรงนี้จะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ผลของแรงที่เกิดขึ้นจะทำให้อนุภาคของแข็งเรียงตัวต่อกัน เชื่อมโยงระหว่างอิลีกโตรด ทำให้เกิดเบรกคาวน์ขึ้นได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การเกิดเบรกควาน์เนื่องจากอนุภาคของแข็งเรียงตัวต่อกันในฉนวนเหนวล

แรงที่กระทำบนอนุภาคเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า  $\epsilon_2$  ฉะนั้นถ้าอนุภาคนั้นเป็นตัวนำ  $\epsilon_2 \rightarrow \infty$  แรงกระทำบนอนุภาคจะเป็น  $F_\infty = (r^3/2)grad E^2$  และอนุภาคตัวนำทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉพาะที่มีค่าสูงขึ้น ถ้าความเครียดสนามไฟฟ้านี้สูงกว่าค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหนวล ก็จะทำให้เกิดสปาร์กไกสๆ อนุภาค ทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นและนำไปสู่การเกิดเบรกควาน์ในฉนวนเหนวล ความคงทนต่อแรงดันของฉนวนเหนวลขึ้นอยู่กับปริมาณสิ่งเจือปน โดยที่สิ่งเจือปนอาจเป็นผงฝุ่น เศษของแข็งเล็กๆ และสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคือความชื้น ซึ่งเป็นสิ่งที่มีผลต่อความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเหนวล

ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของน้ำมันหม้อแปลงที่สำคัญนั้นคือ ความชื้นในน้ำมันหม้อแปลงและการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันหม้อแปลงกับออกซิเจน นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น เช่น ความร้อน สิ่งเจือปน ความเป็นกรด เป็นต้น และจากผลการศึกษาพบว่าดีสชาร์จบางส่วนมีผลกระทบโดยตรงต่ออายุการใช้งานทางไฟฟ้าของน้ำมันหม้อแปลง (Peng, 2009)

### 3.3 ดีสชาร์จบางส่วน

ความหมายของดีสชาร์จบางส่วน (Partial discharge : PD) ตามคำนิยามของ international electro technical commission (IEC) ที่ปรากฏใน IEC 60270 published 2000 Section 3.1 กล่าวว่า ดีสชาร์จบางส่วนเป็นดีสชาร์จทางไฟฟ้าเฉพาะส่วนซึ่งเชื่อมต่อบางส่วนของฉนวนที่อยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้า แต่ไม่สามารถเชื่อมโยงระหว่างตัวนำไฟฟ้าให้ถึงกันได้นั้นคือ ดีสชาร์จบางส่วนเป็นดีสชาร์จเบรกควาน์แบบไม่สมบูรณ์ เกิดขึ้นกับฉนวนที่คั่นอยู่ระหว่างอิเล็กโตรด ซึ่งอาจจะเป็นฉนวนแข็ง ฉนวนเหนวลหรือฉนวนแก๊สก็ได้ เมื่อดีสชาร์จบางส่วนเกิดในโพรง หรือ

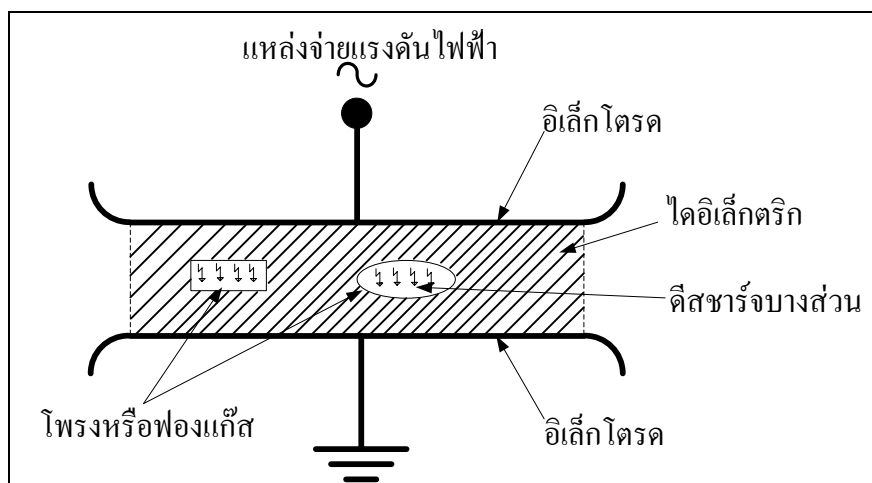
ช่องว่างที่อยู่ในฉนวนแข็ง หรือเกิดในฟองแก๊สที่อยู่ในฉนวนเหลว หรือเกิดที่อากาศบริเวณรอบ อิเล็กโตรดพลังงานที่ทำให้เกิดดิสชาร์จนั้น ไม่มากพอที่จะทำให้ฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นนำไฟฟ้าได้ตลอดแนวระหว่างอิเล็กโตรด ดิสชาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในระบบฉนวนที่มีลักษณะ สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง หรือฉนวนที่มีความไม่สม่ำเสมอ หรือไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือมีสิ่งเจือปน ซึ่งทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบางจุดในฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต ทำให้เกิดเบรกดาวน์เพียงบางส่วนเท่านั้น แต่ไม่อาจทำให้เกิดเบรกดาวน์โดยสมบูรณ์ได้ แม้ว่าขนาดดิสชาร์จบางส่วนโดยส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็ก แต่ดิสชาร์จบางส่วนก็สามารถก่อให้เกิด การทำลายระบบฉนวน และอาจนำไปสู่ความผิดปกติของอุปกรณ์ไฟฟ้า

การเกิดดิสชาร์จบางส่วนอาจส่งผลทำให้เกิดการเสื่อมสภาพความเป็นฉนวน เนื่องจากเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วนในฉนวน ก็อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของโมเลกุลของฉนวน ด้วยเหตุนี้การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง และผลจากการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนจะให้ข้อมูลสถานะของระบบฉนวน หรือข้อมูลเกี่ยวกับขนาดและลักษณะการเกิด ดิสชาร์จบางส่วน หรือข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งการเกิดดิสชาร์จบางส่วน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการตรวจวัด ดิสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ทั้งในสนามไฟฟ้ากระแสสลับและสนามไฟฟ้ากระแสตรง ถึงแม้ว่าดิส ชาร์จบางส่วนจะเป็นการดิสชาร์จขนาดเล็ก แต่ก็สามารถนำไปสู่การเบรกดาวน์ได้

### 3.3.1 ประเภทของดิสชาร์จบางส่วน

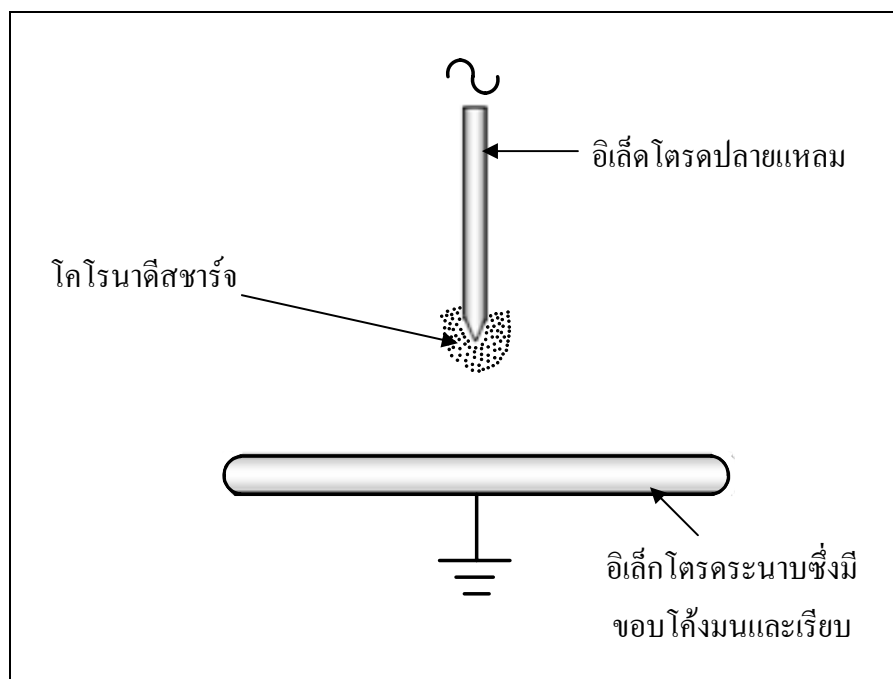
ดิสชาร์จบางส่วน อาจแบ่งออกเป็น 4 แบบ

1. ดิสชาร์จภายใน (internal discharge) เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนที่มีสิ่งเจือปน ซึ่งสิ่งเจือปนนั้น มีค่าไดอิเล็กตริกต่ำ และมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น จึงทำให้ บริเวณนี้เกิดเบรกดาวน์ก่อน ดิสชาร์จภายในเกิดขึ้นเนื่องมาจากมีโพรงอากาศ หรือสิ่งแปลกปลอม ที่มีค่าสภาพยอมต่ำกว่าเนื้อฉนวนหลักเจือปนอยู่ในเนื้อฉนวนแข็งหรือฉนวนเหลว (น้ำมัน หม้อแปลง) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ส่งผลให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในโพรงอากาศ หรือสิ่งเจือปน ดังกล่าวมีค่าสูงกว่าฉนวนรอบ ๆ ดิสชาร์จภายในสามารถเกิดในพลาสติก กระดาษฉนวน น้ำมัน ฉนวนเรซิน เป็นต้น ขนาดของแรงดันที่ดิสชาร์จเริ่มเกิดได้ ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าใน โพรงอากาศ และความคงทนต่อการเบรกดาวน์ของโพรงอากาศ โดยที่ความเครียดสนามไฟฟ้า ในโพรงอากาศ ขึ้นอยู่กับความเข้มของสนามไฟฟ้า ซึ่งความเข้มสนามไฟฟ้าขึ้นกับขนาด แรงดันสูง รูปร่างของโพรงอากาศและทิศทางของความเข้มสนามไฟฟ้าสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า ความทนต่อแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงอากาศขึ้นกับขนาดของโพรงอากาศ นอกจากนี้ความทน ต่อแรงดันเบรกดาวน์ถูกกำหนดโดยชนิดของแก๊ส และความดันแก๊สในโพรงอากาศ ดิสชาร์จ ภายในสามารถทำความเสียหายแก่ฉนวนได้โดยขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุและขนาดของดิสชาร์จ



รูปที่ 3.3 การเกิดดีสชาร์จภายใน

2. โคโรนาดีสชาร์จ (corona discharge) เกิดขึ้นได้ในอากาศหรือแก๊ส บริเวณอิลเล็กโตรดปลายแหลมหรือลักษณะขอบคม ซึ่งมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง นอกจากนี้โคโรนาดีสชาร์จสามารถเกิดในน้ำมันได้เช่นกัน โคโรนาดีสชาร์จสามารถจำลองได้โดยใช้อิลเล็กโตรดปลายแหลมกับอิลเล็กโตรดระนาบ โดยในการจำลองถ้าให้อิลเล็กโตรดปลายแหลมเป็นด้านแรงสูงและให้อิลเล็กโตรดระนาบเป็นด้านต่อลงดิน ดีสชาร์จก็จะเกิดขึ้นด้านครึ่งลบของรูปคลื่นแรงดัน และถ้าเพิ่มแรงดันขึ้นอีกก็จะเกิดทั้งครึ่งลบและครึ่งบวกของรูปคลื่นแรงดัน ถ้าอิลเล็กโตรดปลายแหลมเป็นด้านต่อลงดินและให้อิลเล็กโตรดระนาบเป็นด้านแรงสูง ดีสชาร์จก็จะเกิดขึ้นที่ครึ่งบวกของรูปคลื่นแรงดันก่อน

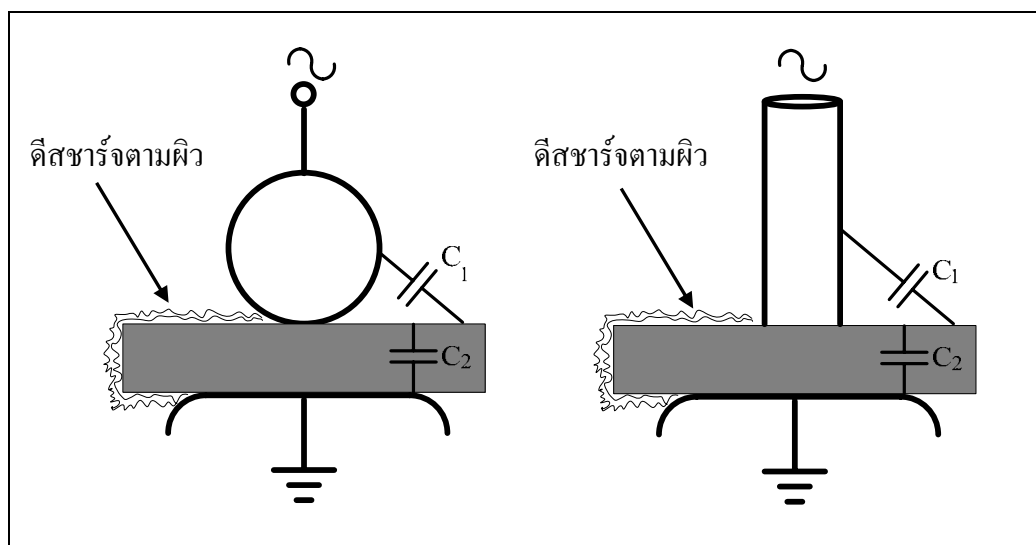


รูปที่ 3.4 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จ

3. ดิสชาร์จตามผิว (surface discharge) มักจะเกิดขึ้นถ้าผิวฉนวนบริเวณนั้น มีความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวขนานหรือแนวเดียวกับผิวฉนวน ดิสชาร์จตามผิวเกิดขึ้นได้กับปลอกฉนวนนำสาย ปลายสายเคเบิล เป็นต้น ดิสชาร์จส่งผลต่อสนามไฟฟ้า เป็นผลให้ดิสชาร์จแผ่ขยายออกจากบริเวณพื้นผิว(บริเวณแรกที่ดิสชาร์จเริ่มเกิด)ที่ซึ่งองค์ประกอบพื้นผิวแรกเริ่มของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดดิสชาร์จ ดิสชาร์จตามผิวเกิดได้ทั้งในอากาศ หรือในน้ำมัน ฉนวนและในแก๊ส  $SF_6$  ดิสชาร์จตามผิวอาจเกิดตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน (ของแข็งกับแก๊ส หรือของแข็งกับของเหลว) เมื่อมีความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวรอยต่อของฉนวนสูงเกินค่าวิกฤต ตัวอย่างในการศึกษาการเกิดดิสชาร์จตามผิวทำโดยการนำแผ่นฉนวนวางคั่นระหว่างอิลีคโตรคดังแสดงในรูปที่ 3.5

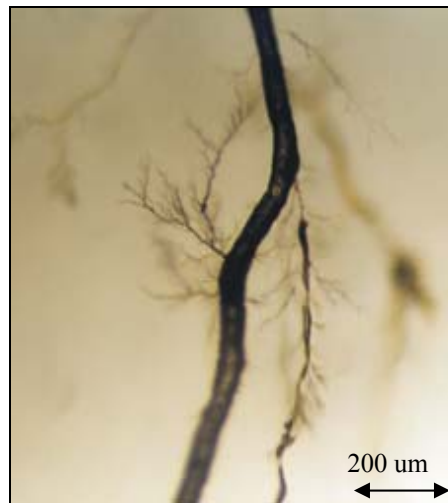
ในรูปที่ 3.5 ดิสชาร์จตามผิวจะเกิดขึ้นบริเวณที่อิลีคโตรคทรงกระบอกหรืออิลีคโตรคทรงกลมสัมผัสกับแผ่นฉนวน เพราะบริเวณดังกล่าวมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นตาม ดิสชาร์จจะขยายตัวออกไปยังขอบของแผ่นฉนวน ถ้าแผ่นฉนวนมีความหนาพอ และแผ่นไม่กว้างเกินไปก็จะเกิดวาทไฟข้ามแผ่นฉนวนไปหาอิลีคโตรคระนาบได้ หรือถ้าแผ่นฉนวนมีความหนาน้อย และแผ่นกว้างมาก ดิสชาร์จตามผิวก็จะเกิดเป็นบริเวณกว้างในระดับหนึ่ง แล้วก็จะเกิดเบรกควาน์

เจาะทะลุแผ่นฉนวนได้ เมื่อทำการพิจารณาค่าสภาพยอมของฉนวนแข็ง ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าสภาพยอมของอากาศหลายเท่าทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นฉนวน  $C_2$  มีค่ามากกว่าค่าความจุไฟฟ้าของอากาศ  $C_1$  ดังนั้นตามหลักการของโวลเตจดิโวลเคอร์แบบตัวเก็บประจุ แรงดันตกคร่อม  $C_1$  จึงมากกว่า ซึ่งหมายถึงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในส่วนนั้นมีค่าสูงกว่า และเมื่อเพิ่มแรงดันมากพอที่จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวเกินค่าวิกฤต ก็จะเริ่มเกิดดีสชาร์จบางส่วน และเมื่อเพิ่มแรงดันสูงกว่าค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (inception voltage) ก็จะทำให้เกิดดีสชาร์จไปตามผิวฉนวน ความเข้มของดีสชาร์จตามผิวจะขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นฉนวนแข็ง  $C_2$  ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าของแผ่นฉนวนนี้ขึ้นอยู่กับความหนาและค่าสภาพยอมของ แผ่นฉนวน

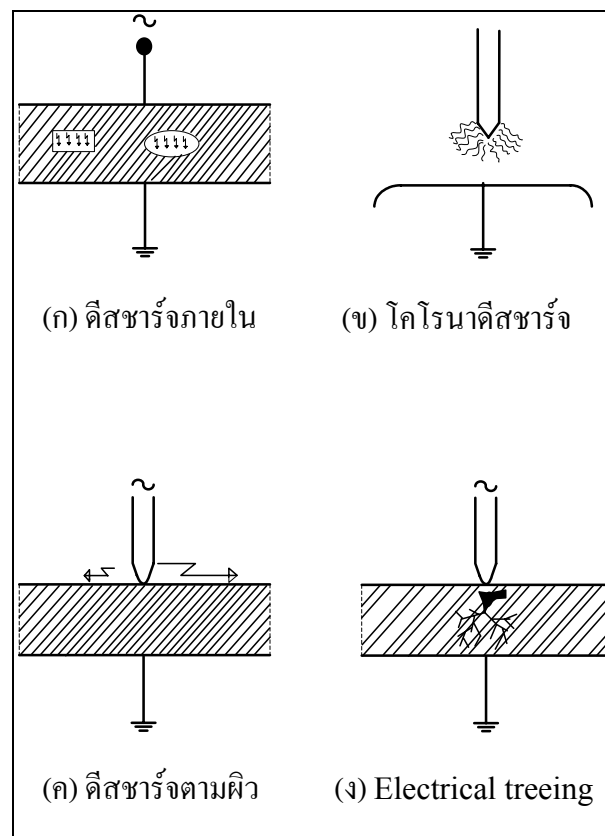


รูปที่ 3.5 การเกิดดีสชาร์จตามผิว

4. ดีสชาร์จทริอิงทางไฟฟ้า (Electrical treeing discharges) ดีสชาร์จชนิดนี้เริ่มเกิดจากจุดบกพร่องในฉนวนแข็งหลังจากจะเกิดแล้วก็จะแตกเป็นกิ่งออกไปทริอิงทางไฟฟ้ามักจะเกี่ยวโยงไปถึงกลไกการทำให้สายในฉนวนพอลิเมอร์แข็ง นอกจากนี้การเกิดทริอิงทางไฟฟ้าสามารถเริ่มเกิดที่โครงสร้างขรุขระของตัวนำภายใน บริเวณตำแหน่งที่น้ำยวานิชถูกทำลายอนุภาคโลหะโปรงอากาศ



รูปที่ 3.6 ลักษณะการเกิดทรีอิงทางไฟฟ้าของอีพอกซีเรซิน (Vogelsang, 2003)



รูปที่ 3.7 การเปรียบเทียบลักษณะของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน (Kreuger, 1989)

### 3.3.2 ผลของดีสชาร์จบางส่วน

เมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วนจะมีพลังงานถ่ายเทให้กับพื้นผิวฉนวน เป็นเหตุให้เกิดความร้อนที่ฉนวนเพิ่มขึ้นเฉพาะจุด เป็นผลให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้ฉนวนเสียเป็นจุดและเกิดผิวดร้งขยายตัวมากขึ้น และสามารถนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์อย่างสมบูรณ์ได้ ทำให้ฉนวนเสียหายและอายุการใช้งานฉนวนจะสั้นลง

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนก่อให้เกิดปัญหาต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า อย่างเช่นการเกิดดีสชาร์จบางส่วนบนสายส่งแรงสูงแบบขึงอากาศ จะทำให้เกิดพลังงานสูญเสียตลอดเวลา และทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ออกไปรบกวนระบบสื่อสารย่านความถี่วิทยุ หรือการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงก็จะทำให้เกิดแก๊สต่าง ๆ เกิดความร้อน ยิ่งไปกว่านั้นยังทำให้น้ำมันหม้อแปลงเกิดการเสื่อมสภาพ และค่าความเป็นฉนวนลดลง หรือในบางกรณีทำให้ฉนวนเสียหายและอาจนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์ได้

### 3.3.3 วงจรสมมูลของดีสชาร์จบางส่วน

เพื่อให้สามารถตรวจจับหรือวัดปริมาณของดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดในเนื้อฉนวน จึงได้มีการพัฒนาวงจรสมมูลของฉนวนที่มีดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้น โดยใช้เป็นวงจรสมมูลสำหรับฉนวนที่มีโพรงแก๊ส เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเกิดและหาปริมาณดีสชาร์จบางส่วน

รูปที่ 3.8 ก แสดงวัสดุฉนวนมีโพรงแก๊สภายในเนื้อฉนวนและฉนวนวางอยู่ระหว่างอิเล็กโทรด A – B โพรงแก๊สจะเขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า  $C_c$  เนื้อฉนวนส่วนที่ต่ออนุกรมกับโพรงแก๊ส ( $C_c$ ) เขียนแทนด้วยความจุไฟฟ้า  $C'_b$  และ  $C''_b$  (เนื้อฉนวนส่วนที่ต่ออนุกรมกับโพรงแก๊สนี้จะรวมกันเป็น  $C_b$ ) เนื้อฉนวนส่วนที่สมบรูณ์คืออยู่โดยรอบของโพรงแก๊สจะให้เป็นความจุไฟฟ้า  $C'_a$  และ  $C''_a$  (เนื้อฉนวนส่วนที่สมบรูณ์คืออยู่โดยรอบของโพรงแก๊ส ซึ่งรวมกันได้เป็น  $C_a$ ) ดังรูปที่ 3.8 ข ค่าความจุไฟฟ้าของส่วนฉนวนที่สมบรูณ์คืออยู่โดยรอบของโพรงแก๊ส

$$C_a = C'_a + C''_a \quad (3.3)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของส่วนฉนวนที่ต่ออนุกรมกับโพรงแก๊ส

$$C_b = \frac{C'_b C''_b}{C'_b + C''_b} \quad (3.4)$$

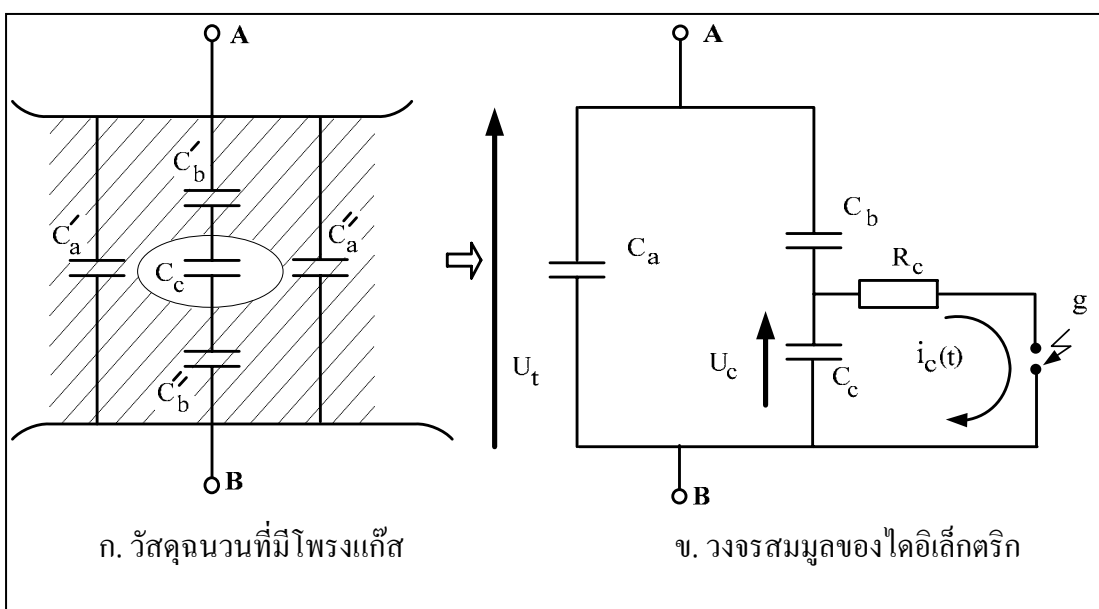
โดยที่ค่า



$$C_a \gg C_c \gg C_b \quad (3.5)$$

จากเหตุผลในสมการ (3.5) ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ  $C_t$  จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ  $C_a$  ซึ่งมีค่ามากกว่า  $C_b$  มาก ๆ นั่นคือ

$$C_t = \frac{C_b C_c}{C_b + C_c} + C_a \approx C_a \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.8 วงจรสมมูลของวัสดุที่มีโพรงแก๊สและเกิดดีสชาร์จบางส่วนภายใน (Kuffel, 1984)

ถ้าป้อนแรงดัน  $U_t$  ที่ขั้ว A - B ทำให้แรงดันตกคร่อมโพรงแก๊สมีค่าสูงกว่าค่าแรงดัน เบรกควาน์ของโพรงแก๊ส(แทนด้วย  $C_c$ ) ก็จะเกิดเบรกควาน์ในโพรงแก๊ส ซึ่งเขียนแทนด้วยแกป  $g$  (แล้วเอาตัวจ่ายแรงดันออก) มีความต้านทาน  $R_c$  ต่ออนุกรมอยู่เป็นตัวจำกัดกระแสดีสชาร์จ  $i_c(t)$  ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ ซึ่งมีช่วงกว้างเป็นนาโนวินาที และทำให้เกิดแรงดันตก  $\delta U_c$  ประจุที่ปล่อยออกมาจากโพรงแก๊สมีค่าเท่ากับ

$$\delta q_c = \delta U_c \quad (3.7)$$

กระแส  $i_c(t)$  ที่ไหลอยู่ภายในไม่สามารถวัดได้ แต่การดีสชาร์จของ  $C_c$  ทำให้เกิดการถ่ายเทประจุของ  $C_b$  และ  $C_a$  ในวงจรสมมูล เป็นผลให้เกิดแรงดันตกที่ขั้ว A – B เท่ากับ  $\delta U_t$  ซึ่งหาได้จาก

$$\delta U_t = \frac{C_b \delta U_c}{C_b + C_a} \quad (3.8)$$

ค่าแรงดันตกไม่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับ  $\delta q_c$  เลย แต่เป็นสัดส่วนกับ  $C_b \delta U_c$  ค่า  $\delta U_t$  ที่วัดได้เป็นพัลส์รูปซันและขึ้นอยู่กับการดีสชาร์จของ  $C_c$  เมื่อแทนค่า

$$\delta U_c = \frac{\delta q_c}{C_c} \quad (3.9)$$

จะได้ว่า

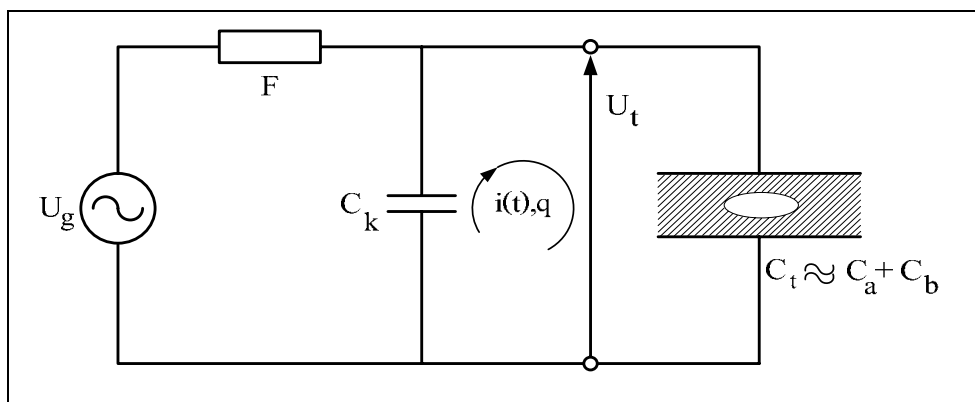
$$\delta U_t = \frac{C_b \delta q_c}{C_c (C_b + C_a)} \quad (3.10)$$

ค่าของ  $\delta U_t$  มีค่าเป็น mV ถึง V ในขณะที่  $\delta U_c$  มีค่าเป็น kV แต่โดยที่ไม่ทราบค่า  $C_c$  และ  $C_b$  จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของ  $\delta U_t$  กับ  $\delta U_c$  และ  $\delta q_c$  ได้ อย่างไรก็ตาม การเกิดดีสชาร์จในโพรงแก๊สจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงถ่ายเทประจุหรือกระแสในวงจรภายนอกที่สามารถตรวจวัดได้ สำหรับดีสชาร์จบางส่วนชนิดอื่น ๆ ก็สามารถเขียนวงจรสมมูลได้

### 3.3.4 ประจุที่ปรากฏและประจุที่วัดได้

เนื่องจากดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นภายในฉนวน หรือภายในอุปกรณ์ที่หุ้มห่อมิดชิด ฉะนั้น ประจุหรือกระแสที่เกิดจากดีสชาร์จในโพรงแก๊สนั้นไม่สามารถวัดได้ แต่การดีสชาร์จในโพรงแก๊ส  $C_c$  ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทประจุ เป็นผลให้เกิดแรงดันตก  $\delta U_t$  ที่ขั้วป้อนแรงดันภายนอก A – B การเคลื่อนที่ของประจุหรือเกิดกระแสไหลวนอันเนื่องมาจากแรงดันตก เป็นค่ากระแส

ชดเชยที่วัดได้ (measurable current)  $i(t)$  (แต่มีใช้กระแสหรือประจุที่เกิดขึ้นจริงภายในโพรงแก๊ส)  
 ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 คีสาร์จบางส่วนในโพรงแก๊สในวัสดุฉนวน

โดยที่  $U_g$  คือ ตัวจ่ายแรงดันป้อนให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  และวัสดุทดสอบ  $C_t$

$C_k$  คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

$C_t$  คือ ค่าเก็บประจุของวัสดุทดสอบประกอบด้วย  $C_a$   $C_b$  และ  $C_c$

$i(t), q$  คือ กระแสพัลส์คีสาร์จบางส่วนที่ถ่ายทอดระหว่าง  $C_k$  กับ  $C_t$

เพื่อชดเชยแรงดันที่ตกไป  $\delta U_t$  คร่อม  $C_t \approx (C_a + C_b)$

ค่ากระแสไหลวน  $i(t)$  ที่วัดได้นี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนค่าเก็บประจุ  $C_k/C_t$  เพราะประจุจะเคลื่อนที่จากตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  ที่ชดเชยแรงดันตก  $\delta U_t$  ในกรณีอุดมคติ  $C_k \gg C_t$  และ  $C_t \approx (C_a + C_b)$  ประจุ  $q$  จะมีมากที่สุด

ถ้า  $C_k \gg C_t$  ค่า  $\delta U_t$  จะได้รับชดเชยสมบูรณ์และประจุที่ถ่ายเทก็คือ  $i(t)$

ประจุถ่ายเทหาได้จากสมการ

$$q = \int i(t) dt = \left\{ C_a + \frac{C_c \cdot C_b}{C_c + C_b} \right\} \delta U_t \quad (3.11)$$

เพราะว่า  $C_b < C_c$  จึงได้

$$q = (C_a + C_b)\delta U_t \quad (3.12)$$

เมื่อแทนค่าจากสมการ (3.10)

$$q = \frac{C_b}{C_c} \delta q_c \quad (3.13)$$

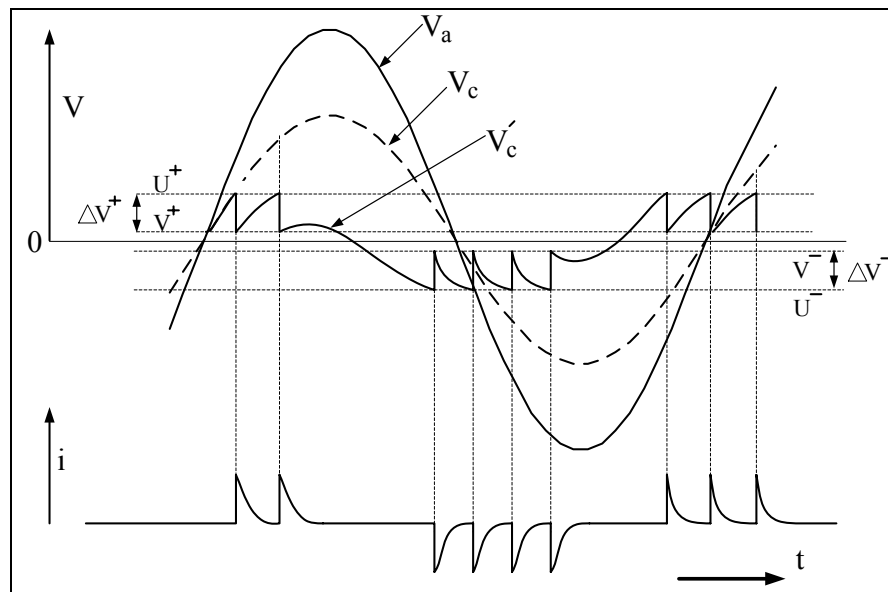
ประจุ  $q$  นี้เรียกว่า ประจุที่ปรากฏของพลัสดีสชาร์จบางส่วน เพราะว่าประจุ  $q$  นี้ไม่เท่ากับประจุที่เกิดขึ้นจริงในโพรงแก๊ส แต่สัมพันธ์กับ  $\delta q_c$  ด้วยอัตราส่วนของ  $C_b/C_c$  และเป็นพื้นฐานของการวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนที่มีความเป็นจริงมากกว่า  $\delta U_t$

### 3.3.5 ธรรมชาติของการเกิดดีสชาร์จ

#### ลักษณะการเกิดดีสชาร์จซ้ำ

ในทางปฏิบัติดีสชาร์จบางส่วนอาจเกิดซ้ำ ๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยที่  $V_a$  คือแรงดันคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์  $V_c$  คือแรงดันคร่อมโพรงแก๊สถ้าไม่มีการเกิดดีสชาร์จบางส่วน ส่วน  $V_c'$  คือแรงดันคร่อมโพรงแก๊สซึ่งมีการเกิด ดีสชาร์จบางส่วน และ  $i$  คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ตามลำดับ  $U$  คือแรงดันเบรกคาว์นของโพรงแก๊ส  $V$  คือแรงดันหลังเบรกคาว์นของโพรงแก๊ส

ในรูปที่ 3.10 แสดงลักษณะการเกิดดีสชาร์จซ้ำอธิบายได้ว่า แรงดันคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์หรือวัสดุทดสอบ  $V_a$  แรงดันคร่อมโพรงแก๊สถ้าไม่มีการเกิดดีสชาร์จบางส่วน  $V_c$  ถ้าแรงดัน  $V_c$  ในช่วงครึ่งบวกมีการเพิ่มขึ้นจนถึงแรงดันเบรกคาว์น  $U^+$  ดีสชาร์จก็จะเกิดในโพรงแก๊ส(หรือฉนวนส่วนที่บกพร่อง) ต่อจากนั้นแรงดันดังกล่าวนี้จะลดลงเป็น  $V^+$  ทำให้ไม่เกิดดีสชาร์จ ช่วงเวลาในการลดลงของแรงดัน  $U^+$  มาเป็น  $V^+$  มีค่าน้อยกว่า 100 ns หลังจากที่ไม่เกิดดีสชาร์จในโพรงแก๊สแล้ว แรงดันที่คร่อมโพรงแก๊สก็จะเพิ่มขึ้นอีกครั้งและเพิ่มจนกระทั่งถึงแรงดันเบรกคาว์น  $U^+$  ก็จะทำให้ดีสชาร์จในโพรงแก๊สก็เกิดอีกครั้ง เหตุการณ์การเกิดดีสชาร์จเช่นนี้อาจเกิดขึ้นได้หลายครั้งจนกว่าแรงดัน  $V_c$  ที่เพิ่มขึ้นไม่มากพอที่จะเกิดดีสชาร์จ สำหรับลักษณะการเกิดดีสชาร์จบางส่วนเมื่อแรงดัน  $V_a$  ในช่วงครึ่งลบนั้นคือถ้าแรงดัน  $V_c$  เพิ่มถึงแรงดันเบรกคาว์น  $U^-$  ก็จะทำให้ดีสชาร์จในโพรงแก๊ส ต่อจากนั้นแรงดันดังกล่าวนี้จะลดลงเป็น  $V^-$  ดีสชาร์จก็จะไม่เกิด และลักษณะการเกิดดีสชาร์จก็จะเหมือนกับการเกิดดีสชาร์จของแรงดันในช่วงครึ่งบวก



รูปที่ 3.10 แรงดันตกคร่อมโพรงแก๊สและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD

*แรงดันดีสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดและแรงดันดีสชาร์จบางส่วนไม่เกิด*

แรงดันดีสชาร์จบางส่วนเริ่มเกิดและแรงดันดีสชาร์จบางส่วนไม่เกิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น การกระจายแรงดัน อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น เป็นต้น นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นฉนวนของตัวฉนวนไฟฟ้า

### 3.3.6 การตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน

การตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการประเมินอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้า เมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วนนอกจากจะเกิดเหตุการณ์ทางไฟฟ้าแล้วยังเกิดความร้อน แสง เสียงและปฏิกิริยาทางเคมี การตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนสามารถแบ่งตามสิ่งที่เกิดจากการดีสชาร์จบางส่วนได้แบบหลักเป็น 2 ประเภทได้แก่

(1) การตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนที่ไม่เป็นทางไฟฟ้า (non electrical discharge detection) สามารถใช้สำหรับการตรวจวัดการเกิดดีสชาร์จบางส่วนได้ แต่วิธีการตรวจวัดที่ไม่เป็นทางไฟฟ้านี้ไม่สามารถใช้สำหรับการวัดขนาดของดีสชาร์จบางส่วนได้ สิ่งที่สามารถตรวจวัดด้วยวิธีการตรวจวัดที่ไม่เป็นทางไฟฟ้าได้แก่ ข้อมูลทางเคมี ความดันแก๊ส ความร้อนเสียงและแสง

(2) การตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนที่เป็นทางไฟฟ้า (electrical discharge detection) จะมุ่งให้ความสนใจเกี่ยวกับการวัดแรงดันหรือกระแสไฟฟ้ารวมถึงความถี่และประจุ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

นอกจากการแบ่งประเภทของการตรวจวัดคิซซาร์จบางส่วนตามสิ่งที่ต้องการตรวจวัดว่าเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าหรือไม่เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วนั้นยังสามารถแบ่งตามช่วงของการใช้งานอุปกรณ์นั้น ๆ สามารถแบ่งได้เป็น

- การตรวจวัดคิซซาร์จบางส่วน ในขณะที่อุปกรณ์ต้องหยุดทำงาน (off line partial discharge monitoring)

- การตรวจวัดคิซซาร์จบางส่วน ในขณะที่อุปกรณ์กำลังทำงานตามปกติ (On line partial discharge monitoring)

สำหรับการตรวจวัดคิซซาร์จบางส่วน ในขณะที่อุปกรณ์กำลังทำงานตามปกติ (คิซซาร์จบางส่วนจะเกิดขึ้นในกรณีที่มีการจ่ายแรงดันให้กับอุปกรณ์) เป็นวิธีที่สามารถตรวจคิซซาร์จบางส่วนได้ตลอดเวลาในขณะที่อุปกรณ์กำลังทำงานและสามารถรายงานผลได้ในขณะเกิดคิซซาร์จบางส่วน ตัวอย่างเช่น การตรวจวัดคิซซาร์จบางส่วนในขณะที่อุปกรณ์กำลังทำงานตามปกติของหม้อแปลง ซึ่งสามารถใช้เซนเซอร์เสียง หรือใช้ทรานสดิวเซอร์กระแสแบบความถี่สูง ทำให้ได้ประโยชน์ที่สำคัญจากการตรวจวัดคิซซาร์จบางส่วนได้แก่ สามารถรู้สภาพความผิดปกติในหม้อแปลง ค่าความผิดปกติของสภาพฉนวน สามารถรู้พิกัดตำแหน่งหรือจุดที่เกิดปัญหา และสามารถบอกถึงความรุนแรงของปัญหาจากคิซซาร์จบางส่วน เป็นต้น

เมื่อการเกิดคิซซาร์จบางส่วนในฉนวนไฟฟ้าก็มักจะมีการแพร่ของหลายสัญญาณ ได้แก่สัญญาณทางไฟฟ้า สัญญาณเสียง สัญญาณแสง เกิดความร้อนและเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เกิดความดันแก๊สเพิ่มสูงขึ้น สัญญาณต่าง ๆ เหล่านี้เป็นหนทางสำหรับการตรวจวัดคิซซาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นในการตรวจวัดคิซซาร์จบางส่วนในหม้อแปลงก็จะทำได้โดยการตรวจวัดสัญญาณต่าง ๆ และสิ่งที่เกิดขึ้น

การตรวจวัดคิซซาร์จบางส่วนในหม้อแปลงแบ่งได้ 3 แบบได้แก่

1. การตรวจวัดทางเคมี (chemical detection)
2. การตรวจวัดทางไฟฟ้า (electrical detection)
3. การตรวจวัดทางอะคูสติก (acoustic detection)

เมื่อเกิดคิซซาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง ก็จะก่อให้เกิดผลต่อคุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลงในทางที่ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพการเป็นฉนวน ซึ่งนำไปสู่ความเสียหายแก่หม้อแปลง ดังนั้นถ้าสามารถตรวจวัดการเกิดคิซซาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง ก็จะเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงได้ คิซซาร์จบางส่วนในหม้อแปลงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถนำไปสู่ความขัดข้องของหม้อแปลง ยิ่งไปกว่านั้นยังนำไปสู่การหยุดชะงักของระบบและการซ่อมบำรุงที่ราคาแพง ดังนั้นการตรวจวัดคิซซาร์จบางส่วนของหม้อแปลงจึงเป็นวิธีที่มี

ประสิทธิภาพสำหรับการประเมินคุณสมบัติของฉนวนต่อการใช้งาน และยังเป็นการหลีกเลี่ยงความผิดพลาดของหม้อแปลง

#### การตรวจวัดทางเคมี

ผลอย่างหนึ่งของการเกิดดีสารจางบางส่วนคือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของวัสดุหรือฉนวน เช่น น้ำมันหม้อแปลงและแก๊ส SF<sub>6</sub> ข้อจำกัดของวิธีการตรวจวัดทางเคมีคือจะไม่ให้ข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของการเกิดดีสารจางบางส่วนหรือขนาดของการทำลายฉนวน โดยเป็นการตรวจวัดสิ่งที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมี เช่นวิธีการวัดแก๊สละลาย (dissolved gas analysis : DGA) ซึ่งเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ และเชื่อถือได้ในการตรวจวัดสิ่งที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ข้อมูลที่ได้จากวิธี DGA นี้จะเป็นชนิดของแก๊สที่เกิดจากการทดสอบ (ทดสอบทางความร้อน หรือการทดสอบด้วยดีสารจางบางส่วน)

ตารางที่ 3.2 ผลการทำ DGA สำหรับดีสารจางพลังงานต่ำและโคโรนาดีสารจางในฉนวนน้ำมัน

Oil type sample	Mineral oil			Natural ester		
	C	LEDT	CDT	C	LEDT	CDT
H <sub>2</sub>	5	901	20	8	191	23
CH <sub>4</sub>	1	145	2	1	14	2
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0	24	0	2	10	1
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1	270	2	1	63	2
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	1540	2	6	280	2
CO	18	6	2	6	51	8
TDCG	26	2886	28	24	609	38

หมายเหตุ : TDGC: The total concentration of the six combustible gases (H<sub>2</sub>,CH<sub>4</sub>,C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>,C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) in ppm. (Control samples; Low energy arc-discharge test. ; Corona type discharge test.) (Khan, Wang, Cotton, and Northcote, 2007).

ในการอธิบายผลของ DGA ตามมาตรฐาน IEEE และ มาตรฐาน IEC ได้กำหนดวิธีสำหรับการประเมินชนิดความบกพร่องโดยขึ้นอยู่กับแก๊สที่พบที่เพิ่มขึ้น วิธีที่ใช้สำหรับการประเมินได้แก่ (1) วิธีแก๊สหลัก (Key Gases) (2) วิธีอัตราส่วน โรเจอร์ (Rogers Ratio) (3) วิธี IEC (4) วิธี โมนอกราฟ (Nomograph) (5) วิธีสามเหลี่ยมดูวัล (Duval Triangle) และ (6) วิธี Doernenburg Ratio วิธีการประเมินสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ ประเภทแรกเป็น

วิธีซึ่งใช้อัตราส่วนแก๊สในการระบุชนิดของความบกพร่อง ประเภทที่สองเป็นวิธีซึ่งใช้ค่าโดยตรงของแก๊สในการระบุชนิดของความบกพร่อง

ตัวอย่างประเภทแรกคือ วิธีอัตราส่วน โรเจอร์ การระบุความบกพร่องถูกทำให้รู้ผลโดยแผนผังรหัสอย่างง่ายบนพื้นฐานช่วงของอัตราส่วน ดังตารางที่ 3.3 และตารางที่ 3.4 และสำหรับการประเมินของวิธีอัตราส่วน โรเจอร์ นั้นหม้อแปลงไฟฟ้าจะถูกพิจารณาว่ามีการเกิดดีสชาร์จบางส่วนสามารถพิจารณาตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.3 รหัสอัตราส่วนแก๊ส

อัตราส่วนแก๊ส	รหัสอัตราส่วน
$\text{CH}_4/\text{H}_2$	i
$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	j
$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	k
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	l

ตารางที่ 3.4 รหัสอัตราส่วน โรเจอร์

รหัสอัตราส่วน	ช่วงค่าของรหัสอัตราส่วน	รหัส
i	$i \leq 0.1$	5
	$0.1 < i < 1.0$	0
	$1.0 \leq i < 3.0$	1
	$i \geq 3.0$	2
j	$j < 1.0$	0
	$j \geq 1.0$	1
k	$k < 1.0$	0
	$1.0 \leq k < 3.0$	1
	$k \geq 3.0$	2
l	$l < 0.5$	0
	$0.5 \leq l < 3.0$	1
	$l \geq 3.0$	2



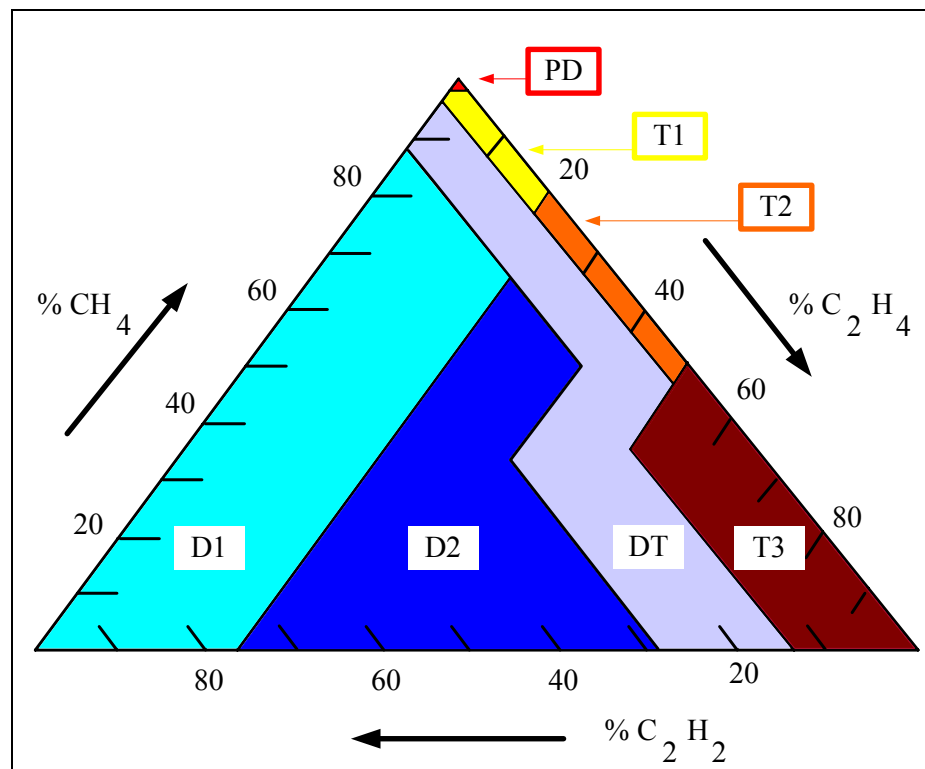
ตารางที่ 3.5 ผลลัพธ์รหัสอัตราส่วนโรเจอร์สำหรับคิสซาร์จบางส่วน

i	j	k	l	ประเภทความผิดปกติ
5	0	0	0	คิสซาร์จบางส่วน
5	0	0	1-2	คิสซาร์จบางส่วนด้วย tracking CO

ตัวอย่างประเภทที่สองคือ วิธีสามเหลี่ยมคูวัล เป็นวิธีซึ่งใช้ค่าของแก๊สในการประเมิน การระบุชนิดความบกพร่องจะถูกหาโดยการคำนวณปริมาณสะสมทั้งหมดของสามแก๊ส ในหน่วยส่วนในล้านส่วน (ppm) (แก๊ส  $\text{CH}_4$  แก๊ส  $\text{C}_2\text{H}_2$  และ แก๊ส  $\text{C}_2\text{H}_4$ ) แล้วนำปริมาณของแต่ละแก๊สหารด้วยปริมาณสะสมทั้งหมดของสามแก๊สเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ของแต่ละแก๊ส จากนั้นนำค่าเปอร์เซ็นต์ของทั้งสามแก๊สมาพิจารณาด้วย สามเหลี่ยมคูวัล สำหรับในการวิเคราะห์การเกิดคิสซาร์จบางส่วน ถ้าเปอร์เซ็นต์ของแก๊ส  $\text{CH}_4$  มากกว่า 99% เปอร์เซ็นต์ของแก๊ส  $\text{C}_2\text{H}_2$  รวมกับแก๊ส  $\text{C}_2\text{H}_4$  มีค่า น้อยกว่า 1% แสดงว่าเกิดคิสซาร์จบางส่วนในหม้อแปลง

การคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์ของแก๊ส  $\text{CH}_4$   $\text{C}_2\text{H}_2$  และ  $\text{C}_2\text{H}_4$  เพื่อใช้กับสามเหลี่ยมคูวัล โดยมีบริเวณดังต่อไปนี้

- ค่าเปอร์เซ็นต์ของแก๊ส  $\text{CH}_4 = \text{CH}_4 / (\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_4)$
- ค่าเปอร์เซ็นต์ของแก๊ส  $\text{C}_2\text{H}_2 = \text{C}_2\text{H}_2 / (\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_4)$
- ค่าเปอร์เซ็นต์ของแก๊ส  $\text{C}_2\text{H}_4 = \text{C}_2\text{H}_4 / (\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_4)$



รูปที่ 3.11 ผังสำหรับการวิเคราะห์วิธีสามเหลี่ยมควัด

โดยแบ่งพื้นที่ของสามเหลี่ยมเป็น

- PD = คีลซาร์จบางส่วน
- T1 = บกพร่องทางความร้อนที่น้อยกว่า 300 °C
- T2 = บกพร่องทางความร้อนระหว่าง 300 °C ถึง 700 °C
- T3 = บกพร่องทางความร้อนที่มากกว่า 700 °C
- D1 = คีลซาร์จพลังงานต่ำ (sparking)
- D2 = คีลซาร์จพลังงานสูง (arcing)
- DT = บกพร่องทั้งทางความร้อนและทางไฟฟ้า

การตรวจวัดทางไฟฟ้า

ให้ความสนใจการตรวจจับพัลส์ทางไฟฟ้าสิ่งซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยกระแสตรีมเมอร์ (current streamer) วิธีการตรวจวัดทางไฟฟ้าประกอบด้วย 2 วิธีคือ

ก. วิธีวัดกระแสพัลส์ (pulse current method) วิธีนี้จะได้รับข้อมูลเกี่ยวกับประจุ โดยการตรวจหากระแสคีลซาร์จบางส่วนในการตรวจวัดอิมพีแดนซ์ สายดินและขดลวด วิธีนี้ง่าย สำหรับการวัดที่เกี่ยวกับปริมาณ และมีความไวในการตอบสนองสูง แต่วิธีนี้ก็มีข้อเสียหลักอยู่

3 ประการ คือประการแรก การวัดของวิธีนี้ทำให้สัญญาณที่วัดได้ผิดพลาดสูงขึ้นตามด้วย ประการที่สองวิธีนี้ให้ความสนใจกับการต่อเชื่อมสายดินของหม้อแปลง ซึ่งจะสร้างกระแสไฟฟ้าขึ้นถ้าหม้อแปลงเกิดดีสชาร์จบางส่วน แต่อุปกรณ์ส่วนใหญ่ไม่สามารถที่ใช้วิธีนี้ได้ ประการที่สาม เป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเฝ้าเดือนที่ยาวนาน (long - term monitoring) ของหม้อแปลง เพราะมีราคาแพง

ข. วิธีการตรวจวัดความถี่ย่านความถี่สูงยิ่ง (ultra high frequency method : UHF) เป็นวิธีการตรวจวัดซึ่งอยู่บนพื้นฐานการตรวจวัดของเรโซแนนซ์ทางไฟฟ้าที่ความถี่สูงกว่า 1.5 GHz ซึ่งทำให้เกิดจากการกระตุ้นของดีสชาร์จบางส่วน โดยใช้เซนเซอร์ UHF อย่างไรก็ตามวิธี UHF ก็มีข้อจำกัดเช่นกัน คือความอ่อนไหวต่อสัญญาณรบกวน วิธี UHF ถูกประยุกต์ใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าในเรื่องของการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน การระบุตำแหน่งดีสชาร์จบางส่วน การวิเคราะห์และการแจ้งเตือนดีสชาร์จบางส่วน และในการตรวจวัดสัญญาณ ดีสชาร์จบางส่วนที่แพร่ผ่านฉนวนแข็งด้วยวิธี UHF พบว่ามีความไวมากกว่าวิธีการตรวจวัดทางคลื่นเสียง

#### *การตรวจวัดทางคลื่นเสียง*

การตรวจวัดทางคลื่นเสียงของดีสชาร์จบางส่วนอยู่บนพื้นฐานการตรวจวัดของการแพร่ของคลื่นเชิงกลจากตำแหน่งการเกิดดีสชาร์จแพร่ออกไปรอบ ๆ ข้อดีของวิธีการตรวจวัดทางคลื่นเสียงที่มีมากกว่าการตรวจวัดทางเคมีและการตรวจวัดทางไฟฟ้าคือ การตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนด้วยวิธีการตรวจวัดทางคลื่นเสียงจะได้ข้อมูลของตำแหน่งการเกิดดีสชาร์จบางส่วน โดยใช้ระบบการวัดซึ่งใช้เซนเซอร์ติดตั้งในหลายตำแหน่งที่ต้องการตรวจวัด โดยในระบบการวัดนั้นจะต้องทราบตำแหน่งการติดตั้งของเซนเซอร์ (X, Y, Z) ดังรูปที่ 3.12 ในการค้นหาตำแหน่งที่เกิดดีสชาร์จบางส่วน โดยการหาผลเฉลยของสมการด้วยวิธีการวนรอบ (iterative) หรือใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ โดยที่ระยะห่างระหว่างตำแหน่งเกิดดีสชาร์จบางส่วนกับเซนเซอร์แต่ละตัวมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$L_1 = v_s T_1 = v_s T \quad (3.14)$$

$$L_2 = v_s T_2 = v_s (T + \tau_{12}) \quad (3.15)$$

$$L_3 = v_s T_3 = v_s (T + \tau_{13}) \quad (3.16)$$

$$L_4 = v_s T_4 = v_s (T + \tau_{14}) \quad (3.17)$$

โดยที่  $T_n$  คือ เวลาการแพร่ของสัญญาณจากจุดเกิดดิสซาร์จบางส่วนถึงเซนเซอร์  $S_n$

$\tau_{1n}$  คือ หน่วงเวลาระหว่างเซนเซอร์  $S_1$  กับ  $S_n$

$v_s$  คือ ความเร็วของการแพร่ในน้ำมัน

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่เกิดดิสซาร์จบางส่วนกับเซนเซอร์แต่ละตำแหน่ง

$$(x - x_{s1})^2 + (y - y_{s1})^2 + (z - z_{s1})^2 = (v_s T)^2 \quad (3.18)$$

$$(x - x_{s2})^2 + (y - y_{s2})^2 + (z - z_{s2})^2 = (v_s (T + \tau_{12}))^2 \quad (3.19)$$

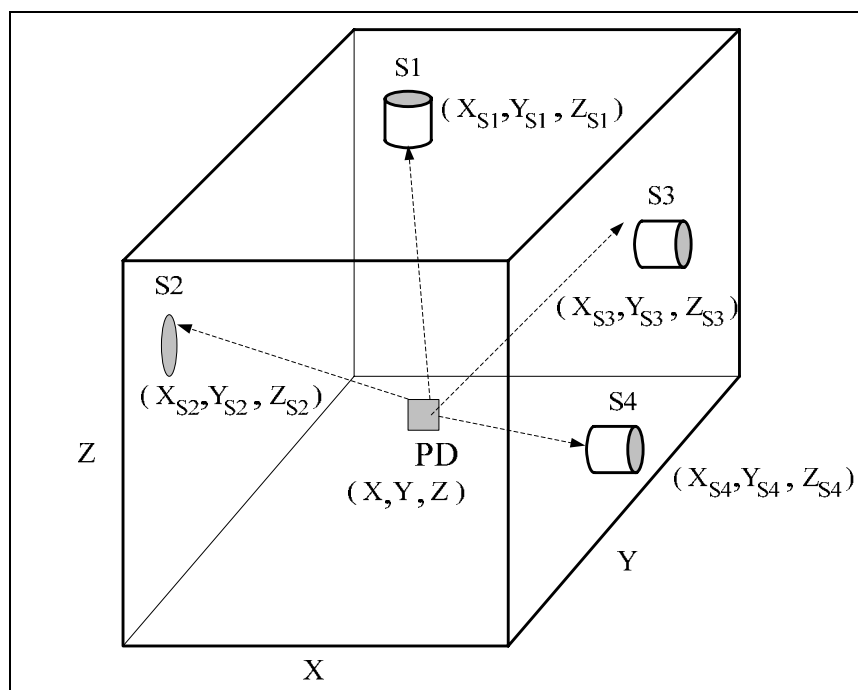
$$(x - x_{s3})^2 + (y - y_{s3})^2 + (z - z_{s3})^2 = (v_s (T + \tau_{13}))^2 \quad (3.20)$$

$$(x - x_{s4})^2 + (y - y_{s4})^2 + (z - z_{s4})^2 = (v_s (T + \tau_{14}))^2 \quad (3.21)$$

ตารางที่ 3.6 ความเร็วของเสียงในน้ำมันหม้อแปลง

อุณหภูมิของน้ำมันหม้อแปลง ( $^{\circ}\text{C}$ )	ความเร็ว (m/s)
20	1413
25	1400
50	1300
80	1200
110	1100

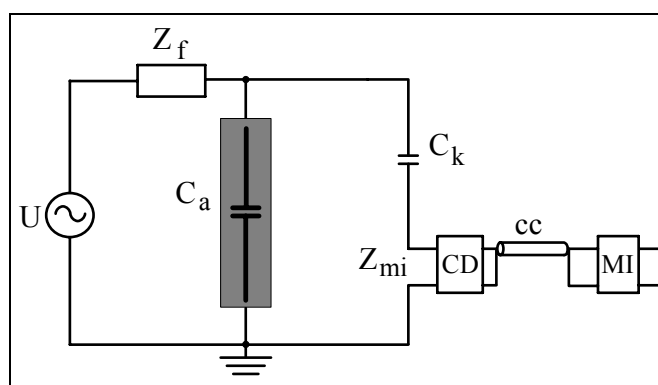
ระบบการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีการตรวจวัดทางคลื่นเสียงดังแสดงในรูปที่ 3.12 เป็นระบบการตรวจวัดที่ต้องการรู้ตำแหน่งการเกิดดิสซาร์จบางส่วนในถัง โดยทำการติดตั้งเซนเซอร์รับสัญญาณตามตำแหน่งที่ต้องการ การกำหนดลำดับเซนเซอร์ ( $S_1 S_2 S_3 \dots S_n$ ) จะกำหนดโดยถ้าเซนเซอร์ตำแหน่งใดรับสัญญาณได้ก่อนเซนเซอร์ตำแหน่งอื่น ๆ ก็จะถูกกำหนดให้เป็นเซนเซอร์ตัวที่หนึ่ง ส่วนเซนเซอร์ตำแหน่งที่เหลือก็จะเรียงตามลำดับ



รูปที่ 3.12 ระบบการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีการตรวจวัดทางคลื่นเสียง

### 3.3.7 วงจรพื้นฐานการวัดดิสซาร์จบางส่วนโดยวิธีการตรวจวัดทางไฟฟ้า

ดิสซาร์จบางส่วนทำให้เกิดรูปแบบของกระแสพัลส์ในตัวนำของวัสดุทดสอบ วงจรพื้นฐานสำหรับการวัดดิสซาร์จบางส่วน ซึ่งเป็นวิธีตรวจวัดทางไฟฟ้าดังรูปที่ 3.13 ประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.13 วงจรพื้นฐานการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วน

U คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสสลับ ซึ่งป้อนแรงดันให้กับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  และ วัสดุทดสอบ P

$Z_f$  คือ ตัวกรองประกอบด้วยอิมพีแดนซ์มีค่าสูงที่ความถี่สูง นั่นคือ ตัวกรองจะทำหน้าที่ป้องกันมิให้คลื่นรบกวนความถี่สูงจากแหล่งจ่ายเข้าไปรบกวนวงจรทดสอบ แต่ยอมให้กระแสทดสอบความถี่ต่ำไหลผ่านไปได้ ในขณะที่เดียวกันตัวกรองก็จะทำหน้าที่ป้องกันมิให้สัญญาณ ดิสชาร์จบางส่วนจากวัสดุทดสอบย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายแรงดัน

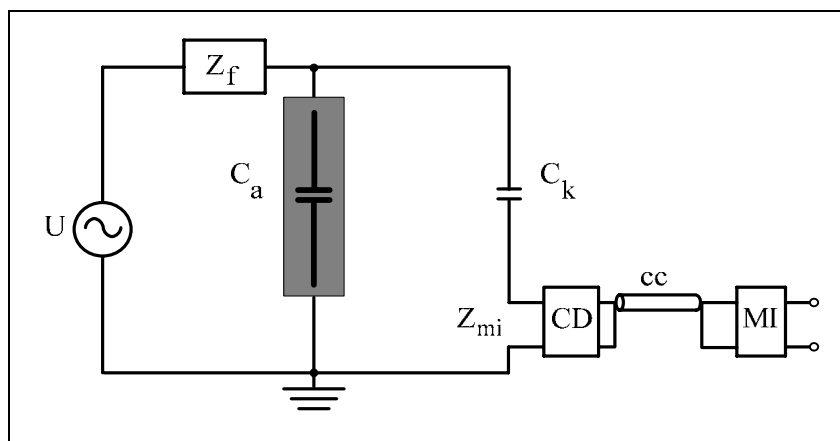
$C_k$  คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณเท่า ๆ กับความจุไฟฟ้าของวัสดุทดสอบหรือใหญ่กว่า ในทางปฏิบัติตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวจะมีค่าประมาณ 1000 pF เพื่อให้มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำพอที่จะทำให้กระแสดิสชาร์จบางส่วนซึ่งมีค่าน้อยกว่า 100  $\mu A$  และเป็นพัลส์แคบ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยวใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง  $C_a$   $C_k$  และ CD ดังนั้นตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว ต้องมีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำ และปราศจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ

ส่วนอุปกรณ์รับสัญญาณ หรือ อุปกรณ์คาบเกี่ยว (coupling device : CD) และเครื่องมือวัด(measuring instrument : MI) อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (integrate) กระแสพัลส์ที่ไหลในวงจรทดสอบอันเนื่องมาจากการเกิดดิสชาร์จบางส่วน โดยมีสายเคเบิล CC เป็นสายเชื่อมต่อระหว่าง CD และ MI หน้าที่อีกประการหนึ่งของอุปกรณ์รับสัญญาณคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ และฮาร์โมนิกส์จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบไม่ให้เข้าสู่เครื่องมือวัด ส่วนเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่ 3 ประการคือ *ประการที่หนึ่ง* เป็นวงจรขยายสัญญาณ *ประการที่สอง* เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ *ประการที่สาม* เป็นอุปกรณ์แสดงผลดิสชาร์จบางส่วน

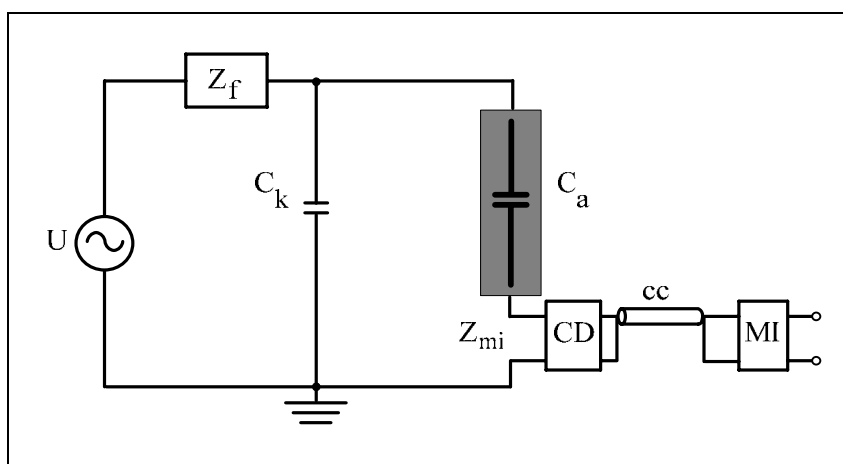
หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน เริ่มจากป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย U ผ่านตัวกรอง  $Z_f$  ให้กับวงจรทดสอบ โดยในการป้อนแรงดันนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มจนกระทั่งเกิดดิสชาร์จบางส่วนที่วัสดุทดสอบ  $C_a$  (ถ้าฉนวนนั้นมีความบกพร่อง) ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของวัสดุทดสอบ  $C_a$  แล้ว ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  $C_k$  จะดิสชาร์จประจุไปที่วัสดุทดสอบ  $C_a$  เพื่อชดเชยแรงดันตกนั้น ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์  $i_i$  ไหลวนครบวงจรซึ่งประกอบด้วย  $C_k$   $C_a$  และ CD ดังนั้น CD และ MI วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง  $C_k$  กับ  $C_a$  โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์  $i_i$  เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

การต่อระบบวงจรระบบวัด ดิสชาร์จบางส่วนในวงจรทดสอบ จะมีความแตกต่างตรงที่การต่ออิมพีแดนซ์วัด  $Z_{mi}$  ซึ่งมาตรฐานการวัดดิสชาร์จบางส่วน IEC 60270 เรียกว่า อุปกรณ์คาบเกี่ยว (coupling device) CD ประกอบเป็นอิมพีแดนซ์  $Z_{mi}$  ต่อที่ต้นระบบวัดแบ่งเป็น 2 แบบ

ดังในรูปที่ 3.14 และ รูปที่ 3.15 ซึ่งเป็นวงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนวิธีตรง (straight detection circuit)



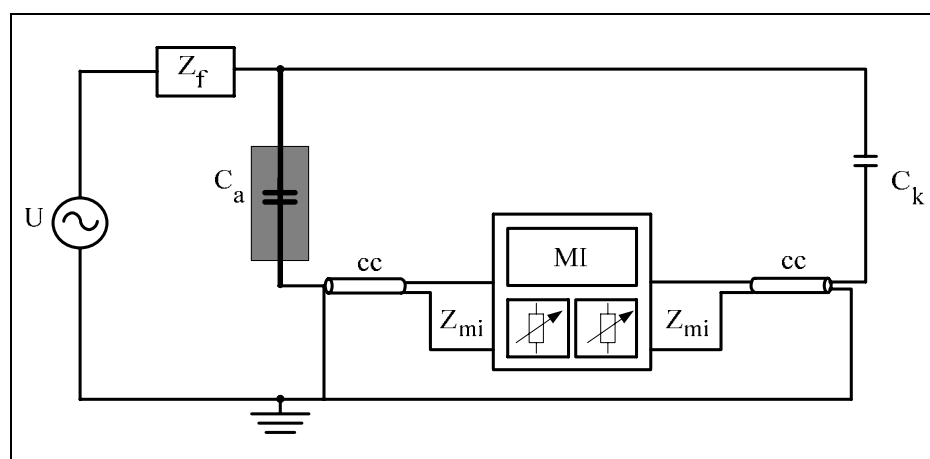
รูปที่ 3.14 วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนแบบอุปกรณ์คาบเกี่ยวต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว



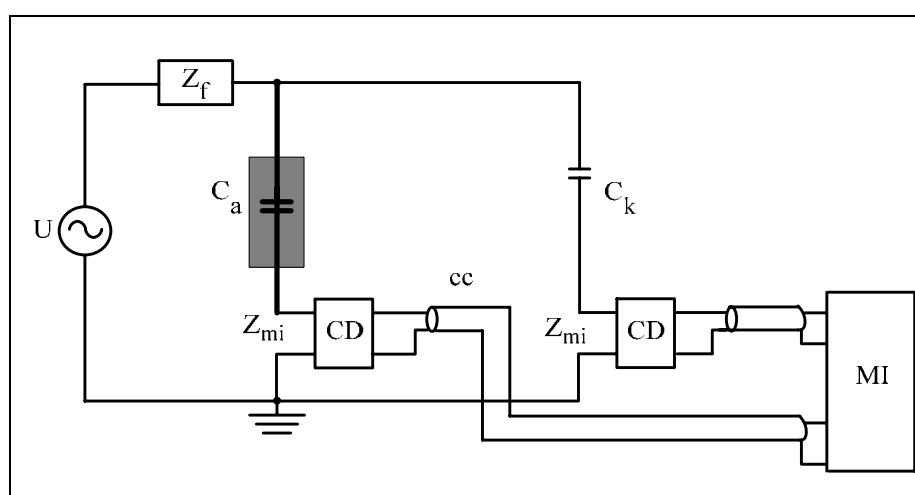
รูปที่ 3.15 วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนแบบอุปกรณ์คาบเกี่ยวต่ออนุกรมกับวัสดุทดสอบ

โดยที่ U คือ แหล่งจ่ายแรงดันสูง  
 CD คือ อุปกรณ์คาบเกี่ยว  
 $Z_f$  คือ ตัวกรอง

- CC คือ สายเคเบิลเชื่อมต่อ  
 $C_k$  คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว  
 $C_a$  คือ วัสดุทดสอบ  
 $Z_{mi}$  คือ อิมพีแดนซ์ป้อนเข้าของระบบตรวจวัด  
 MI คือ เครื่องมือตรวจวัด



รูปที่ 3.16 วงจรตรวจจับคี่สสารจึบงส่วนแบบวงจรทดสอบแบบสมดุล  
 (balanced circuit arrangement)



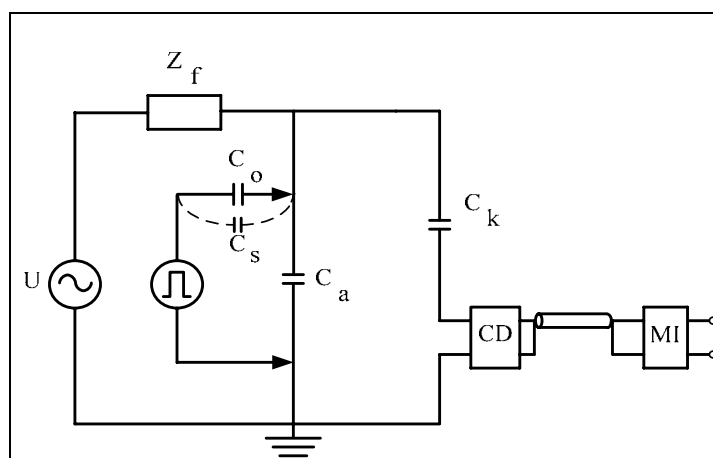
รูปที่ 3.17 วงจรตรวจจับคี่สสารจึบงส่วนแบบวงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณ  
 (polarity discrimination circuit arrangement)



วงจรรูปที่ 3.14 และวงจรรูปที่ 3.15 เป็นวงจรทดสอบแบบวิธีตรง ข้อดีของวงจรรูปที่ 3.14 คือขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบถูกต่อลงกราวด์โดยตรง ในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดการเบรกดาวน์อุปกรณ์รับสัญญาณจะไม่ได้ได้รับความเสียหายและเหมาะสมสำหรับทดสอบวัสดุทดสอบที่มีขั้วแรงดันต่ำหรือซิลด์หรือ screen ขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ซิลด์ของเคเบิลถูกต่อลงกราวด์ ข้อดีของวงจรรูปที่ 3.15 คือจะมีความไวสูงกว่าวงจรรูปที่ 3.14 เพราะใช้อุปกรณ์คาบเกี่ยวต่ออนุกรมกับวัสดุทดสอบ

วงจรรูปที่ 3.16 เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุล วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบคอมมอน โหมด (common mode) สำหรับวงจรรูปที่ 3.17 เป็นวงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณได้ มีข้อดีเช่นเดียวกับวงจรแบบสมดุลแต่มีความสามารถเพิ่มเติมในการแยกขั้วสัญญาณรบกวนจากภายนอกออกจากสัญญาณดีสซาร์จบางส่วนภายในวงจรทดสอบได้ ข้อเสียของวงจรรูปที่ 3.15 วงจรรูปที่ 3.16 และวงจรรูปที่ 3.17 คืออาจก่อให้เกิดเครื่องมือวัดเกิดความเสียหายในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดเบรกดาวน์ และไม่เหมาะในการทดสอบวัสดุทดสอบที่มีซิลด์ขนาดใหญ่ เนื่องจากซิลด์ไม่ได้ถูกต่อลงกราวด์โดยตรง ดังนั้นถ้ามีสัญญาณรบกวนที่ซิลด์จะทำให้ความไวในการตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วนลดลง

เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วนนั้นมีความแปรผันตามขนาดของตัวเก็บประจุคัปปลิงและวัสดุทดสอบ จึงต้องมีการปรับเทียบด้วยค่าดีสซาร์จบางส่วนมาตรฐานก่อนทำการป้อนแรงดันให้กับวงจรทดสอบ ทำได้โดยการใช้เครื่องปรับเทียบดีสซาร์จมาตรฐานป้อนกระแสพัลส์สั้น ๆ ที่มีประจุ  $q_{cal}$  ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.18

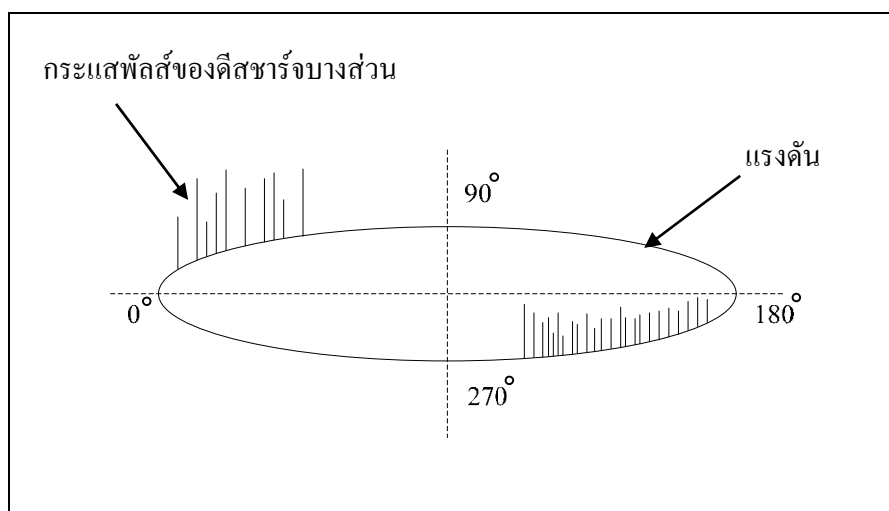


รูปที่ 3.18 วงจรสำหรับการปรับเทียบวงจรตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน

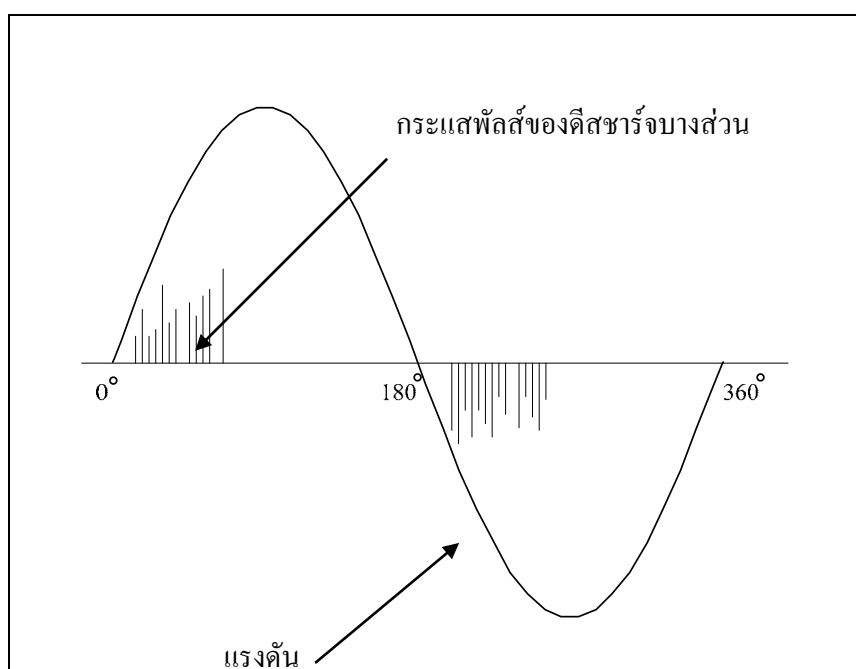
การเปรียบเทียบวงจรถดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรถดสอบ โดยใช้เครื่องเปรียบเทียบดิซาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้น ๆ ที่มีประจุ (pulse area)  $q_{cal}$  ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ถ้าเครื่องตรวจวัดดิซาร์จบางส่วนอ่านค่าดิซาร์จบางส่วนได้เท่ากับ  $a_1$  ดังนั้น สเกลแฟกเตอร์(scale factor)  $K_1 = q_{cal}/a_1$  หลังจากทำการปรับเปลี่ยนวงจรถดสอบเสร็จแล้วต้องเอาเครื่องเปรียบเทียบดิซาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรถดสอบ (ในกรณีที่  $c_0$  เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ) ในขณะที่ทำการทดสอบที่แรงดันตามมาตรฐานกำหนด ถ้าในขณะนั้นเครื่องตรวจวัดดิซาร์จบางส่วนอ่านค่าได้  $a_2$  ดังนั้นประจุที่ปรากฏของดิซาร์จบางส่วนคือ  $q = K_1 a_2$  และความไวของวงจรถดสอบ  $q_{min} = 2K_1 hn$  เมื่อ  $hn$  คือค่าสูงสุดของระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background noise) ที่อ่านจากเครื่องตรวจวัดดิซาร์จบางส่วน หลังการปรับเทียบก่อนการจ่ายแรงดันให้วงจรถดสอบ

#### การแสดงผลของดิซาร์จบางส่วน

การแสดงผลของดิซาร์จบางส่วนที่ได้จากการตรวจวัดทางไฟฟ้าสามารถทำได้โดยทางมิเตอร์ ทางออสซิลโลสโคปและทางเครื่องบันทึก การแสดงนั้นอาจแสดงได้ 2 แบบ คือแสดงรูปพัลส์ของดิซาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปวงรี หรือแสดงรูปพัลส์ของดิซาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์



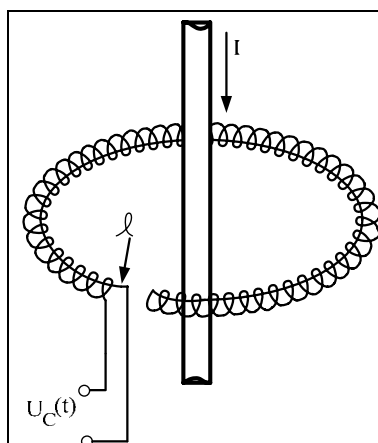
รูปที่ 3.19 การแสดงดิซาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปวงรี



รูปที่ 3.20 การแสดงคิซาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์

### 3.4 หลักการการวัดกระแสฟลักซ์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี

การวัดกระแสฟลักซ์ด้วยขดลวดโรกอฟสกี (Rogowski coil) เป็นการวัดกระแสโดยใช้หลักการของหม้อแปลงกระแส (CT) แบบพิเศษ กล่าวคือ โรกอฟสกีคอยล์เป็นอุปกรณ์วัดกระแสที่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทำให้เกิดการสร้างเส้นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กนี้ไปคล้องขดลวดที่พันรอบบนแกนที่ไม่เป็นแม่เหล็ก ซึ่งวางอยู่รอบตัวนำที่ต้องการวัดกระแสไหลผ่าน จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายขดลวดคือ  $U_c(t)$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของกระแส  $di_p/dt$  ค่าแรงดันที่วัดได้จะเป็นสัดส่วนกับรูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวนำนั้น ถ้าแรงดันเหนี่ยวนำนี้ผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสมก็จะได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการจะวัดได้อย่างถูกต้อง

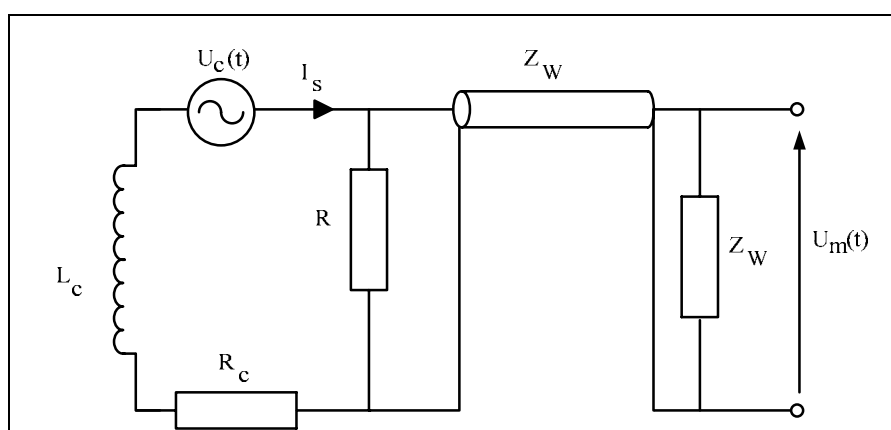


รูปที่ 3.21 ขดลวดโรกอฟสกี

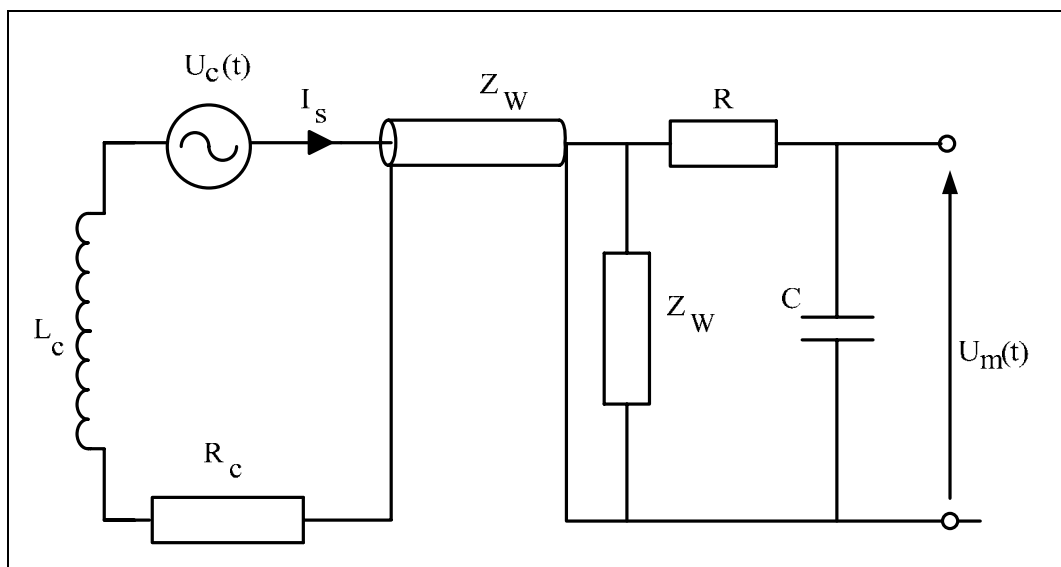
### 3.4.1 วงจรต่อต้านเอาต์พุตของขดลวดโรกอฟสกี

แรงดันขาออกของโรกอฟสกีคอยล์ขึ้นกับอิมพีแดนซ์ขาออกที่นำมาต่อเข้ากับโรกอฟสกีคอยล์ ซึ่งเป็นวงจรอินทิเกรตที่เป็นพาสซีฟ มีอยู่ 2 แบบ คือ แบบ LR อินทิเกรเตอร์ และ แบบ RC อินทิเกรเตอร์

1. แบบ LR อินทิเกรเตอร์ จะมีโพลคือเป็น  $R$  ซึ่งมีค่าต่ำ เมื่อเทียบกับค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด ดังรูปที่ 3.22
2. แบบ RC อินทิเกรเตอร์ จะเป็นวงจรที่มีความต้านทานสูง ( $R \gg Z_w$ ) ต่ออันดับอยู่กับตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 3.23



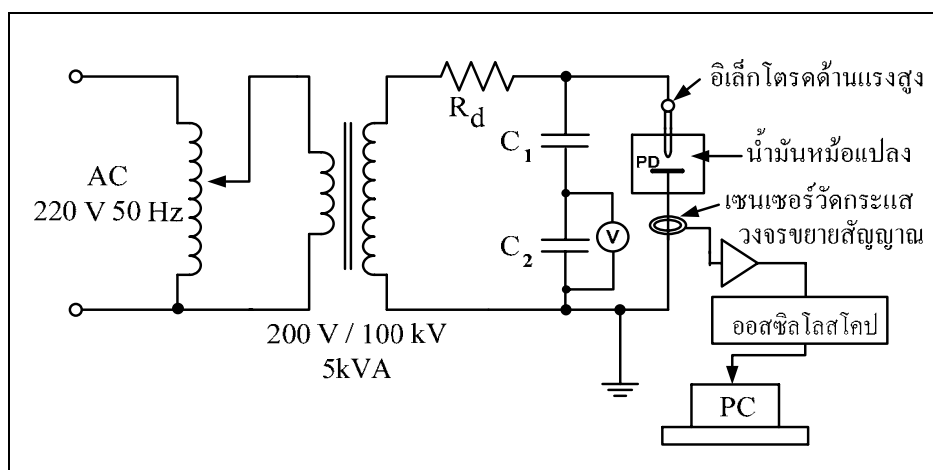
รูปที่ 3.22 ขดลวดโรกอฟสกีต่อด้วย LR อินทิเกรเตอร์



รูปที่ 3.23 ขดลวดโรกอฟสกีต่อด้วย RC อินทิเกรเตอร์

- โดยที่  $U_c$  = แรงดันเหนี่ยวนำ  
 $L_c$  = ความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกี  
 $R_c$  = ความต้านทานของขดลวดโรกอฟสกี  
 $R$  = ความต้านทานโหลด  
 $C$  = ตัวเก็บประจุ  
 $Z_w$  = เสรีจิมพีแดนซ์ของสายวัด  
 $U_m$  = แรงดันที่วัดได้

สำหรับการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนเป็นการทดสอบดิสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลงโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์พลาซม – ระบาย ซึ่งอยู่ภายในภาชนะบรรจุน้ำมันหม้อแปลง ดังรูปที่ 3.24



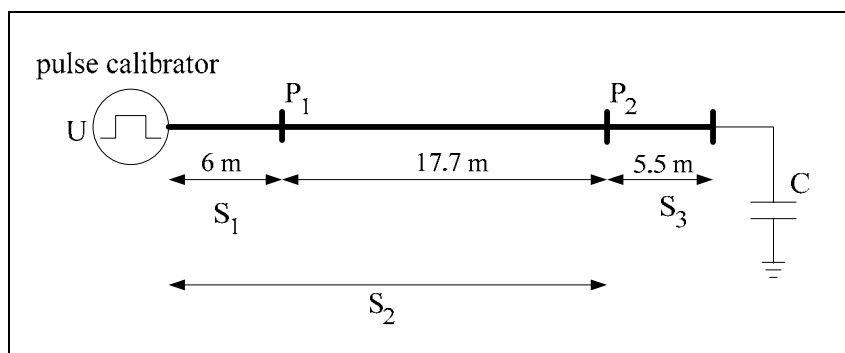
รูปที่ 3.24 วงจรการทดลองการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง

เมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง จะเกิดมีกระแสพัลส์ไหลไปยังกราวด์ ทำให้สามารถทำการวัดค่ากระแสดังกล่าวนี้ออกมาในรูปของแรงดันโดยใช้เซนเซอร์กระแส แต่ขนาดแรงดันที่ได้ที่วัดได้นั้นมีขนาดเล็ก และมีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย จึงทำการขยายสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยวงจรขยายสัญญาณ แล้วจึงทำการกรองสัญญาณรบกวนด้วยวงจรกรองความถี่สูง (high pass filter) จากนั้นจึงจะแสดงสัญญาณบนหน้าจอของออสซิลโลสโคปแล้วนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์

### 3.4.2 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานขดลวดโรกอฟสกี

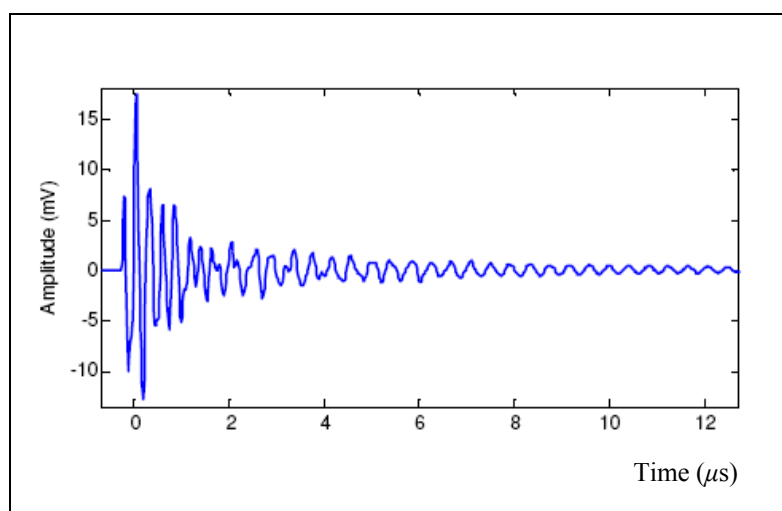
ระบบการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนหนึ่งเฟสออนไลน์ (on-line single-phase partial discharge measuring system) ด้วยขดลวดโรกอฟสกี (Hashmi, 2009) โดยได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างผลการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP/ATP กับผลการทดลองที่ได้จากการตรวจวัดในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนี้ผลของอิมพีแดนซ์ขดลวดโรกอฟสกีจะถูกวิเคราะห์สำหรับสมรรถนะของระบบการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน และศึกษาผลของสายส่งเหนือศีรษะที่มีต่อระบบการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน

สำหรับวงจรการทดลองประกอบด้วย แหล่งจ่ายพัลส์มาตรฐาน (pulse calibrator) สายส่งเหนือศีรษะ (covered-conductor (CC) overhead lines) สำหรับระบบแรงดันสูงปานกลาง (medium voltage) ขดลวดโรกอฟสกี (flexible Rogowski coil) ออสซิลโลสโคป และตัวเก็บประจุขนาด 500 pF ในรูปที่ 3.25 แหล่งจ่ายพัลส์มาตรฐานทำการจ่ายแรงดันพัลส์จากดินสายส่งเหนือศีรษะไปยังตัวเก็บประจุขนาด 500 pF โดยขดลวดโรกอฟสกีถูกติดตั้ง ณ ตำแหน่ง  $P_1$  และตำแหน่ง  $P_2$  เพื่อวัดสัญญาณแรงดันพัลส์

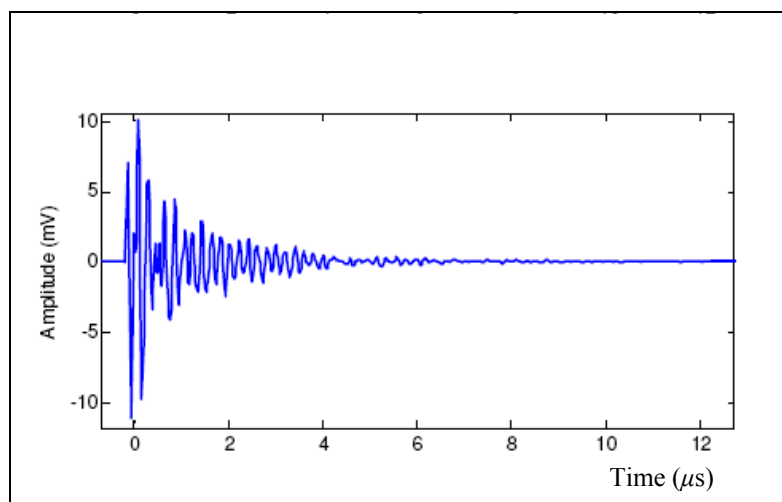


รูปที่ 3.25 แผนผังเส้นเคเบิลสำหรับระบบการตรวจวัดสัญญาณด้วยขดลวดโรกอฟสกี แบบออนไลน์

เมื่อทำการทดลองโดยจ่ายแรงดันพัลส์ 5 nC แล้วตรวจวัดสัญญาณด้วยขดลวดโรกอฟสกี ณ ตำแหน่ง  $P_1$  และตำแหน่ง  $P_2$  ดังแสดงผลในรูปที่ 3.26 และรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.26 สัญญาณ ณ ตำแหน่ง  $P_1$  ของรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.27 สัญญาณ ณ ตำแหน่ง  $P_2$  ของรูปที่ 3.25

### 3.5 วัตถุประสงค์ของการตรวจวัดคัสซาร์จบางส่วน

เป้าหมายของการตรวจวัดคัสซาร์จก็เพื่อการสืบหาความจริงที่ชัดเจนในการทดสอบแบบไม่ทำลาย หรือเพื่อการประเมินอายุการใช้งานของฉนวน เป้าหมายในการตรวจวัดคัสซาร์จอย่างน้อยที่สุดมี 4 ประการที่ต้องการคือ

1. การตรวจวัด (detection) เป็นการสังเกตการณ์ที่จะระบุให้ได้แน่นอนว่าคัสซาร์จนั้นเกิดขึ้นหรือไม่
2. การวัด (measurement) ถ้าคัสซาร์จมีการเกิดขึ้น ขนาดของคัสซาร์จจะต้องสืบหาให้ชัดเจน ปริมาณทางกายภาพที่จะต้องเลือกมา ซึ่งเป็นทั้งปริมาณที่เกี่ยวกับความอันตรายของคัสซาร์จและสามารถวัดได้ด้วยวิธีการตรวจวัดคัสซาร์จ หลังจากปริมาณที่ถูกเลือกมา วิธีการเทียบมาตรฐานที่เชื่อถือได้มีการใช้ต่อเนื่องไปจนถึงได้ผลที่สม่าเสมอ
3. ตำแหน่ง (location) หลังจากคัสซาร์จถูกตรวจวัด ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากต่อตำแหน่งของบริเวณเกิดคัสซาร์จ ตำแหน่งที่เกิดคัสซาร์จก็จะมี ความแตกต่างกันไปไม่ว่าจะเป็นคัสซาร์จในสายเคเบิลหรือในปลายขั้วของเคเบิล หรือคัสซาร์จในหม้อแปลงหรือในปลอกฉนวนนำสายของหม้อแปลง การเลือกใช้วิธีการตรวจวัดคัสซาร์จก็ต้องเป็นวิธีตรวจวัดที่สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของคัสซาร์จได้
4. การประเมินค่า (evaluation) ในการประเมินจะต้องทำการประเมินชนิดและความอันตรายโดยการตรวจวัดคัสซาร์จ เมื่อมีการใช้ข้อมูลทั้งหมดที่ได้มาจากการทดสอบคัสซาร์จที่มีสมรรถนะดี ข้อมูลที่สำคัญสามารถได้จากคุณภาพของฉนวนภายใต้การทดสอบ



### 3.6 สรุป

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้เป็นการกล่าวถึง คุณสมบัติของน้ำมันหม้อแปลง คีตสารจำบางส่วน การตรวจวัดคีตสารจำบางส่วนด้วยวิธีการต่าง ๆ และหลักการการวัดกระแสฮาร์มอนิกส์ด้วยขดลวด โรกอฟสกี ทั้งนี้การเลือกใช้วิธีการตรวจวัดคีตสารจำบางส่วน ขึ้นอยู่กับความเหมาะสม และสิ่งที่ต้องการวิเคราะห์ สำหรับวิทยานิพนธ์เรื่องการพัฒนาระบบรู้จำแบบรูปของคีตสารจำ บางส่วนโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ ในขั้นตอนของการทดลองการตรวจวัดคีตสารจำบางส่วน ได้เลือกใช้วิธีการตรวจวัดทางไฟฟ้า โดยทำการตรวจวัดปริมาณซึ่งเกี่ยวข้องกับการเกิดคีตสารจำ บางส่วน ซึ่งจะกล่าวไว้ในบทต่อไป

## บทที่ 4

### การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

#### 4.1 บทนำ

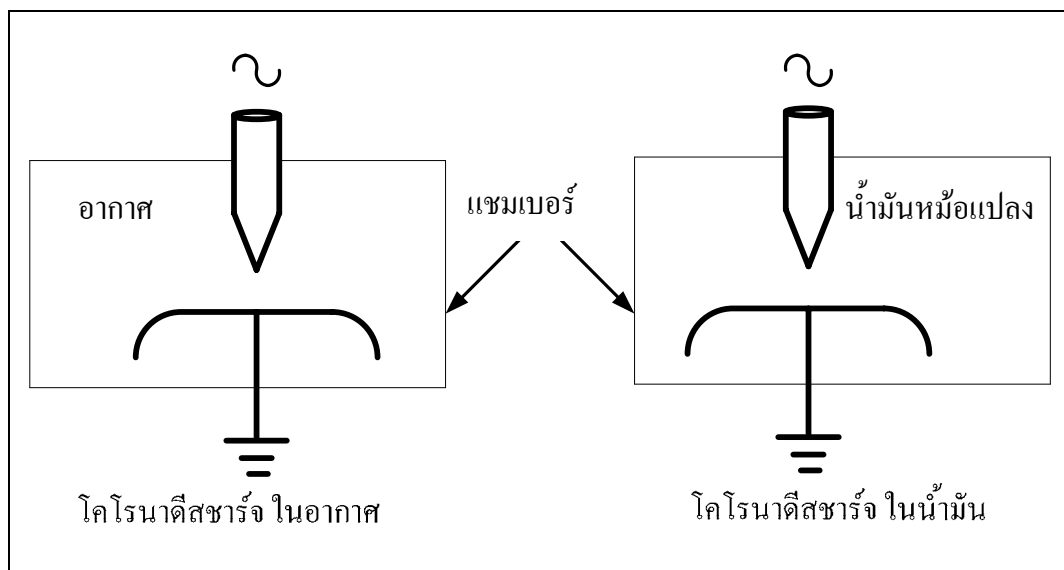
สำหรับการทดสอบการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาคุณลักษณะของดิสชาร์จบางส่วนแต่ละชนิดนั้น ในงานวิจัยนี้ผู้ทำวิจัยได้เลือกใช้วิธีการตรวจวัดทางไฟฟ้าโดยวิธีการตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์ โดยได้สร้างแบบจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในแบบต่าง ๆ มาใช้ประกอบการทดสอบการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน สำหรับการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 และต้องคำนึงถึงองค์ประกอบที่ใช้ในการตรวจทดสอบจะต้องไม่เป็นตัวที่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนต่อสัญญาณที่ต้องการตรวจวัด

#### 4.2 แบบจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

ในการศึกษาวิจัยของวิทยานิพนธ์เรื่องการรู้จำแบบรูปดิสชาร์จบางส่วนโดยใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ ได้มีการจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน 4 ชนิด ได้แก่ โครนาดิสชาร์จในอากาศ โครนาดิสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง ดิสชาร์จภายใน และดิสชาร์จตามผิว โดยทำการจำลองตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

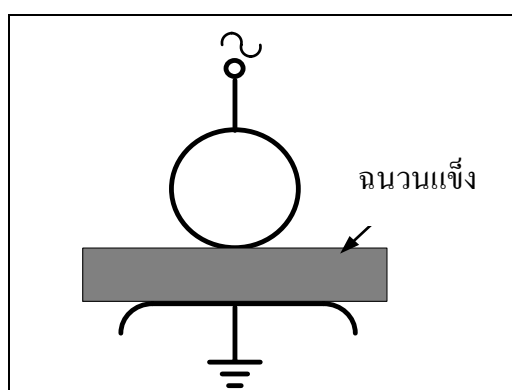
(1) การจำลองการเกิดโครนาดิสชาร์จในอากาศ เป็นดิสชาร์จที่เกิดขึ้นบริเวณของตัวนำไฟฟ้าซึ่งมีลักษณะแหลมคมหรือปลายแหลมและเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ในการจำลองการเกิดโครนาดิสชาร์จในอากาศ ทำการจำลองโดยใช้อิเล็กโตรดปลายแหลมกับอิเล็กโตรดระนาบดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยวางอิเล็กโตรดทั้งสองห่างกันเป็นระยะ 2 cm และวางอยู่ภายในแชมเบอร์ (chamber) และภายในแชมเบอร์เป็นอากาศ โดยทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดปลายแหลมส่วนอิเล็กโตรดระนาบต่อลงดิน

(2) การจำลองการเกิดโครนาดิสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง เป็นดิสชาร์จที่เกิดขึ้นบริเวณของตัวนำไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะแหลมคมหรือปลายแหลม และเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ในการจำลองการเกิดโครนาดิสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง ทำการจำลองโดยใช้อิเล็กโตรดปลายแหลมกับอิเล็กโตรดระนาบดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยวางอิเล็กโตรดทั้งสองห่างกันเป็นระยะ 2 cm และวางอยู่ภายในแชมเบอร์ที่บรรจุน้ำมันหม้อแปลง โดยทำการป้อนแรงดันให้กับอิเล็กโตรดปลายแหลมส่วนอิเล็กโตรดระนาบต่อลงดิน



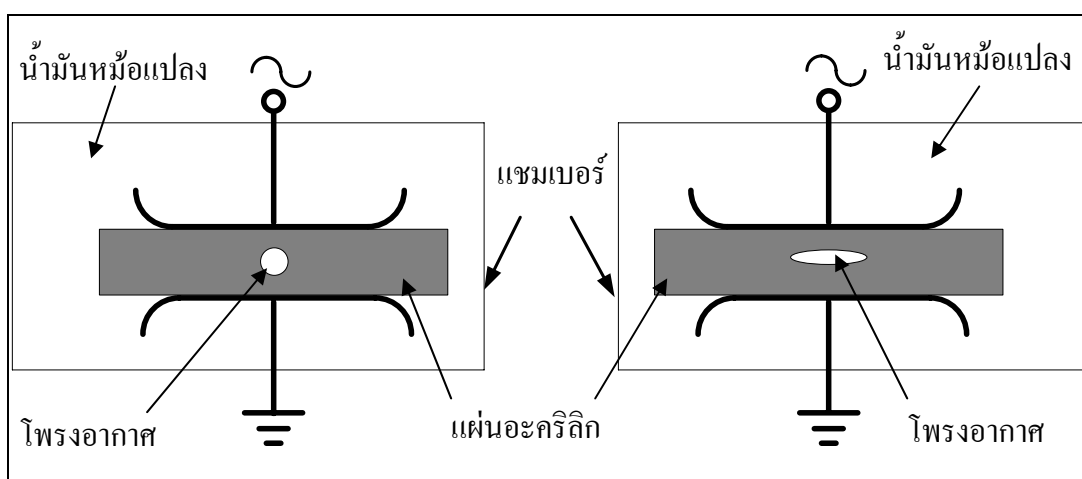
รูปที่ 4.1 การจำลองการเกิดโคโรนาดีสชาร์จ

(3) การจำลองการเกิดดีสชาร์จตามผิว ซึ่งเป็นการดีสชาร์จตามผิวที่อาจเกิดขึ้นตามแนวรอยต่อของฉนวนต่างชนิดกัน เช่น ของแข็งกับแก๊ส ทำโดยใช้อิเล็กโตรดทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 cm และอิเล็กโตรดระนาบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 11 cm และนำแผ่นอะคริลิกขนาด  $14 \times 14 \times 2$  cm<sup>3</sup> วางคั่นระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสองดังแสดงในรูปที่ 4.2 การนำแผ่นอะคริลิกมาคั่นจะทำให้มีรอยต่อของฉนวน 2 ชนิดซึ่งมีค่าสภาพยอมต่างกัน คือ อากาศกับแผ่นอะคริลิกทำให้บริเวณรอยต่อของฉนวน 2 ชนิดมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง



รูปที่ 4.2 การจำลองการเกิดดีสชาร์จตามผิว

(4) การจำลองการเกิดดีสชาร์จภายในฉนวนแข็ง ซึ่งเป็นดีสชาร์จที่เกิดกับฉนวนแข็งที่มี โพรงอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมอยู่ภายใน ทำได้โดยการจำลองโพรงอากาศขนาดเล็กให้อยู่ภายใน แผ่นอะคริลิก ขนาด  $14 \times 14 \times 2 \text{ cm}^3$  ซึ่งมีการจำลองลักษณะของโพรงอากาศดังแสดงในรูปที่ 4.3 การจำลองการเกิดดีสชาร์จภายในฉนวนแข็งทำโดยการวางแผ่นอะคริลิกที่มีโพรงอากาศไว้ระหว่าง อิเล็กโทรดระนาบกับอิเล็กโทรดระนาบ การจำลองดีสชาร์จต้องทำในแชมเบอร์ที่มีน้ำมันหม้อแปลง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดวابلฟ้าข้ามฉนวนแข็ง ถ้าแรงดันตกคร่อม โพรงอากาศสูงเกินกว่าค่าแรงดันที่ โพรงอากาศสามารถทนได้ ก็จะทำให้เกิดเบรกดาวน์หรือดีสชาร์จเฉพาะบริเวณโพรงอากาศ



รูปที่ 4.3 การจำลองการเกิดดีสชาร์จภายในฉนวนแข็ง



(ก) โครโมดิสชาร์จ

(ข) ดิสชาร์จตามผิว

(ค) ดิสชาร์จภายใน

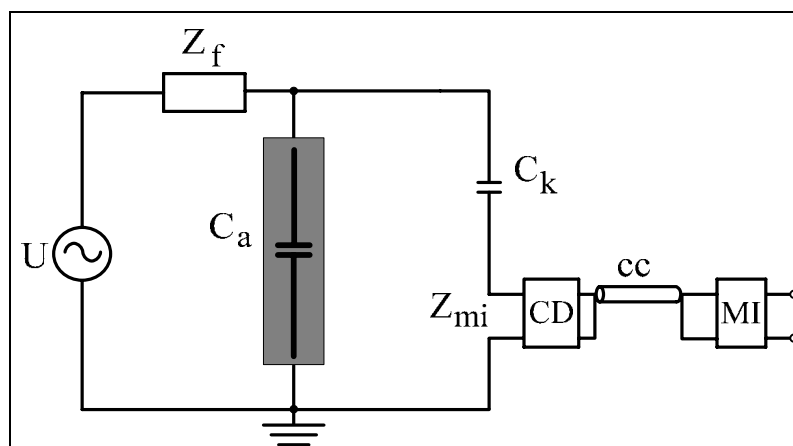
รูปที่ 4.4 แบบจำลองการเกิดดิสชาร์จบางส่วน

### 4.3 วงจรทดสอบการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

การตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนสามารถทำได้หลายวิธีดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการวัด สำหรับการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนในเชิงปริมาณที่ดีที่สุดคือการวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีการตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ซึ่งสามารถทราบขนาดของดีสชาร์จที่เกิดขึ้น วงจรสำหรับการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงหรือแรงดันทดสอบ  $U$  ตัวกรองสัญญาณ (filter) จากแหล่งจ่าย  $Z_f$  วัสดุทดสอบ (test object)  $C_a$  ตัวเก็บประจุคัปปลิงหรือตัวเก็บประจุ คาบเกี่ยว (coupling capacitor)  $C_k$  อุปกรณ์รับสัญญาณหรืออุปกรณ์คาบเกี่ยว (coupling device) CD สายเคเบิลนำสัญญาณ (connecting cable) CC และเครื่องมือวัด (measuring instrument) MI ดังแสดงในรูปที่ 4.5

รายละเอียดคุณสมบัติและหน้าที่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

(1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง  $U$  เพื่อใช้ในการจ่ายแรงดันให้กับวงจรทดสอบและมีฟังก์ชันกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบควรเป็นหม้อแปลงทดสอบที่ไม่เกิดดีสชาร์จบางส่วนในตัวของหม้อแปลงเอง ที่แรงดันทดสอบ



รูปที่ 4.5 วงจรทดสอบการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน

(2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์  $Z_f$  ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์และดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบที่ใช้เป็นแหล่งจ่าย นอกจากนี้ตัวกรองสัญญาณยังทำหน้าที่ป้องกันดีสชาร์จบางส่วนจากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทาง

แหล่งจ่ายแรงดัน ตัวกรองต้องทนแรงดันทดสอบได้และไม่เกิดคิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรองเช่น ตัวเหนี่ยวนำ (high voltage inductor) หรือ ตัวกรองชนิดแถบความถี่ต่ำผ่าน (high voltage low – pass filter) เป็นต้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบที่ปราศจากคิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงอาจไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองอีก เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทดสอบนั้นมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำ โดยเฉพาะหม้อแปลงปลดคิสซาร์จบางส่วน

(3) ตัวเก็บประจุคัปปลิง  $C_k$  ถูกใช้เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อสัญญาณความถี่สูงจากจุดตรวจวัดไปยังเครื่องมือวัด นั่นก็คือตัวเก็บประจุคัปปลิงจะเชื่อมต่อสัญญาณให้ครบวงจรระหว่าง  $C_a$   $C_k$  และ CD ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับคิสซาร์จบางส่วน ดังนั้นตัวเก็บประจุคัปปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำ ปราศจากการเกิดคิสซาร์จบางส่วนที่แรงดันทดสอบ โดยในการทดสอบของงานวิจัยนี้ ตัวเก็บประจุคัปปลิง 2 nF และมีอิเล็กทรอนิกส์แบบวงแหวนทอ (toroid) เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าอยู่ที่ส่วนบนของตัวเก็บประจุคัปปลิง

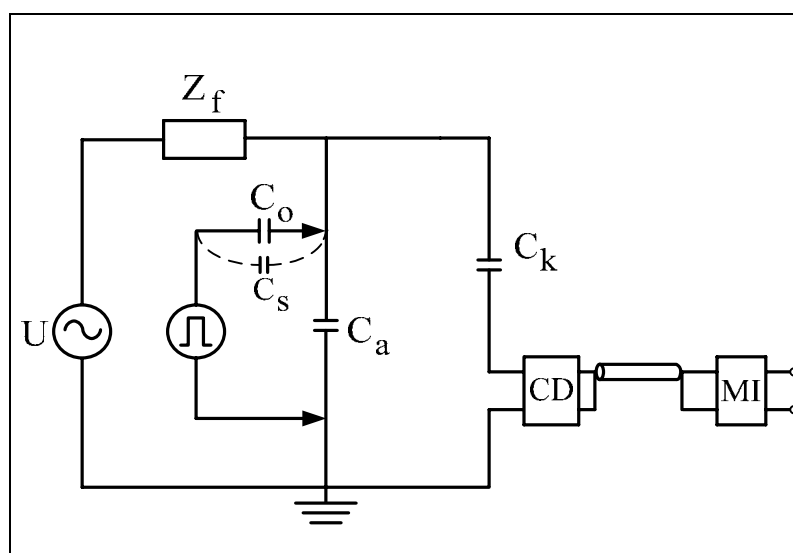
(4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายเชื่อมต่อระหว่าง CD และ MI โดยในการทดสอบการตรวจวัดคิสซาร์จบางส่วนของงานวิจัยนี้ใช้ชุดอุปกรณ์รับสัญญาณและเครื่องมือวัด MPD 600 OMICON

#### 4.3.1 การเปรียบเทียบวงจรทดสอบการตรวจวัดคิสซาร์จบางส่วน

สำหรับการทดสอบการตรวจวัดคิสซาร์จบางส่วนนั้นมีจำเป็นที่จะต้องมีการเปรียบเทียบเครื่องมือก่อนทำการทดสอบ เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจวัดคิสซาร์จบางส่วน มีความแปรผันตามขนาดของตัวเก็บประจุคัปปลิงและวัสดุทดสอบ จึงต้องมีการเปรียบเทียบด้วยค่าคิสซาร์จบางส่วนมาตรฐานก่อนทำการป้อนแรงดันให้กับวงจรทดสอบ ทำได้โดยการใช้เครื่องปรับเทียบคิสซาร์จมาตรฐานป้อนกระแสพัลส์สั้น ๆ ที่มีประจุ  $q_{cal}$  ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

การเปรียบเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบคิสซาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้น ๆ ที่มีประจุ (pulse area)  $q_{cal}$  ซึ่งทราบ ค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ถ้าเครื่องตรวจวัดคิสซาร์จบางส่วนอ่านค่าคิสซาร์จบางส่วนได้เท่ากับ  $a_1$  ดังนั้น สเกลแฟกเตอร์  $K_1 = q_{cal}/a_1$  หลังจากทำการปรับเทียบวงจรทดสอบเสร็จแล้วต้องเอาเครื่องปรับเทียบคิสซาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ (ในกรณีที่  $c_0$  เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ) ในขณะที่ทำการทดสอบที่แรงดันตามมาตรฐานกำหนด ถ้าในขณะนั้นเครื่องตรวจวัดคิสซาร์จบางส่วนอ่านค่าได้  $a_2$  ดังนั้นประจุที่ปรากฏของคิสซาร์จบางส่วนคือ  $q = K_1 a_2$  และความไวของวงจรทดสอบ  $q_{min} = 2K_1 h_n$  เมื่อ  $h_n$  คือค่าสูงสุด

ของระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (background noise) ที่อ่านจากเครื่องตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน หลังการปรับเทียบก่อนการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบต้องถอนตัวเก็บประจุปรับเทียบ (capacitor calibrator) ออกจากวงจรทดสอบทุกครั้ง



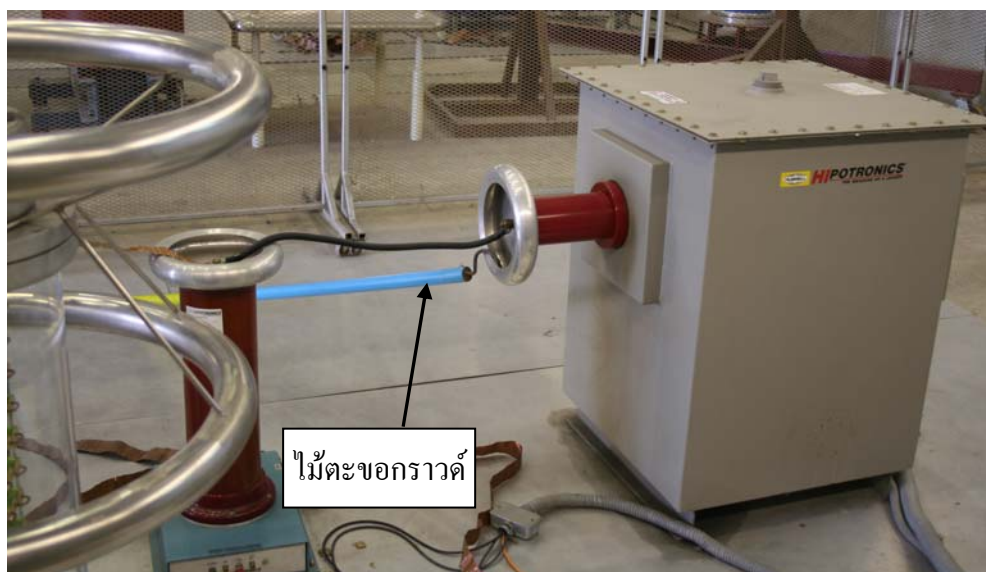
รูปที่ 4.6 วงจรสำหรับการปรับเทียบวงจรตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน

#### 4.4 การทดสอบการตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน

การทดสอบดีสซาร์จบางส่วนเป็นการทดสอบด้วยไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันความผิดพลาด ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ทำการทดสอบ และอุปกรณ์เครื่องมือวัด จึงต้องทำการทดสอบด้วยความระมัดระวัง คำนึงถึงความปลอดภัยและทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

เมื่อต้องการเปลี่ยนอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่อยู่ในวงจรทดสอบต้องปลดแหล่งจ่ายแรงดันออกให้ได้โดยลดแรงดันไฟฟ้าให้เป็นศูนย์แล้วปิดสวิตซ์ของแหล่งจ่ายแรงดัน จากนั้นจึงใช้ไม้ตะขอกวาดสัมผัสอุปกรณ์ต่าง ๆ และเกี่ยวตะขอกวาดค้างไว้ในวงจร ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากนั้นแล้วจึงทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ต้องการ หลังจากเปลี่ยนอุปกรณ์เสร็จแล้ว จะต้องนำไม้ตะขอกวาดออกจากวงจรทดลอง แล้วจึงทำการทดลองต่อ





รูปที่ 4.7 ลักษณะการเกี่ยวไม้ตะขอกราวด์ในวงจรทดสอบไฟฟ้าแรงสูง

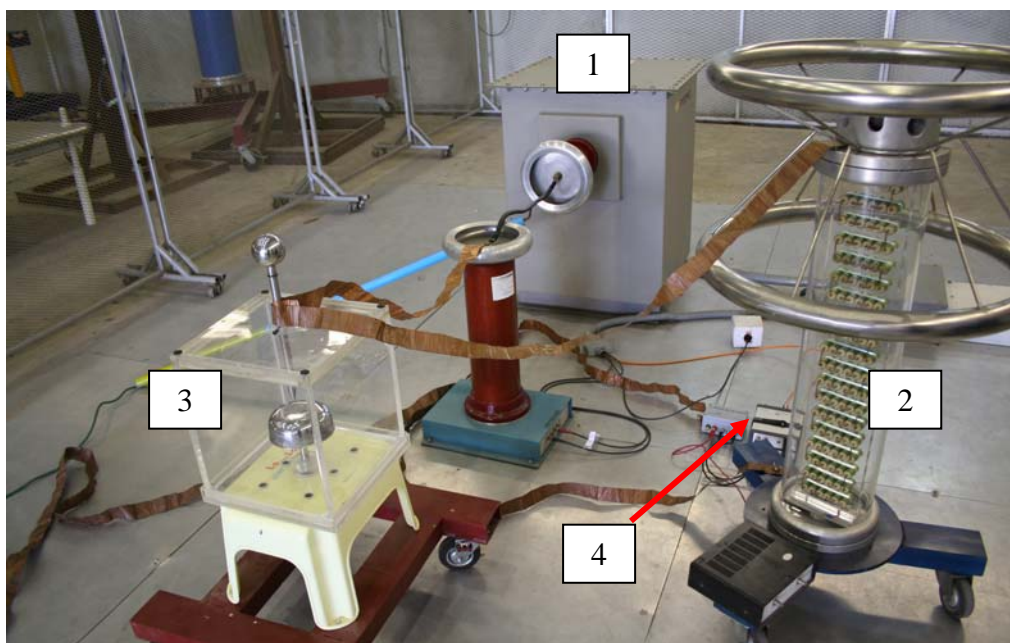
เพื่อความปลอดภัยและป้องกันความเสียหายของเครื่องมือตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน ดังนั้น ก่อนการทดลอง การตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน ควรนำวัสดุทดสอบไปทำการทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ และในระหว่างการทดลอง การตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน จะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่ให้ถึงค่าแรงดันเบรกดาวน์ของวัสดุทดสอบ

ขั้นตอนการทดลอง การตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน มีดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการต่อวงจรทดสอบการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนดังแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 โดยเลือกใช้วัสดุทดสอบตามชนิดของดีสชาร์จบางส่วน ตัวอย่างเช่น ทำการตรวจวัดโคโรนาดีสชาร์จ ก็เลือกวัสดุทดสอบโคโรนาดีสชาร์จ (แบบ ก ในรูปที่ 4.4)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการปรับเทียบวงจรทดสอบ หลังจากทำการปรับเทียบแล้วจะต้องปลดตัวเก็บประจุปรับเทียบ ที่ใช้ในการปรับเทียบออกจากวงจรทดลอง

ขั้นตอนที่ 3 จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับวงจรทดสอบ ปรับแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการดีสชาร์จ แต่จะต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่ให้ถึงค่าแรงดันเบรกดาวน์ของวัสดุทดสอบ บันทึกข้อมูล



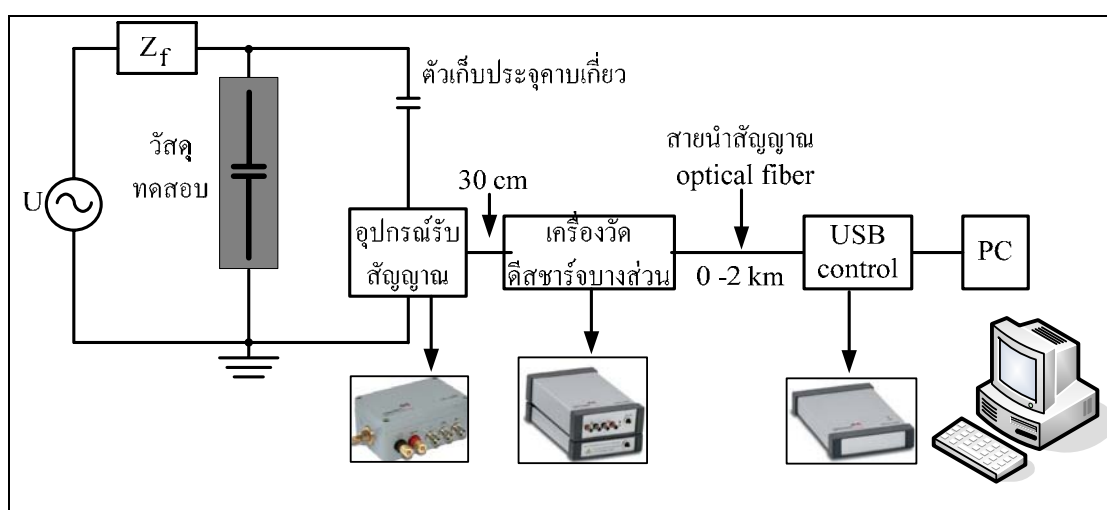
รูปที่ 4.8 อุปกรณ์และเครื่องมือวงจรทดสอบการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

โดยที่ หมายเลข 1 คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง

หมายเลข 2 คือ ตัวเก็บประจุคาบเกี่ยว

หมายเลข 3 คือ วัสดุทดสอบ

หมายเลข 4 คือ อุปกรณ์รับสัญญาณและเครื่องมือวัดดิสชาร์จบางส่วน



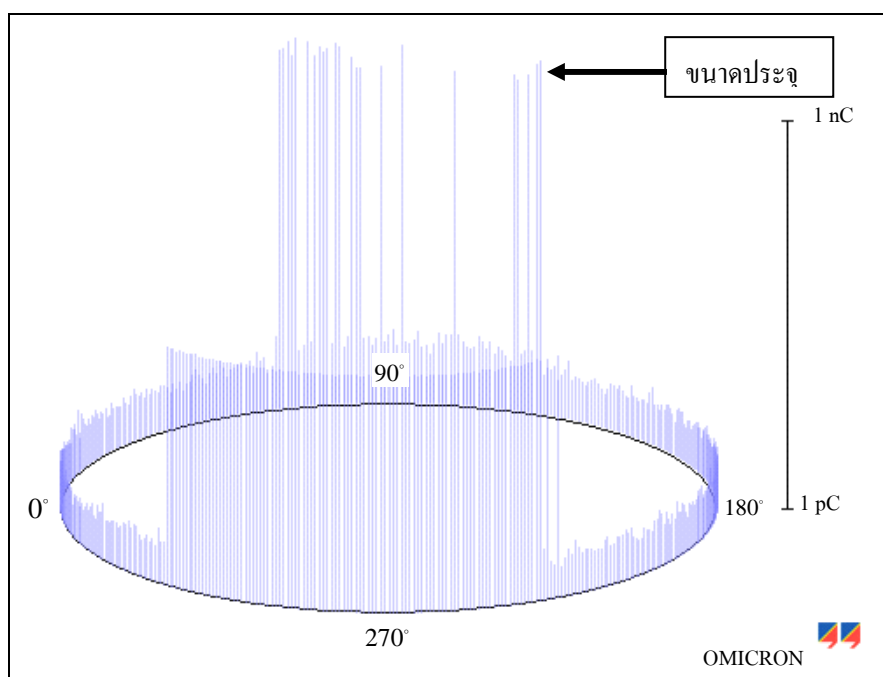
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งอุปกรณ์ของวงจรทดสอบการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วน

#### 4.5 ผลการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วน

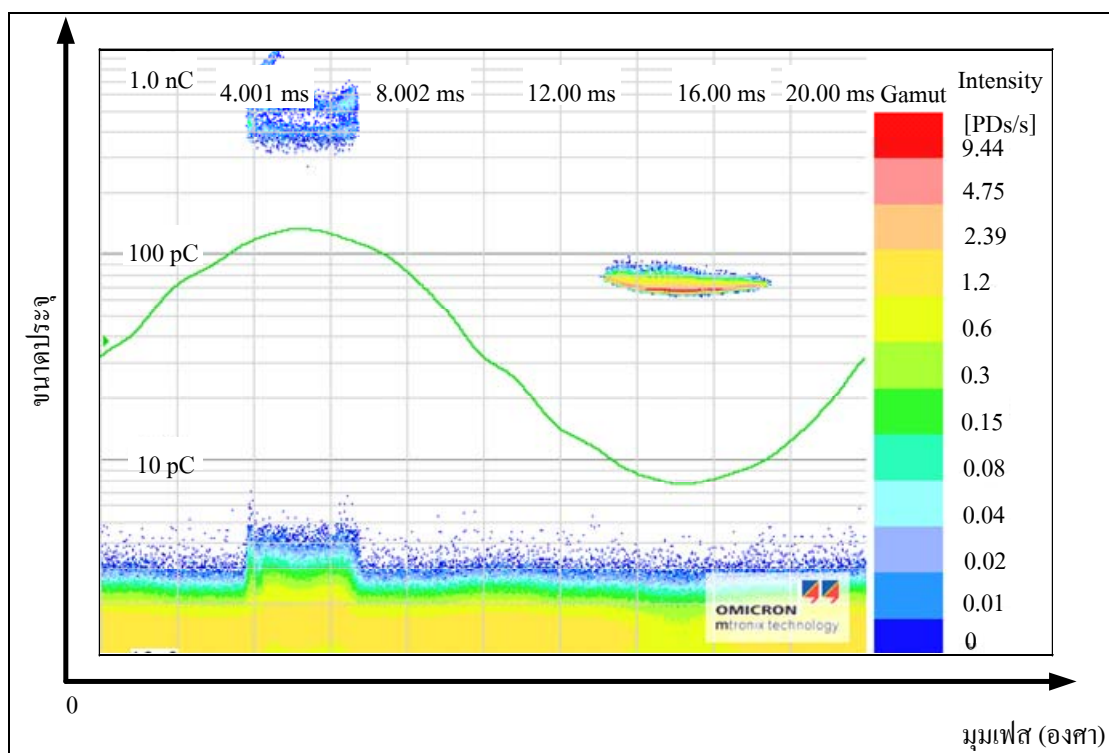
ผลที่ได้จากการตรวจวัดดีสชาร์จบางส่วนในแต่ละประเภท สามารถแสดงได้ 2 รูปแบบคือ การแสดงดีสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์และการแสดงดีสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปวงรี

สำหรับการแสดงดีสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปวงรี ของการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในอากาศดังรูปที่ 4.10 ของการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันดังรูปที่ 4.12 ของการเกิดดีสชาร์จภายในดังรูปที่ 4.14 และ ของการเกิดดีสชาร์จตามผิวดังรูปที่ 4.16 จะแสดงการเกิดดีสชาร์จในหนึ่งคาบเวลา โดยแสดงขนาดประจุและมุมเฟสของการเกิดดีสชาร์จในแต่ละครั้ง

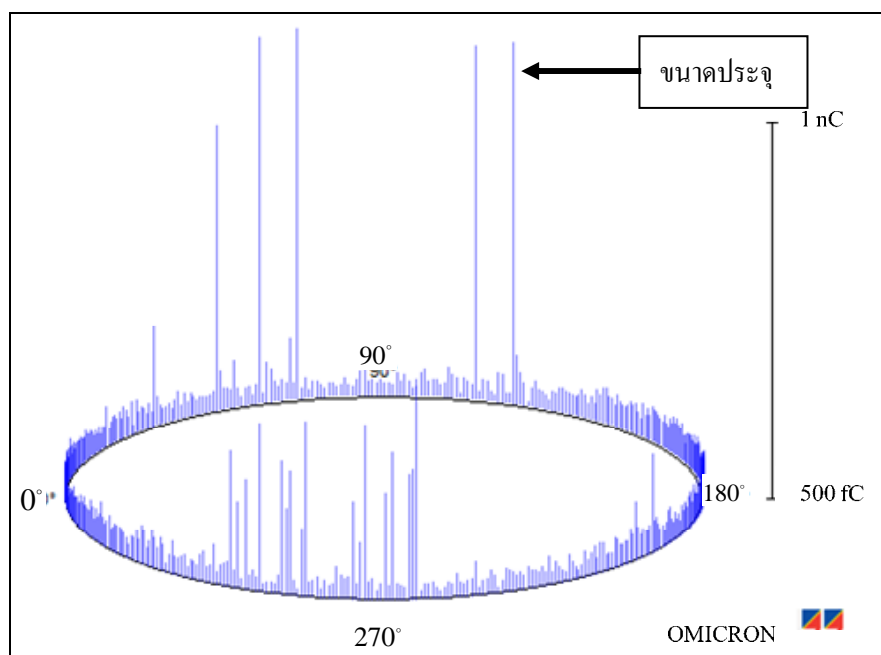
สำหรับการแสดงดีสชาร์จบางส่วนบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ ของการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในอากาศดังรูปที่ 4.11 ของการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันดังรูปที่ 4.13 ของการเกิดดีสชาร์จภายในดังรูปที่ 4.15 และ ของการเกิดดีสชาร์จตามผิวดังรูปที่ 4.17 เป็นการแสดงข้อมูลการเกิดดีสชาร์จ โดยแกนนอนแสดงมุมเฟสของการเกิดดีสชาร์จ แกนตั้งแสดงขนาดประจุของการเกิดดีสชาร์จในแต่ละครั้ง และทำการเก็บข้อมูลการเกิดดีสชาร์จตลอดช่วงเวลาการตรวจวัด



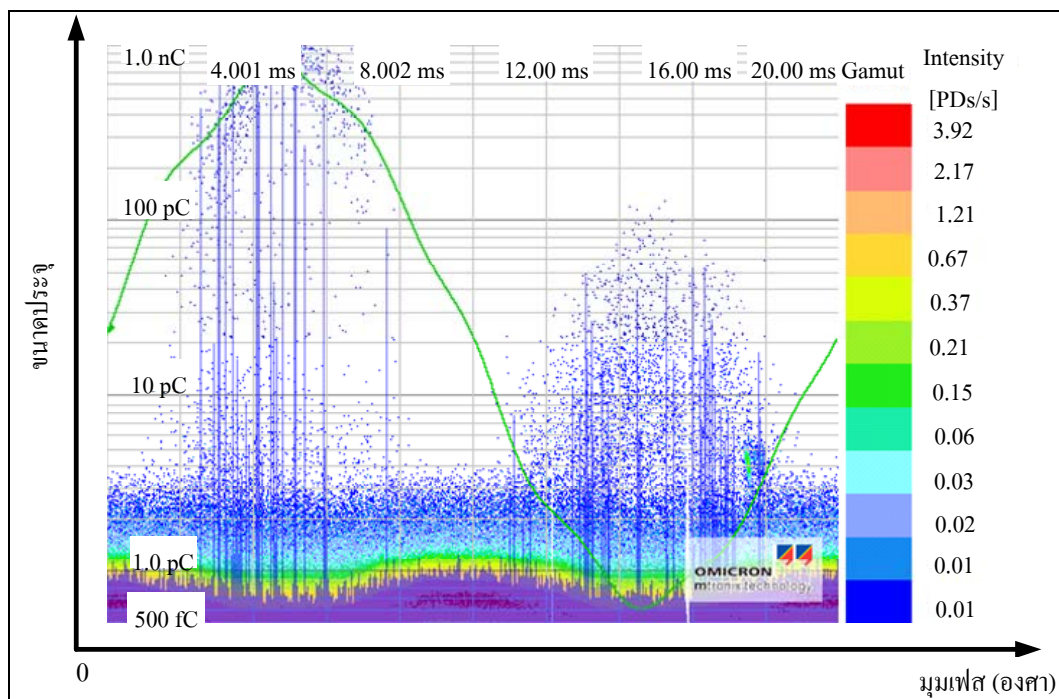
รูปที่ 4.10 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จในอากาศแสดงบนฐานเวลารูปวงรี



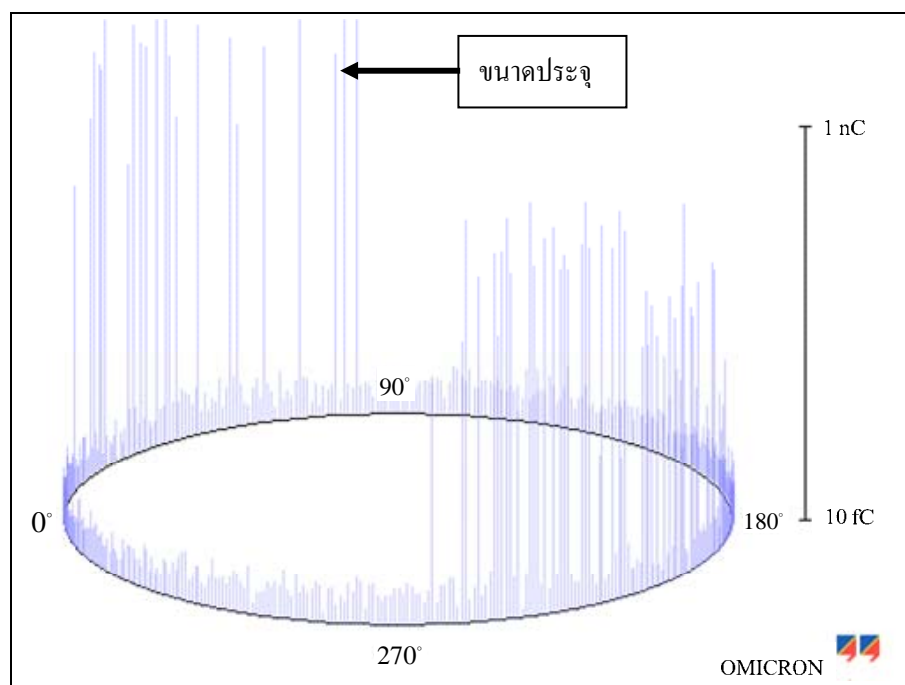
รูปที่ 4.11 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จในอากาศแสดงบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์



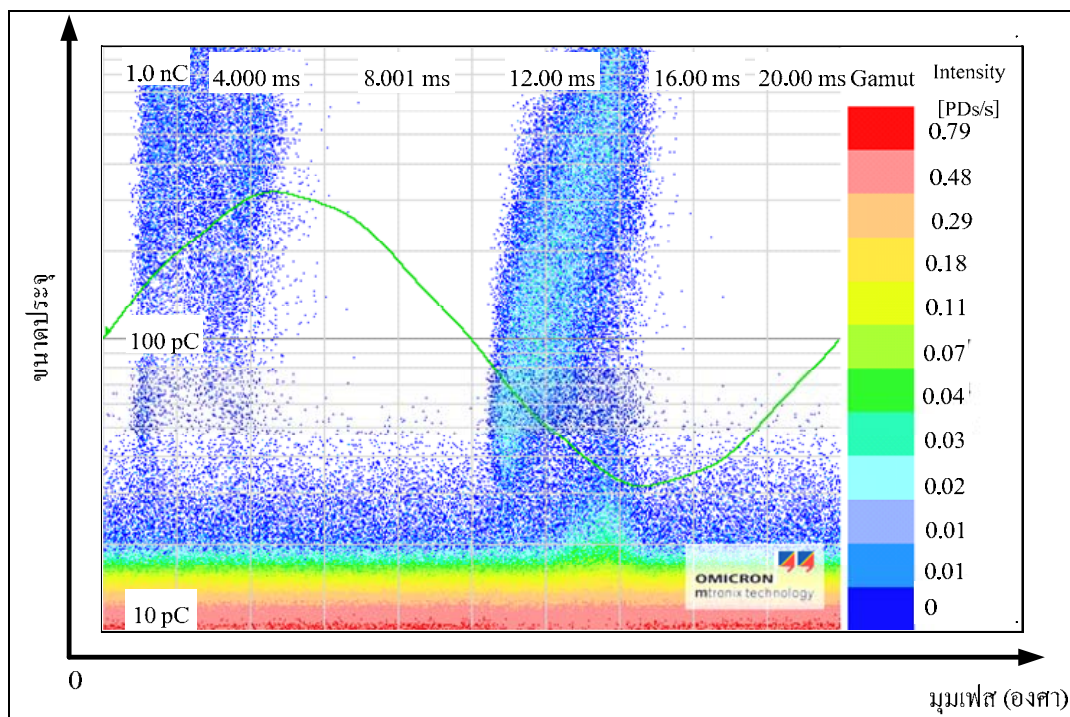
รูปที่ 4.12 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันแสดงบนฐานเวลารูปวงรี



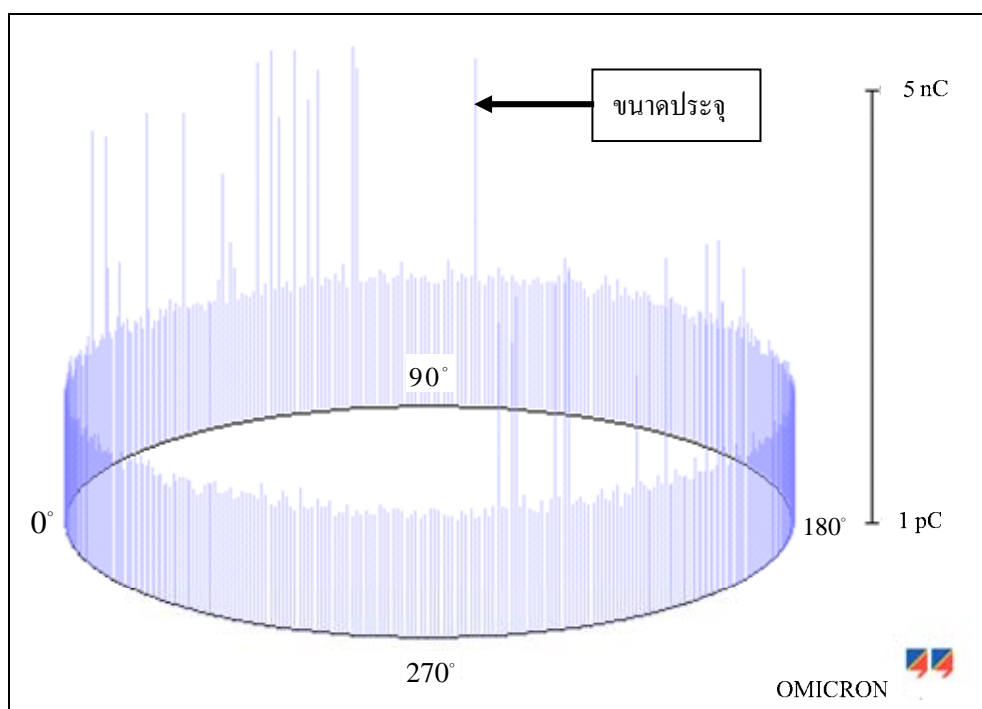
รูปที่ 4.13 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันแสดงบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์



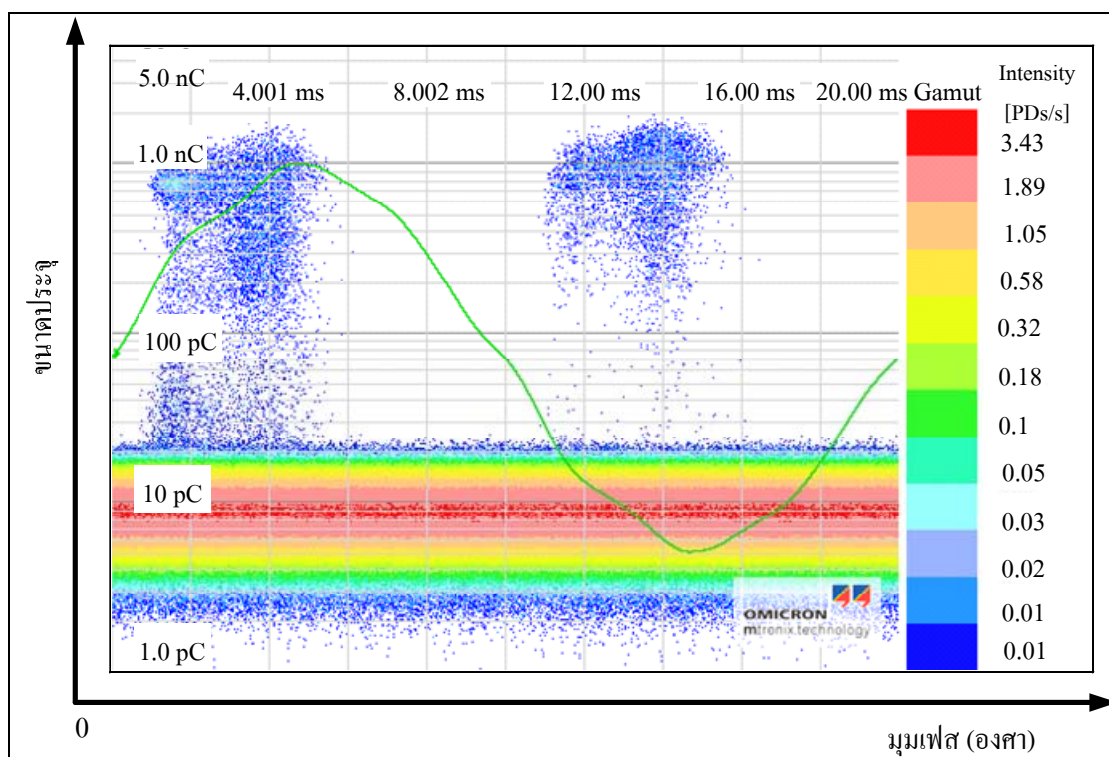
รูปที่ 4.14 การเกิดดีสชาร์จตามผิวแสดงบนฐานเวลารูปวงรี



รูปที่ 4.15 การเกิดคัสซาร์จตามผิวแสดงบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์



รูปที่ 4.16 การเกิดคัสซาร์จภายในแสดงบนฐานเวลารูปวงรี



รูปที่ 4.17 การเกิดคัสซาร์จภายในแสดงบนฐานเวลารูปคลื่น ไซส์

ผลการทดสอบการตรวจวัดโคโรนาดีสซาร์จในอากาศ ผลการตรวจวัดซึ่งแสดงบนฐานเวลารูปวงรี ในรูปที่ 4.10 และ แสดงบนฐานเวลารูปคลื่น ไซส์ในรูปที่ 4.11 จากการทดสอบเมื่อเพิ่มค่าแรงดันถึง ค่าแรงดันที่คัสซาร์จเริ่มเกิด นั่นคัสซาร์จเกิดในช่วงแรงดันครึ่งลบ จากนั้นทำการเพิ่มค่าแรงดันเป็น 5.8 kV จึงเกิดคัสซาร์จทั้งในช่วงแรงดันครึ่งบวก และในช่วงแรงดันครึ่งลบ โดยจากผลการตรวจวัด จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าขนาดประจุที่เกิดจากในช่วงแรงดันครึ่งบวก นั้นมีขนาดประจุใหญ่กว่า ขนาดประจุที่เกิดจากในช่วงแรงดันครึ่งลบ และเมื่อพิจารณาในแต่ละหนึ่งคาบเวลาหรือหนึ่งเฟส วิน โควล์ จะพบว่าจำนวนครั้งของการเกิดคัสซาร์จในช่วงแรงดันครึ่งบวก นั้นมีจำนวนน้อยกว่า จำนวนครั้งของการเกิดคัสซาร์จในช่วงแรงดันครึ่งลบ

ผลการทดสอบการตรวจวัดโคโรนาดีสซาร์จในน้ำมัน ผลการตรวจวัดซึ่งแสดงบนฐานเวลา รูปวงรีในรูปที่ 4.12 และ แสดงบนฐานเวลารูปคลื่น ไซส์ในรูปที่ 4.13 เป็นผลที่แรงดันทดสอบ 26 kV คัสซาร์จจะเกิดทั้งในช่วงแรงดันครึ่งบวกและในช่วงแรงดันครึ่งลบ เมื่อพิจารณาขนาดประจุ และมูมเฟสของการเกิดคัสซาร์จ จะเห็นว่ามิลักษณะการเกิดคัสซาร์จที่แตกต่างกันกับกรณีของ โคโรนาดีสซาร์จในอากาศ คือ ข้อมูลมีการกระจายตัวมาก

ผลการทดสอบการตรวจวัดดิสชาร์จภายใน ผลการตรวจวัดซึ่งแสดงบนฐานเวลารูปวงรีในรูปที่ 4.14 และ แสดงบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ในรูปที่ 4.15 จากผลการทดสอบเป็นผลที่แรงดันทดสอบ 34 kV ถ้าพิจารณาขนาดประจุ พบว่าขนาดประจุในช่วงแรงดันครึ่งบวก มีลักษณะการกระจายของข้อมูลมากกว่าขนาดประจุในช่วงแรงดันครึ่งลบ

ผลการทดสอบการตรวจวัดดิสชาร์จตามผิว ผลการตรวจวัดซึ่งแสดงบนฐานเวลารูปวงรีในรูปที่ 4.16 และ แสดงบนฐานเวลารูปคลื่นไซน์ในรูปที่ 4.17 จากผลการทดสอบเป็นผลที่แรงดันทดสอบ 14 kV ถ้าพิจารณาขนาดประจุ พบว่าขนาดประจุในช่วงแรงดันครึ่งบวกและในช่วงแรงดันครึ่งลบ มีลักษณะข้อมูลที่มีการกระจายตัว

#### 4.6 สรุป

การตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนต้องคำนึงถึงส่วนประกอบของวงจรทดสอบให้ได้ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล เพื่อให้ได้ข้อมูลดิสชาร์จบางส่วนมาใช้ในกระบวนการรู้จำและการจำแนกประเภทดิสชาร์จบางส่วน สำหรับการตรวจวัดดิสชาร์จบางส่วนดังกล่าวรายละเอียดไว้ในข้างต้นเป็นวิธีทางไฟฟ้า ทำให้ได้ผลจากการตรวจวัดประกอบด้วยค่าประจุและตำแหน่งมุมเฟสของการเกิดดิสชาร์จบางส่วน จากนั้นจึงคำนวณหาค่าคุณลักษณะของดิสชาร์จบางส่วน ซึ่งจะกล่าวในบทที่ 5



## บทที่ 5

### คุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนในทางสถิติ

#### 5.1 บทนำ

ข้อมูลดีสซาร์จบางส่วนที่ได้จากการตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน เป็นข้อมูลซึ่งประกอบด้วยขนาดประจุและมุมเฟสของการเกิดดีสซาร์จบางส่วนในแต่ละคาบเวลาของคลื่นแรงดัน เนื่องจากการวิเคราะห์ข้อมูลในทางสถิติ จึงต้องรวบรวมข้อมูลดีสซาร์จบางส่วนจากหลายคาบเวลาของคลื่นแรงดัน ส่งผลให้ข้อมูลดีสซาร์จบางส่วนมีมิติขนาดใหญ่ เพื่อให้ข้อมูลดีสซาร์จบางส่วนมีขนาดมิติเล็กลง และเหมาะกับการนำไปใช้ในกระบวนการรู้จำและการจำแนกประเภท จึงต้องนำข้อมูลดีสซาร์จบางส่วนดังกล่าวนี้มาคำนวณหาค่าคุณลักษณะ สำหรับเนื้อหาในบทที่ 5 ของวิทยานิพนธ์ เป็นรายละเอียดเกี่ยวกับการคำนวณค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีทางสถิติเพื่อใช้เป็นข้อมูลคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนในแต่ละชนิด ค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการรู้จำรูปแบบและการจำแนกประเภท

#### 5.2 การคำนวณค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วน

เพื่ออธิบายคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วน ซึ่งพิจารณาตามเวลาหรือมุมเฟสที่สังเกตได้ ปริมาณเหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็นปริมาณ 3 กลุ่ม ได้แก่

1. ปริมาณพื้นฐาน (basic quantities) เป็นปริมาณที่ได้มาจากการเกิดดีสซาร์จบางส่วนในช่วงหนึ่งคาบเวลาของคลื่นแรงดัน ปริมาณพื้นฐานประกอบด้วย ขนาดประจุและมุมเฟสของการเกิดดีสซาร์จในแต่ละครั้ง
2. ปริมาณอนุมาน (deduced quantities) เป็นปริมาณผลรวมของปริมาณพื้นฐาน โดยพิจารณาจากจำนวนหลายคาบเวลาของคลื่นแรงดัน อย่างเช่น มากกว่า 100 คาบเวลาของคลื่นแรงดัน ในการพิจารณา จะวิเคราะห์การเกิดดีสซาร์จที่ละหนึ่งคาบเวลา แล้วจึงรวบรวมปริมาณที่ได้ในแต่ละคาบเวลาให้เป็นข้อมูลทางสถิติ
3. ตัวดำเนินการทางสถิติ (statistical operators) คือตัวดำเนินการสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติของปริมาณอนุมานเช่น ค่าความเบ้ ค่าความโด่ง ของค่าคุณลักษณะดีสซาร์จบางส่วน

### 5.2.1 ปริมาณพื้นฐาน

ปริมาณกลุ่มแรกจะอยู่ในรูปของปริมาณพื้นฐาน พฤติกรรมทางไฟฟ้าของดีสชาร์จบางส่วนสามารถแทนได้โดย ปริมาณอิสระ 2 ปริมาณ

1. ขนาดดีสชาร์จ (discharge magnitude) นั่นก็คือ ประจุที่ปรากฏ
2. เวลาดีสชาร์จ (discharge timing) คือ ตำแหน่งของดีสชาร์จในเวลานั้น ๆ

สัมพันธ์กับรูปคลื่นแรงดันของแรงดันทดสอบ

จำนวนของประจุแทนด้วยกระแสดีสชาร์จ  $i_d(t)$  ในวัสดุทดสอบ ซึ่งเป็นการอ้างอิงถึงประจุที่ปรากฏ  $q_i$  (apparent charge)

$$q_i = C_b \cdot \Delta V \quad (5.1)$$

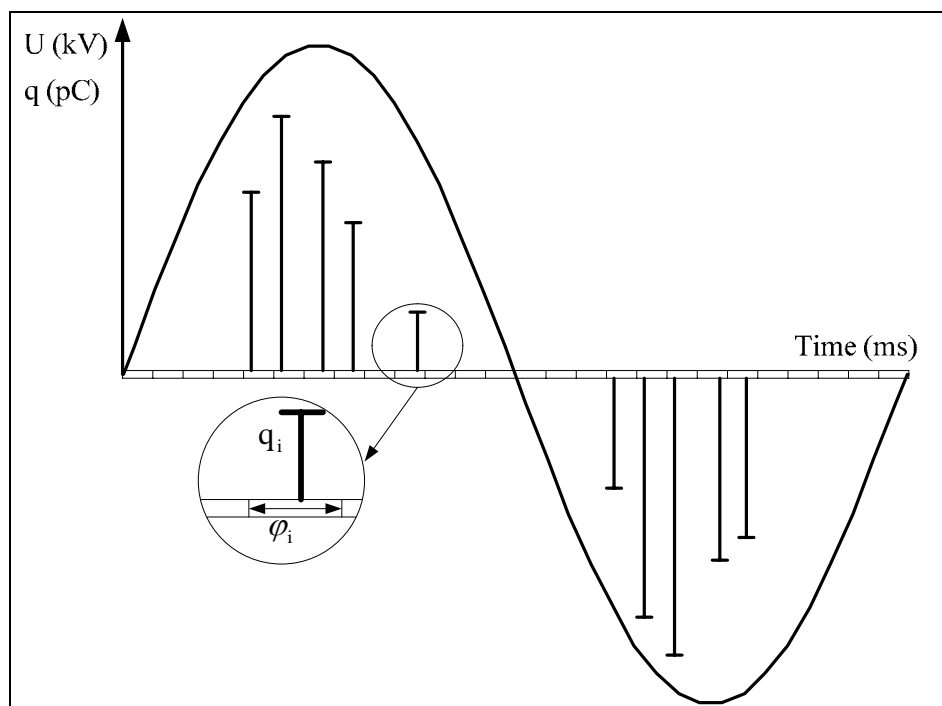
เมื่อ  $C_b$  คือค่าความจุไฟฟ้าที่อนุกรมกับฉนวนส่วนที่บกพร่อง และ  $\Delta V$  คือแรงดันตกที่คร่อมฉนวนส่วนที่บกพร่อง

ตำแหน่งดีสชาร์จซึ่งสัมพันธ์กับมุมเฟสของคลื่นแรงดันทดสอบ อธิบายด้วยมุมเฟส (phase angle)  $\varphi_i$  ค่าแรงดันในขณะที่เกิดดีสชาร์จ (ignition voltage) ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ถูกแทนด้วย  $U_i$  จุดประสงค์หลักสำหรับการใช้ปริมาณดีสชาร์จพื้นฐานคือ เพื่ออธิบายรายละเอียดของกระบวนการเกิดดีสชาร์จในช่วงหนึ่งคาบเวลาของคลื่นแรงดัน ปริมาณดังกล่าวได้แก่ ขนาดดีสชาร์จ  $q_i$  มุมเฟส  $\varphi_i$  (ตำแหน่งมุมเฟสที่ดีสชาร์จ) และ จำนวนครั้งของการดีสชาร์จ  $N_q$

### 5.2.2 ปริมาณอนุมาณ

ปริมาณกลุ่มที่สองจะอยู่ในรูปของปริมาณอนุมาณ สำหรับการพิจารณาค่าของปริมาณอนุมาณ สามารถทำได้โดยการรวบรวมปริมาณพื้นฐาน ในช่วงเวลาที่มากกว่าหนึ่งคาบเวลาของคลื่นแรงดัน อาทิเช่น มากกว่า 100 คาบเวลา ปริมาณอนุมาณสามารถวิเคราะห์ในรูปแบบของฟังก์ชันเชิงเวลา และในรูปแบบของฟังก์ชันของมุมเฟส

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ จะกล่าวถึงเฉพาะปริมาณในรูปแบบฟังก์ชันของมุมเฟสเท่านั้น โดยปริมาณในรูปแบบฟังก์ชันของมุมเฟส จะแสดงความสัมพันธ์ของกระแสดีสชาร์จบางส่วนกับมุมเฟสของคลื่นแรงดัน ในการวิเคราะห์ปริมาณอนุมาณ ทำโดยการพิจารณาจากปริมาณพื้นฐานทีละหนึ่งคาบเวลาหรือหนึ่งเฟสวินโดวส์ (phase windows) จากนั้นจึงรวบรวมค่าที่ในแต่ละเฟสวินโดวส์ให้เป็นข้อมูลทางสถิติ โดยหนึ่งเฟสวินโดวส์แสดงด้วยแกนมุมเฟส  $0 - 360^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ขนาดประจุและมุมเฟสของการเกิดดิสชาร์จบางส่วนในหนึ่งเฟสวินโดวส์

การวิเคราะห์ปริมาณอนุมาณในแต่ละเฟสวินโดวส์ ทำให้ได้ปริมาณ 4 ปริมาณ ดังการคำนวณต่อไปนี้

1. ผลรวมขนาดของประจุดิสชาร์จที่สังเกตได้ในหนึ่งเฟสวินโดวส์  
(discharge amount)

$$q_s = \sum q_i \quad (5.2)$$

2. จำนวนของดิสชาร์จที่สังเกตได้ในหนึ่งเฟสวินโดวส์ (pulse count)

$$n = \sum i \quad (5.3)$$

3. ค่าเฉลี่ยขนาดของประจุดิสชาร์จที่สังเกตได้ในหนึ่งเฟสวินโดวส์  
(mean pulse height)

$$q_n = \frac{q_s}{n} \quad (5.4)$$

4. ค่าสูงสุดของประจุคัสซาร์จที่สังเกตได้ในหนึ่งเฟสวินโดวส์  
(maximum pulse height)

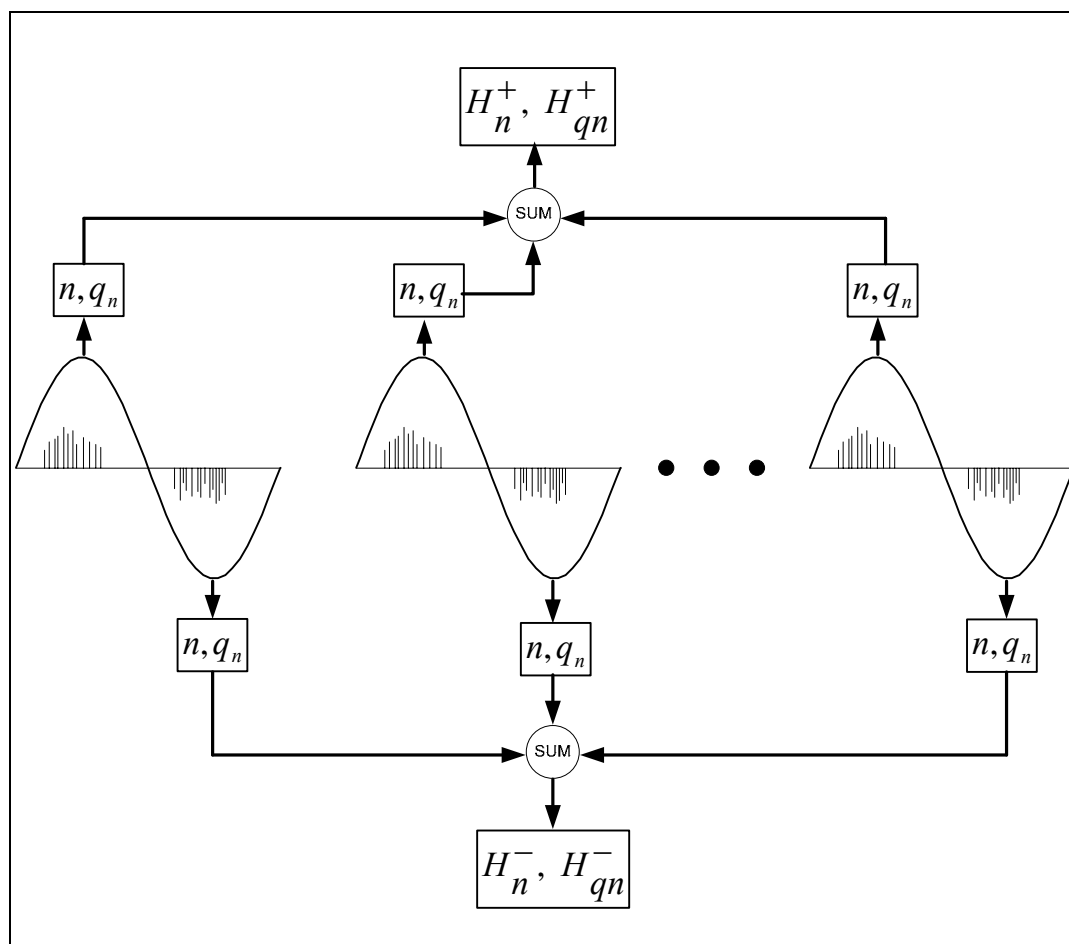
$$q_m = \text{MAX}(q_i) \quad (5.5)$$

เมื่อ  $q_i$  คือ ขนาดคัสซาร์จในเฟสวินโดวส์ช่วงเวลาหนึ่งลูกคลื่นแรงดัน  $i = 1$  ถ้าคัสซาร์จเกิดในเฟสวินโดวส์ หรือ  $i = 0$  ถ้าไม่มีคัสซาร์จเกิดในเฟสวินโดวส์ ปริมาณ ทั้ง 4 ( $q_s$ ,  $n$ ,  $q_n$ ,  $q_m$ ) ที่ได้จากการวิเคราะห์ในแต่ละเฟสวินโดวส์ จะรวมเป็นปริมาณการกระจาย 4 แบบ ซึ่งเป็นฟังก์ชันตามมุมเฟสได้แก่

1. การกระจายผลรวมคัสซาร์จตามมุมเฟส  $H_{qs}(\varphi)$  (discharge amount distribution) เป็นปริมาณที่แสดงผลรวมของขนาดคัสซาร์จในแต่ละเฟสวินโดวส์
2. การกระจายจำนวนครั้งที่เกิดคัสซาร์จตามมุมเฟส  $H_n(\varphi)$  (pulse count distribution) เป็นปริมาณแทนจำนวนคัสซาร์จที่ถูกสังเกตได้ในแต่ละเฟสวินโดวส์
3. การกระจายขนาดคัสซาร์จเฉลี่ยตามมุมเฟส  $H_{qn}(\varphi)$  (mean pulse height distribution) เป็นปริมาณแทนขนาดเฉลี่ยในแต่ละเฟสวินโดวส์ การกระจาย  $H_{qn}(\varphi)$  หาได้จากจำนวนรวมคัสซาร์จทั้งหมดในแต่ละเฟสวินโดวส์หารด้วยจำนวนครั้งของการเกิดคัสซาร์จในเฟสวินโดวส์เดียวกัน
4. การกระจายขนาดคัสซาร์จที่มากที่สุดตามมุมเฟส  $H_{qm}(\varphi)$  เป็นปริมาณแทนค่าที่มากที่สุดของคัสซาร์จในแต่ละเฟสวินโดวส์

ค่าการกระจาย  $H_n(\varphi)$  และ  $H_{qn}(\varphi)$  ให้การอธิบายที่ดีของการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบคัสซาร์จบางส่วน โดยที่ค่าการกระจาย  $H_n(\varphi)$  บรรจุข้อมูลความหนาแน่นของคัสซาร์จบางส่วน วิชานิพนธ์นี้จึงใช้ค่าการกระจาย  $H_n(\varphi)$  และ  $H_{qn}(\varphi)$  ในการอธิบายลักษณะการเกิดคัสซาร์จบางส่วน

การพิจารณาค่าการกระจาย  $H_n(\varphi)$  และ  $H_{qn}(\varphi)$  ของการเกิดคัสซาร์จในช่วงแรงดันครึ่งบวก จะพิจารณาแยกกันกับการเกิดคัสซาร์จในช่วงแรงดันครึ่งลบ ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 การพิจารณาของปริมาณอนุมาณ

### 5.2.3 ตัวดำเนินการทางสถิติ

ตัวดำเนินการทางสถิติ เป็นปริมาณที่อยู่ในรูปของตัวดำเนินการทางสถิติ โดยตัวดำเนินการทางสถิติใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณอนุมาณบางปริมาณ เพื่อหาค่ารูปแบบหรือลักษณะการกระจายของข้อมูล โดยที่ค่าการกระจายจำนวนครั้งที่เกิดคิสราร์จตามมุมเฟส  $H_n(\varphi)$  และการกระจายขนาดคิสราร์จเฉลี่ยตามมุมเฟส  $H_{qn}(\varphi)$  เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับวัสดุฉนวนไฟฟ้าที่เกิดคิสราร์จบางส่วน ตัวดำเนินการทางสถิติประกอบด้วย

(1) ความเบ้เอียง (skewness)  $Sk$  คือ ค่าที่แสดงความสมมาตรหรือความเบ้เอียงของรูปแบบการกระจายข้อมูลเมื่อเปรียบเทียบการกระจายข้อมูลปกติ

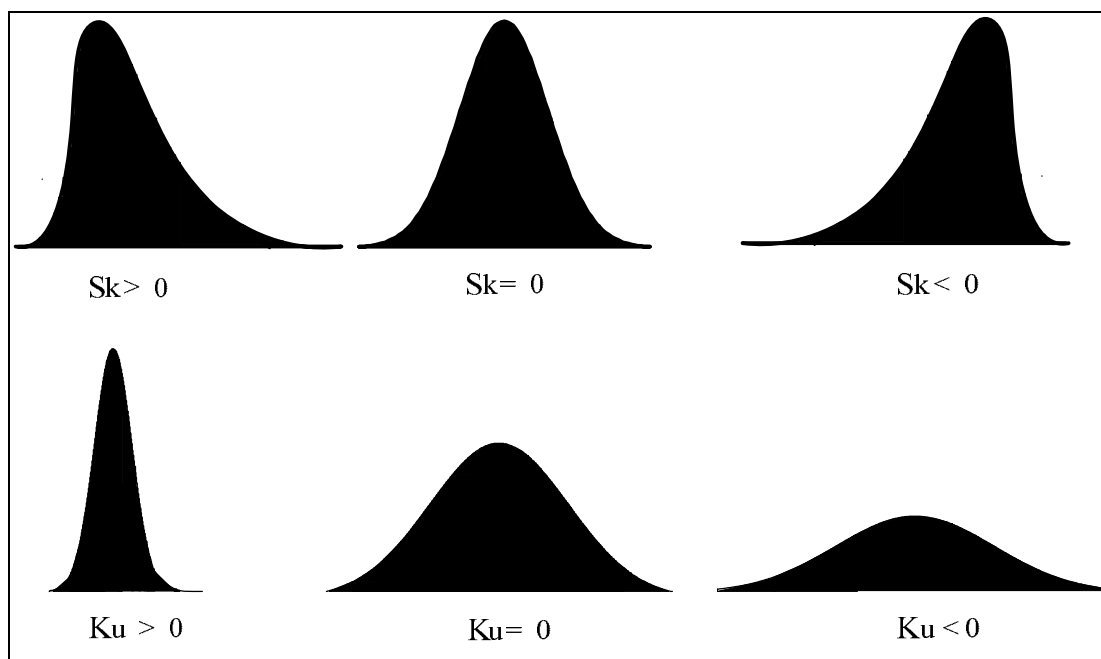
$$Sk = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 \times P_i}{\sigma^3} \quad (5.6)$$

- เมื่อ  $X_i$  คือ ข้อมูล  
 $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล  
 $\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)  
 $P_i$  คือ ความน่าจะเป็นของข้อมูล  $X_i$
- โดย  $Sk = 0$  ถ้าการกระจายแบบสมมาตร  
 $Sk > 0$  ถ้าการกระจายเบ้เอียงไปทางซ้าย  
 $Sk < 0$  ถ้าการกระจายเบ้เอียงไปทางขวา

(2) ความแหลมคม (kurtosis)  $Ku$  คือ ค่าที่แสดงความโด่งหรือความแหลมคมของการกระจายข้อมูล

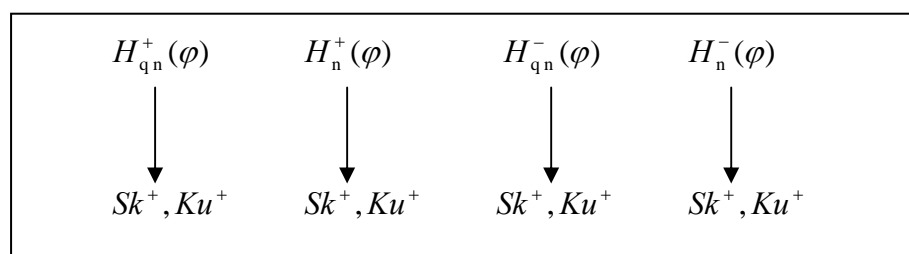
$$Ku = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 \times P_i}{\sigma^4} - 3 \quad (5.7)$$

- เมื่อ  $X_i$  คือ ข้อมูล  
 $\mu$  คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล  
 $\sigma$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation)  
 $P_i$  คือ ความน่าจะเป็นของข้อมูล  $X_i$
- โดย  $Ku = 0$  ถ้าการกระจายแบบสมมาตร  
 $Ku > 0$  ถ้าการกระจายมีลักษณะยอดแหลม นั่นคือข้อมูลกระจายอยู่ในช่วงแคบ  
 $Ku < 0$  ถ้าการกระจายมีลักษณะยอดตื้น นั่นคือข้อมูลกระจายอยู่ในช่วงกว้าง



รูปที่ 5.3 รูปแบบการกระจายของค่าความเบ้เอียง และความแหลมคม

เนื่องจากตัวแปรบางส่วน สามารถเกิดได้ทั้งในแรงดันครึ่งบวก และแรงดันครึ่งลบของคลื่นแรงดัน จึงต้องพิจารณาปริมาณในแรงดันครึ่งบวก แยกออกจากการพิจารณาปริมาณในแรงดันครึ่งลบ ดังนั้น ปริมาณ  $H_{qn}(\varphi)$  และ  $H_n(\varphi)$  จึงสามารถแสดงด้วยการกระจายใน 2 ลักษณะการกระจาย นั่นคือ การกระจายในแรงดันครึ่งบวก  $H_{qn}^+(\varphi)$  กับ  $H_n^+(\varphi)$  และการกระจายในแรงดันครึ่งลบ  $H_{qn}^-(\varphi)$  กับ  $H_n^-(\varphi)$  โดยแต่ละปริมาณ ( $H_{qn}^+(\varphi)$ ,  $H_n^+(\varphi)$ ,  $H_{qn}^-(\varphi)$  และ  $H_n^-(\varphi)$ ) สามารถอธิบายด้วยค่าความเบ้ และค่าความแหลมคม



รูปที่ 5.4 พารามิเตอร์คุณลักษณะของการกระจาย

เพื่อศึกษาความแตกต่างของปริมาณทางสถิติระหว่างการกระจาย  $H_{qn}(\varphi)$  และ  $H_n(\varphi)$  ของทั้งแรงดันครึ่งบวกและแรงดันครึ่งลบ จึงมีการกำหนดปริมาณที่ใช้อธิบายความแตกต่างดังนี้

(ก) ความอสมมาตรของดิสชาร์จ (discharge asymmetry :  $Q$ )

$$Q = \frac{Q_s^- / N_q^-}{Q_s^+ / N_q^+} \quad (5.8)$$

เมื่อ  $Q_s^+$  คือ ผลรวมขนาดดิสชาร์จในแรงดันครึ่งบวก  
 $Q_s^-$  คือ ผลรวมขนาดดิสชาร์จในแรงดันครึ่งลบ  
 $N_q^+$  คือ ผลรวมจำนวนครั้งการดิสชาร์จในแรงดันครึ่งบวก  
 $N_q^-$  คือ ผลรวมจำนวนครั้งการดิสชาร์จในแรงดันครึ่งลบ

$$Q_s^\pm = \sum q_i^\pm \quad (5.9)$$

เมื่อ  $q^+$  คือ ขนาดของประจุที่ปรากฏในเฟสวินโดว์ของแรงดันครึ่งบวก  
 $q^-$  คือ ขนาดของประจุที่ปรากฏในเฟสวินโดว์ของแรงดันครึ่งลบ  
 (ข) ค่า cross – correlation factor :  $cc$

$$cc = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i / n}{\sqrt{[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n] [\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n]}} \quad (5.10)$$

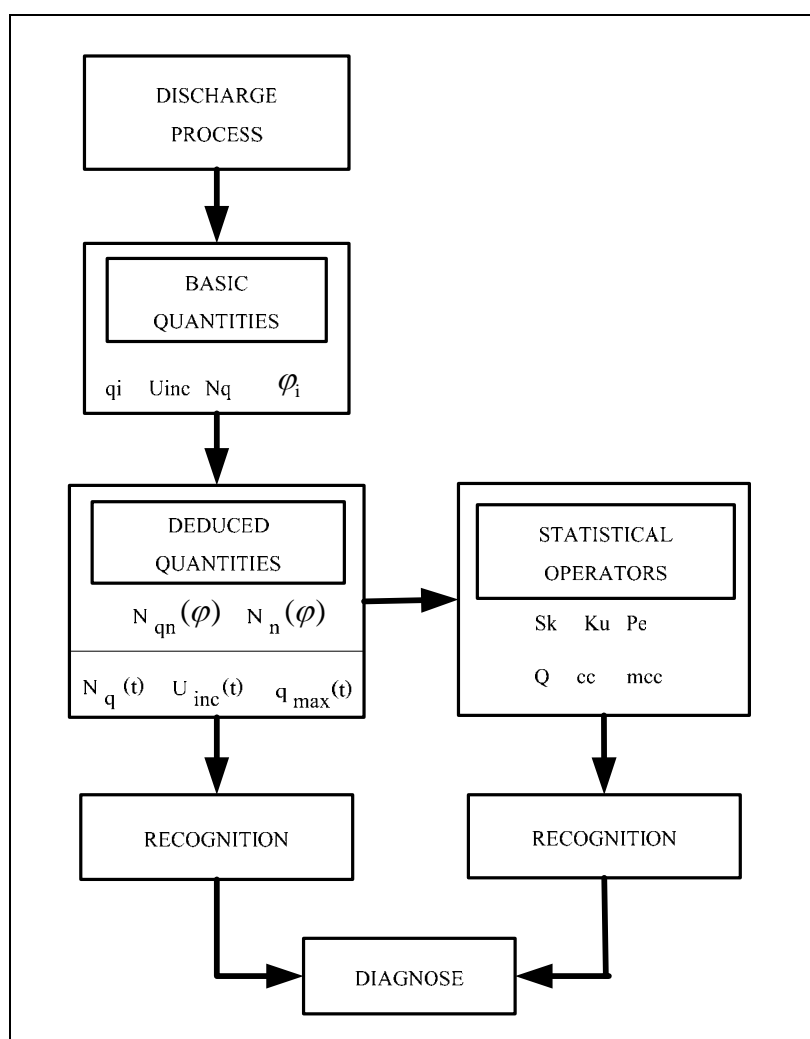
เมื่อ  $x_i$  คือ ขนาดดิสชาร์จเฉลี่ยในหนึ่งเฟสวินโดว์ของแรงดันครึ่งบวก  
 $y_i$  คือ ขนาดดิสชาร์จเฉลี่ยในหนึ่งเฟสวินโดว์ของแรงดันครึ่งลบ  
 $n$  คือ จำนวนเฟสวินโดว์



(ค) ค่า modified cross – correlation factor :  $mcc$  ในกรณีนี้  $\Phi = 1$

$$mcc = \Phi \cdot Q \cdot cc \quad (5.11)$$

ปริมาณต่าง ๆ ทางสถิติของดีสชาร์จบางส่วนตามที่กล่าวมาข้างต้นตามลำดับสามารถนำมาใช้ในการรู้จำหรือวินิจฉัยดีสชาร์จบางส่วนตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 แผนผังของการวิเคราะห์ข้อมูลดีสชาร์จบางส่วนเพื่อการรู้จำและการจำแนกประเภท  
(Gulski, 1991)

#### 5.2.4 ตัวอย่างการคำนวณค่าคุณลักษณะ

ในหัวข้อตัวอย่างการคำนวณค่าคุณลักษณะ เป็นการเสนอการคำนวณค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วน ด้วยวิธีทางสถิติและสมการที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้นของบทนี้

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างข้อมูลการเกิดโคโรนาดีสซาร์จในอากาศ

ครั้งที่	ขนาดประจุ	มมเฟส	ครั้งที่	ขนาดประจุ	มมเฟส
1	6.05e-10	71.425	24	6.55e-11	258.13
2	5.37e-10	90.578	25	6.87e-11	258.8
3	4.35e-10	116.1	26	6.55e-11	259.46
4	7.40e-11	237.48	27	7.05e-11	260.17
5	7.86e-11	239.95	28	6.56e-11	260.79
6	7.26e-11	241.71	29	6.74e-11	261.41
7	7.46e-11	243.25	30	6.55e-11	262.03
8	6.88e-11	244.5	31	6.57e-11	262.62
9	7.09e-11	245.72	32	6.77e-11	263.23
10	7.54e-11	246.98	33	6.47e-11	263.8
11	7.04e-11	247.94	34	6.47e-11	264.37
12	6.92e-11	248.89	35	6.63e-11	264.95
13	6.90e-11	249.78	36	6.75e-11	265.55
14	6.61e-11	250.65	37	6.63e-11	266.13
15	6.76e-11	251.48	38	7.00e-11	266.73
16	6.69e-11	252.29	39	6.57e-11	267.26
17	6.77e-11	253.1	40	6.51e-11	267.8
18	6.72e-11	253.86	42	6.64e-11	268.33
19	6.78e-11	254.62	42	6.42e-11	268.85
20	6.57e-11	255.33	43	6.58e-11	269.39
21	6.56e-11	256.03	44	7.33e-11	270
22	6.64e-11	256.73	45	6.64e-11	270.54
23	6.92e-11	257.47	46	6.48e-11	271.06

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลการเกิดโคโรนาไวรัสซาร์จในอากาศ ในช่วงหนึ่งคาบเวลา (ต่อ)

ครั้งที่	ขนาดประจุ	มุมเฟส	ครั้งที่	ขนาดประจุ	มุมเฟส
50	6.46e-11	273.18	74	6.73e-11	287.42
51	6.87e-11	273.76	75	6.72e-11	288.14
52	6.90e-11	274.35	76	6.73e-11	288.87
53	6.58e-11	274.86	77	7.01e-11	289.72
54	6.42e-11	275.38	78	6.78e-11	290.46
47	6.52e-11	271.6	79	6.92e-11	291.29
48	6.59e-11	272.14	80	6.67e-11	292.05
49	6.46e-11	272.67	81	6.56e-11	292.85
55	6.42e-11	275.93	82	6.67e-11	293.7
56	6.41e-11	276.46	83	6.81e-11	294.6
57	6.98e-11	277.12	84	6.59e-11	295.47
58	6.42e-11	277.65	85	7.12e-11	296.45
59	6.58e-11	278.22	86	6.72e-11	297.41
60	6.46e-11	278.76	87	6.83e-11	298.39
61	6.50e-11	279.32	88	6.71e-11	299.42
62	6.53e-11	279.9	89	6.78e-11	300.53
63	6.34e-11	280.46	90	6.91e-11	301.68
64	6.44e-11	281.04	91	6.97e-11	302.97
65	6.64e-11	281.64	92	6.94e-11	304.3
66	6.68e-11	282.27	93	7.01e-11	305.77
67	6.51e-11	282.86	94	6.83e-11	307.43
68	6.57e-11	283.48	95	6.84E-11	309.71
69	6.56e-11	284.12			
70	6.48e-11	284.75			
71	6.69e-11	285.41			
72	6.46e-11	286.05			
73	6.59e-11	286.73			

ข้อมูลดีสชาร์จในตารางที่ 5.1 เป็นข้อมูลโคโรนาดีสชาร์จในอากาศในช่วงหนึ่งคาบเวลา จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

- ในช่วงแรงดันครึ่งบวก เกิดดีสชาร์จ 3 ครั้ง เฉลี่ยเป็น 0.52567 nC
- ในช่วงแรงดันครึ่งลบ เกิดดีสชาร์จ 5 ครั้ง เฉลี่ยเป็น 67.351 pC

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างข้อมูลการเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง

คาบเวลาที่ 1		
ครั้งที่	ขนาดประจุ	มุมเฟส
1	1.05E-11	99.498
2	2.66E-11	231.52
3	1.08E-11	231.67
4	9.18E-12	231.87
5	1.47E-11	232.9
6	8.36E-12	233.17

ข้อมูลดีสชาร์จในตารางที่ 5.2 เป็นข้อมูลโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลงในช่วงหนึ่งคาบเวลา จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

- ในช่วงแรงดันครึ่งบวก เกิดดีสชาร์จ 1 ครั้ง เฉลี่ยเป็น 10.05 pC
- ในช่วงแรงดันครึ่งลบ เกิดดีสชาร์จ 5 ครั้ง เฉลี่ยเป็น 13.928 pC

ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างข้อมูลการเกิดดีสชาร์จภายใน

คาบเวลาที่ 1		
ครั้งที่	ขนาดประจุ	มมเฟส
1	8.94E-10	28.985
2	1.46E-10	74.447
3	4.99E-10	81.698
4	8.23E-10	244.23
5	9.03E-10	268.69

ข้อมูลดีสชาร์จในตารางที่ 5.3 เป็นข้อมูลดีสชาร์จภายใน ในช่วงหนึ่งคาบเวลา จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

- ในช่วงแรงดันครึ่งบวก เกิดดีสชาร์จ 3 ครั้ง เฉลี่ยเป็น 51.3 nC
- ในช่วงแรงดันครึ่งลบ เกิดดีสชาร์จ 2 ครั้ง เฉลี่ยเป็น 86.3 nC

ตารางที่ 5.4 ตัวอย่างข้อมูลการเกิดดีสชาร์จตามผิว

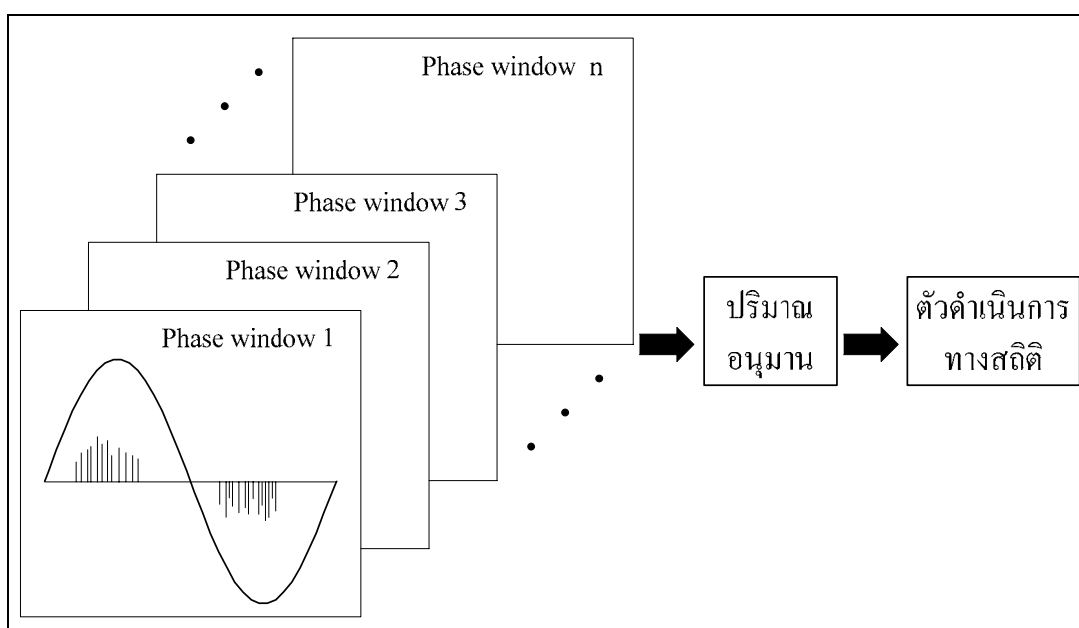
คาบเวลาที่ 1		
ครั้งที่	ขนาดประจุ	มุมเฟส
1	1.34E-09	21.923
2	7.28E-10	32.547
3	9.35E-10	56.683
4	6.03E-10	72.826
5	5.61E-10	92.877
6	4.01E-11	117.71
7	8.11E-11	197.74
8	8.75E-11	201.76
9	7.57E-10	213.52
10	4.13E-11	225.07
11	1.10E-09	238.53
12	2.61E-10	244.76
13	7.50E-10	249.28
14	4.11E-11	252.66
15	4.19E-11	259.38

ข้อมูลดีสชาร์จในตารางที่ 5.4 เป็นข้อมูลดีสชาร์จตามผิว ในช่วงหนึ่งคาบเวลา จึงสามารถคำนวณได้ดังนี้

- ในช่วงแรงดันครึ่งบวก เกิดดีสชาร์จ 6 ครั้ง เฉลี่ยเป็น 0.701 nC
- ในช่วงแรงดันครึ่งลบ เกิดดีสชาร์จ 9 ครั้ง เฉลี่ยเป็น 0.351 nC

## 5.4 สรุป

การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดดิสซาร์จบางส่วน เพื่อใช้เป็นค่าคุณลักษณะของดิสซาร์จบางส่วนนั้นเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยค่าคุณลักษณะของดิสซาร์จบางส่วนที่ได้จะนำมาใช้เป็นข้อมูลในการรู้จำและการจำแนกประเภทของดิสซาร์จบางส่วน สำหรับวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลดิสซาร์จบางส่วนในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีการทางสถิติในการหาค่าคุณลักษณะที่บ่งบอกลักษณะการเกิดดิสซาร์จบางส่วน ลำดับการวิเคราะห์ข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 5.6 เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ปริมาณพื้นฐาน แล้วคำนวณหาปริมาณอนุमान และสุดท้ายคำนวณตัวดำเนินการทางสถิติ ทำให้ได้ค่าคุณลักษณะของดิสซาร์จบางส่วน ซึ่งประกอบด้วย ค่าความเบ้เอียง ค่าความโด่งหรือความแหลมคม ความอสมมาตรของดิสซาร์จ ค่า cross – correlation factor และค่า modified cross – correlation factor



รูปที่ 5.6 แผนผังลำดับการคำนวณค่าคุณลักษณะของดิสซาร์จบางส่วนในทางสถิติ

## บทที่ 6

### เทคนิคปัญญาประดิษฐ์

#### 6.1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้ของจะกล่าวถึงเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการรู้จำและการจำแนกประเภทคิศจารัจบางส่วน เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการรู้จำนั้นมีหลากหลาย แต่สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเพียง 2 เทคนิคเท่านั้น คือ เทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนูน (SVM)

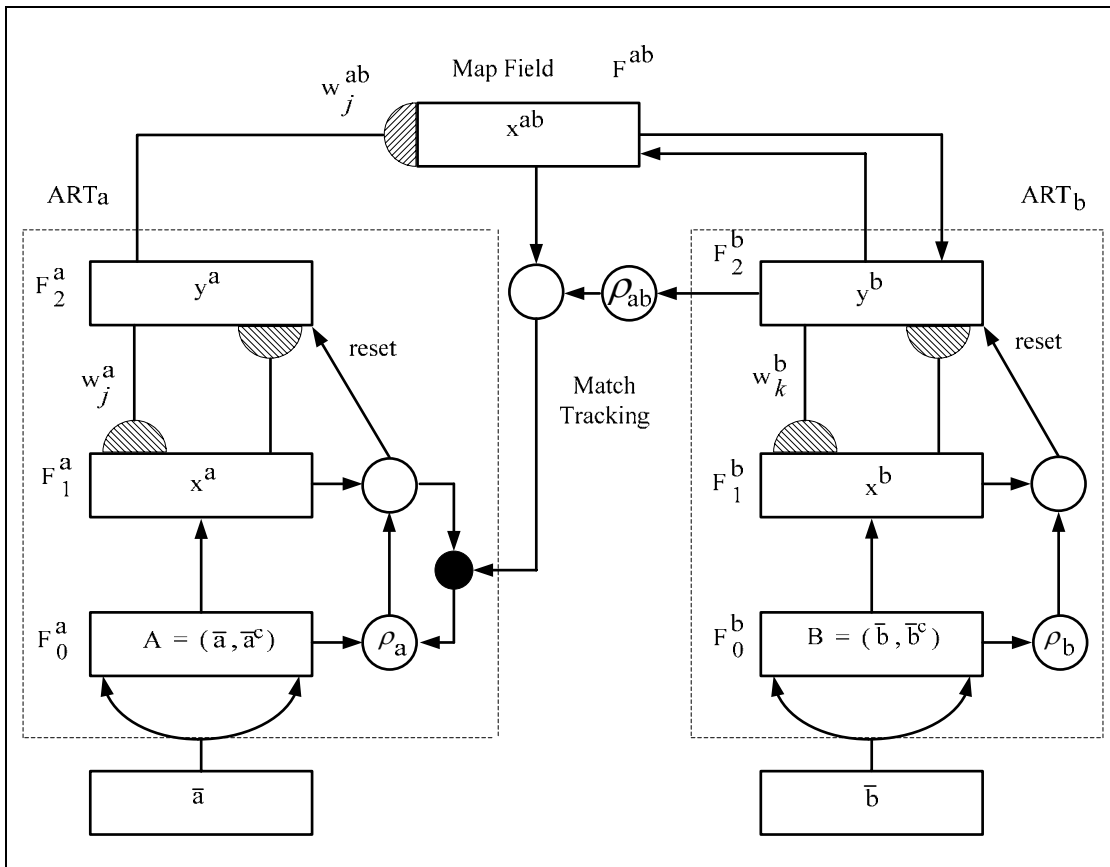
#### 6.2 Fuzzy ARTMAP

การพัฒนาาระบบชาญฉลาดได้มีความก้าวหน้าไปอย่างมาก นักวิจัยได้ทำการออกแบบสร้างโครงข่ายประสาทเทียมขึ้นมาเพื่อใช้แก้ปัญหาในหลายๆด้านเช่น การจดจำรูปแบบ การทำนาย การหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เป็นต้น

ทฤษฎีเรโซแนนซ์แบบปรับตัวได้ (Adaptive Resonance Theory : ART) ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Carpenter and Grossberg (1987;1991) สำหรับเครือข่าย ART แบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ ART1 ART2 และ fuzzy ART โดย ART1 เป็นรูปแบบไบนารีของ ART และสามารถจัดกลุ่มเวกเตอร์อินพุตแบบไบนารีได้ ART2 เป็นรูปแบบอนาลอกของ ART และสามารถจัดกลุ่มเวกเตอร์อินพุตค่าจำนวนจริงได้ fuzzy ART สามารถจัดกลุ่มเวกเตอร์อินพุตทั้งค่าไบนารีและค่าต่อเนื่อง ARTMAP เป็นรูปแบบที่มีการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (supervised version) ของ ART และ ARTMAP เป็นประเภทหนึ่งของสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งดำเนินการการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนของประเภทการจดจำและการส่งแบบหลายมิติ (multi-dimensional maps) ใช้ได้ทั้งเวกเตอร์อินพุตรูปแบบอนาลอกและแบบไบนารี

Fuzzy ARTMAP (Carpenter et al., 1992) เป็นสถาปัตยกรรมโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งสังเคราะห์จากพีชชีลอจิกกับโครงข่ายประสาทเทียม ART สถาปัตยกรรมของ Fuzzy ARTMAP ประกอบด้วย ARTa และ ARTb ในระหว่างการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน จะกำหนดชุดของอินพุต  $(\bar{a}, \bar{b})$  โดยมี  $F^{ab}$  ซึ่งเป็นโมดูลระหว่าง ART หรือเรียกว่าสนามส่ง (map field) เป็นเชื่อมต่อ ARTa และ ARTb สถาปัตยกรรมของ Fuzzy ARTMAP ดังแสดงในรูปที่ 6.1





รูปที่ 6.1 สถาปัตยกรรมหรือโครงสร้างของ Fuzzy ARTMAP (Carpenter et al., 1992)

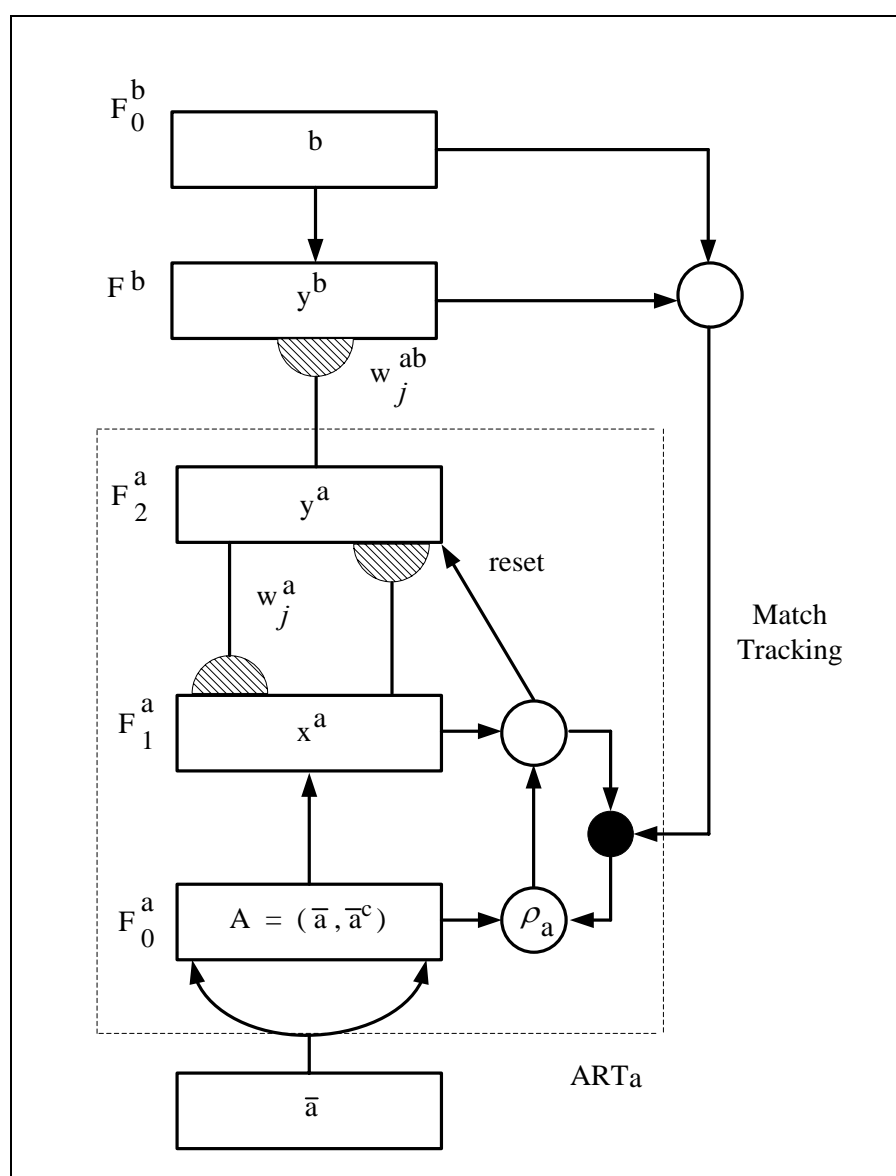
ตัวดำเนินการแปลงข้อมูลให้สมบูรณ์ใน ART<sub>a</sub> และ ART<sub>b</sub> จะแปลงรูปแบบอินพุต  $\bar{a}$  และ  $\bar{b}$  ให้เป็นอินพุตที่สมบูรณ์แทนด้วย  $A = (\bar{a}, \bar{a}^c)$  และ  $B = (\bar{b}, \bar{b}^c)$  โดย  $F_1^a$  และ  $F_1^b$  จะรับ A และ B เป็นอินพุต

ถ้าการทำนาย ซึ่งทำขึ้นโดย ART<sub>a</sub> ไม่ถูกต้องหรือได้รับการยืนยันที่ ART<sub>b</sub> ก็จะเกิดการขัดขวางของการกระตุ้นสนามส่ง นั่นคือกระบวนการ match tracking

match tracking ทำการเพิ่มค่าพารามิเตอร์สอดคล้องของ ART<sub>a</sub> ที่  $F_1^a$  และ  $F_0^a$  ให้เหมาะสมและเป็นการกระตุ้น ART<sub>a</sub> ให้ทำนายได้อย่างถูกต้อง

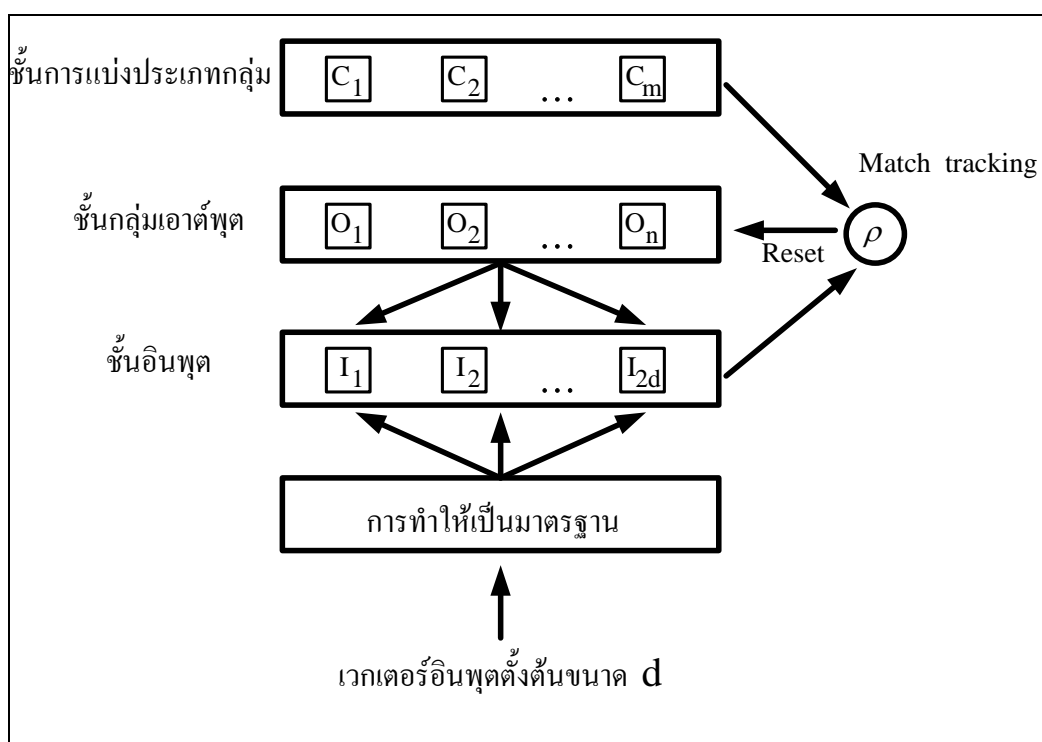
### 6.3 Simplified Fuzzy ARTMAP (SFAM)

Simplified Fuzzy ARTMAP (Kasuba, 1993) คือ รูปแบบที่ง่ายของ Fuzzy ARTMAP โดยที่สนามส่ง และ ARTb ถูกลดให้เป็น สนามเดี่ยว (single field)  $F^b$  ดังแสดงในรูปที่ 6.2 SFAM ได้ลดค่าดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ และความซับซ้อนที่มากเกินไปเมื่อเทียบกับแบบดั้งเดิมของ SFAM นอกจากนี้ยังใช้สมการการเรียนรู้ที่ง่ายและสามารถเรียนรู้ตัวอย่างหรือรูปแบบด้วยจำนวนรอบที่น้อยครั้งของการฝึกสอนซ้ำ



รูปที่ 6.2 สถาปัตยกรรมหรือโครงสร้างของ Simplified Fuzzy ARTMAP (Carpenter et al., 1992)

Simplified Fuzzy ARTMAP โดยพื้นฐานแล้วประกอบด้วยสองชั้นเครือข่าย คือชั้นอินพุต และชั้นเอาต์พุต ดังแสดงในรูปที่ 6.3 โดยแบ่งออกเป็นชั้นย่อยได้แก่ ชั้นตัวแปลงข้อมูลให้สมบูรณ์ (complement coder layer) ชั้น อิน พุ ต (input layer) ชั้น ก ลุ่ม เอา ต์ พุ ต (output category layer) และชั้นการแบ่งประเภทกลุ่ม (category layer) สำหรับลำดับชั้นการทำงานเริ่มต้นด้วย อินพุตเข้ามาสู่ ชั้นตัวแปลงข้อมูลให้สมบูรณ์ โดยในชั้นนี้ชุดเวกเตอร์ข้อมูลจะถูกเพิ่มให้มีขนาดเป็นสองเท่า ของขนาดเดิม ในการเพิ่มขนาดของเวกเตอร์ให้เป็นสองเท่าของขนาดเดิมนั้น สามารถทำได้ โดยการเพิ่มส่วนที่ทำให้สมบูรณ์ของชุดเวกเตอร์ข้อมูลชุดนั้น ๆ ดังแสดงในสมการที่ 6.1 และ สมการที่ 6.2จากนั้นอินพุตที่สมบูรณ์จะไปสู่ชั้นอินพุต ค่าน้ำหนัก ( $W$ ) จะได้จากชั้นกลุ่มเอาต์พุต ชั้นแบ่งประเภทกลุ่มจะจัดเตรียมชื่อตามจำนวนของกลุ่มและเป็นสิ่งซึ่งเครือข่ายต้องเรียนรู้ สำหรับค่าพารามิเตอร์สอดคล้อง (vigilance parameter :  $\rho$ ) และ match tracking เป็นกลไกของ สถาปัตยกรรมเครือข่าย และถูกใช้สำหรับการฝึกสอนเครือข่าย



รูปที่ 6.3 Simplified Fuzzy ARTMAP

ค่า  $\rho$  อยู่ในช่วง 0-1 ใช้ควบคุมกลุ่มของเอาต์พุต โดยที่กลไก match tracking ของเครือข่าย จะทำหน้าที่ในการปรับค่า  $\rho$  ดังนั้นเมื่อเกิดข้อผิดพลาดในช่วงของการฝึกสอนของการแบ่ง ประเภทแล้ว กลไก match tracking อาจจะมีผลต่อเครือข่ายในการปรับพารามิเตอร์การเรียนรู้ และการเปิดโหนดเอาต์พุตใหม่

### 6.3.1 การทำอินพุตให้เป็นมาตรฐาน

องค์ประกอบเวกเตอร์ที่สมบูรณ์ถูกใช้สำหรับการทำอินพุตให้เป็นมาตรฐาน (input normalization) โดยทำการคำนวณค่าเวกเตอร์ที่ถูกแปลงอย่างสมบูรณ์ (complement coded vector:  $\bar{a}^C$ )

เมื่อกำหนดเวกเตอร์อินพุตเป็น  $\bar{a} = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_d)$  ซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $d$  ดังนั้นเวกเตอร์  $\bar{a}^C$  สามารถคำนวณได้จาก

$$\bar{a}^C = (1 - a_1, 1 - a_2, 1 - a_3, \dots, 1 - a_d) \quad (6.1)$$

กระบวนการทำอินพุตให้เป็นมาตรฐานมีความจำเป็นเพราะว่า Simplified Fuzzy ARTMAP ต้องการอินพุตที่อยู่ในช่วง 0-1 ดังนั้นเวกเตอร์อินพุตที่สมบูรณ์  $I$  จะคำนวณได้ดังนี้

$$I = (\bar{a}, \bar{a}^C) = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_d, 1 - a_1, 1 - a_2, 1 - a_3, \dots, 1 - a_d) \quad (6.2)$$

ขนาดของเวกเตอร์กำหนดได้ดังสมการ

$$|p| = \sum_{i=1}^d p_i, \quad \text{สำหรับ } p = (p_1, p_2, \dots, p_d) \quad (6.3)$$

ดังนั้นสำหรับค่า  $|I|$

$$|I| = |(\bar{a}, \bar{a}^C)| = \sum_{i=1}^d a_i + \left( d - \sum_{i=1}^d a_i \right) \quad (6.4)$$

### 6.3.2 การกระตุ้นโหนดเอาต์พุต

การกระตุ้น โหนดเอาต์พุต (output activation) แสดงโดยค่า  $T_j$  และถูกอ้างอิงไว้ให้เป็นฟังก์ชันการกระตุ้น (activation function) สำหรับโหนดเอาต์พุตใด ๆ เมื่อ  $W_j$  คือ top-down weight

$$T_j(I) = \frac{|I \wedge W_j|}{\alpha + |W_j|} \quad (6.5)$$

โดย  $\wedge$  = Fuzzy AND operator (minimum) นิยามว่า

$$(p \wedge q)_i = \min(p_i, q_i) \quad (6.6)$$

พารามิเตอร์  $\alpha$  เป็นค่าที่เข้าใกล้ศูนย์ โดยส่วนใหญ่จะประมาณ 0.0000001 ในการพิจารณาโหนดที่มีค่าฟังก์ชันการกระตุ้นสูงสุด

$$\text{Winner} = \max(T_j) \quad (6.7)$$

และ ฟังก์ชันจับคู่ (match function) ถูกกำหนดได้โดย

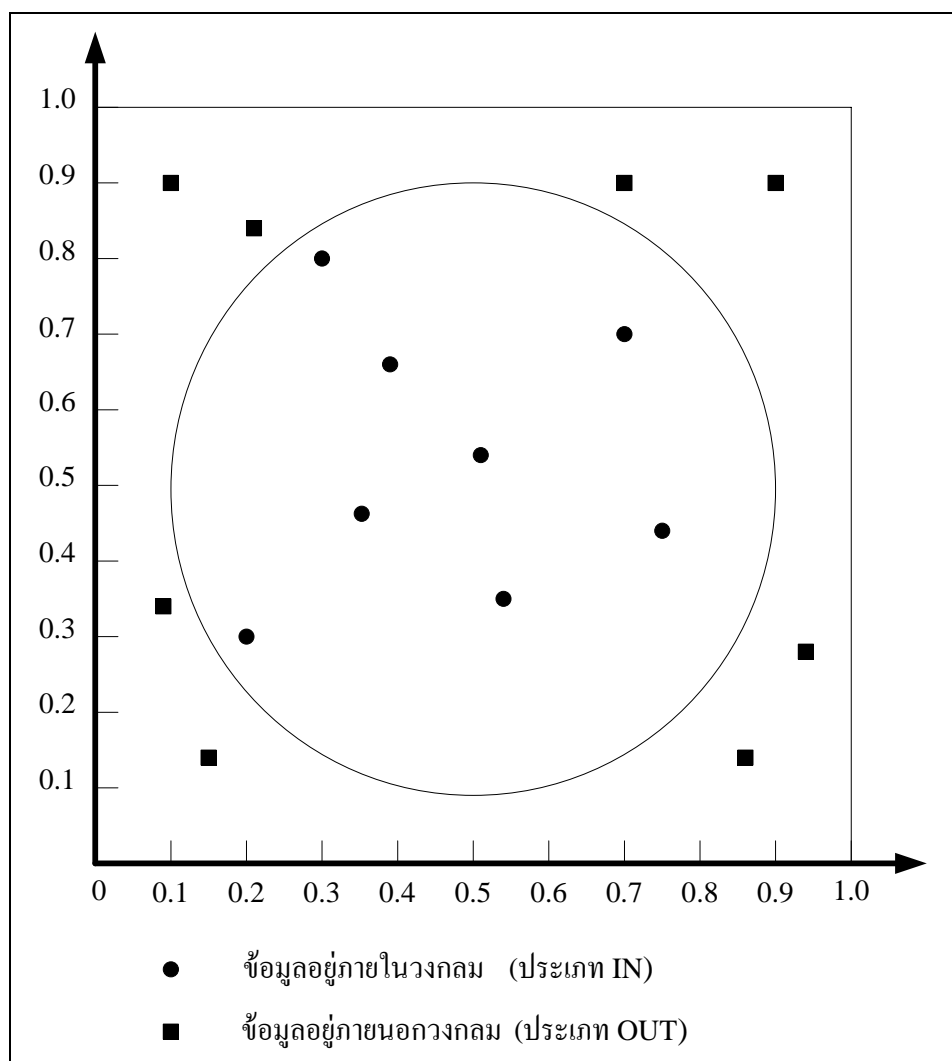
$$\frac{|I \wedge W_j|}{|I|} \quad (6.8)$$

ดังนั้น สมการปรับค่า  $W_j$  ของโหนดเอาต์พุตใด ๆ

$$W_j^{\text{new}} = \beta(I \wedge W_j^{\text{old}}) + (1 - \beta)W_j^{\text{old}} \quad \text{โดย } 0 < \beta < 1 \quad (6.9)$$

### 6.3.3 หลักการทำงานของ Simplified Fuzzy ARTMAP

หลักการทำงานของ Simplified Fuzzy ARTMAP สามารถอธิบายได้ดังตัวอย่าง การแก้ปัญหาการจำแนกจุดข้อมูลที่อยู่ภายในหรือภายนอกพื้นที่วงกลม ซึ่งอยู่ในพื้นที่สี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 6.4 เป็นข้อมูลเป็นคู่อันดับ (x y) ซึ่งอยู่ภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด  $1 \times 1$  หน่วย โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ประเภทคือประเภท IN และประเภท OUT ถ้าข้อมูลที่อยู่ภายในพื้นที่วงกลมจะจัดให้อยู่ในประเภท IN และถ้าข้อมูลที่อยู่ภายนอกพื้นที่วงกลมจะจัดให้อยู่ในประเภท OUT หลักการทำงานของ Simplified Fuzzy ARTMAP ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการฝึกสอน (training) และขั้นตอนการวินิจฉัย (inference)



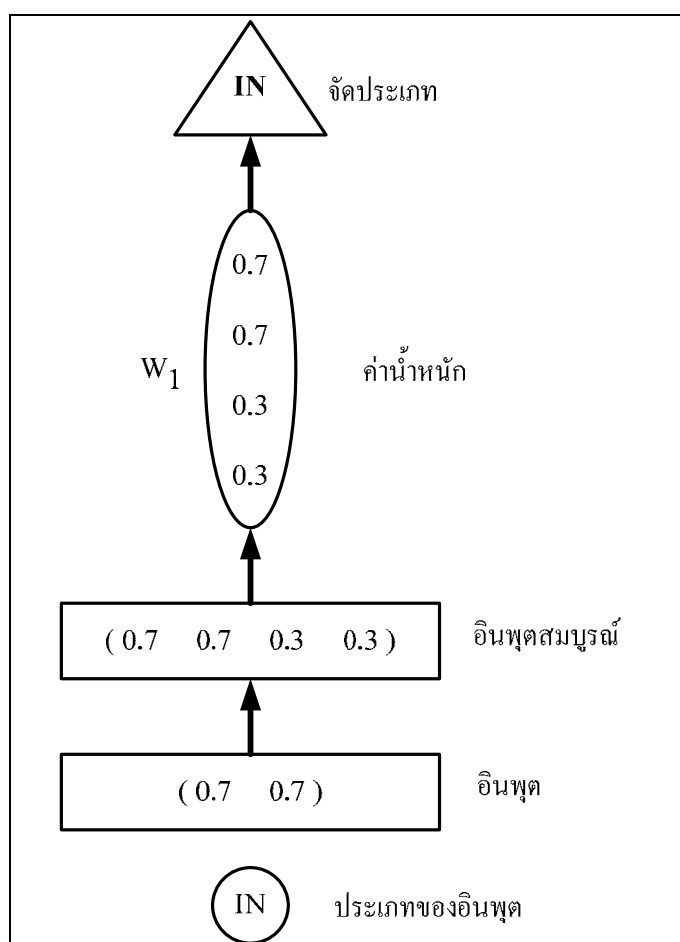
รูปที่ 6.4 แสดงข้อมูลที่อยู่ภายในวงกลมและภายนอกวงกลม

(ก) ขั้นตอนการฝึกสอน เป็นการฝึกสอน Simplified Fuzzy ARTMAP ด้วยข้อมูลสำหรับฝึกสอน ซึ่งมีทั้งข้อมูลประเภท IN และข้อมูลประเภท OUT กระบวนการฝึกสอนแสดงดังตัวอย่างที่ 6.1 –ตัวอย่างที่ 6.6

ตัวอย่างที่ 6.1 พิจารณาการเรียนรู้ (0.7 0.7) และมีประเภทเป็น IN

$$I = (0.7 \ 0.7 \ 1-0.7 \ 1-0.7) = (0.7 \ 0.7 \ 0.3 \ 0.3)$$

เนื่องจากเป็นอินพุตแรกของการฝึกสอนประเภท IN ซึ่งจะทำให้ค่าของ  $W_1 = (0.7 \ 0.7 \ 0.3 \ 0.3)$  และค่าฟังก์ชันการกระตุ้นจึงยังไม่มีผล



รูปที่ 6.5 การฝึกสอน Simplified Fuzzy ARTMAP ด้วยข้อมูล (0.7 0.7) ประเภท IN

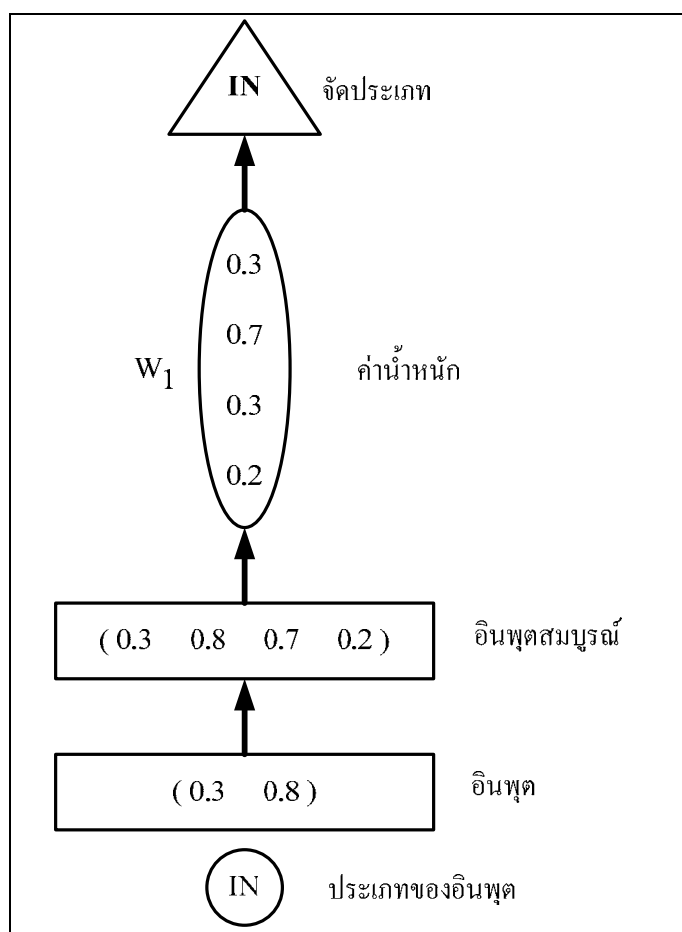
ตัวอย่างที่ 6.2 พิจารณาการเรียนรู้ (0.3 0.8) และมีประเภทเป็น IN

$$I = (0.3 \ 0.8 \ 1-0.3 \ 1-0.8) = (0.3 \ 0.8 \ 0.7 \ 0.2)$$

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_j(I) = \frac{|I \wedge W_j|}{\alpha + |W_j|} = 0.7499 \text{ โดยที่ } (\alpha = 0.000001)$$

$$\text{ค่าฟังก์ชันจับคู่} = MF(I) = \frac{|I \wedge W_j|}{|I|} = 0.75$$

ถ้าเลือกค่าพารามิเตอร์สอดคล้อง ( $\rho$ ) = 0.5 จะเห็นได้ว่าในกรณีการฝึกสอนนี้ ค่า  $MF(I) > \rho$  และเนื่องจากกลุ่มประเภทของ  $I$  คือ IN ซึ่งชี้ระบุโดย  $W_1$  ดังนั้น  $W_1$  จึงเหมาะที่จะเรียนรู้เวกเตอร์อินพุต  $I$  และทำการปรับค่า  $W_1$  ด้วยสมการ (6.9) และใช้ค่า  $\beta = 1$  จะได้ว่า  $W_1^{\text{new}} = (0.3 \ 0.7 \ 0.3 \ 0.2)$



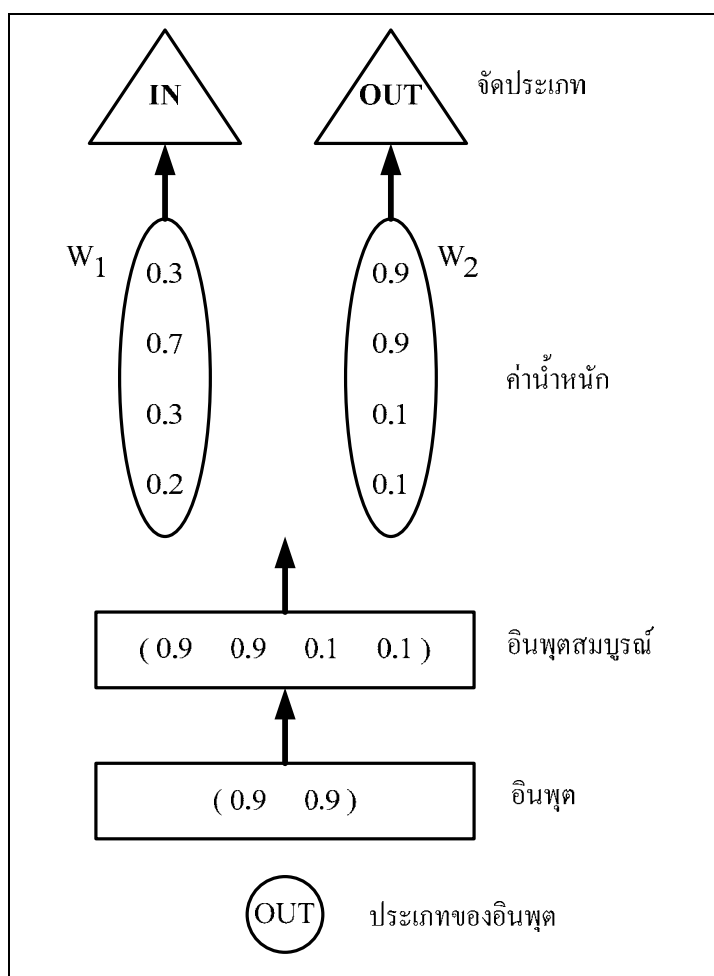


รูปที่ 6.6 การฝึกสอน Simplified Fuzzy ARTMAP ด้วยข้อมูล (0.3 0.8) ประเภท IN

ตัวอย่างที่ 6.3 พิจารณาการเรียนรู้ (0.9 0.9) และมีประเภทเป็น OUT

$$I = (0.9 \ 0.9 \ 1 - 0.9 \ 1 - 0.9) = (0.9 \ 0.9 \ 0.1 \ 0.1)$$

เนื่องจากเป็นอินพุตแรกของการฝึกสอนประเภท OUT ดังนั้นค่าของ  $W_2 = (0.9 \ 0.9 \ 0.1 \ 0.1)$  และค่าฟังก์ชันการกระตุ้นจึงยังไม่มีผล



รูปที่ 6.7 การฝึกสอน Simplified Fuzzy ARTMAP ด้วยข้อมูล (0.9 0.9) ประเภท OUT

ตัวอย่างที่ 6.4 พิจารณาการเรียนรู้ (0.7 0.9) และมีประเภทเป็น OUT

$$I = (0.7 \ 0.9 \ 1 - 0.7 \ 1 - 0.9) = (0.7 \ 0.9 \ 0.3 \ 0.1)$$

เนื่องจากมีสองโนคน้ำหนัก คือ  $W_1$  และ  $W_2$  เพื่อการเลือกว่าโนคน้ำหนักใดเหมาะสมในการเรียนรู้เวกเตอร์  $I$  ของกรณีอินพุตนี้ โดยเลือกค่าฟังก์ชันการกระตุ้นสูงสุด

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_1(I) = \frac{|I \wedge W_1|}{\alpha + |W_1|} = 0.9333$$

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_2(I) = \frac{|I \wedge W_2|}{\alpha + |W_2|} = 0.8999$$

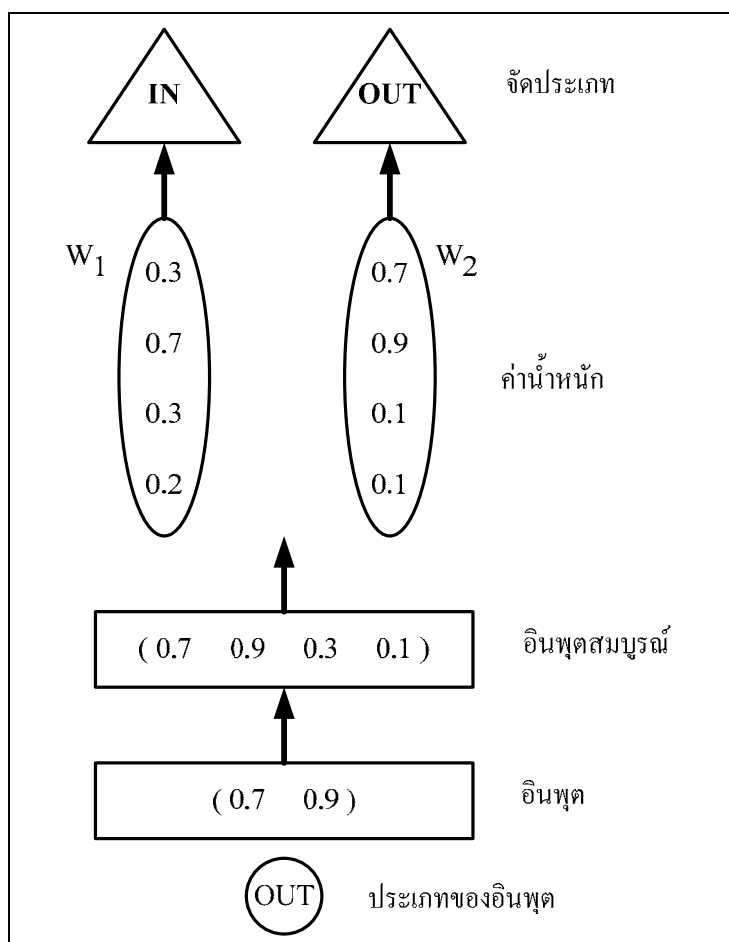
$T_1(I)$  ของโนด  $W_1$  มีค่าสูงสุดจึงทำให้  $W_1$  ถูกเลือกในการเรียนรู้เวกเตอร์  $I$  จากนั้นจึงคำนวณค่า  $MF(I)$  ของ  $W_1$

$$\text{ค่าฟังก์ชันจับคู่} = MF(I) = \frac{|I \wedge W_1|}{|I|} = 0.7$$

แม้ว่า  $W_1$  จะถูกเลือกในการเรียนรู้เวกเตอร์  $I$  และค่า  $MF(I)$  ของ  $W_1$  ก็มากกว่าค่า  $\rho$  แต่จะสังเกตได้ว่าเกิดความไม่ถูกต้องในการเรียนรู้ อันเนื่องมาจาก  $W_1$  ซึ่งระบุกลุ่มประเภท IN โดยที่ประเภทของ  $I$  คือ OUT ดังนั้น  $W_1$  จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการเรียนรู้เวกเตอร์  $I$  จึงต้องเลือกค่าฟังก์ชันการกระตุ้นของโนดที่มีค่ามากเป็นลำดับถัดไป นั่นคือต้องเลือกโนด  $W_2$  มาใช้ในการเรียนรู้ และ กลไก match tracking ก็จะเกิดขึ้นโดยการปรับค่า  $\rho$  ให้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย นั่นคือ  $\rho = 0.701$

$$\text{ค่าฟังก์ชันจับคู่} = MF(I) = \frac{|I \wedge W_2|}{|I|} = 0.9$$

เนื่องจาก  $MF(I) > \rho$  และ กลุ่มประเภท OUT ซึ่งถูกชี้ระบุโดย  $W_2$  ก็เหมือนกันกับประเภทของเวกเตอร์  $I$  ทำให้เกิดการปรับค่า  $W_2$  ดังนั้น  $W_2^{\text{new}} = (0.7 \ 0.9 \ 0.1 \ 0.1)$



รูปที่ 6.8 การฝึกสอน Simplified Fuzzy ARTMAP ด้วยข้อมูล (0.7 0.9) ประเภท OUT

ตัวอย่างที่ 6.5 พิจารณาการเรียนรู้ (0.2 0.3) และมีประเภทเป็น IN

$$I = (0.2 \ 0.3 \ 1 - 0.2 \ 1 - 0.3) = (0.2 \ 0.3 \ 0.8 \ 0.7)$$

เนื่องจากมีสองโนดน้ำหนัก คือ  $W_1$  และ  $W_2$  เพื่อการเลือกว่าโนดน้ำหนักใดเหมาะสมในการเรียนรู้เวกเตอร์  $I$  ของกรณีอินพุตนี้ โดยเลือกค่าฟังก์ชันการกระตุ้นสูงสุด

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_1(I) = \frac{|I \wedge W_1|}{\alpha + |W_1|} = 0.6667$$

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_2(I) = \frac{|I \wedge W_2|}{\alpha + |W_2|} = 0.3889$$

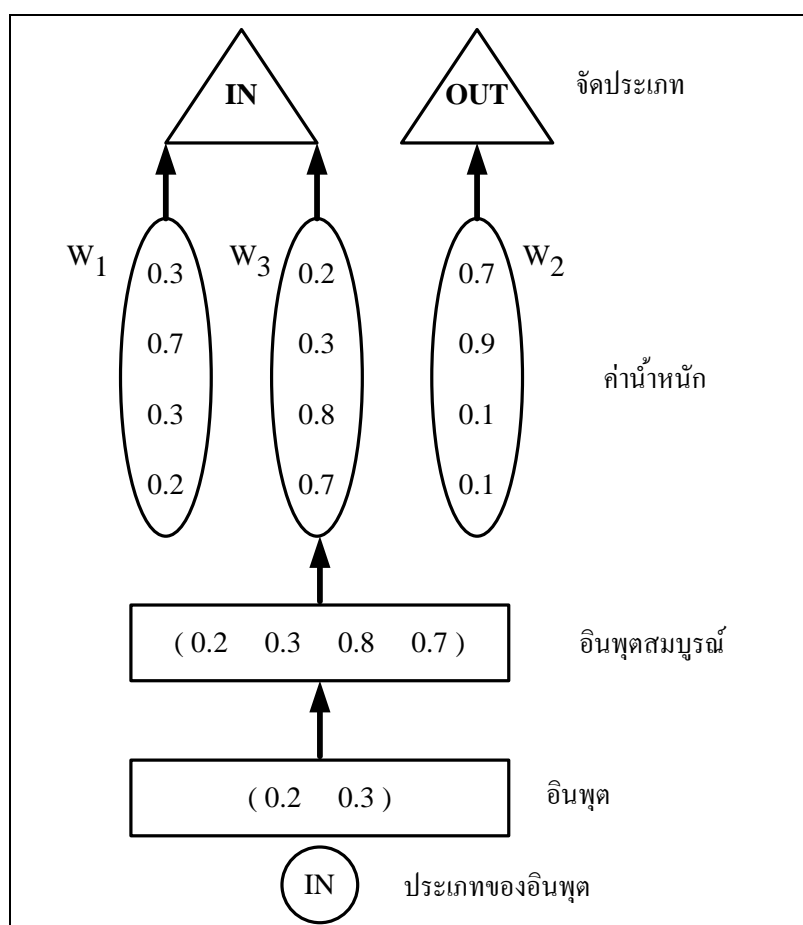
$T_1(I)$  ของโนด  $W_1$  มีค่าสูงสุดจึงทำให้  $W_1$  ถูกเลือกในการเรียนรู้เวกเตอร์  $I$  จากนั้นจึงคำนวณค่า  $MF(I)$  ของ  $W_1$

$$\text{ค่าฟังก์ชันจับคู่} = MF(I) = \frac{|I \wedge W_1|}{|I|} = 0.5$$

แม้ว่าค่า  $T_1(I)$  ของโนด  $W_1$  จะมีค่ามากที่สุด แต่ค่า  $MF(I)$  ของ  $W_1$  น้อยกว่าค่า  $\rho$  ดังนั้น  $W_1$  จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการเรียนรู้เวกเตอร์  $I$  ทำให้ต้องเลือกพิจารณาโนด  $W_2$  มาใช้ในการเรียนรู้  $I$  จึงต้องเลือกค่าฟังก์ชันการกระตุ้นของโนดที่มีค่ามากเป็นลำดับถัดไป นั่นคือต้องเลือกโนด  $W_2$  มาใช้ในการเรียนรู้

$$\text{ค่าฟังก์ชันจับคู่} = MF(I) = \frac{|I \wedge W_2|}{|I|} = 0.35$$

เนื่องจาก  $MF(I)$  ของ  $W_2$  มีค่าน้อยกว่า  $\rho$  เป็นผลให้  $W_2$  ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการเรียนรู้เวกเตอร์  $I$  ดังนั้นในกรณีนี้จึงทำให้เกิดการสร้างโนดน้ำหนักใหม่คือ  $W_3$  ซึ่งซึ่กลุ่มประเภท IN โดยที่ค่า  $W_3 = (0.2 \ 0.3 \ 0.8 \ 0.7)$



รูปที่ 6.9 การฝึกสอน Simplified Fuzzy ARTMAP ด้วยข้อมูล (0.2 0.3) ประเภท IN

ตัวอย่างที่ 6.6 พิจารณาการเรียนรู้ (0.1 0.9) และมีประเภทเป็น OUT

$$I=(0.1 \ 0.9 \ 1-0.1 \ 1-0.9)=(0.1 \ 0.9 \ 0.9 \ 0.1)$$

เนื่องจากมีสามโนดน้ำหนัก คือ  $W_1$   $W_2$  และ  $W_3$  เพื่อการเลือกว่าโนดน้ำหนักใดเหมาะสมในการเรียนรู้เวกเตอร์  $I$  ของกรณีอินพุตนี้ โดยเลือกค่าฟังก์ชันการกระตุ้นสูงที่สุด

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_1(I) = \frac{|I \wedge W_1|}{\alpha + |W_1|} = 0.7999$$

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_2(I) = \frac{|I \wedge W_2|}{\alpha + |W_2|} = 0.667$$

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_3(I) = \frac{|I \wedge W_3|}{\alpha + |W_3|} = 0.699$$

$T_1(I)$  ของโนด  $W_1$  มีค่าสูงที่สุดจึงทำให้  $W_1$  ถูกเลือกในการเรียนรู้เวกเตอร์  $I$  จากนั้นจึงคำนวณค่า  $MF(I)$  ของ  $W_1$

$$\text{ค่าฟังก์ชันจับคู่} = MF(I) = \frac{|I \wedge W_1|}{|I|} = 0.6$$

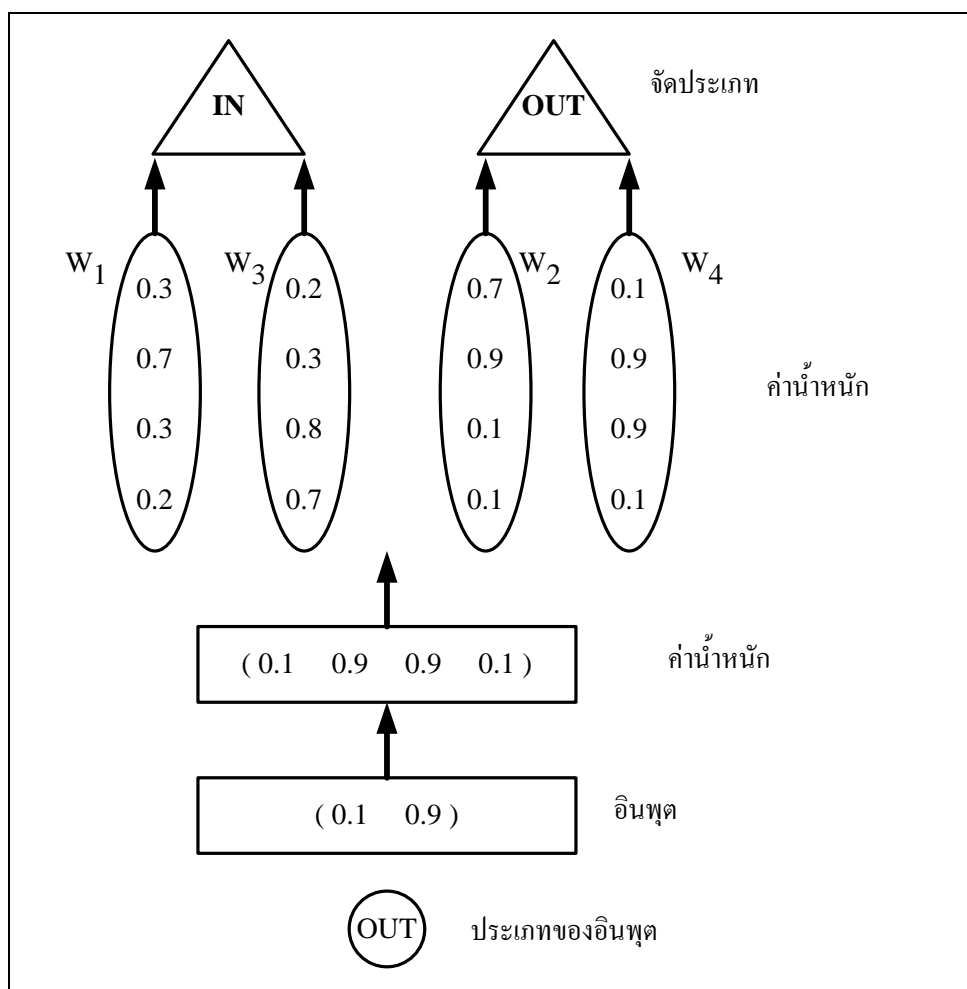
แม้ว่าค่า  $T_1(I)$  ของโนด  $W_1$  จะมีค่ามากที่สุด แต่ค่า  $MF(I)$  ของ  $W_1$  น้อยกว่าค่า  $\rho$  ดังนั้น  $W_1$  จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการเรียนรู้เวกเตอร์  $I$  จึงต้องเลือกค่าฟังก์ชันการกระตุ้นของโนดที่มีค่ามากเป็นลำดับถัดไป นั่นคือต้องเลือกพิจารณาโนด  $W_3$  มาใช้ในการเรียนรู้

$$\text{ค่าฟังก์ชันจับคู่} = MF(I) = \frac{|I \wedge W_3|}{|I|} = 0.7$$

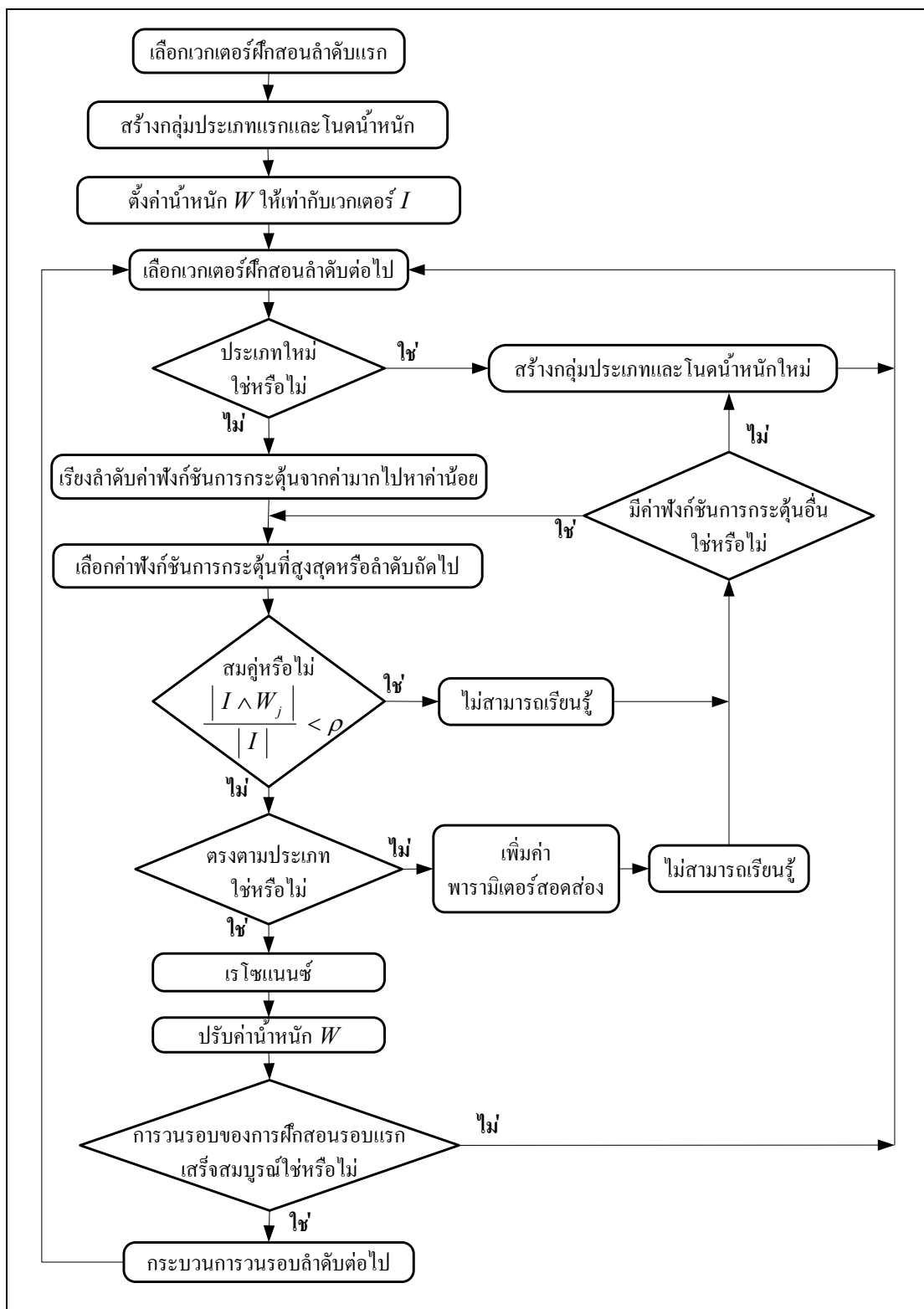
เนื่องจาก  $MF(I)$  ของ  $W_3$  มีค่าน้อยกว่า  $\rho$  จึงต้องเลือกค่าฟังก์ชันการกระตุ้นของโนดที่มีค่ามากเป็นลำดับถัดไป นั่นคือต้องเลือกพิจารณาโนด  $W_2$  มาใช้ในการเรียนรู้เวกเตอร์

$$\text{ค่าฟังก์ชันจับคู่} = MF(I) = \frac{|I \wedge W_2|}{|I|} = 0.6$$

$MF(I)$  ของ  $W_2$  มีค่าน้อยกว่า  $\rho$  ดังนั้นในกรณีนี้จึงทำให้เกิดการสร้างโนดน้ำหนักใหม่คือ  $W_4$  ซึ่งใช้ระบบประเภท OUT โดยที่  $W_4=(0.1 \ 0.9 \ 0.9 \ 0.1)$



รูปที่ 6.10 การฝึกสอน Simplified Fuzzy ARTMAP ด้วยข้อมูล (0.1 0.9) ประเภท OUT



รูปที่ 6.11 แผนผังการฝึกสอนของ Simplified Fuzzy ARTMAP

(ข) ขั้นตอนการอนุมานหรือการวินิจฉัย เป็นการนำข้อมูลที่ยังไม่ทราบประเภท มาทำการวินิจฉัยว่าเป็นข้อมูลประเภท IN และข้อมูลประเภท OUT กระบวนการวินิจฉัยแสดง ดังตัวอย่างที่ 6.7 ตัวอย่างที่ 6.8

ตัวอย่างที่ 6.7 พิจารณาการอนุมานประเภทของ (0.2 0.5)

เพื่อทำการอนุมานประเภทของเวกเตอร์ทดสอบโดยการพิจารณาค่า  $T_j(I)$  ของ  $W_j$  ที่ค่ามากที่สุด (โดยใช้ค่า  $W_j$  จากตัวอย่าง 6.1-6.6) เมื่อ  $I_T = (0.2 \ 0.5 \ 0.8 \ 0.5)$

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_1(I) = \frac{|I_T \wedge W_1|}{\alpha + |W_1|} = 0.7999$$

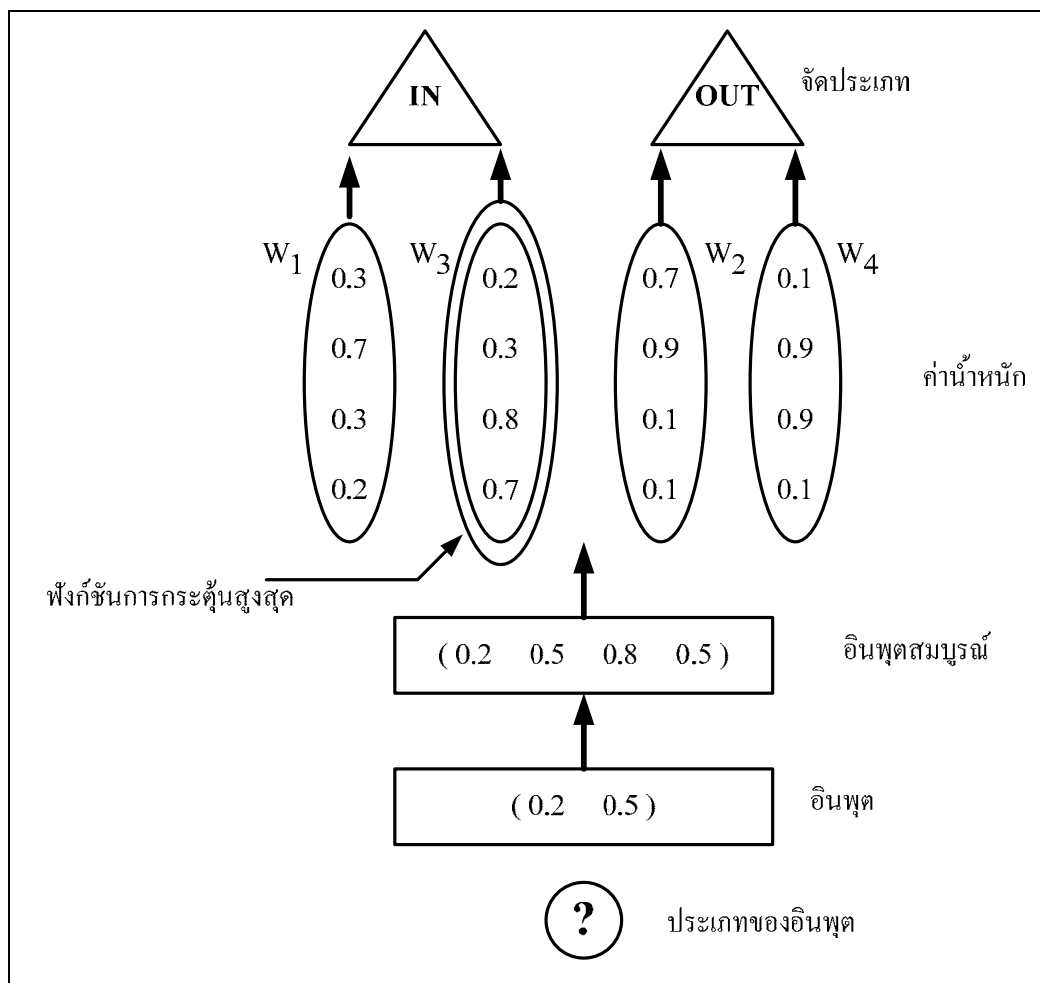
$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_2(I) = \frac{|I_T \wedge W_2|}{\alpha + |W_2|} = 0.4999$$

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_3(I) = \frac{|I_T \wedge W_3|}{\alpha + |W_3|} = 0.8999$$

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_4(I) = \frac{|I_T \wedge W_4|}{\alpha + |W_4|} = 0.7499$$

จากผลการคำนวณค่า  $T_j(I)$  ของโนด  $W_j$  แล้วพบว่าค่า  $T_3(I)$  ของโนด  $W_3$  นั้นมีค่าสูงสุด และ  $W_3$  ซึ่งชี้ระบุประเภท IN ดังนั้น อินพุต (0.2 0.5) จึงถูกอนุมานว่าเป็นประเภท IN หรือเป็นจุดที่อยู่ภายในพื้นที่วงกลม





รูปที่ 6.12 การอนุมานประเภทของข้อมูล (0.2 0.5) ด้วย Simplified Fuzzy ARTMAP

ตัวอย่างที่ 6.8 พิจารณาการอนุมานประเภทของ (0.9 0.75)

เพื่อทำการอนุมานประเภทของเวกเตอร์ทดสอบโดยการพิจารณาค่า  $T_j(I)$  ของ  $W_j$  ที่ค่ามากที่สุด (โดยใช้ค่า  $W_j$  จากตัวอย่าง 6.1-6.6) เมื่อ  $I_T = (0.9 \ 0.75 \ 0.9 \ 0.25)$

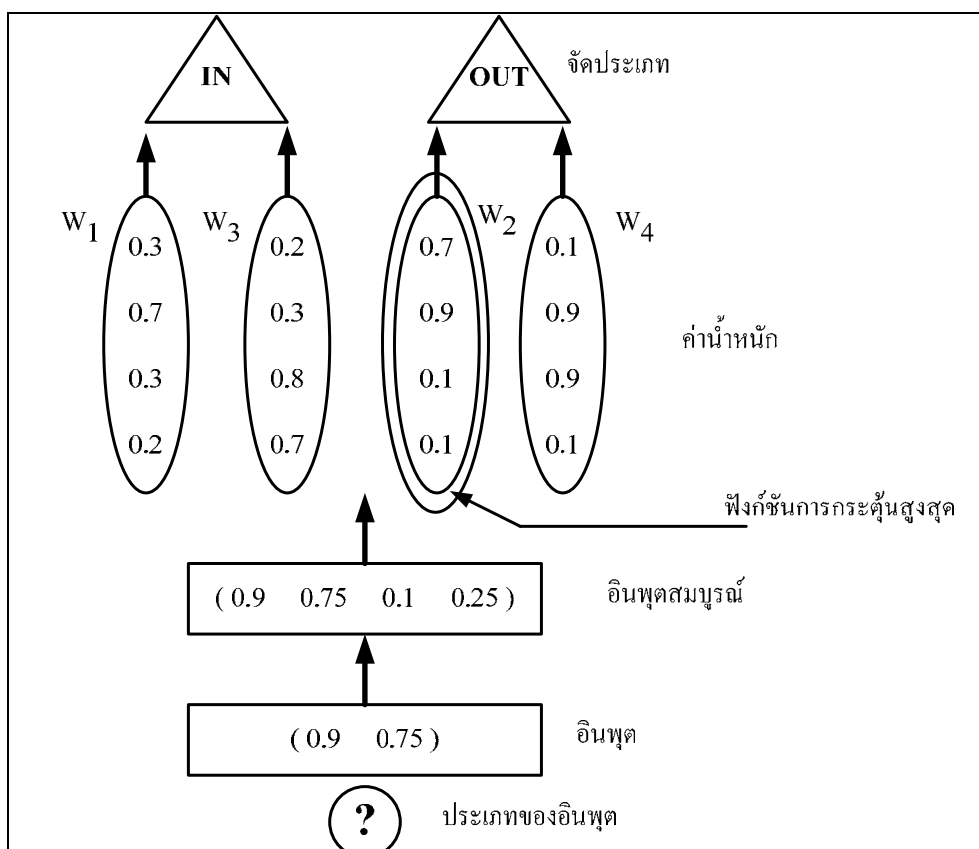
$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_1(I) = \frac{|I_T \wedge W_1|}{\alpha + |W_1|} = 0.8667$$

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_2(I) = \frac{|I_T \wedge W_2|}{\alpha + |W_2|} = 0.9167$$

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_3(I) = \frac{|I_T \wedge W_3|}{\alpha + |W_3|} = 0.4249$$

$$\text{ฟังก์ชันการกระตุ้น } T_4(I) = \frac{|I_T \wedge W_4|}{\alpha + |W_4|} = 0.5249$$

จากผลการคำนวณค่า  $T_j(I)$  ของโนด  $W_j$  แล้วพบว่าค่า  $T_2(I)$  ของโนด  $W_2$  นั้นมีค่าสูงสุด และ  $W_2$  ซึ่งใช้ระบุประเภท OUT ดังนั้นอินพุต (0.9 0.75) จึงถูกอนุมานว่าเป็นประเภท OUT หรือเป็นจุดที่อยู่ภายนอกพื้นที่วงกลม



รูปที่ 6.13 การอนุมานประเภทของข้อมูล (0.9 0.75) ด้วย Simplified Fuzzy ARTMAP

#### 6.3.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ Simplified Fuzzy ARTMAP

สำหรับตัวอย่างนี้การนำเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP มาประยุกต์ใช้ในการรู้จำรูปภาพ (Rajasekaran, 2000) เป็นการเรียนรู้จำรูปแบบและจำแนกประเภทของรูปภาพ ทั้งรูปภาพที่มีสิ่งรบกวนและรูปภาพที่ไม่มีสิ่งรบกวน

สำหรับภาพที่ใช้ในการฝึกสอนและการจำแนกประเภทนั้นเป็นรูปภาพขาวดำที่ไม่มีการรบกวน ซึ่งประกอบด้วย รูปภาพเครื่องบิน รูปภาพรถถังและรูปภาพเฮลิคอปเตอร์ ดังแสดงในรูปภาพที่ 6.14-6.16 ซึ่งเป็นแบบปกติ รูปภาพที่นำมาใช้ในการฝึกสอนนั้นจะถูกคำนวณ

ค่าคุณลักษณะด้วยวิธี moment based feature extractor เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการฝึกสอน และการจำแนกประเภท

ตารางที่ 6.1 การรู้จำรูปภาพवाद้าที่ไม่มีกรอบ

จำนวนรอบของการฝึกสอน	3
ค่าพารามิเตอร์สอดคล้อง	$0.5 \leq \rho < 1$
ชุดข้อมูลฝึกสอน	3 ตัวอย่าง (ในแต่ละประเภท)
ชุดข้อมูลทดสอบ	50 รูปแบบ
ลักษณะของข้อมูลทดสอบ	แบบหมุน แบบเพิ่มขนาด แบบเลื่อนตำแหน่ง แบบผสมรวม
อัตราการเรียนรู้	100%

#### 6.4 เครื่องเวกเตอร์เกือหนุน

เครื่องเวกเตอร์เกือหนุน ได้ถูกพัฒนาขึ้น โดย Vapnik และกำลังได้รับความสนใจนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้งานอย่างมากมาย เนื่องจากคุณสมบัติเด่นหลายประการเช่นสามารถใช้ในการทำนายเพื่อการจำแนกประเภทข้อมูล มีความแม่นยำสูง เป็นต้น รวมไปถึงประสิทธิภาพในการใช้งานจริง เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในเรื่องความสามารถในการจำแนกประเภทข้อมูลได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการแก้ปัญหาการจำแนกข้อมูลที่มี 2 คลาส (two-class problem) เป้าหมายของปัญหาดังกล่าวคือการจำแนกข้อมูลทั้ง 2 คลาสด้วยฟังก์ชันที่ได้หรือสร้างมาจากตัวอย่างข้อมูลที่จะจำแนก เป้าหมายอีกประการหนึ่งคือการสร้างตัวจำแนกที่สามารถใช้ในการจำแนกได้ดีกับข้อมูล ซึ่งไม่ได้เป็นตัวอย่างข้อมูลในการฝึกสอน (คุณสมบัติการทำให้เป็นทั่วไปหรือ generalization)

เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนเป็นวิธีการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (supervised learning method) สามารถใช้ได้ทั้งในการจำแนกหรือแบ่งประเภทข้อมูล (classification) และการสร้างสมการถดถอย (regression)

เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนที่ใช้ในการจำแนกประเภทข้อมูลเรียกว่า support vector classification (SVC) เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนที่ใช้ในการสร้างสมการถดถอยเรียกว่า support vector regression (SVR) สำหรับในงานวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวเฉพาะเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนที่ใช้ในการจำแนกประเภท เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนที่ใช้ในการจำแนกประเภทนั้นประกอบด้วยตัวจำแนกแบบ

เชิงเส้น (linear classifier) และ ตัวจำแนกแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear classifier) โดยมีเป้าหมายคือการหาระนาบเกินคั่นที่เหมาะสมที่สุด (optimal separating hyper plane: OSH)

(1) ตัวจำแนกเชิงเส้น (linear classifier) เป็นเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนที่จำแนกข้อมูลในกรณีที่มีข้อมูลนั้นสามารถแยกได้ง่าย ในรูปที่ 6.14 แสดงการจำแนกข้อมูล 2 คลาสด้วยตัวจำแนกเชิงเส้น จะเห็นได้ว่ามีตัวจำแนกเชิงเส้นที่สามารถแบ่งข้อมูลเป็น 2 คลาสได้ถูกต้องนั้นมีอยู่มากมาย ตัวจำแนกที่เหมาะสมที่สุดควรจะอยู่ห่างจากข้อมูลซึ่งอยู่ใกล้ที่สุดของข้อมูลทั้ง 2 คลาสด้วยระยะที่มากที่สุด

ระนาบเกินคั่นเหมาะสมที่สุดพิจารณาปัญหาในการจำแนกข้อมูลฝึกสอนแบบเวกเตอร์ 2 คลาส

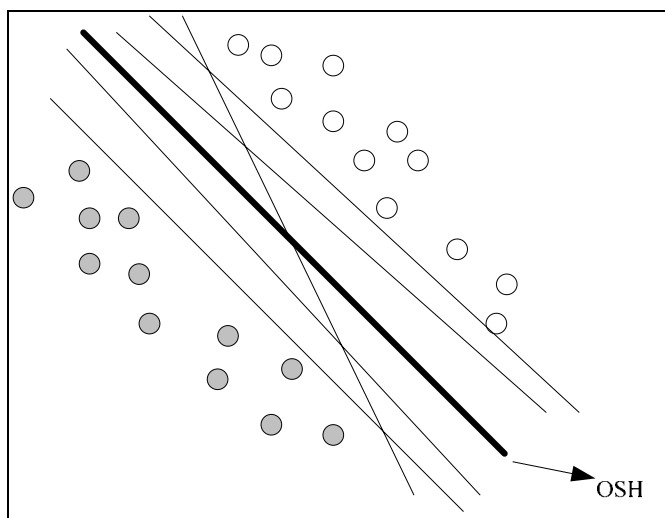
$$D = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_Q, y_Q)\}, x \in \mathbb{R}^n, y \in \{-1, 1\} \quad (6.10)$$

ตัวจำแนกระนาบเกิน (hyper plane) นิยามได้ดังนี้

$$\langle w, x \rangle + b = 0 \quad (6.11)$$

ระนาบเกินข้างต้นเรียกว่าระนาบเกินแบบบัญญัติ (canonical hyper plane) โดยที่พารามิเตอร์ของระนาบเกินดังกล่าวประกอบด้วย  $w$  คือ ขนาดเวกเตอร์หรือเวกเตอร์น้ำหนัก (weight vector) และ  $b$  คือค่าไบอัส (bias value) กลุ่มของข้อมูลเวกเตอร์ที่จะกล่าวได้ว่าถูกแยกอย่างเหมาะสมโดยระนาบเกินคั่นเหมาะสมที่สุดได้นั้นระนาบเกินคั่นเหมาะสมที่สุดจะต้องจำแนกข้อมูลเวกเตอร์ทั้ง 2 คลาสได้อย่างถูกต้อง และระยะห่างระหว่างระนาบเกินคั่นเหมาะสมที่สุดกับเวกเตอร์ข้อมูลที่อยู่ใกล้ที่สุดจะต้องมีค่ามากที่สุด โดยต้องหาระนาบเกินคั่นเหมาะสมที่สุดในรูปของฟังก์ชัน  $f(x) = \langle w, x \rangle + b$  ฟังก์ชันระนาบเกินสามารถพิจารณาให้เป็นบรรทัดฐานโดยเวกเตอร์น้ำหนักและปริมาณไบอัส ด้วยเงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\min_i |f(x_i)| = \min_i |\langle w, x_i \rangle + b| = 1 \quad (6.12)$$



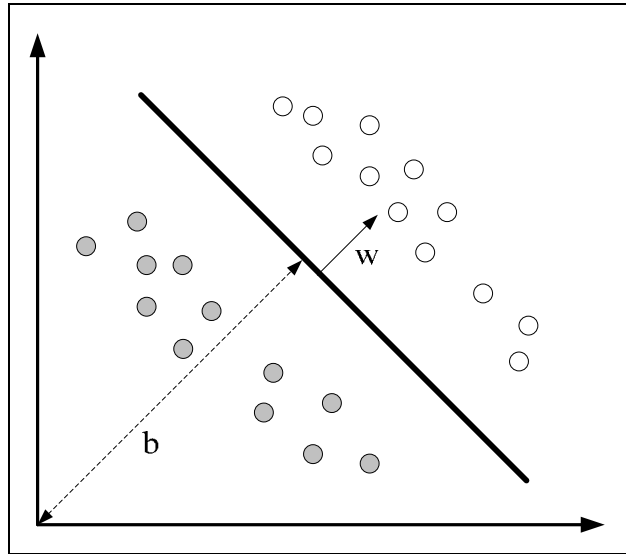
รูปที่ 6.14 การจำแนกข้อมูล 2 คลาส

ดังนั้นความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนใด ๆ  $(x_i, y_i)$

$$y_i [\langle w, x_i \rangle + b] \geq 1 \quad , i = 1, \dots, Q \quad (6.13)$$

สำหรับกลุ่มข้อมูลเวกเตอร์ที่สามารถจำแนกได้อย่างเป็นเชิงเส้น (linearly separable) แล้วสามารถพิจารณาฟังก์ชันระยะนาบเกินแบบบัญญัติ  $f(x) = \langle w, x \rangle + b$  ด้วยการเลือกค่าขนาดเวกเตอร์  $w$  ที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานและค่าไบอัส  $b$  อย่างเหมาะสม ขอบเขต (margin) สามารถนิยามได้จากระยะทางยูคลิดระหว่างเวกเตอร์ฝึกสอน  $x_i$  ใด ๆ กับระยะนาบเกิน ถ้าพิจารณาระยะนาบเกินในแบบบัญญัติ ค่าขอบเขตสามารถวัดได้จากขนาดของเวกเตอร์  $w$  ของระยะนาบเกิน ดังนั้นระยะยูคลิดระหว่างเวกเตอร์  $x_i$  จากระยะนาบเกิน  $\langle w, x \rangle + b$  คือ

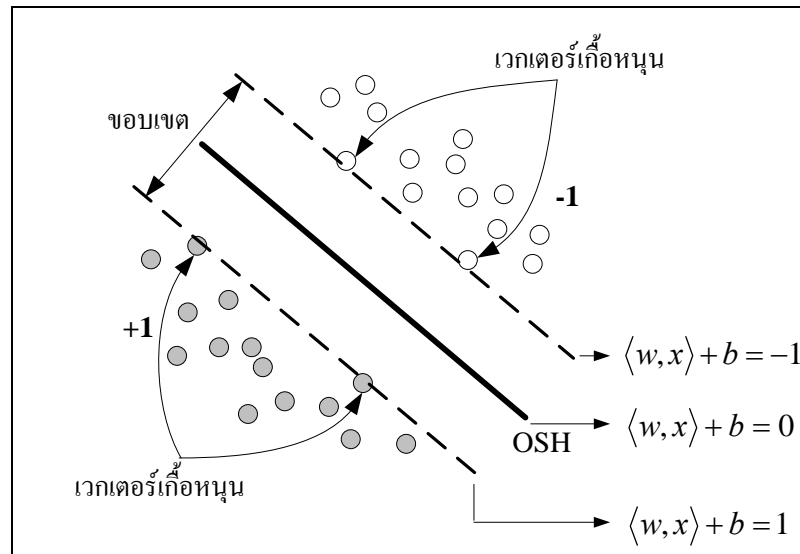
$$d(w, b, x_i) = \frac{|\langle w, x_i \rangle + b|}{\|w\|} \quad (6.14)$$



รูปที่ 6.15 ระนาบเกิน  $\langle w, x \rangle + b = 0$

ดังนั้นสำหรับระนาบเกินที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ระยะยุคลิดระหว่างระนาบเกินกับข้อมูล  
เวกเตอร์ (ทั้ง 2 คลาส)

$$\begin{aligned}
 d(w, b) &= \min_{x_i, y_i = -1} d(w, b, x_i) + \min_{x_i, y_i = +1} d(w, b, x_i) \\
 &= \min_{x_i, y_i = -1} \frac{\langle w, x_i + b \rangle}{\|w\|} + \min_{x_i, y_i = +1} \frac{\langle w, x_i + b \rangle}{\|w\|} \\
 &= \frac{1}{\|w\|} \left( \min_{x_i, y_i = -1} |\langle w, x_i + b \rangle| + \min_{x_i, y_i = +1} |\langle w, x_i + b \rangle| \right) \\
 &= \frac{2}{\|w\|}
 \end{aligned} \tag{6.15}$$



รูปที่ 6.16 เครื่องเวกเตอร์เกือหนุน

จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะเห็นได้ว่า ขนาดของเวกเตอร์  $w$  ยังมีค่าน้อย ขอบเขตของระนาบเกินก็จะมีค่ามาก ปัญหาในการหาระนาบเกินที่เหมาะสมที่จึงเป็นการหาค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันต่อไปนี้ ตามเงื่อนไขในสมการที่

$$\Phi = \frac{1}{2} \|w\|^2 \quad (6.16)$$

พิจารณาวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบโปรแกรมกำลังสอง (quadratic programming) สำหรับใช้ในการหาขอบเขตที่มากที่สุด โดยการพิจารณาทฤษฎีของลากร็องจ์ (Lagrange theory) หรือ ทฤษฎีบทของ Kuhn-Tucker (Kuhn-Tucker theory หรือ KTT) ที่มีฟังก์ชันลากร็องจ์ (Lagrangian) ดังรูปต่อไปนี้

$$\mathbf{L}(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} \|w\|^2 - \sum_{i=1}^Q \alpha_i y_i [(\langle w, x_i \rangle + b) - 1] \quad (6.17)$$

โดยที่  $\alpha$  คือตัวคูณลากร็องจ์ (lagrange multiplier) ซึ่งต้องการหาค่าน้อยที่สุดของฟังก์ชันลากร็องจ์เทียบกับขนาดของเวกเตอร์  $w$  และ ค่าไบอัส  $b$

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^Q \alpha_i y_i = 0 \quad (6.18)$$

$$\text{และ } \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial w} = 0 \Rightarrow w = \sum_{i=1}^Q \alpha_i y_i x_i \quad (6.19)$$

ฟังก์ชันลากรังจ์ดังกล่าวมีภาวะคู่กัน (duality) จึงสามารถหาค่าเหมาะสมที่สุดจากภาวะคู่กันดังกล่าว เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ภาวะคู่กันของฟังก์ชันลากรังจ์จึงอยู่ในรูป

$$\max_{\alpha} W(\alpha) = \max_{\alpha} \left( \min_{w,b} \mathbf{L}(w,b,\alpha) \right) \quad (6.20)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (6.17) สมการที่ (6.18) สมการที่ (6.19) และสมการที่ (6.20) จะได้ความสัมพันธ์สำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดดังนี้

$$\max_{\alpha} W(\alpha) = \max_{\alpha} \left( -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^Q \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle + \sum_{k=1}^Q \alpha_k \right) \quad (6.21)$$

วิธีการหาคำตอบของปัญหาเป็นดังนี้

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha} \left( \frac{1}{2} \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^Q \alpha_i \alpha_j y_i y_j \langle x_i, x_j \rangle - \sum_{k=1}^Q \alpha_k \right) \quad (6.22)$$

ซึ่งมีเงื่อนไขคือ  $\alpha_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, Q$

$$\sum_{i=1}^Q \alpha_i y_i = 0 \quad (6.23)$$



การแก้สมการ (6.22) กับสมการ (6.23) เพื่อหาตัวคูณลากรังจ์และระนาบเกนคั่นเหมาะสมที่สุดจะได้ดังนี้

$$w^* = \sum_{i=1}^Q \alpha_i y_i x_i \quad (6.24)$$

$$b^* = -\frac{1}{2} \langle w^*, x_r + x_s \rangle \quad (6.25)$$

โดยที่  $x_r$  และ  $x_s$  คือเวกเตอร์เกือหนุ่น ซึ่งได้จากข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนในแต่ละคลาส

$$\alpha_r, \alpha_s > 0, \quad y_r = -1, y_s = +1 \quad (6.26)$$

ตัวจำแนกสามารถพิจารณาเป็น 2 ประเภทคือ

- ตัวจำแนกแบบแข็ง (hard classifier) มีสมการระนาบเกนคือ

$$f(x) = \text{sgn}(\langle w, x_i \rangle + b) = \text{sgn} \left( \sum_{i \in \text{SVs}} \alpha_i y_i \langle x_i, x \rangle + b \right) \quad (6.27)$$

- ตัวจำแนกแบบอ่อน (soft classifier) มีสมการระนาบเกนคือ

$$f(x) = h(\langle w^*, x \rangle + b) \quad (6.28)$$

$$-1: z < -1$$

$$\text{โดยที่ } h(z) = \begin{cases} z: -1 \leq z \leq 1 \\ +1: z > 1 \end{cases}$$

$$+1: z > 1$$

พิจารณาเงื่อนไขของ KKT ต่อไปนี้

$$\alpha_i (y_i [\langle w, x_i \rangle + b] - 1) = 0, \quad i = 1, \dots, Q \quad (6.29)$$

จะได้ว่าเฉพาะเวกเตอร์ที่เป็นไปตามเงื่อนไขต่อไปนี้

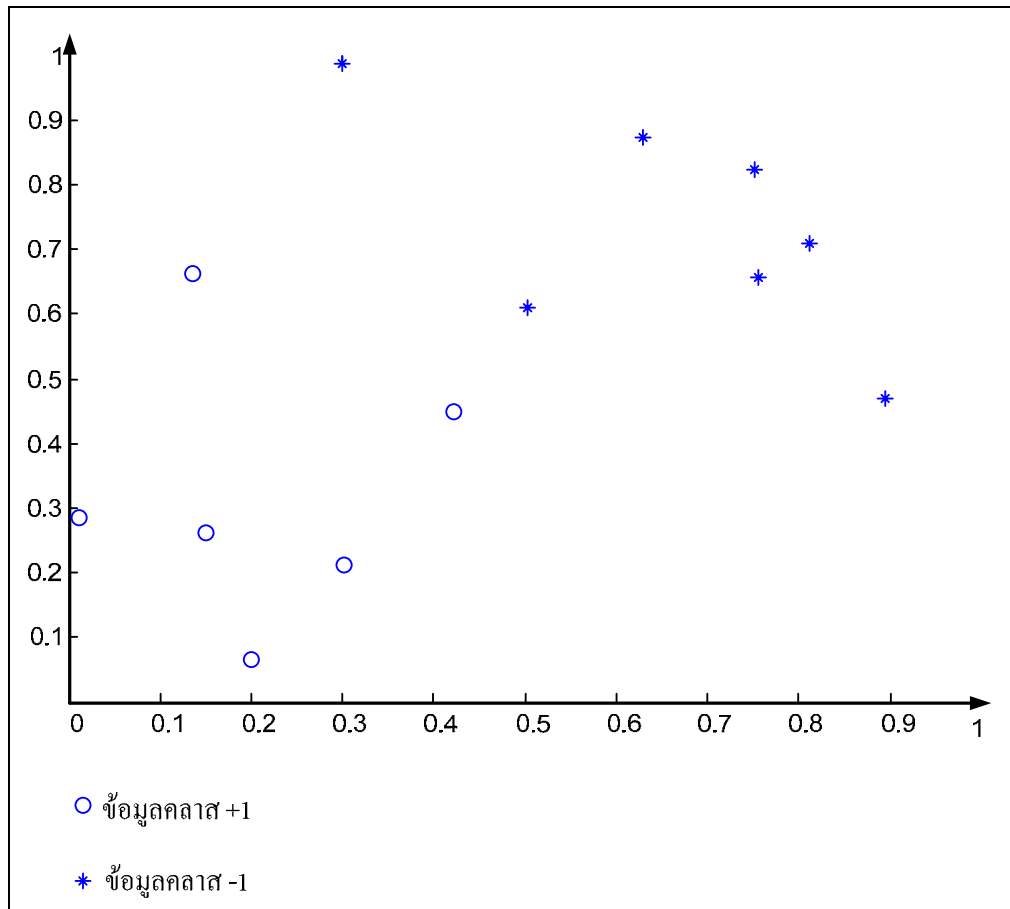
$$y_i[\langle w, x_i \rangle + b] = 1 \quad (6.30)$$

จะมีตัวคูณลากรังจ์ที่ไม่เป็นศูนย์ (non-zero lagrange multipliers) เวกเตอร์ดังกล่าวก็คือ เวกเตอร์เกือหนูนั่นเอง

พิจารณาการจำแนกข้อมูลเวกเตอร์ดังต่อไปนี้ด้วยตัวจำแนกแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นข้อมูลคู่ อันดับในแกน 2 มิติ คือ แกนตั้งและแกนนอน ดังแสดงในตารางที่ 6.2 และรูปที่ 6.17

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลตัวอย่างสำหรับการจำแนกแบบเชิงเส้นด้วยเครื่องเวกเตอร์เกือหนูน

X		Y
0.1365	0.6614	1
0.0118	0.2844	1
0.8939	0.4692	-1
0.1991	0.0648	1
0.2987	0.9883	-1
0.7561	0.65546	-1
0.8125	0.7102	-1
0.5023	0.6105	-1
0.4221	0.4501	1
0.3023	0.2114	1
0.1505	0.2611	1
0.6302	0.8721	-1
0.7523	0.8241	-1
0.1365	0.6614	1



รูปที่ 6.17 การจำแนกข้อมูล 2 คลาส ด้วยตัวจำแนกแบบเชิงเส้น

เนื่องจากการจำแนกข้อมูลแบบเชิงเส้น จึงทำการเลือกคำนวณเมตริกซ์  $H$  โดยใช้ฟังก์ชันแบบเชิงเส้น

$$H(i, j) = \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^Q Y_i * Y_j * \langle X_i, X_j \rangle \text{ โดยที่ฟังก์ชันแบบเชิงเส้น } \langle X_i, X_j \rangle = X_i \bullet X_j^T$$

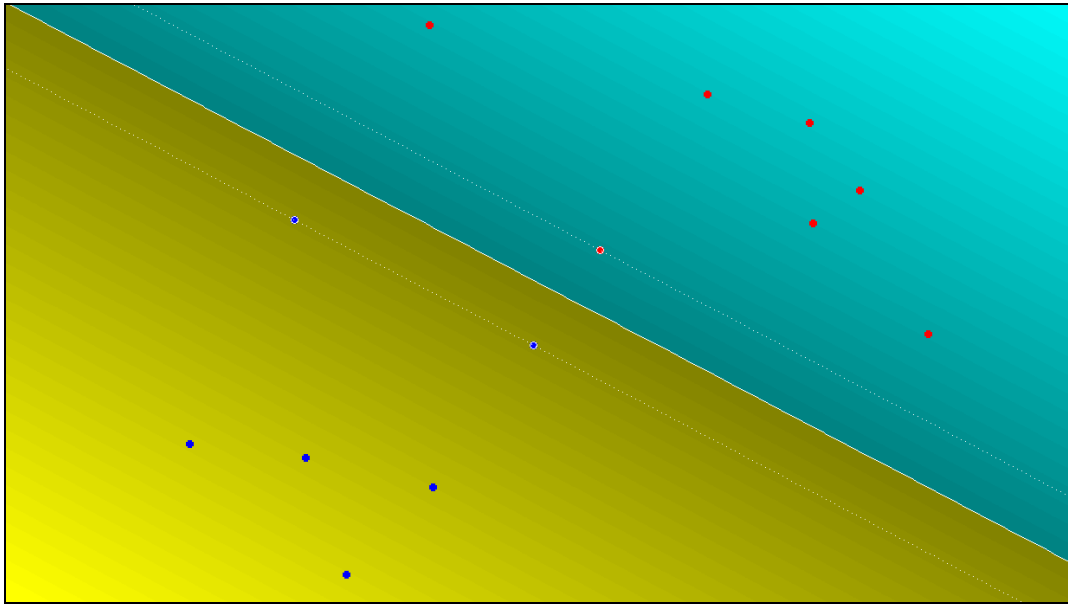
จากเมตริกซ์  $H$  จึงใช้การโปรแกรมกำลังสอง (quadratic programming) สามารถใช้คำสั่งในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาตัวคูณลากร็องจ์  $\alpha$  และ คำนวณหาขนาดเวกเตอร์  $w$  จากสมการ (6.24)

จากนั้นคำนวณขนาดเวกเตอร์ด้วยตัวคูณลากร็องจ์และเมตริกซ์  $H$

$$\| w \|^2 = \alpha^T * H * \alpha \quad \text{ดังนั้น} \quad \| w \| = \sqrt{128.189}$$

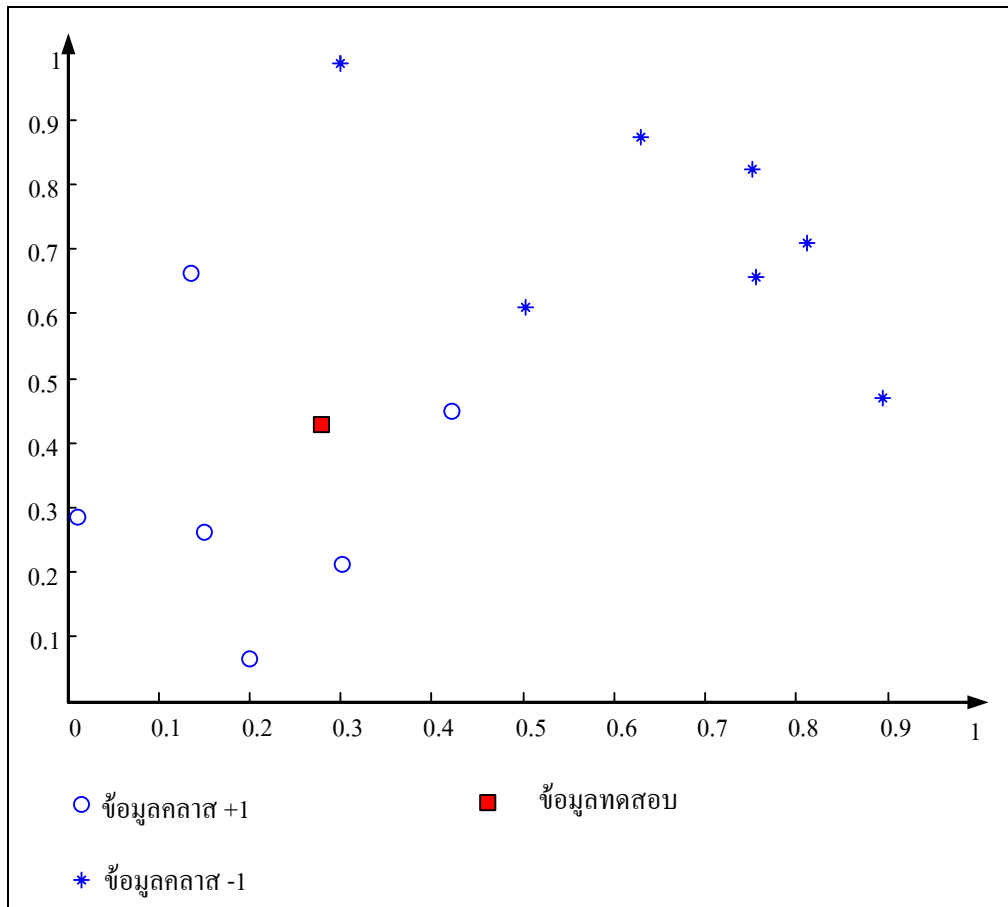
และ  $\text{Margin} = \frac{2}{\| w \|} = 0.1766$  และ คำนวณหาค่าไบอัส  $b$  จากสมการที่ (6.25) ดังนั้น ค่าไบอัส

$$b = 7.9391$$



รูปที่ 6.18 ระบายเกินคั่นเหมาะสมที่สุดของตัวจำแนกเชิงเส้น

พิจารณาเมื่อข้อมูล  $x_{\text{test}} = [0.2813 \quad 0.4289]$  แล้วทำการจำแนกด้วยสมการที่ (6.27) และด้วยค่า  $\alpha$  และ  $b$  ข้างต้น



รูปที่ 6.19 การจำแนกประเภทของข้อมูลทดสอบ ด้วยตัวจำแนกแบบเชิงเส้น

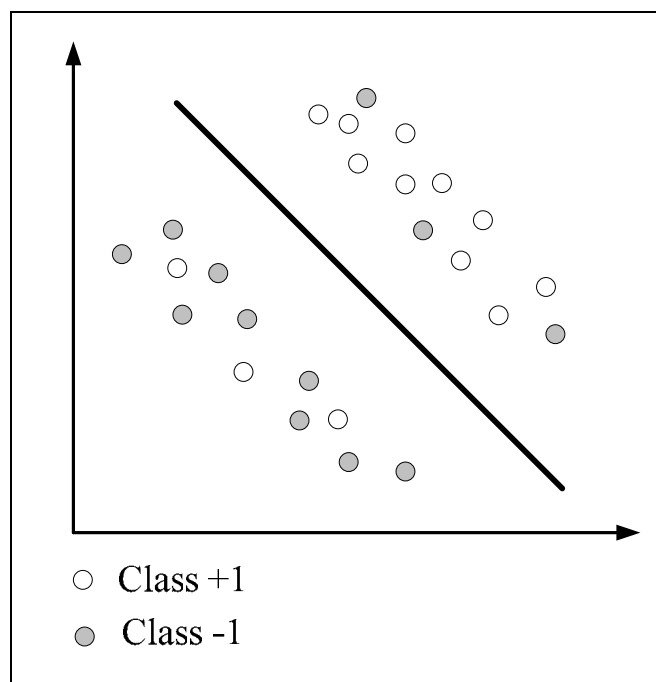
$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i \in \text{SVs}} \alpha_i y_i \langle x_i, x \rangle + b\right) \Rightarrow f(x) = \text{sgn}((-5.7980) + 7.9391)$$

จากสมการการจำแนกได้ค่าเป็น +2.1411 ซึ่งเครื่องหมายเป็นบวก ดังนั้นข้อมูลทดสอบนี้จึงถูกจำแนกเป็นคลาส +1 ดังนั้นผลการจำแนกจึงมีความถูกต้อง

(2) ตัวจำแนกแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear classifier) ในกรณีที่ข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนไม่สามารถจำแนกได้ด้วยตัวจำแนกเชิงเส้นหรือกรณีที่ขอบเขตการจำแนกข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนไม่เป็นเชิงเส้น เครื่องเวกเตอร์เกือหนุ่นก็สามารถส่ง (map) ข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอน  $X$  ไปยังปริภูมิลักษณะมิติสูงได้ (high dimensional feature space :  $Z$ ) โดยการเลือกการส่งแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear mapping) ที่เหมาะสมแล้วทำให้เครื่องเวกเตอร์เกือหนุ่นสามารถที่จะหาระนาบเกินคั่นที่เหมาะสมที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นในปริภูมิที่มีมิติสูงขึ้นได้อย่างเหมาะสม สิ่งที่ใช้ในการส่งข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนไปยังปริภูมิลักษณะมิติที่สูงกว่าคือฟังก์ชันแก่น (kernel function)

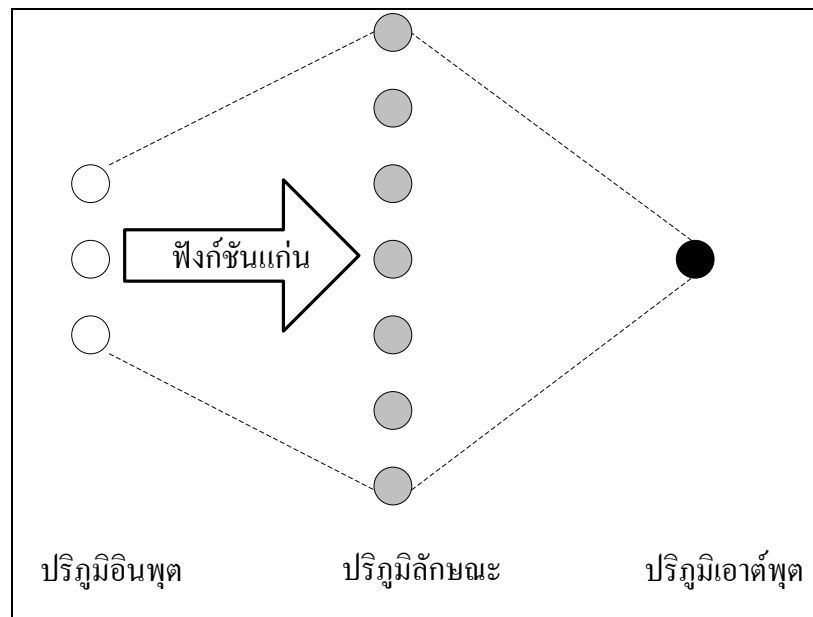
ในการหาคำตอบหรือการแก้ปัญหาของข้อมูลที่สามารถแยกได้แบบไม่เป็นเชิงเส้น ด้วยเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน โดยแนวคิดพื้นฐานสำหรับการจำแนกข้อมูลเวกเตอร์โดยทำการส่งข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนไปยังปริภูมิลักษณะมิติที่สูงกว่าโดยการส่ง (mapping) แล้วสามารถสร้างระนาบเกินที่มีขอบเขตมากที่สุดเพื่อใช้ในการจำแนกข้อมูล

พิจารณาในรูปที่ 6.20 เป็นข้อมูลซึ่งเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนไม่สามารถหาระนาบสำหรับแบ่งแยกแบบเชิงเส้นใด ๆ เพื่อให้การจำแนกข้อมูลทั้ง 2 คลาสให้มีความถูกต้องได้



รูปที่ 6.20 ข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนที่ไม่สามารถแบ่งแยกได้แบบเชิงเส้น

ปริภูมิที่อินพุตเวกเตอร์ถูกส่งไปก่อนที่จะถูกจำแนกเรียกว่า ปริภูมิลักษณะ (feature space) ดังแสดงในรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.21 การส่งปริภูมิอินพุตไปยังปริภูมิลักษณะที่มีมิติสูงกว่า

$$y_i(\langle w, x \rangle + b) \geq 1 - \xi_i \quad i = 1, 2, \dots, Q \quad \xi_i \geq 0 \quad (6.31)$$

เมื่อ  $\xi$  คือปริมาณวัดของความผิดพลาดที่จำแนกไม่ได้ (measure of the misclassification errors) ฟังก์ชันที่ใช้ส่งหรือแปลงข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนไปยังปริภูมิลักษณะที่มีมิติสูงกว่านั้นมีหลายฟังก์ชันเช่นฟังก์ชันพหุนาม (polynomial function) ฟังก์ชันฐานรัศมี (radial basis function) ฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid function) ฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (spline function) เป็นต้น เมื่อมีการใช้ฟังก์ชันดังกล่าวนี้แล้วทำให้สมการสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุดจะได้สมการ

$$\max_{\alpha} W(\alpha) = \max_{\alpha} \left( -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^Q \alpha_i \alpha_j y_i y_j K \langle x_i, x_j \rangle + \sum_{k=1}^Q \alpha_k \right) \quad (6.32)$$

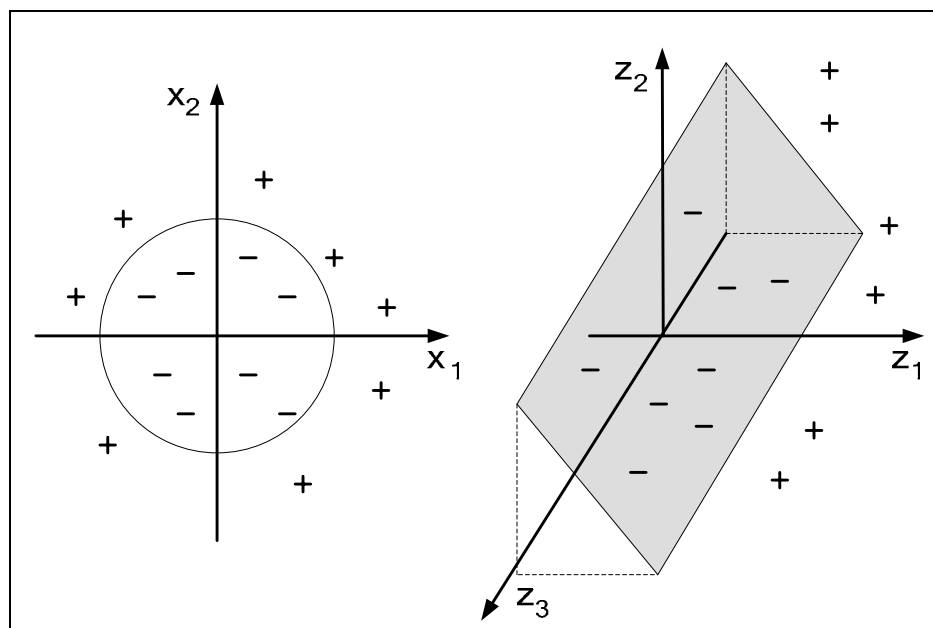
เมื่อ  $K \langle x_i, x_j \rangle$  คือฟังก์ชันแก่นที่ใช้ในการส่งแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อส่งข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนไปยังปริภูมิที่มีมิติสูงขึ้นและวิธีการหาคำตอบของปัญหาเป็นดังนี้

$$\alpha^* = \arg \min_{\alpha} \left( \frac{1}{2} \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^Q \alpha_i \alpha_j y_i y_j K \langle x_i, x_j \rangle - \sum_{k=1}^Q \alpha_k \right) \tag{6.33}$$

ซึ่งมีเงื่อนไขคือ  $0 \leq \alpha_i \leq C \quad i = 1, \dots, Q$

$$\sum_{i=1}^Q \alpha_i y_i = 0 \tag{6.34}$$

$C$  คือพารามิเตอร์ค่าคงที่ซึ่งเรียกว่า regularization parameter ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมความถ่วงดุลระหว่างขอบเขตที่มากที่สุด (maximum margin) กับความผิดพลาดในการจำแนกที่น้อยที่สุด (minimum classification error)



รูปที่ 6.22 การส่งข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนจากปริภูมิสองมิติไปยังปริภูมิสามมิติ

เมื่อหาคำตอบของสมการที่ (6.33) ด้วยเงื่อนไขในสมการที่ (6.34) เพื่อหาตัวคูณลากรังจ์และตัวจำแนกแบบแข็งซึ่งทำให้ได้ระนาบเกินคั่นเหมาะสมที่สุดก็คือ



$$f(x) = \text{sgn}(\langle w, x \rangle + b) = \text{sgn} \left( \sum_{i \in \text{SVs}} \alpha_i y_i K(x_i, x) + b \right) \quad (6.35)$$

$$\langle w, x \rangle = \sum_{i=1}^Q \alpha_i y_i K(x_i, x) \quad (6.36)$$

$$b = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^Q \alpha_i y_i [K(x_i, x_r) + K(x_i, x_s)] \quad (6.37)$$

ฟังก์ชันแก่น ถูกใช้ในการส่งหรือแปลงข้อมูลเวกเตอร์ฝึกสอนซึ่งอยู่ในปริภูมิอินพุตไปยังปริภูมิลักษณะที่มีมิติสูงกว่าและทำให้สามารถจำแนกข้อมูลเวกเตอร์ได้ ตัวอย่างของฟังก์ชันแก่นที่ใช้สำหรับเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนได้แก่

ฟังก์ชันพหุนาม

$$K(x_i, x_j) = (x_i \bullet x_j^T + 1)^d \quad (6.38)$$

โดยที่  $d$  คือเลขชี้กำลังของสมการพหุนาม

ฟังก์ชันฐานรัศมีแบบเกาส์เซียน (gaussian radial basis function) เป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูปแบบเกาส์เซียน

$$K(x_i, x_j) = \exp \left( -\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2} \right) \quad (6.39)$$

ฟังก์ชันฐานรัศมีแบบเลขชี้กำลัง (exponential radial basis function) เป็นฟังก์ชันที่อยู่ในรูป

$$K(x_i, x_j) = \exp \left( -\frac{\|x_i - x_j\|}{2\sigma^2} \right) \quad (6.40)$$

ฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid function) เป็นฟังก์ชันจากเครือข่ายเพอร์เซ็ปตรอนแบบหลายชั้นที่อยู่ในรูป

$$K(x_i, x_j) = \tanh(\rho \langle x_i, x_j \rangle + \theta) \quad (6.41)$$

โดยที่  $\rho$  คือค่ามาตราส่วนและ  $\theta$  คือค่าออฟเซต ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ต้องเลือก

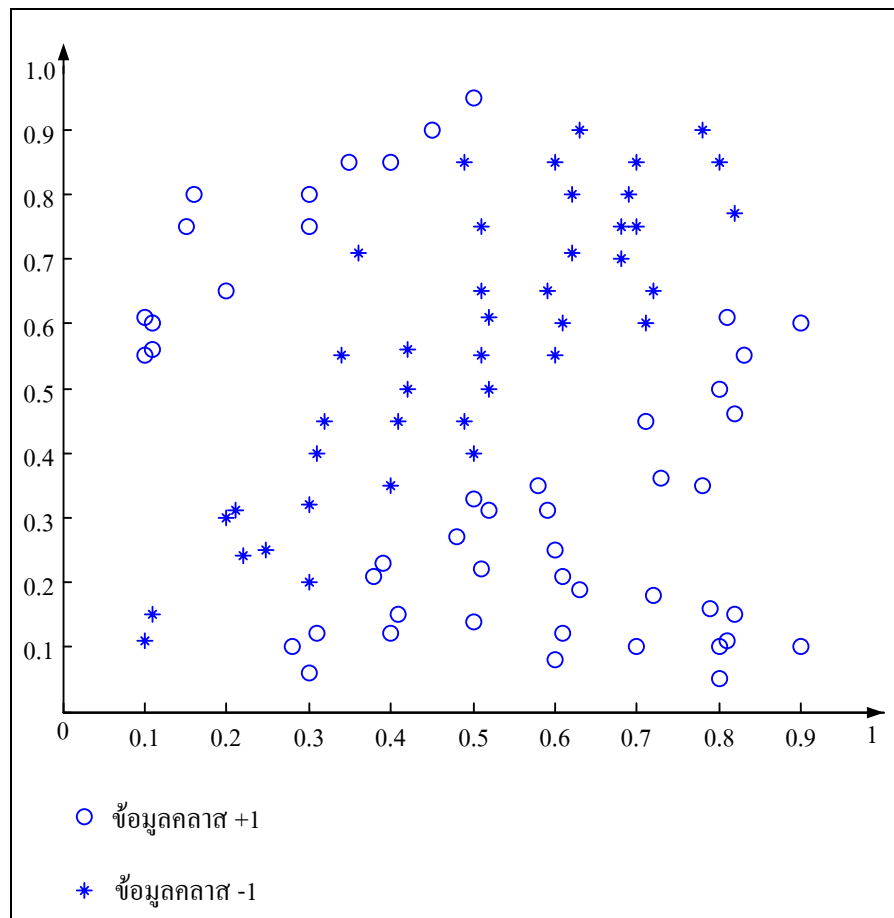
ฟังก์ชันอนุกรมฟูริเยร์ (fourier series function) สามารถพิจารณาว่าเป็นการส่งของปริภูมิลักษณะขนาด  $2N+1$  ฟังก์ชันแก่นี่นิยามการใช้งานในช่วง  $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$

$$K(x_i, x_j) = \frac{\sin\left(N + \frac{1}{2}\right)(x_i - x_j)}{\sin\left(\frac{1}{2}(x_i - x_j)\right)} \quad (6.42)$$

ฟังก์ชันเสมือนพหุนาม (spline function) เป็นฟังก์ชันที่มีความยืดหยุ่น ฟังก์ชันที่มีขนาดจำกัด (finite spline) มีอันดับเท่ากับ  $k$  และมีจำนวน  $N$  เส้น ณ ตำแหน่ง  $\tau_s$  และในกรณีนี้  $k=1$  จะได้ฟังก์ชันแก่นเป็นช่วงกำลังสาม (piece-wise cubic)

$$K(x_i, x_j) = 1 + \langle x_i, x_j \rangle + \frac{1}{2} \langle x_i, x_j \rangle \min(x_i, x_j) - \frac{1}{6} \min(x_i, x_j)^3 \quad (6.43)$$

พิจารณาข้อมูลเวกเตอร์ในรูปที่ 6.23 ถ้าทำการจำแนกข้อมูลเวกเตอร์ด้วยเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนที่ใช้ตัวจำแนกแบบเชิงเส้น จะเห็นได้ว่าไม่สามารถจำแนกข้อมูลเวกเตอร์ทั้งสองคลาสได้



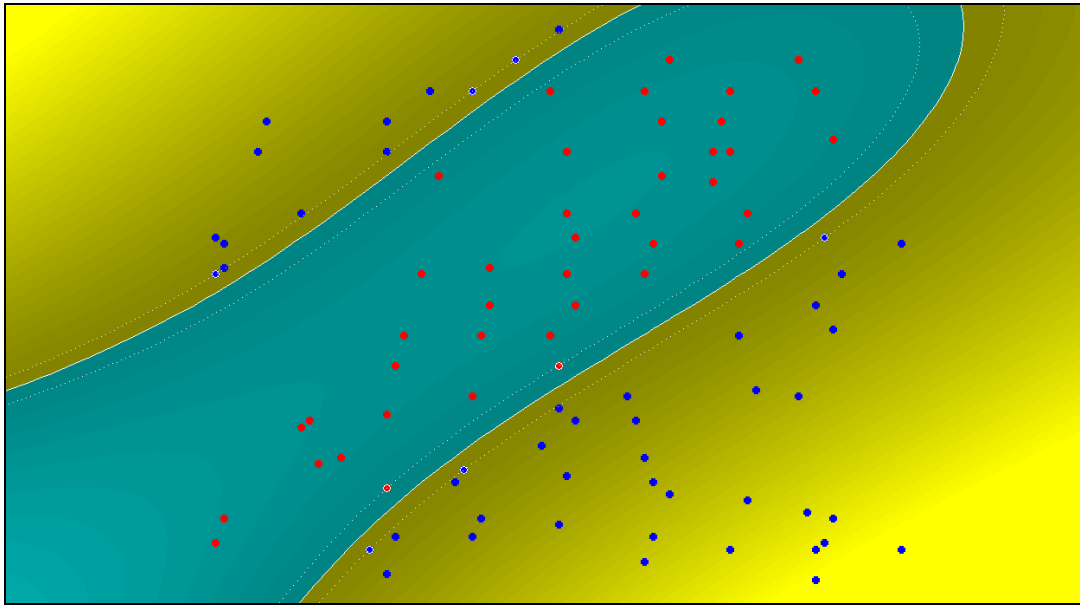
รูปที่ 6.23 ข้อมูลเวกเตอร์ที่ไม่สามารถแบ่งแยกด้วยตัวจำแนกแบบเชิงเส้น

ดังนั้นจึงทำการจำแนกข้อมูลดังกล่าวด้วยเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนที่ใช้ตัวจำแนกแบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยเลือกใช้ฟังก์ชันฐานรัศมีแบบเกาส์เขียนเป็นฟังก์ชันแก่น จึงสามารถที่จะจำแนกข้อมูลได้

เนื่องจากการจำแนกข้อมูลเวกเตอร์แบบไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำการเลือกคำนวณเมตริกซ์ H

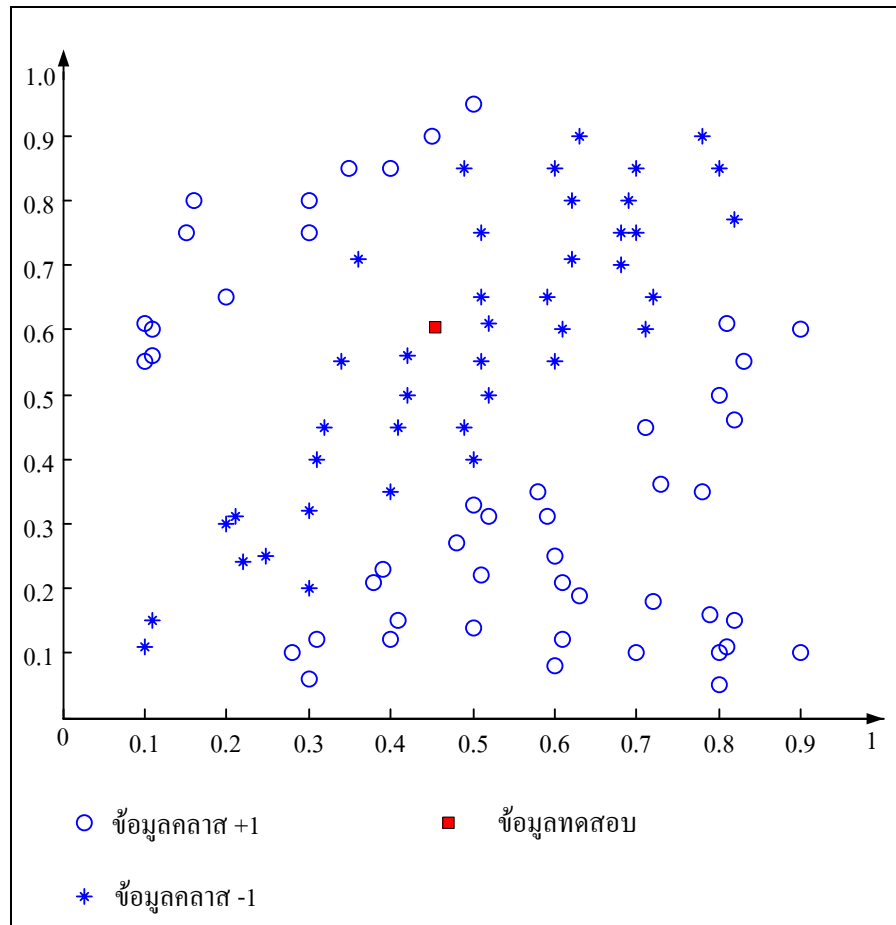
$$H(i, j) = \sum_{i=1}^Q \sum_{j=1}^Q Y_i * Y_j * K(X_i, X_j)$$

โดยที่ฟังก์ชันแก่น  $K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right)$  และ  $\sigma = 1$

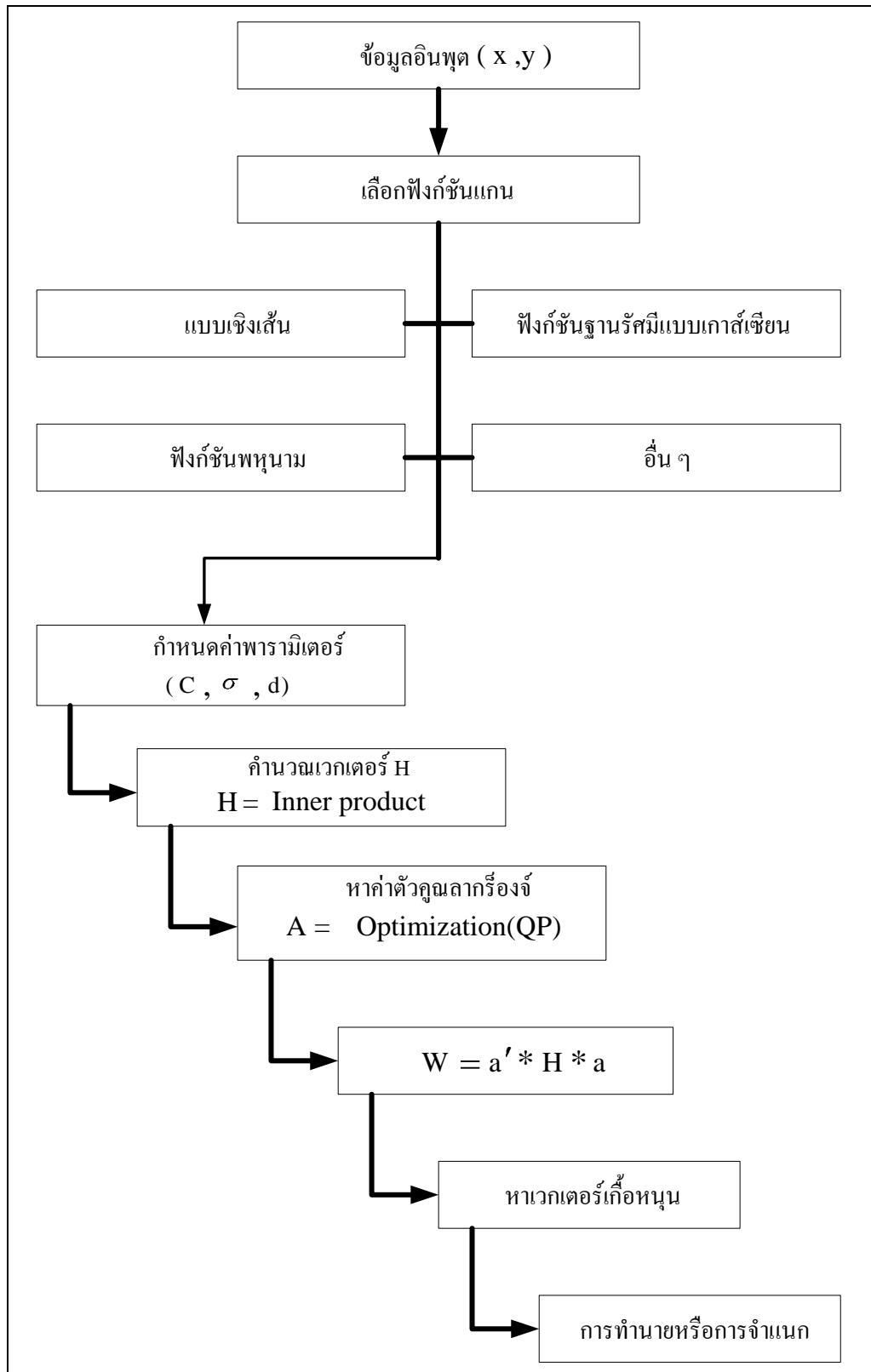


รูปที่ 6.24 ข้อมูลเวกเตอร์ที่ถูกแบ่งแยกด้วยตัวจำแนกแบบไม่เป็นเชิงเส้น

พิจารณาเมื่อข้อมูลทดสอบ =  $[0.45 \quad 0.61]$  แล้วทำการจำแนกด้วยสมการที่ (6.35) และผลจากการจำแนกคือเป็นข้อมูลคลาส -1 ดังนั้นผลการจำแนกที่ได้นั้นมีความถูกต้อง



รูปที่ 6.25 การจำแนกข้อมูลเวกเตอร์ที่ถูกแบ่งแยกด้วยตัวจำแนกแบบไม่เป็นเชิงเส้น  
ด้วยข้อมูลทดสอบ

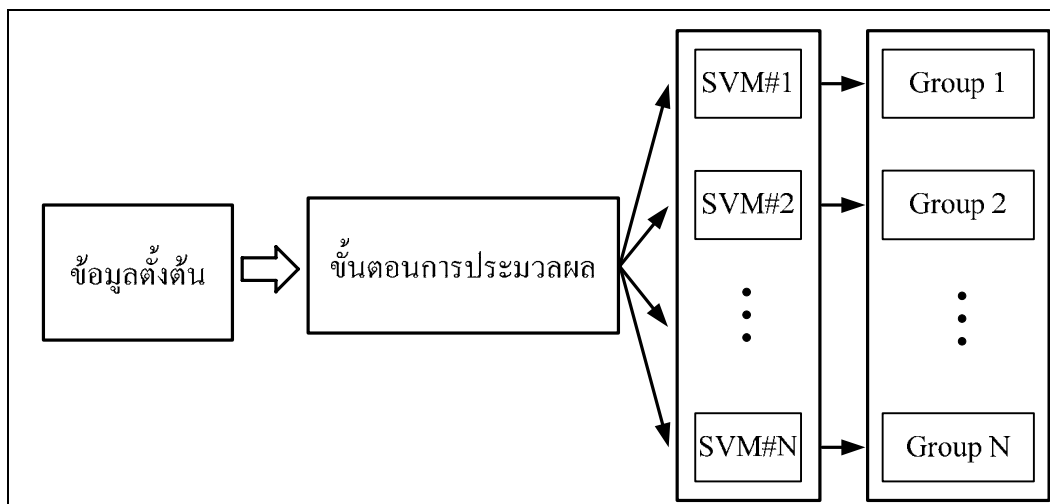


รูปที่ 6.26 แผนผังการจำแนกข้อมูลเวกเตอร์ด้วยเครื่องเวกเตอร์เกือหนุ่น

แผนผังการจำแนกข้อมูลเวกเตอร์ด้วยเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนดังแสดงในรูปที่ 6.26 เริ่มด้วยข้อมูลเวกเตอร์ที่จะนำมาทำการฝึกสอนด้วยเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน จากนั้นทำการเลือกฟังก์ชันแก่นและพารามิเตอร์ของฟังก์ชันแก่น แล้วทำการคำนวณหาเมตริกซ์  $H$  เพื่อหาค่าตัวคูณลากร็องจ์  $\alpha$  โดยใช้การโปรแกรมกำลังสอง แล้วจึงทำการคำนวณค่าขนาดเวกเตอร์และเวกเตอร์เกือหนุน พร้อมทั้งค่าไบอัส สุดท้ายเป็นการทำนายหรือการจำแนกประเภทของข้อมูล

การจำแนกข้อมูลแบบหลายคลาสด้วยเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน ถึงแม้ว่าเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนจะเป็นตัวจำแนกข้อมูลแบบ 2 คลาส แต่ก็สามารถทำการปรับโครงสร้างของระบบเพื่อให้เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนให้มีความสามารถในการเรียนรู้และจำแนกข้อมูล  $N$  คลาสได้ โดยการเลือกใช้เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนจำนวน  $N$  ชุดเพื่อเรียนรู้ข้อมูลแต่ละคลาสด้วยรูปแบบต่อไปนี้

- SVM#1 เรียนรู้ข้อมูลชุดที่ 1 และ เรียนรู้ข้อมูลที่ไม่ใช่ชุดที่ 1
- SVM#2 เรียนรู้ข้อมูลชุดที่ 2 และ เรียนรู้ข้อมูลที่ไม่ใช่ชุดที่ 2
- "
- "
- SVM#N เรียนรู้ข้อมูลชุดที่  $N$  และ เรียนรู้ข้อมูลที่ไม่ใช่ชุดที่  $N$



รูปที่ 6.27 การใช้เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนสำหรับจำแนกข้อมูลแบบหลายคลาส

หลังจากนั้นเมื่อทำการป้อนข้อมูลอินพุตสำหรับทดสอบให้แต่ละชุดของเครื่องเวกเตอร์ เกื้อหนุน แล้วทำการคำนวณและพิจารณาว่าเครื่องเวกเตอร์เกื้อหนุนชุดใดสามารถที่จะจำแนกข้อมูล อินพุตดังกล่าวได้ดีที่สุด โดยพิจารณาได้จากเงื่อนไขระยะทางของข้อมูลอินพุตที่ห่างจากระนาบเกิน ของคลาส + 1 มากที่สุด (ระยะนาบเกินของคลาส +1 แทนชุดข้อมูลที่ไม่ใช่ และระยะนาบเกิน ของคลาส -1 แทนชุดข้อมูลที่ไม่ใช่)

#### 6.4.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เครื่องเวกเตอร์เกื้อหนุน

สำหรับการศึกษาดูตัวอย่างการประยุกต์ใช้เครื่องเวกเตอร์เกื้อหนุนที่จะกล่าวนี้ เป็นการจำแนกความบกพร่องของเฟือง โดยการใช้เครื่องเวกเตอร์เกื้อหนุน (Soleimani, 2009) เป็นการศึกษาเพื่อนำเสนอวิธีการดำเนินการระบุความผิดปกติพร่องของเฟือง โดยใช้เทคนิค การประมวลผลสัญญาณการสั่นและเครื่องเวกเตอร์เกื้อหนุน เวกเตอร์ลักษณะถูกคำนวณ จากสัญญาณการสั่นประกอบด้วย เวลา ความถี่ และการวิเคราะห์เวลากับความถี่

เงื่อนไขการพิจารณาความผิดปกติพร่องของเฟืองแบ่งเป็น 4 แบบคือ สภาพสมบูรณ์ดี (healthy) สภาพเก่าเล็กน้อย (slightly worn) สภาพเก่าปานกลาง (medium worn) และสภาพซี่ฟันหัก (broken-teeth gear)

สัญญาณการสั่นของเฟืองจะถูกพิจารณาใน 3 ลักษณะได้แก่ ลักษณะปริภูมิเวลา (time-domain features) ลักษณะปริภูมิความถี่ (frequency-domain features) และลักษณะ เวลา - ความถี่ (time-frequency features) โดยใช้การแปลงเวฟเลต (wavelet transform) แล้วเลือกลักษณะที่มีความเด่นชัดเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและระบุประเภท ด้วยเครื่องเวกเตอร์เกื้อหนุน

## 6.5 สรุป

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงเทคนิคชาวนฉลาดคือ simplified fuzzy ARTMAP และเครื่องเวกเตอร์เกื้อหนุนเพื่อใช้ในการรู้จำและจำแนกประเภทของดิสชาร์จบางส่วน โดยได้แสดงการคำนวณและค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องรวมทั้งสมการต่าง ๆ และตัวอย่าง การประยุกต์ใช้งาน ในการนำเทคนิคดังกล่าวไปใช้งานควรคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์และสมการ ให้มีความเหมาะสม สำหรับการประยุกต์ใช้งานเทคนิคชาวนฉลาดทั้งเทคนิค simplified fuzzy ARTMAP และเครื่องเวกเตอร์เกื้อหนุนเพื่อใช้ในการรู้จำและจำแนกประเภท ของดิสชาร์จบางส่วนจะถูกนำเสนอรายละเอียดในบทที่ 7



## บทที่ 7

### การประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ในการรู้จำดีสซาร์จบางส่วน

#### 7.1 บทนำ

สำหรับเนื้อหาในบทที่ 7 เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ซึ่งประกอบด้วยเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และ เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนมาใช้ในการรู้จำและจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วน โดยเนื้อหาและรายละเอียดการคำนวณของเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และ เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 สำหรับเนื้อหาในบทนี้จะเป็นการนำเสนอในส่วนของโปรแกรมเพื่อใช้ในการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วน ค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนจะถูกใช้เป็นข้อมูลในขั้นตอนการรู้จำและการจำแนกประเภท โดยขั้นตอนในการประยุกต์ใช้นั้นจะได้กล่าวดังต่อไปนี้

#### 7.2 ค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วน

ข้อมูลจากที่ได้การทดลองการตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน ด้วยวิธีการตรวจวัดทางไฟฟ้าซึ่งรายละเอียดได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 ข้อมูลดีสซาร์จบางส่วนที่ตรวจวัดได้ประกอบด้วยขนาดประจุและมุมเฟสของการเกิดดีสซาร์จบางส่วน จากนั้นทำการคำนวณค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีทางสถิติ ค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนประกอบด้วย ค่าพารามิเตอร์  $Sk^+$ ,  $Sk^-$ ,  $Ku^+$ ,  $Ku^-$  ของ  $H_n(\varphi)$  ค่าพารามิเตอร์  $Sk^+$ ,  $Sk^-$ ,  $Ku^+$ ,  $Ku^-$  ของ  $H_{qn}(\varphi)$  ค่า  $Q$  ค่า  $cc$  และ ค่า  $mcc$  ตามสูตรการคำนวณที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5 แล้วนั้นจึงนำมาเป็นฐานข้อมูลสำหรับการฝึกสอนในการรู้จำและการจำแนกประเภทของดีสซาร์จบางส่วน

#### 7.3 การประยุกต์ใช้เทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP

##### ในการรู้จำดีสซาร์จบางส่วน

การประยุกต์ใช้เทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP ในการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วนในวิทยานิพนธ์นี้จะเขียนอัลกอริทึมด้วยโปรแกรม MATLAB สำหรับขั้นตอนการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วน นั้นเริ่มด้วยข้อมูลของดีสซาร์จบางส่วนในแต่ละประเภท ซึ่งแสดงด้วยค่าคุณลักษณะที่ได้มาจากการคำนวณด้วยวิธีทางสถิติ และเป็นข้อมูล

ที่นำมาใช้สำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภทคีสหาร์จบางส่วน เรียงลำดับข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7.1 การเรียงลำดับค่าคุณลักษณะสำหรับเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP

$H_n(\varphi)$				$H_{qn}(\varphi)$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Q$	cc	mcc

ในการทำงานของโปรแกรมการรู้จำและการจำแนกคีสหาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP นั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องจัดเรียงข้อมูล ข้อมูลที่ใช้สำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภทนั้น ประกอบด้วยค่าคุณลักษณะของคีสหาร์จบางส่วน

ค่าคุณลักษณะของคีสหาร์จบางส่วน ซึ่งจัดเรียงข้อมูลในรูปแบบเมตริกซ์ขนาด  $160 \times 11$  ประกอบด้วย

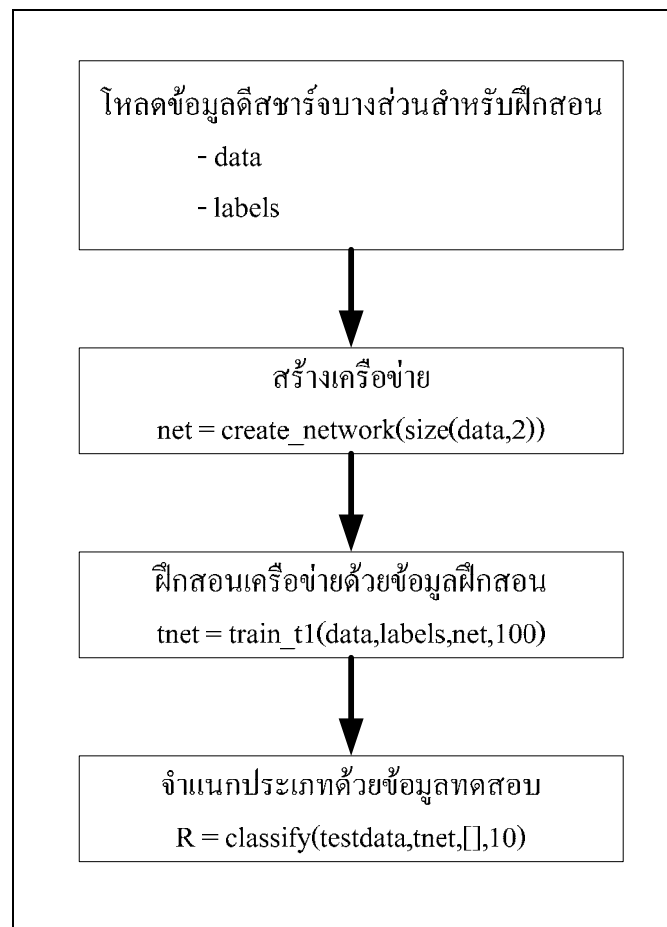
- แถวที่ 1-40 เป็นข้อมูลค่าคุณลักษณะของโคโรนาคีสหาร์จในอากาศ
- แถวที่ 41-80 เป็นข้อมูลค่าคุณลักษณะของโคโรนาคีสหาร์จในน้ำมัน
- แถวที่ 81-120 เป็นข้อมูลค่าคุณลักษณะของคีสหาร์จตามผิว
- แถวที่ 120-160 เป็นข้อมูลค่าคุณลักษณะของคีสหาร์จภายใน

ข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของคีสหาร์จบางส่วน ซึ่งจัดเรียงข้อมูลในรูปแบบเมตริกซ์ขนาด  $160 \times 1$  ประกอบด้วย

- แถวที่ 1-40 เป็นข้อมูลโคโรนาคีสหาร์จในอากาศ เป็นกลุ่ม 1
- แถวที่ 41-80 เป็นข้อมูลโคโรนาคีสหาร์จในน้ำมัน เป็นกลุ่ม 2
- แถวที่ 81-120 เป็นข้อมูลคีสหาร์จตามผิว เป็นกลุ่ม 3
- แถวที่ 121-160 เป็นข้อมูลคีสหาร์จภายใน เป็นกลุ่ม 4

เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานของโปรแกรม MATLAB จึงได้ตั้งชื่อเมตริกซ์ของค่าคุณลักษณะของคีสหาร์จบางส่วนชื่อว่า data และตั้งชื่อเมตริกซ์ของข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของคีสหาร์จบางส่วนชื่อว่า labels

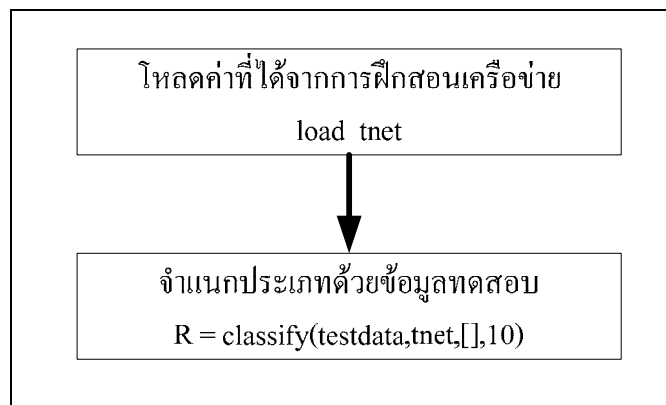
ขั้นตอนการประยุกต์ใช้เทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP ในการรู้จำคีสหาร์จบางส่วนแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 7.1 ขั้นตอนการใช้อัลกอริทึมของเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP  
ในการรู้จำดีสซาร์จบางส่วน

หากต้องการเพิ่มฐานข้อมูลฝึกสอนสามารถทำได้โดย เพิ่มค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนในเมตริกซ์ data และเพิ่มข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของดีสซาร์จบางส่วนในเมตริกซ์ labels ให้มีความสอดคล้องกัน

ถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงฐานข้อมูลฝึกสอน สามารถเก็บค่า tnet ที่ได้จากฝึกสอนเครือข่ายด้วยข้อมูลฝึกสอนดังกล่าว เพื่อใช้ในขั้นตอนการจำแนกประเภทครั้งต่อไปได้



รูปที่ 7.2 ขั้นตอนการใช้อัลกอริทึมของเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP ในการรู้จำดีสซาร์จบางส่วน

สำหรับคำสั่งที่เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในโปรแกรม สำหรับการรู้จำ และการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วนถูกนำเสนอไว้ในภาคผนวก

ตารางที่ 7.2 ผลการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วน ด้วยเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP

ข้อมูลทดสอบ	จำนวนข้อมูล (ชุด)	ผลการจำแนกที่ถูกต้อง (ชุด)
โคโรนาดีสซาร์จในอากาศ	25	25
โคโรนาดีสซาร์จในน้ำมันหม้อแปลง	25	25
ดีสซาร์จตามผิว	25	25
ดีสซาร์จภายใน	25	25

#### 7.4 การประยุกต์ใช้เทคนิค เครื่องเวกเตอร์เกือหนุน ในการรู้จำดีสซาร์จบางส่วน

การประยุกต์ใช้เทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนในการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วนในวิทยานิพนธ์นี้จะเขียนอัลกอริทึมด้วยโปรแกรม MATLAB สำหรับขั้นตอนการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน นั้นเริ่มต้นด้วยข้อมูลของดีสซาร์จบางส่วนในแต่ละประเภท ซึ่งแสดงด้วยค่าคุณลักษณะที่ได้มาจากการคำนวณด้วยวิธีทางสถิติ และเป็นข้อมูลที่น่ามาใช้สำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วน เรียงลำดับข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 การเรียงลำดับค่าคุณลักษณะสำหรับเทคนิค เครื่องเวกเตอร์เกือหนุน

$H_n(\varphi)$				$H_{qn}(\varphi)$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Q$	cc	mcc

ในการทำงานของโปรแกรมการรู้จำและการจำแนกคีสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนนั้นจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องจัดเรียงข้อมูลข้อมูลเพื่อใช้สำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภทของคีสซาร์จบางส่วน

ค่าคุณลักษณะของคีสซาร์จบางส่วน ซึ่งจัดเรียงข้อมูลในรูปแบบเมตริกซ์ขนาด  $160 \times 11$  ประกอบด้วย

- แถวที่ 1-40 เป็นข้อมูลค่าคุณลักษณะของโคโรนาคีสซาร์จในอากาศ
- แถวที่ 41-80 เป็นข้อมูลค่าคุณลักษณะของโคโรนาคีสซาร์จในน้ำมัน
- แถวที่ 81-120 เป็นข้อมูลค่าคุณลักษณะของคีสซาร์จตามผิว
- แถวที่ 120-160 เป็นข้อมูลค่าคุณลักษณะของคีสซาร์จภายใน

เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานของโปรแกรม MATLAB จึงได้ตั้งชื่อเมตริกซ์ของค่าคุณลักษณะของคีสซาร์จบางส่วนชื่อว่า data

ในการใช้เทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนเพื่อการรู้จำและการจำแนกประเภทคีสซาร์จบางส่วนซึ่งประกอบด้วย โคโรนาคีสซาร์จในอากาศ โคโรนาคีสซาร์จในน้ำมัน คีสซาร์จตามผิว คีสซาร์จภายใน ดังนั้น จึงต้องใช้เทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนจำนวน 4 โมเดล คือ เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนหนึ่ง (SVM#1) เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนสอง (SVM#2) เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนสาม (SVM#3) และเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนสี่ (SVM#4)

การฝึกสอนเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนหนึ่ง (SVM#1) เพื่อให้รู้จำข้อมูลของโคโรนาคีสซาร์จในอากาศ ดังนั้นจึงให้ข้อมูลของโคโรนาคีสซาร์จในอากาศเป็นกลุ่ม +1 โดยให้ข้อมูลของคีสซาร์จบางส่วนชนิดอื่นเป็นกลุ่ม -1

ข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของคีสซาร์จบางส่วนถูกจัดเรียงเป็นเมตริกซ์(เมตริกซ์ labels\_1 มีขนาด  $160 \times 1$ ) ในกรณีของกลุ่มการฝึกสอนโคโรนาคีสซาร์จในอากาศ (SVM#1)

- แถวที่ 1-40 เป็นข้อมูลโคโรนาคีสซาร์จในอากาศ จัดเป็นกลุ่ม +1
- แถวที่ 41-80 เป็นข้อมูลโคโรนาคีสซาร์จในน้ำมัน จัดเป็นกลุ่ม -1
- แถวที่ 81-120 เป็นข้อมูลคีสซาร์จตามผิว จัดเป็นกลุ่ม -1
- แถวที่ 120-160 เป็นข้อมูลคีสซาร์จภายใน จัดเป็นกลุ่ม -1

การฝึกสอนเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนหนึ่ง (SVM#2) เพื่อให้รู้จำข้อมูลของโคโรนาไวรัสซาร์จในน้ำมัน ดังนั้นจึงให้ข้อมูลของโคโรนาไวรัสซาร์จในน้ำมันเป็นกลุ่ม +1 โดยให้ข้อมูลของไวรัสซาร์จบางส่วนชนิดอื่นเป็นกลุ่ม -1

ข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของไวรัสซาร์จบางส่วนถูกจัดเรียงเป็นเมตริกซ์(เมตริกซ์ labels\_2 มีขนาด  $160 \times 1$ ) ในกรณีของกลุ่มการฝึกสอนโคโรนาไวรัสซาร์จในน้ำมัน (SVM#2)

- แถวที่ 1-40 เป็นข้อมูลโคโรนาไวรัสซาร์จในอากาศ จัดเป็นกลุ่ม -1
- แถวที่ 41-80 เป็นข้อมูลโคโรนาไวรัสซาร์จในน้ำมัน จัดเป็นกลุ่ม +1
- แถวที่ 81-120 เป็นข้อมูลไวรัสซาร์จตามผิว จัดเป็นกลุ่ม -1
- แถวที่ 120-160 เป็นข้อมูลไวรัสซาร์จภายใน จัดเป็นกลุ่ม -1

การฝึกสอนเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนหนึ่ง (SVM#3) เพื่อให้รู้จำข้อมูลของไวรัสซาร์จตามผิวดังนั้นจึงให้ข้อมูลของไวรัสซาร์จตามผิวเป็นกลุ่ม +1 โดยให้ข้อมูลของไวรัสซาร์จบางส่วนชนิดอื่นเป็นกลุ่ม -1

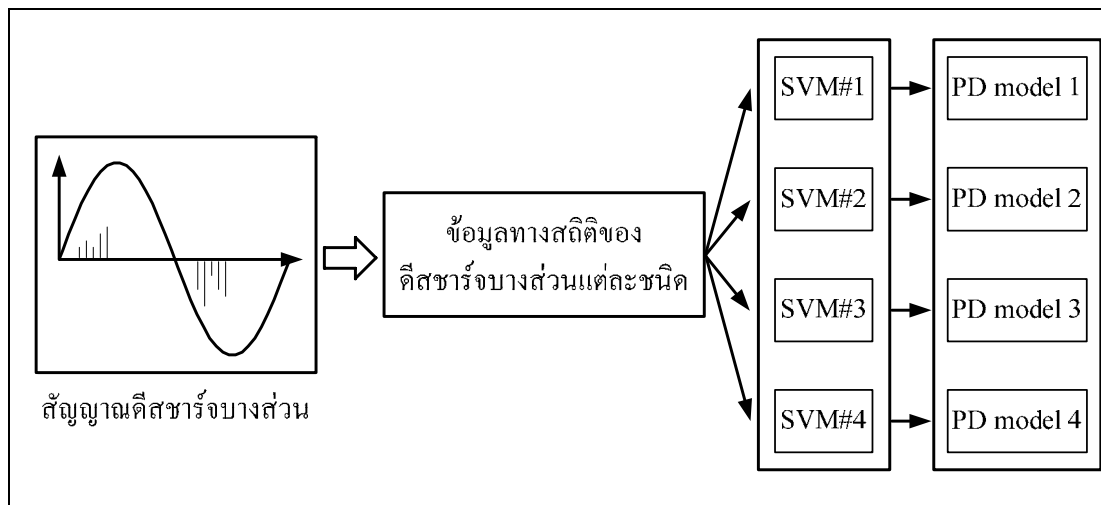
ข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของไวรัสซาร์จบางส่วนถูกจัดเรียงเป็นเมตริกซ์(เมตริกซ์ labels\_3 มีขนาด  $160 \times 1$ ) ในกรณีของกลุ่มการฝึกสอนข้อมูลไวรัสซาร์จตามผิว (SVM#3)

- แถวที่ 1-40 เป็นข้อมูลโคโรนาไวรัสซาร์จในอากาศ จัดเป็นกลุ่ม -1
- แถวที่ 41-80 เป็นข้อมูลโคโรนาไวรัสซาร์จในน้ำมัน จัดเป็นกลุ่ม -1
- แถวที่ 81-120 เป็นข้อมูลไวรัสซาร์จตามผิว จัดเป็นกลุ่ม +1
- แถวที่ 120-160 เป็นข้อมูลไวรัสซาร์จภายใน จัดเป็นกลุ่ม -1

การฝึกสอนเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนหนึ่ง (SVM#4) เพื่อให้รู้จำข้อมูลของไวรัสซาร์จภายใน ดังนั้นจึงให้ข้อมูลของไวรัสซาร์จภายในเป็นกลุ่ม +1 โดยให้ข้อมูลของไวรัสซาร์จบางส่วนชนิดอื่นเป็นกลุ่ม -1

ข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของไวรัสซาร์จบางส่วนถูกจัดเรียงเป็นเมตริกซ์(เมตริกซ์ labels\_4 มีขนาด  $160 \times 1$ ) ในกรณีของกลุ่มการฝึกสอนข้อมูลไวรัสซาร์จภายใน (SVM#4)

- แถวที่ 1-40 เป็นข้อมูลโคโรนาไวรัสซาร์จในอากาศ จัดเป็นกลุ่ม -1
- แถวที่ 41-80 เป็นข้อมูลโคโรนาไวรัสซาร์จในน้ำมัน จัดเป็นกลุ่ม -1
- แถวที่ 81-120 เป็นข้อมูลไวรัสซาร์จตามผิว จัดเป็นกลุ่ม -1
- แถวที่ 120-160 เป็นข้อมูลไวรัสซาร์จภายใน จัดเป็นกลุ่ม +1



รูปที่ 7.3 แผนผังการรู้จำและการจำแนกประเภทคิสซาร์จบางส่วน  
ด้วยเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุ่น

ดังนั้นข้อมูลสำหรับการฝึกสอนเครื่องเวกเตอร์เกือหนุ่นในแต่ละโมเดล ดังนี้

(SVM#1) ฝึกสอนด้วยข้อมูลคุณลักษณะของคิสซาร์จบางส่วน (เมตริกซ์ data) และ ข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของคิสซาร์จบางส่วน (เมตริกซ์ labels<sub>1</sub>)

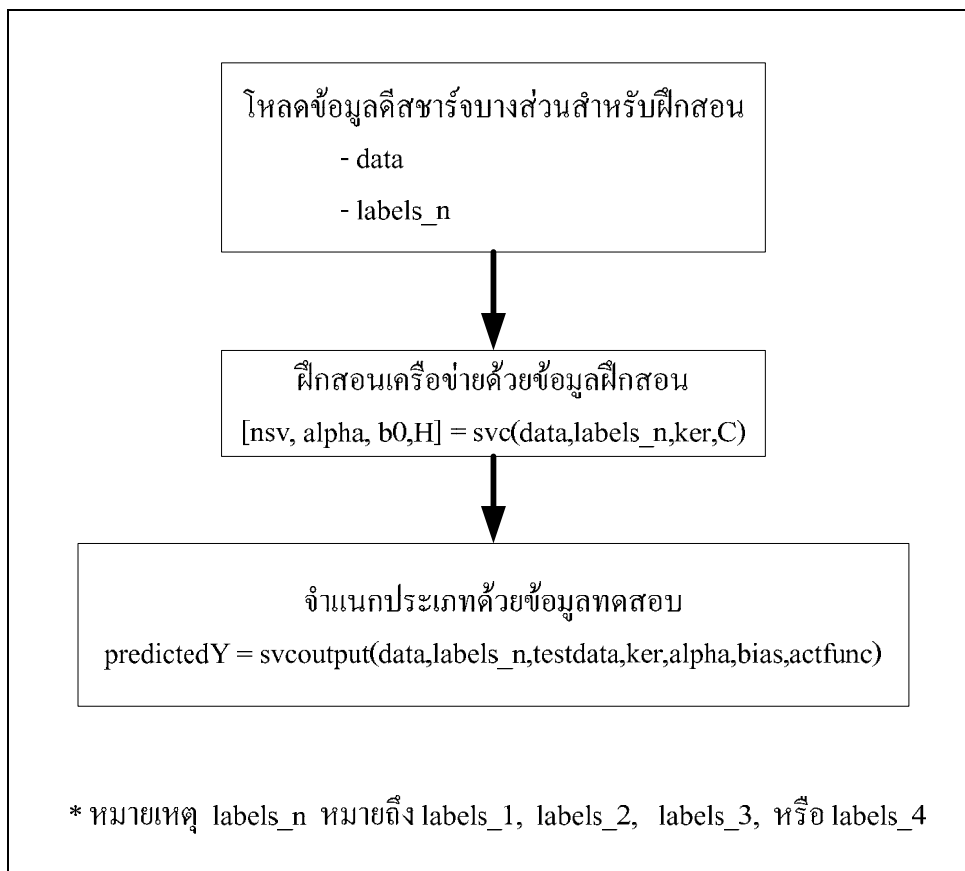
(SVM#2) ฝึกสอนด้วยข้อมูลคุณลักษณะของคิสซาร์จบางส่วน (เมตริกซ์ data) และ ข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของคิสซาร์จบางส่วน (เมตริกซ์ labels<sub>2</sub>)

(SVM#3) ฝึกสอนด้วยข้อมูลคุณลักษณะของคิสซาร์จบางส่วน (เมตริกซ์ data) และ ข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของคิสซาร์จบางส่วน (เมตริกซ์ labels<sub>3</sub>)

(SVM#4) ฝึกสอนด้วยข้อมูลคุณลักษณะของคิสซาร์จบางส่วน (เมตริกซ์ data) และ ข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของคิสซาร์จบางส่วน (เมตริกซ์ labels<sub>4</sub>)

หากต้องการเพิ่มฐานข้อมูลฝึกสอนสามารถทำได้โดย เพิ่มค่าคุณลักษณะของคิสซาร์จบางส่วนในเมตริกซ์ data และเพิ่มข้อมูลกลุ่มหรือประเภทของคิสซาร์จบางส่วนในเมตริกซ์ labels<sub>n</sub> (n = 1 2 3 4) ให้มีความสอดคล้องกัน

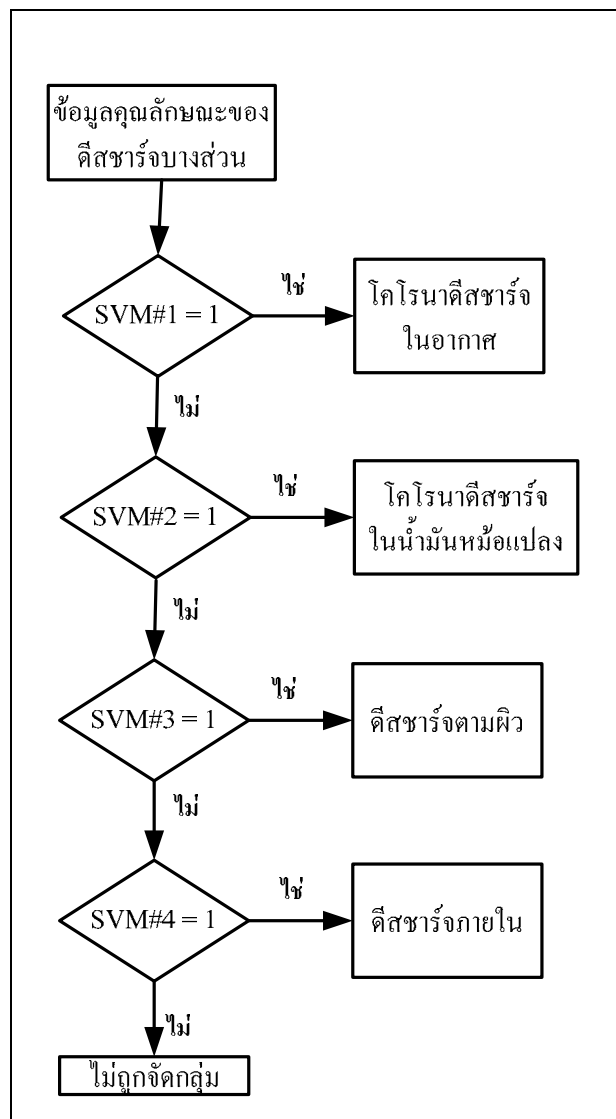
อัลกอริทึมของเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุ่นสำหรับการฝึกสอนและการจำแนกประเภทคิสซาร์จบางส่วน ของเครื่องเวกเตอร์เกือหนุ่นแต่ละโมเดล ดังแสดงในรูปที่ 7.4



รูปที่ 7.4 ขั้นตอนการใช้อัลกอริทึมของเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนของแต่โมเดล ในการรู้จำและการจำแนกประเภทคี่สขาร้จบางส่วน

ขั้นตอนในการใช้เทคนิคเวกเตอร์เกือหนุนทั้ง 4 โมเดล เพื่อจำแนกประเภทคี่สขาร้จ บางส่วนแสดงในรูปที่ 7.5





รูปที่ 7.5 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้เครื่องเวกเตอร์เกือหนุนเพื่อการรู้จำและการจำแนกประเภทคีซาร์จบางส่วน

สำหรับคำสั่งที่เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในโปรแกรมสำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภทคีซาร์จบางส่วนถูกนำเสนอไว้ในภาคผนวก

ตารางที่ 7.4 ผลการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน

ข้อมูลทดสอบ	จำนวน ข้อมูล (ชุด)	ผลการจำแนกที่ถูกต้อง (ชุด)
โคโรนาดีสซาร์จในอากาศ	25	25
โคโรนาดีสซาร์จในน้ำมันหม้อแปลง	25	25
ดีสซาร์จตามผิว	25	25
ดีสซาร์จภายใน	25	25

จากผลการประยุกต์ใช้เทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุนในการรู้จำดีสซาร์จบางส่วน จึงสรุปและเปรียบเทียบของทั้งสองเทคนิคดังต่อไปนี้

ตารางที่ 7.5 ตารางเปรียบเทียบเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP  
และเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน

ชื่อเปรียบเทียบ	SFAM	SVM
จำนวนโมเดลที่ใช้ในการรู้จำและจำแนก ดีสซาร์จบางส่วนจำนวน 4 ประเภท	1 โมเดล	4 โมเดล
ข้อมูลสำหรับฝึกสอน	1 ชุด	4 ชุด
การกำหนดพารามิเตอร์	พารามิเตอร์สอดคล้อง	ฟังก์ชันแกนและพารามิเตอร์
อินพุตดำเนินการ	เวกเตอร์อินพุตสมบูรณ์ $I$	เมตริกซ์ $H$
การดำเนินการทางคณิตศาสตร์	$\wedge =$ Fuzzy AND operator	การหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบโปรแกรมกำลังสอง
ผลจากการดำเนินการ	น้ำหนักการเรียนรู้ $W_j$	ตัวคูณลากรังจ์ $\alpha$ ค่าไบอัส $b$
สิ่งที่ใช้พิจารณาในการทำนาย	ค่าฟังก์ชันกระตุ้นที่มากที่สุด $\max T_j(I)$	$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i \in \text{SVs}} \alpha_i y_i K\langle x_i, x \rangle + b\right)$

ถ้าเปรียบเทียบเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกี่ยวพัน ในเรื่องของเวลาที่ใช้ สำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภทคีสซาร์จบางส่วนของวิทยานิพนธ์นี้ ผลปรากฏว่า เทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP จะดำเนินการ ได้เร็วกว่าเทคนิคเครื่องเวกเตอร์ เกี่ยวพัน ทั้งนี้ก็เพราะว่าจะต้องใช้เทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกี่ยวพันจำนวน 4 โมเดล ในการรู้จำ และจำแนกประเภทคีสซาร์จบางส่วน

## 7.5 สรุป

ค่าคุณลักษณะของคีสซาร์จบางส่วนชุดสำหรับฝึกสอน ถูกนำมาใช้เป็นฐานข้อมูล และฝึกสอนให้กับเครือข่ายประสาทเทียมของเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเครือข่ายประสาทเทียมของเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกี่ยวพัน จากนั้นค่าคุณลักษณะของคีสซาร์จบางส่วนชุดข้อมูลทดสอบ จะถูกจำแนกประเภทโดยอาศัยเครือข่ายประสาทเทียม (ที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว) ของเทคนิคชาญฉลาดทั้งสอง ผลการรู้จำและการจำแนกประเภทคีสซาร์จบางส่วนของข้อมูลทดสอบ ด้วยเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกี่ยวพันนั้นให้ผลการจำแนกที่มีความถูกต้อง

## บทที่ 8

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการศึกษาและทำการทดลองการรู้จำแบบรูปของดีสซาร์จบางส่วนในน้ำมันหม้อแปลง เพื่อจำแนกประเภทของดีสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน สำหรับขั้นตอนการตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วนในงานวิจัยนี้วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีการตรวจวัดทางไฟฟ้าโดยวิธีการตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์ และได้สร้างแบบจำลองการเกิดดีสซาร์จบางส่วนในแบบต่าง ๆ คือ การจำลองการเกิดโคโรนาดีสซาร์จในอากาศ การจำลองการเกิดโคโรนาดีสซาร์จในน้ำมันหม้อแปลง การจำลองการเกิดดีสซาร์จภายในฉนวนแข็ง การจำลองการเกิดดีสซาร์จตามผิวมาใช้ประกอบการทดสอบการตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน รายละเอียดได้นำเสนอไว้ในบทที่ 3 และบทที่ 4 จากนั้นข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนของการตรวจวัดดีสซาร์จบางส่วน จะนำมาคำนวณหาค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนด้วยวิธีทางสถิติ เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภท โดยรายละเอียดการคำนวณหาค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนได้นำเสนอไว้ในบทที่ 5 ส่วนบทที่ 6 ได้นำเสนอเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ซึ่งประกอบด้วย เทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน เพื่อใช้ในการรู้จำดีสซาร์จบางส่วน และบทที่ 7 ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ จากผลศึกษาการรู้จำและการจำแนกรูปแบบของดีสซาร์จบางส่วนด้วยเทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน ดังนั้น จากผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

(1) ค่าการกระจาย  $H_n(\varphi)$  และ  $H_{qn}(\varphi)$  ของแบบจำลองการเกิดดีสซาร์จบางส่วนแสดงด้วยค่าตัวดำเนินการทางสถิติ ได้แก่ ค่าความเบ้เอียง ค่าความแหลมคม ค่าความอสมมาตรของดีสซาร์จ ค่า cross – correlation factor และค่า modified cross – correlation factor

(2) แหล่งกำเนิดดีสซาร์จบางส่วนทั้ง 4 ประเภท นั้นให้ข้อมูลทางสถิติที่มีความแตกต่างกัน ทำให้สามารถนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภทได้

(3) ค่าคุณลักษณะของดีสซาร์จบางส่วนใช้เป็นฐานข้อมูลในกระบวนการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วน ด้วยเทคนิคปัญญาประดิษฐ์ที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น ผลจากการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วนด้วยข้อมูลทดสอบนั้นให้ผลการรู้จำและจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วนมีอัตราความถูกต้อง

(4) เทคนิค Simplified Fuzzy ARTMAP และเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกี่ยวพัน สามารถประยุกต์ใช้ในการรู้จำและการจำแนกประเภทคิสซาร์จบางส่วนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับข้อมูลในแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด

## 8.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ค่าคุณลักษณะของคิสซาร์จบางส่วนที่ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ เป็นค่าที่ได้จากแบบจำลองการเกิดคิสซาร์จบางส่วน จึงควรทำการทดลองการตรวจวัดคิสซาร์จบางส่วนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อให้สามารถจำแนกคิสซาร์จบางส่วนในหม้อแปลงไฟฟ้าได้ เป็นต้น

(2) ควรมีการศึกษากการจำลองการเกิดคิสซาร์จตามผิวของฉนวนในสถานะต่าง ๆ เช่น มีความเปราะเปื้อน หรือสภาวะหมอกควัน เป็นต้น

(3) สำหรับการทดสอบการตรวจวัดคิสซาร์จบางส่วน จำนวนเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดคิสซาร์จบางส่วนในแต่ละครั้ง เพื่อบันทึกข้อมูลคิสซาร์จบางส่วน ไม่ควรมากหรือน้อยจนเกินไป เพราะถ้าใช้เวลามากเกินไป จะได้ข้อมูลมีขนาดใหญ่มาก อาจทำให้เกิดปัญหาในขั้นตอนการจัดการข้อมูล โดยเฉพาะคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะต่ำ

(4) ควรมีการศึกษารู้อจำและการจำแนกประเภทคิสซาร์จบางส่วน ให้สามารถระบุประเภทคิสซาร์จบางส่วนในขณะที่ตรวจวัดได้ทันที

## รายการอ้างอิง

- ตำราวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (พิมพ์ครั้งที่ 1). จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ,  
กรุงเทพฯ, 2547
- อาทิตย์ ศรีแก้ว. ปัญญาเชิงคำนวณ (พิมพ์ครั้งที่ 1). สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- Carpenter, G., Grossberg, S., and Iizuka, K. (1992). Comparative performance measures of Fuzzy  
ARTMAP learned vector quantization, and back propagation for handwritten character  
recognition. **IEEE , International Joint Conference on Neural Networks.** 1 : 794- 799.
- Carpenter, G., Grossberg, S., Markuzon, N., Reynolds, J.H., and Rosen, D.D. (1992). Fuzzy  
ARTMAP : A neural network architecture for incremental supervised learning of analog  
multidimensional maps. **IEEE , Transactions on Neural Networks.** 3(5) : 689- 713.
- Champion, J.V., and Dodd, D.J. (1995). Systematic and reproducible partial discharge patterns in  
an epoxy resin. **IEEE, Proceedings of the 5th International Conference on  
Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics.** : 339–343.
- Champion, J.V., and Dodd, D.J. (1996). Systematic and reproducible partial discharge patterns  
during electrical tree growth in an epoxy resin. **Journal of Applied Physics.** 29(3): 862–  
868.
- Chang, W.Y. (2009). Partial Discharge Pattern Recognition for Cast-Resin Current Transformer.  
**IEEE Proceedings of the 9th International Conference on Properties and  
Applications of Dielectric Materials:** 461-464
- Chatpattananan, V., and Pattanadech, N. (2006). A Classification of Partial Discharge on High  
Voltage Equipment with Multinomial Logistic Regression. **IEEE Annual Report  
Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.:** 573-576
- Chen, P.H., Chen, H.C., Liu, A., and Chen, L.M. (2010) . Pattern recognition for partial discharge  
diagnosis of power transformer. **IEEE Proceedings of the 9th International  
Conference on Machine Learning and Cybernetics.** 6 : 2996 – 3001.

- Dissado, L.A., and Fothergill, G.C. (1992). **Electrical degradation and breakdown in polymers**. Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1992, ISBN: 0 86341 196 7
- Dissado, L.A., Dodd, S.J., Champion, J.V., Williams, P.I., and Alison, J.M. (1997). Propagation of electrical tree structures in solid polymeric insulation. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 4(3): 259–279.
- Farag, A.S., Shewhdi, M.H., Jin, X., WANG, C., Cheng, T.C., Dong, X., Gao, S., Jing, W., and Wang, Z. (1999). On-line partial discharge calibration and monitoring for power Transformers. **Elsevier Science. Electric Power Systems Research**. 50(1): 47-54.
- Gulski, E. (1991). **Computer-aided recognition of partial discharges using statistical tools**. Delft University Press . ISBN 90-6275-728-6
- Gulski, E., and Krivda, A. (1993). Neural Networks as a Tool for Recognition of Partial Discharges. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**. 28(6) : 984-1001.
- Hao, L., and Lewin, P. L. (2010). Partial Discharge Source Discrimination using a Support Vector Machine. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 17(1) : 189-197
- Hashmi, G.M., and Lehtonen, M. (2009). Effects of Rogowski Coil and Covered-Conductor Parameters on the Performance of PD Measurements in Overhead Distribution Networ....<sup>146</sup>  
**International Journal of Innovations in Energy Systems and Power**. 4(2) : 14 – 21.
- IEC 60270 published 2000 Section 3.1
- IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions from Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors
- Jin, X., Wang, C., Jing, W., Clieng, T.C., Jiang, L., Zhu, D., Li, F., and Dong, X. (1999). Partial Discharge Pattern Recognition of Power Transformer with Neural Network Applications. **IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**.1 : 261-264
- Judd, M.D., Yang, L., and Hunter, I.B.B. (2005). Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors Part 1: Sensors and signal interpretation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 21(2) : 5–14.
- Judd, M.D., Yang, L., and Hunter, I.B.B. (2005). Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors. Part 2: field experience. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 21(3) : 5 – 13

- Kaneiwa, H., Suzuoki, Y., and Mizutani, T. (2000). Partial discharge characteristics and tree inception in artificial simulated tree channels. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 7(6): 843–848.
- Kasuba, T. (1993). **Simplified fuzzy ARTMAP**. *AI Expert*.8 :18–25.
- Khan, I.U., Wang, Z., Cotton, I., and Northcote, S. (2007). Dissolved Gas Analysis of Alternative Fluids for Power Transformers. **IEEE Electrical Insulation Magazine**. 23(5) : 5 -14.
- Kreuger, F.H. **Partial Discharge Detection in High – Voltage Equipment**. Butterworth & Co. (Publishers) Ltd, 1989.
- Kuffel, E., Zaengl, W. S., and Kuffel, J. (1984). **High Voltage Engineering Fundamentals**. 2<sup>nd</sup> Ed., Butterworth-Heinemann. 1984
- Kundu, P., Kishore, N.K., and Sinha, A.K. (2010). Classification of Acoustic Emission Based Partial Discharge in Oil Pressboard Insulation System Using Fractal Features. **IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena**.: 1-4.
- Kundu, P., Kishore, N.K., and Sinha, A.K. (2008). Classification of Acoustic Emission Based Partial Discharge in Oil Pressboard Insulation System Using Wavelet Analysis. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. (46): 879 – 886.
- Ludpa S., Pattanadech N., Leelajindakrairerk, M., and Yutthagowith, P. (2008). Pattern Classification of Partial Discharge in High Voltage Equipment by Regression Analysis. **IEEE Proceedings of the 5th International Conference on ECTI-CON**. 2 : 921-924.
- Manual MPD 600, OMICRON mtronix technology
- Muhamad, N.A., Phung, B.T., and Blackburn, T.R. (2007). **Dissolved Gas Analysis (DGA) of Partial Discharge Fault in Bio-degradable Transformer Insulation Oil**. *IEEE Australasian Universities Power Engineering Conference*.: 1-6.
- Oonsivilai, A., and Marungsri, B. (2008). Application of Artificial Intelligent Technique for Partial Discharges Localization in Oil Insulating Transformer. **WSEAS Transactions on Systems**. 7(10) : 920 – 929.
- Peng, D., Yang, D., Wang, C., and Li, M. (2009). **The Influence of Transformer Oil Aging to Dielectric Dissipation Factor and Its Insulating Lifetime**. *IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. : 1-4.



- Rajasekaran, S., and Vijayalakshmi Pai, G.A. (2000). Image recognition using SIMPLIFIED FUZZY ARTMAP augmented with a moment based feature extractor. **International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence**. 14(8) :1081–1095
- Rajasekaran, S., and Vijayalakshmi Pai, G.A. (2006). **Neural Networks, Fuzzy Logic and Genetic Algorithms: Synthesis and Applications**. Prentice- Hall of India Private Limited.
- Raja, K., and Floribert T. (2002). Comparative investigations on UHF and acoustic PD detection sensitivity in transformers. **IEEE International Symposium on Electrical Insulation:Conference Record of the 2002**:150 – 153
- Ravindranath, B., and Chander, M. (1984). **Power system protection and switchgear**. Malaviya Regional Engineering College, Jaipur, India
- Shen, Z. B., and El-Saadany, E. F. (2006). Localization of Partial Discharges Using UHF Sensors in Power Transformers. **IEEE Power Engineering Society General Meeting**. : 1-6.
- Soleimani, A., Mahijoob, M. J., and Shariatpanahi, M. (2009). Fault classification in gears using Support Vector Machines (SVMs) and signal processing. **IEEE the 5th International Conference on ICSCCW**.:1-4.
- Suwarno, Suzuoki, Y., Komori, F., and Mizutani, T. (1996). Partial discharges due to electrical treeing in polymers: phaseresolved and time-sequence observation and analysis. **Journal of Applied Physics**. 29(11): 2922–2931.
- Tang, L., Luo, R., Deng, M., and Su, J. (2008). Study of Partial Discharge Localization using Ultrasonics in Power Transformer Based on Particle Swarm Optimization. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**. 15(2) : 492 – 495.
- Vogelsang, R., Fruth, B., Farr1, T., and Frohlich, K. (2003). Detection of electrical tree propagation by partial discharge measurements. **IEEE Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials**. 1: 281 – 285.
- Vogelsang, R., Fruth, B., Farr1, T., and Frohlich, K. (2005). Detection of electrical tree propagation by partial discharge measurements. **European Transactions on Electrical Power,ETEP**. 15(3) : 271 – 284.

Wang, X. , Li, B., Roman, H. T., Russo, O. L., Chin, K., and Farmer, K. R. (2006). Acousto-optical PD Detection for Transformers. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**. 21(3) :1068-1073.

ภาคผนวก ก

โปรแกรมสำหรับการรู้จำและการจำแนกประเภทดีสซาร์จบางส่วน



```

*****
ฟังก์ชันสำหรับการสร้างเครือข่ายของ เทคนิค Simplified fuzzy ARTMAP

*****
function net = create_network(num_features, varargin)
.
a = varargin
net = struct( ...           % กำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้สำหรับการ
    'D'                    , num_features ... % สร้างเครือข่ายประสาทเทียม เช่น ค่า  $\alpha$ 
    , 'max_categories'     , 100 ...         % ค่าพารามิเตอร์สอดคล้อง ค่า  $\beta$  เป็นต้น
    , 'vigilance'         , 0.85...
    , 'alpha'             , 0.001 ...
    , 'epochs'            , 1 ...
    , 'beta'              , 1 ...
    , 'weights'           , cell(1) ...
    , 'labels'            , [] ...
    , 'epsilon'           , 0.001 ...
    , 'singlePrecision'   , false ...
);

for i=1:2:length(varargin)
    net = setfield(net,varargin{i},varargin{i+1});
end

```

```

*****
ฟังก์ชันสำหรับการฝึกสอนของ เทคนิค Simplified fuzzy ARTMAP

*****

% ฟังก์ชัน train_t2 ฝึกสอนเครือข่ายของ SFAM ด้วยข้อมูลสำหรับฝึกสอน
% โดยที่ data เป็นเมตริกซ์ขนาด  $M \times N$  และ labels เป็นเมตริกซ์ขนาด  $M \times 1$ 
% เมตริกซ์ data กับ เมตริกซ์ labels ต้องมีความสอดคล้องกัน
% net เป็นเครือข่ายประสาทเทียมที่ยังไม่มีการฝึกสอน

function net = train_t2(data, labels, net)

for e=1:net.epochs
    network_changed = false;

    for s=1:size(data,1)

        input = data(s,:);
        input_label = labels(s);

%      การทำอินพุตให้เป็นมาตรฐาน
        input = [input 1-input];

%      กำหนดค่าพารามิเตอร์สอดคล้อง
        ro = net.vigilance;

        create_new_prototype = true;

%      คำนวณค่าฟังก์ชันกระตุ้นของแต่ละประเภท
        activation = ones(1,length(net.weights));

            for i=1:length(net.weights)
                activation(i) = sum(min(input,net.weights{i}))/...
                    (net.alpha + sum(net.weights{i}));
            end

%      เรียงลำดับค่าฟังก์ชันกระตุ้นจากมากไปหาน้อย
        [sortedActivations, sortedIndices] = sort(activation,'descend');

```

```

%   ทำการคำนวณและพิจารณาค่าฟังก์ชันกระตุ้นจากมากไปหาน้อยเพื่อหาค่าน้ำหนัก  $W_j$ 
%   ที่เหมาะสมกับการเรียนรู้ของแต่ละประเภท

for p=sortedIndices

    match = sum(min(input,net.weights{p}))/sum(input);

    if match>=ro                                     % ตรวจสอบโรเซนเนสซ์
        if input_label==net.labels(p)               % ตรวจสอบประเภท

            % ปรับค่าน้ำหนักการเรียนรู้
            net.weights{p} = net.beta*(min(input,net.weights{p})) + ...
                (1-net.beta)*net.weights{p};

            network_changed = true;
            create_new_prototype = false;
            break;

        else

            % Match-tracking begins. Increase vigilance
            ro = sum(min(input,net.weights{p}))/net.D + net.epsilon;
            net.vigilance = ro;

        end
    end
end

if create_new_prototype
    new_index = length(net.weights)+1;

    if net.singlePrecision
        net.weights{new_index} = ones(1,2*net.D,'single');
    else
        net.weights{new_index} = ones(1,2*net.D);
    end

    net.weights{new_index} = net.beta*(min(input,net.weights{new_index})) + ...
        (1-net.beta)*net.weights{new_index};

    net.labels(new_index) = input_label;
    network_changed = true;

end

end % samples loop
end % epochs loop

```

```

*****
ฟังก์ชันสำหรับการจำแนกประเภทของ เทคนิค Simplified fuzzy ARTMAP

*****
function results = classify(data, net, labels, debug);

results = [];
hits=0;

for s=1:size(data,1)
    input = data(s,:);

    %   การทำอินพุตให้เป็นมาตรฐาน
    input = [input 1-input];

    %   คำนวณค่าฟังก์ชันกระตุ้นของแต่ละประเภท
    activation = ones(1,length(net.weights));
    for i=1:length(net.weights)
        activation(i) = sum(min(input,net.weights{i}))/...
            (net.alpha + sum(net.weights{i}));
    end

    %   เรียงลำดับค่าฟังก์ชันกระตุ้นจากมากไปหาน้อย
    [sortedActivations, sortedIndices] = sort(activation,'descend');

    %   ทำการคำนวณและพิจารณาค่าฟังก์ชันกระตุ้นจากมากไปหาน้อยเพื่อหาค่าน้ำหนัก  $W_j$ 
    %   ที่เหมาะสมกับการเรียนรู้ของแต่ละประเภท
    results(s)=-1;
    for p=sortedIndices

        match = sum(min(input,net.weights{p}))/sum(input);

        if match>=net.vigilance                % ตรวจสอบเรโซแนนซ์
            results(s) = net.labels(p);

            break;
        end
    end
end % samples loop

```



```

*****
โปรแกรมสำหรับการรู้จำและการจำแนกคิษฐ์าร์จบางส่วนด้วยเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกี่ยวหนูน
*****
clear all ; clc
load CHA_PD_svm.mat           % โหลดชุดข้อมูลสำหรับฝึกสอน

global p1 p2;
p1 = 5;
p2 = 2;
load CHA_PD_testdata.mat     % โหลดชุดข้อมูลสำหรับทดสอบ

for i=1:1

% SVM#1
[nsv1 alpha1 bias1] = svc(data,labels1,'rbf',Inf);
predictedY_1 = svcoutput(data,labels1,testdata,'rbf',alpha1,bias1);
if predictedY_1 == 1
    break;
end

% SVM#2
[nsv2 alpha2 bias2] = svc(data,labels2,'rbf',Inf)
predictedY_2 = svcoutput(data,labels2, testdata,'rbf',alpha2,bias2)
if predictedY_2 == 1
    break;
end

% SVM#3
[nsv3 alpha3 bias3] = svc(data,labels3,'rbf',Inf)
predictedY_3 = svcoutput(data,labels3, testdata,'rbf',alpha3,bias3)
if predictedY_3 == 1
    break;
end

% SVM#4
[nsv4 alpha4 bias4] = svc(data,labels4,'rbf',Inf)
predictedY_4 = svcoutput(data,labels4, testdata,'rbf',alpha4,bias4)

end

```

```

*****
ฟังก์ชันสำหรับการฝึกสอนของเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน
*****
function [nsv, alpha, b0,H] = svc(X,Y,ker,C)
% SVC Support Vector Classification
%
% Usage: [nsv alpha bias] = svc(X,Y,ker,C)
%
% Parameters:   X       - Training inputs
%              Y       - Training targets
%              ker     - kernel function
%              C       - upper bound (non-separable case)
%              nsv     - number of support vectors
%              alpha   - Lagrange Multipliers
%              b0      - bias term
%
% Author: Steve Gunn (srg@ecs.soton.ac.uk)

if (nargin < 2 | nargin > 4) % check correct number of arguments
    help svc
else

    fprintf('Support Vector Classification\n')
    fprintf('_____ \n')
    n = size(X,1);
    if (nargin < 4) C=Inf; end
    if (nargin < 3) ker='linear'; end

    % tolerance for Support Vector Detection
    epsilon = svtol(C);

    % Construct the Kernel matrix
    fprintf('Constructing ...\n');
    H = zeros(n,n);
    for i=1:n
        for j=1:n
            H(i,j) = Y(i)*Y(j)*svkernel(ker,X(i,:),X(j,:));
        end
    end
    c = -ones(n,1);

    % Add small amount of zero order regularisation to
    % avoid problems when Hessian is badly conditioned.
    H = H+1e-10*eye(size(H));

```

```

% Set up the parameters for the Optimisation problem

vlb = zeros(n,1); % Set the bounds: alphas >= 0
vub = C*ones(n,1); % alphas <= C
x0 = zeros(n,1); % The starting point is [0 0 0 0]
neqcstr = nobias(ker); % Set the number of equality constraints (1 or 0)
if neqcstr
    A = Y';, b = 0; % Set the constraint Ax = b
else
    A = [];, b = [];
end

% Solve the Optimisation Problem

fprintf('Optimising ...\n');
st = cputime;

[alpha lambda how] = qp(H, c, A, b, vlb, vub, x0, neqcstr);

fprintf('Execution time: %4.1f seconds\n',cputime - st);
fprintf('Status : %s\n',how);
w2 = alpha'*H*alpha;
fprintf('|w0|^2 : %f\n',w2);
fprintf('Margin : %f\n',2/sqrt(w2));
fprintf('Sum alpha : %f\n',sum(alpha));

% Compute the number of Support Vectors
svi = find( alpha > epsilon);
nsv = length(svi);
fprintf('Support Vectors : %d (%3.1f%%)\n',nsv,100*nsv/n);

% Implicit bias, b0
b0 = 0;

% Explicit bias, b0
if nobias(ker) ~= 0
    % find b0 from average of support vectors on margin
    % SVs on margin have alphas: 0 < alpha < C
    svii = find( alpha > epsilon & alpha < (C - epsilon));
    if length(svii) > 0
        b0 = (1/length(svii))*sum(Y(svii) - H(svii,svi)*alpha(svi).*Y(svii));
    else
        fprintf('No support vectors on margin - cannot compute bias.\n');
    end
end

end

```

```

*****
ฟังก์ชันสำหรับการจำแนกประเภทของเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน
*****
function predictedY = svcoutput(trnX,trnY,tstX,ker,alpha,bias,actfunc)
% SVCOUTPUT Calculate SVC Output
%
% Usage: predictedY = svcoutput(trnX,trnY,tstX,ker,alpha,bias,actfunc)
%
% Parameters:   trnX - Training inputs
%               trnY - Training targets
%               tstX - Test inputs
%               ker  - kernel function
%               beta - Lagrange Multipliers
%               bias - bias
%               actfunc- activation function (0(default) hard | 1 soft)
%
% Author: Steve Gunn (srg@ecs.soton.ac.uk)

if (nargin < 6 | nargin > 7) % check correct number of arguments
    help svcoutput
else

    if (nargin == 6)
        actfunc = 0;
    end
    n = size(trnX,1);
    m = size(tstX,1);
    H = zeros(m,n);
    for i=1:m
        for j=1:n
            H(i,j) = trnY(j)*svkernel(ker,tstX(i,:),trnX(j,:));
        end
    end
    if (actfunc)
        predictedY = softmargin(H*alpha + bias);
    else
        predictedY = sign(H*alpha + bias);
    end
end
end

```

```

*****
ฟังก์ชันสำหรับการจำแนกประเภทของเทคนิคเครื่องเวกเตอร์เกือหนุน
*****
%          'linear' -
%          'poly'      - p1 is degree of polynomial
%          'rbf'       - p1 is width of rbfs (sigma)
%          'sigmoid'  - p1 is scale, p2 is offset
%          'spline'   -
%          'bspline'  - p1 is degree of bspline
%          'fourier'  - p1 is degree
%          'erfb'     - p1 is width of rbfs (sigma)
%          'anova'    - p1 is max order of terms
% Author: Steve Gunn (srg@ecs.soton.ac.uk)

if (nargin < 1) % check correct number of arguments
    help svkernel
else
    global p1 p2;

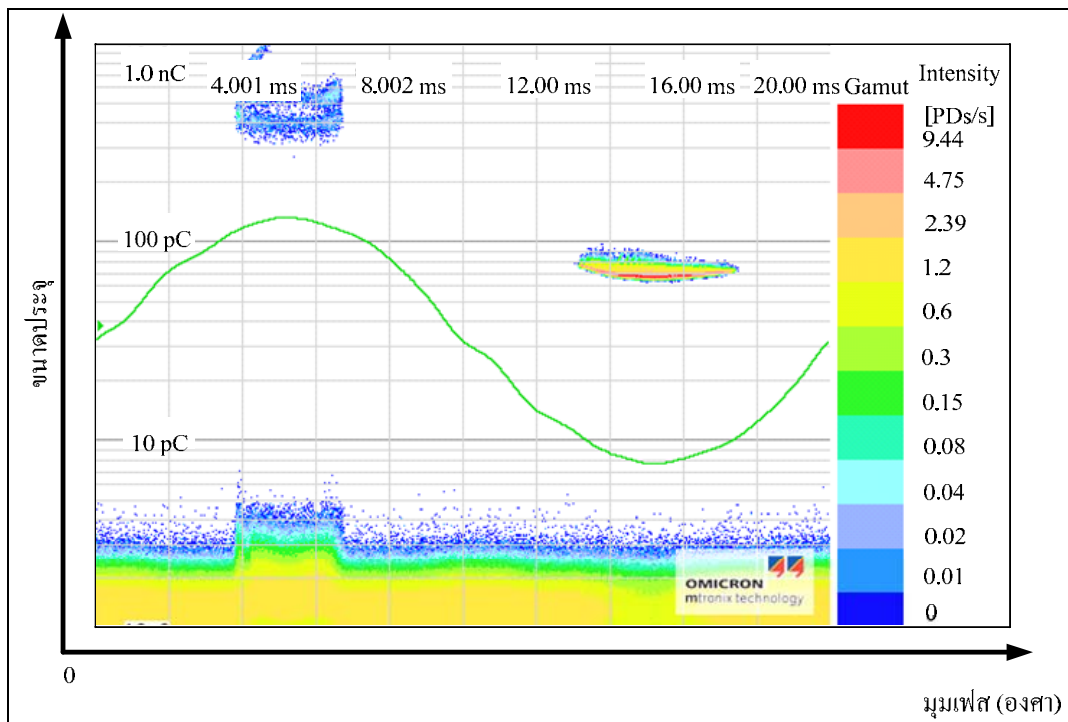
    switch lower(ker)
        case 'linear'
            k = u*v';
        case 'poly'
            k = (u*v' + 1)^p1;
        case 'rbf'
            k = exp(-(u-v)*(u-v)/(2*p1^2));
        case 'erfb'
            k = exp(-sqrt((u-v)*(u-v))/(2*p1^2));
        case 'sigmoid'
            k = tanh(p1*u*v'/length(u) + p2);
        case 'fourier'
            z = sin(p1 + 1/2)*2*ones(length(u),1);
            i = find(u-v);
            z(i) = sin(p1 + 1/2)*(u(i)-v(i))./sin((u(i)-v(i))/2);
            k = prod(z);
        case 'spline'
            z = 1 + u.*v + (1/2)*u.*v.*min(u,v) - (1/6)*(min(u,v)).^3;
            k = prod(z);
            case 'bspline'
                z = 0;
                for r = 0: 2*(p1+1)
                    z = z + (-1)^r*binomial(2*(p1+1),r)*(max(0,u-v + p1+1 - r)).^(2*p1 + 1);
                end
                k = prod(z);
    end

end
end

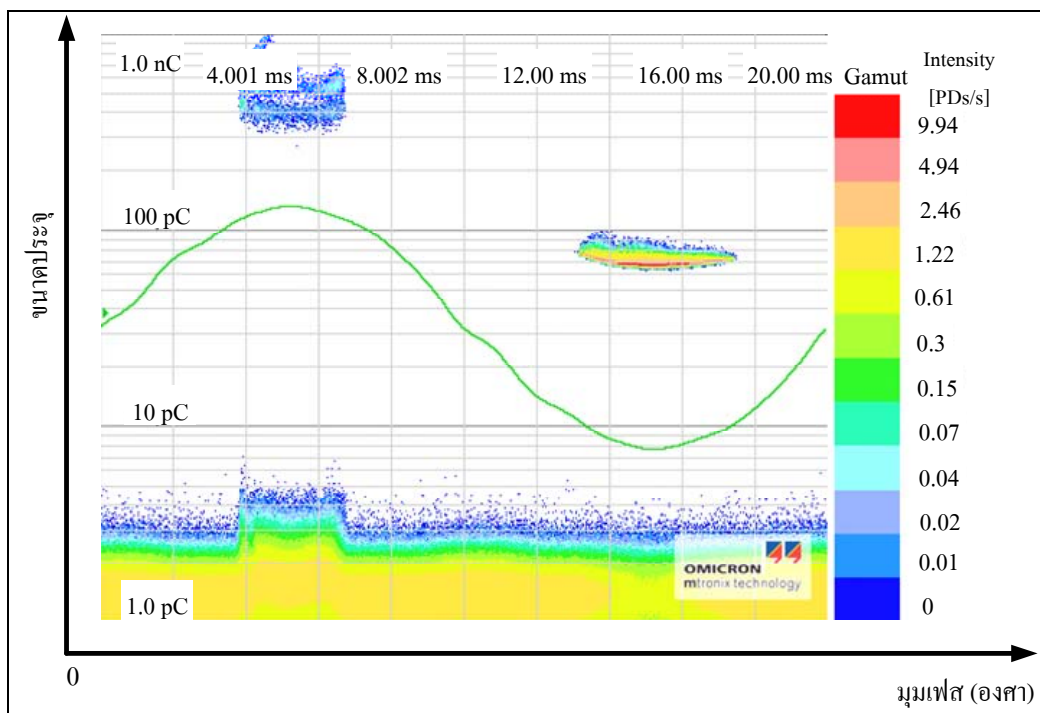
```

ภาคผนวก ข

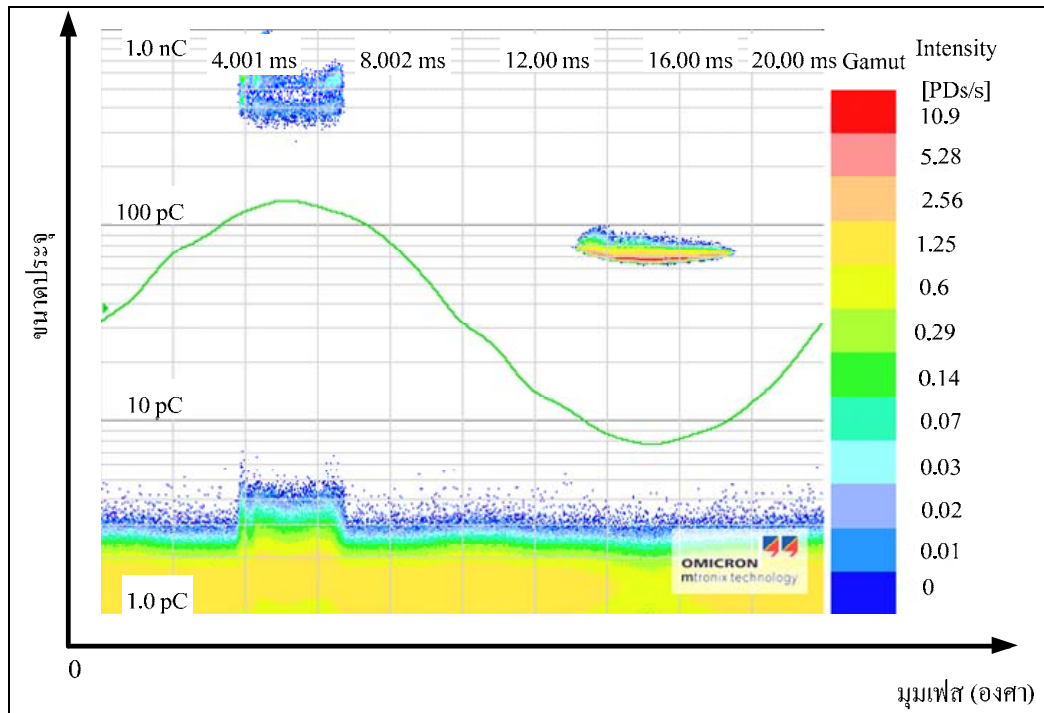
ค่าคุณลักษณะของดีสชาร์จบางส่วน



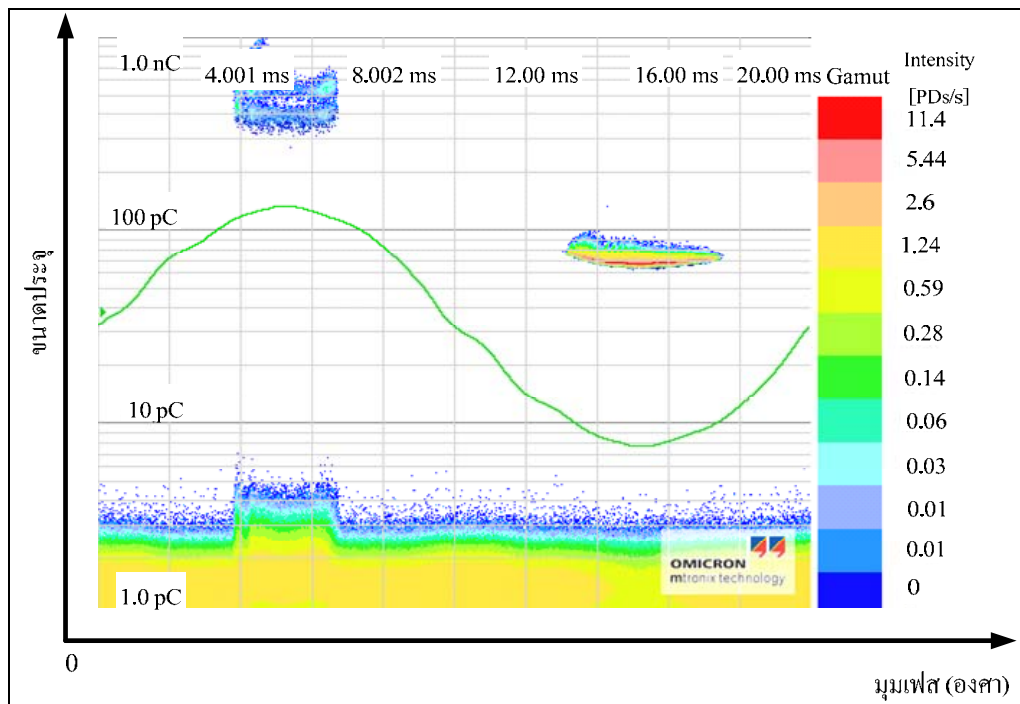
รูปที่ ข.1 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จในอากาศ



รูปที่ ข.2 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จในอากาศ

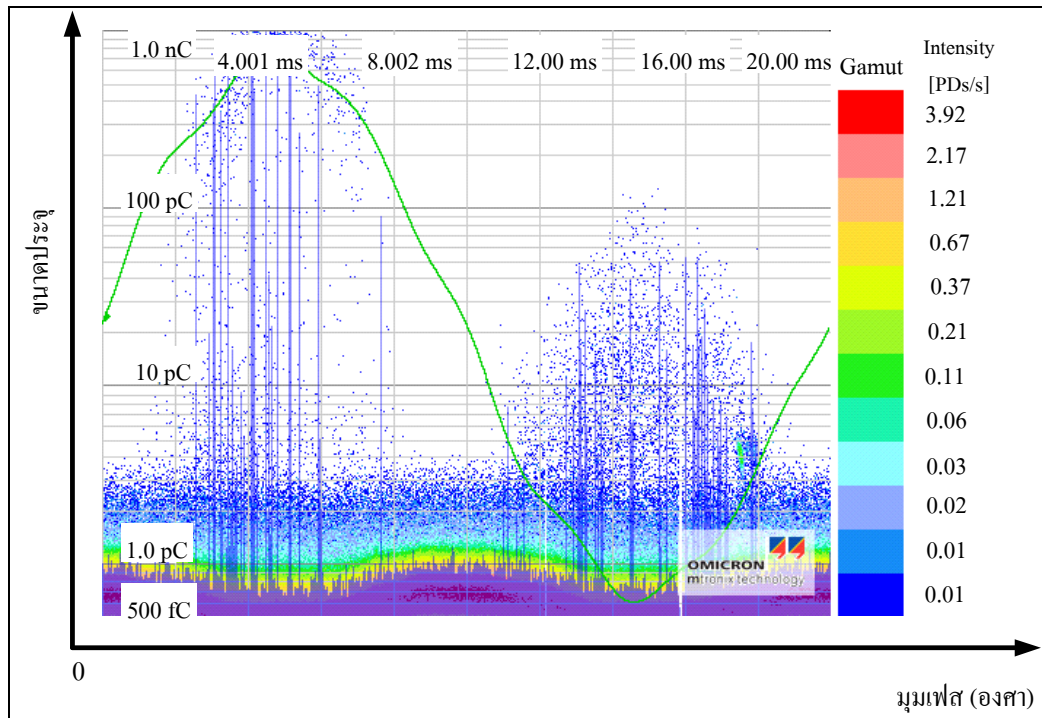


รูปที่ ข.3 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จในอากาศ

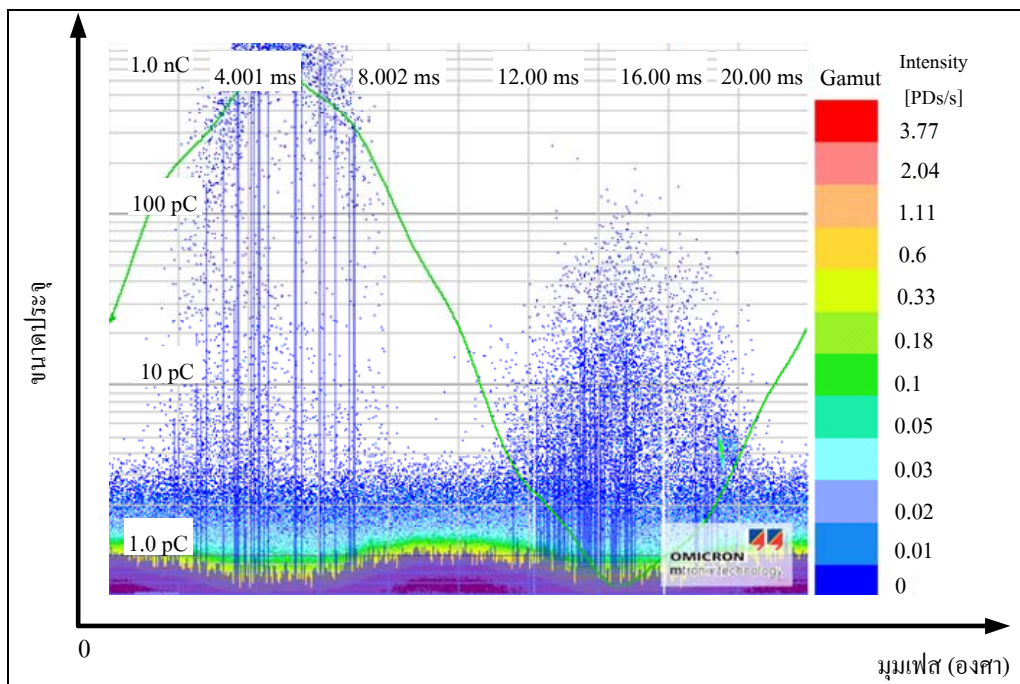


รูปที่ ข.4 การเกิดโคโรนาดิสชาร์จในอากาศ

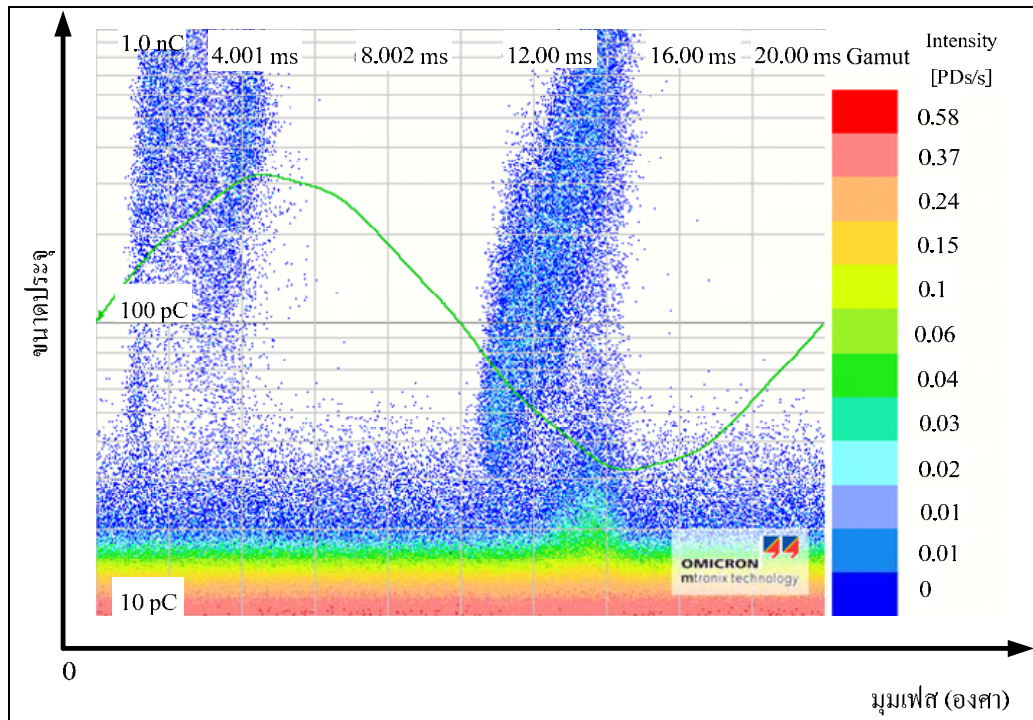




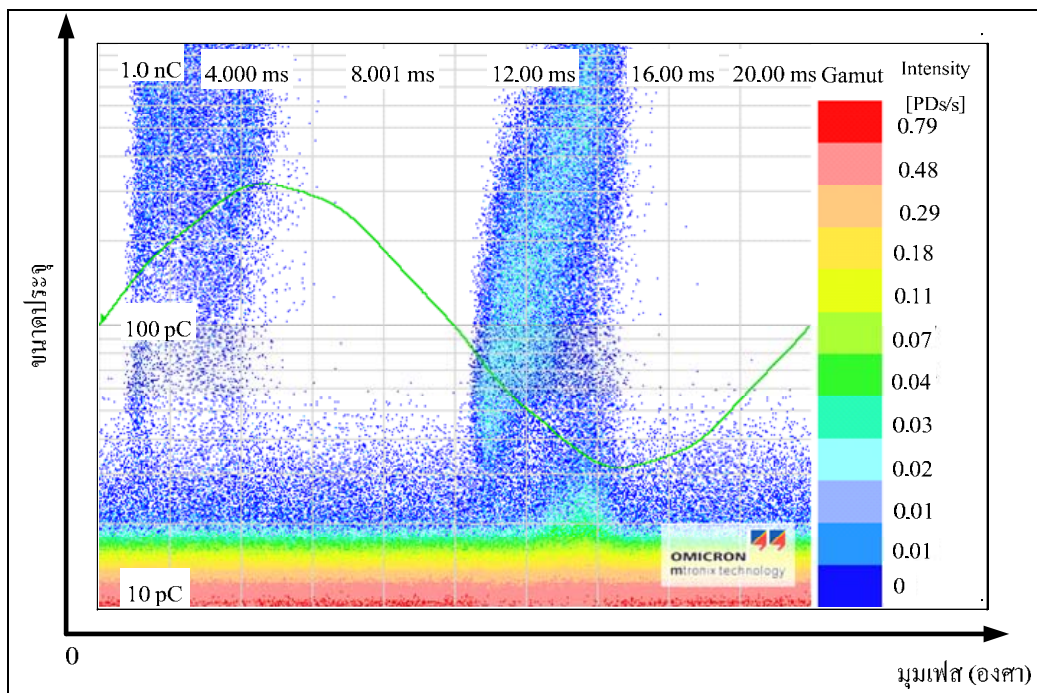
รูปที่ ข.5 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง



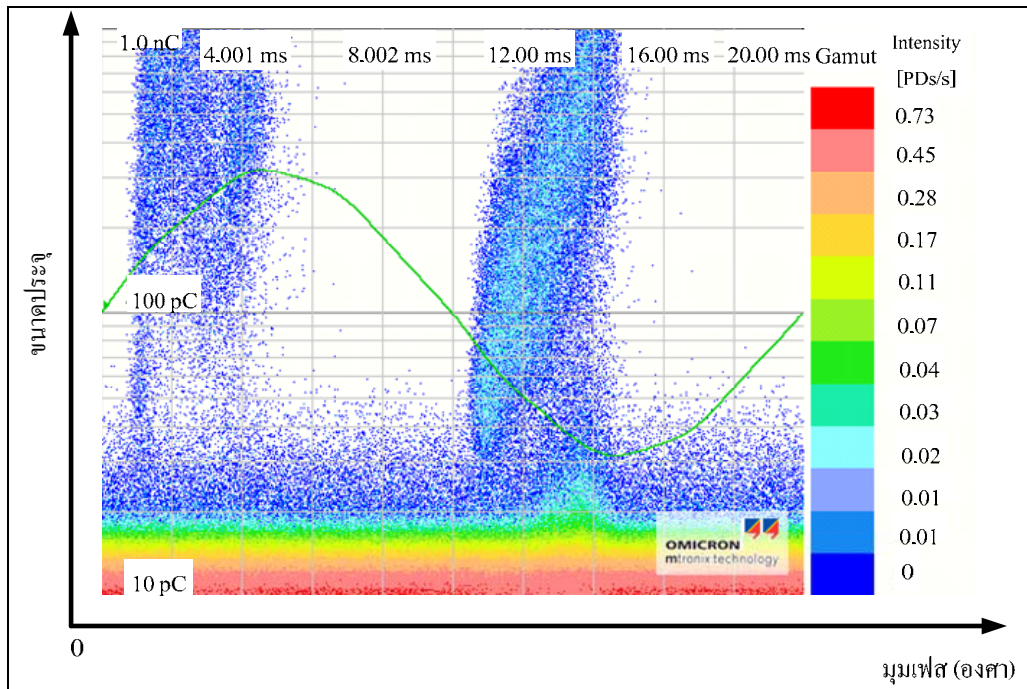
รูปที่ ข.6 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง



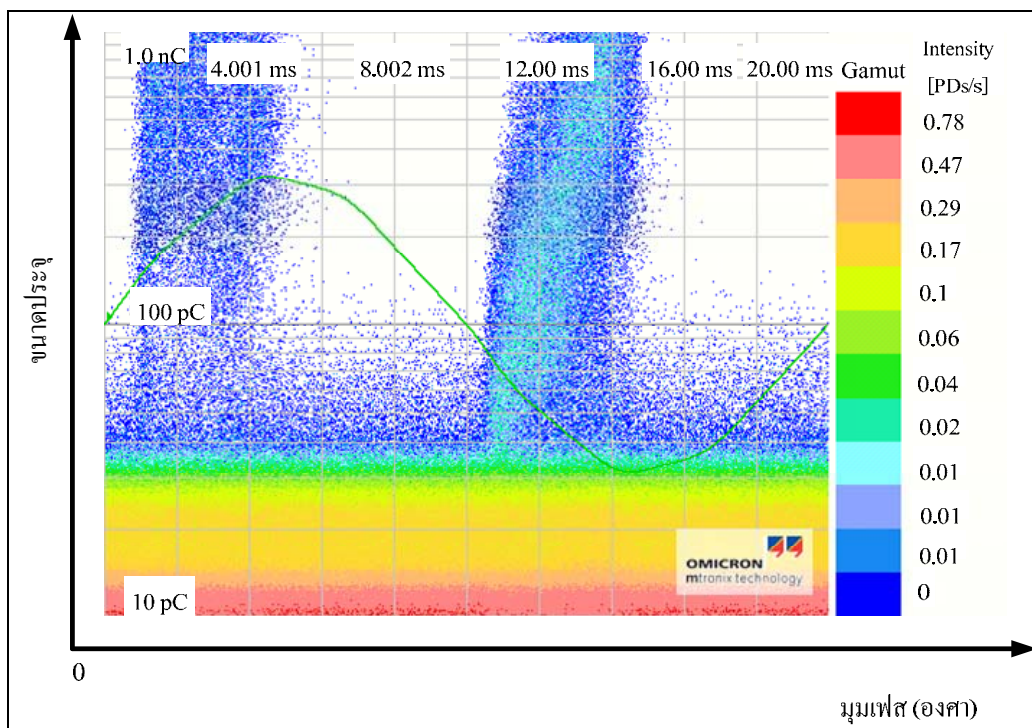
รูปที่ ข.7 การเกิดดีสชาร์จตามผิว



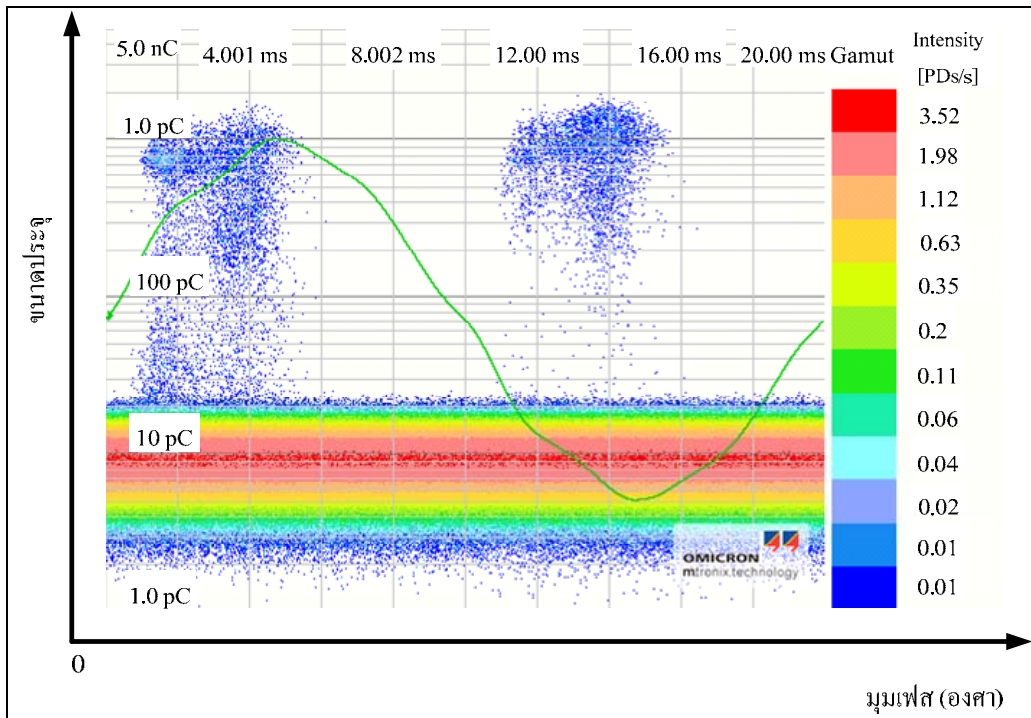
รูปที่ ข.8 การเกิดดีสชาร์จตามผิว



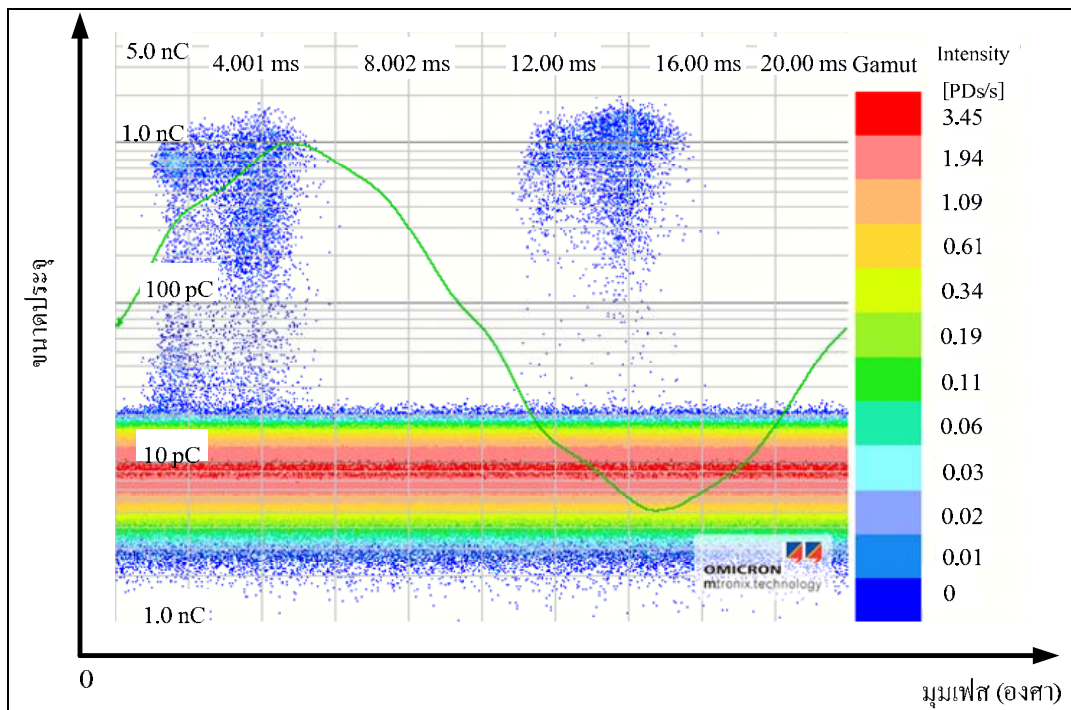
รูปที่ ข.9 การเกิดดีสชาร์จตามผิว



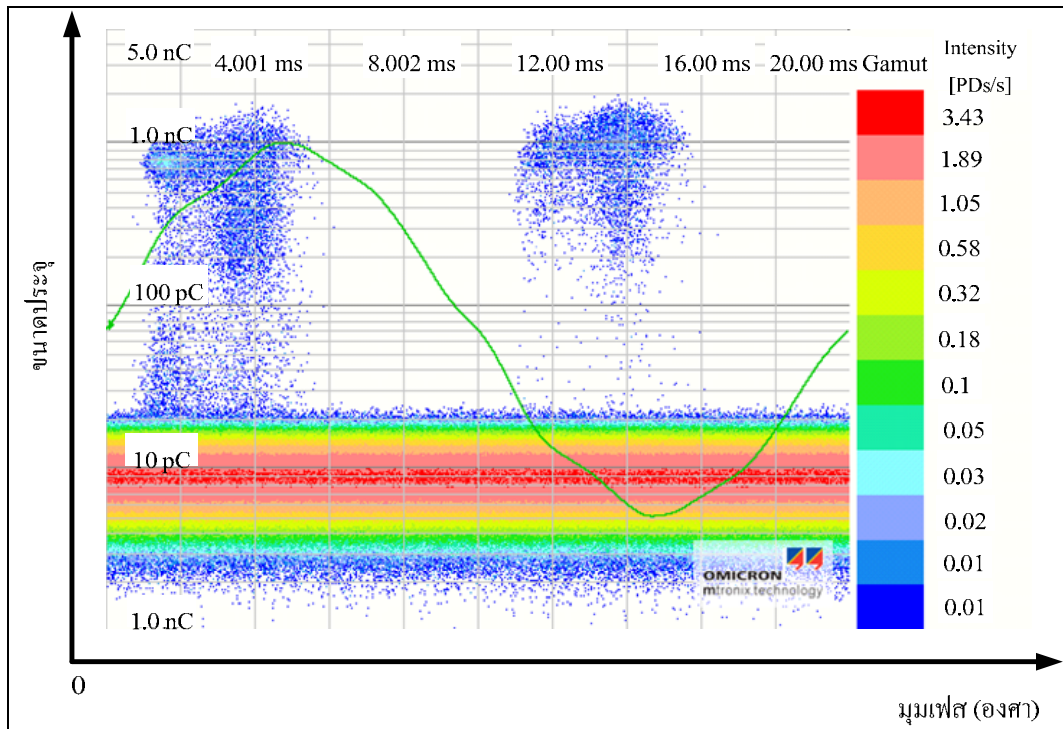
รูปที่ ข.10 การเกิดดีสชาร์จตามผิว



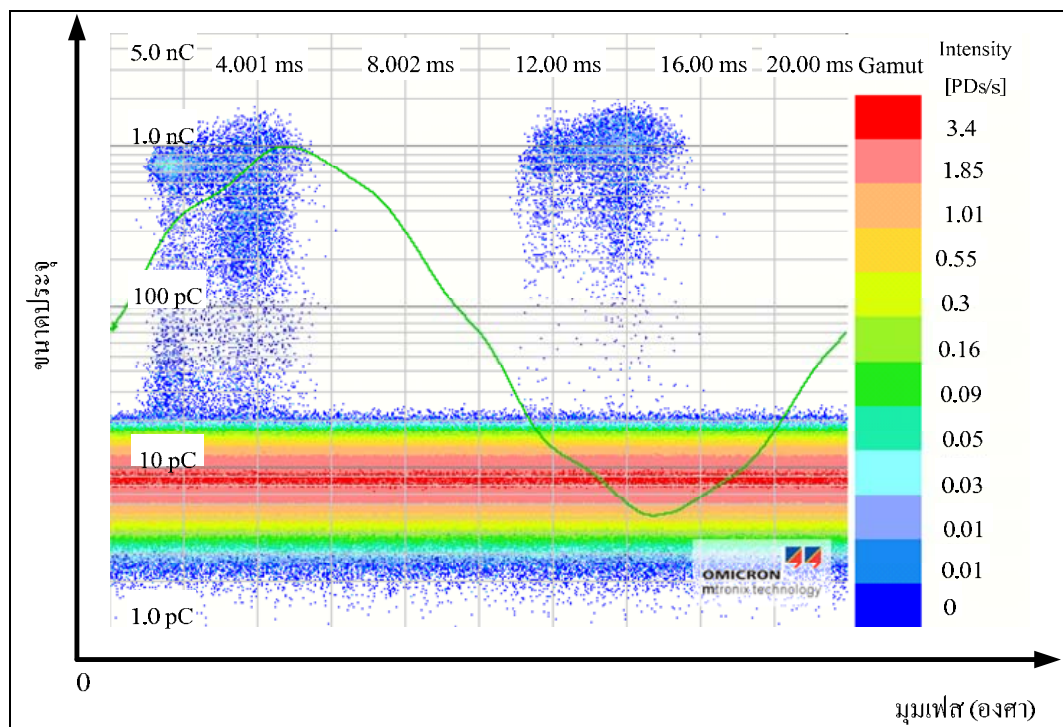
รูปที่ ข.11 การเกิดคิสซาร์จภายใน



รูปที่ ข.12 การเกิดคิสซาร์จภายใน



รูปที่ ข.13 การเกิดคัสซาร์จภายใน



รูปที่ ข.14 การเกิดคัสซาร์จภายใน

ตารางที่ ข.1 ค่าคุณลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จในอากาศ

	$H_{qn}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
1	-0.06537	0.19232	-0.40142	0.11862	0.71369	-2.0558	-0.28458	9.2311	0.13161	0.016999	0.002237
2	-0.03529	0.26738	-0.29044	0.055926	0.70895	-1.7958	-0.16131	8.5151	0.13157	0.055172	0.007259
3	-0.04254	0.31436	-0.25378	-0.20479	0.70808	-1.8056	-0.12952	9.7643	0.13153	0.12301	0.01618
4	0.044907	0.35587	-0.28561	-0.00952	0.86081	-1.5532	0.36159	7.9941	0.13261	0.096259	0.012765
5	-0.05329	0.37465	-0.30041	0.02262	0.91022	-1.5484	0.53732	7.4012	0.13267	0.089182	0.011832
6	-0.06925	0.42578	-0.36151	0.059113	0.96895	-2.0601	0.77128	10.269	0.13305	0.082587	0.010989
7	-0.08407	0.50896	-0.36307	0.2795	1.023	-1.976	1.0083	9.6567	0.1335	0.052968	0.007071
8	-0.07926	0.50291	-0.41693	0.3575	0.96451	-1.7911	0.95247	8.9121	0.13372	0.058026	0.007759
9	-0.04115	0.43203	-0.46999	0.32266	0.98611	-1.4881	1.0328	6.7933	0.13441	0.075863	0.010197
10	-0.0711	0.43327	-0.59746	0.43833	1.0276	-1.6431	1.406	7.4695	0.13509	0.037729	0.005097
11	-0.16125	0.27684	-0.76391	0.059907	0.98122	-1.8486	1.2311	8.6936	0.1351	0.046353	0.006262
12	-0.18191	0.34482	-0.79036	0.098189	1.0166	-1.6986	1.1657	7.2493	0.13435	0.041276	0.005545
13	-0.11153	0.36047	-0.83092	0.15328	1.0271	-1.7379	1.218	7.9502	0.13464	0.054473	0.007334
14	-0.11692	0.34763	-0.82111	0.11466	1.023	-1.8606	1.0161	8.0039	0.13444	0.055818	0.007504
15	-0.10193	0.31798	-0.83816	0.10371	0.97832	-1.1522	0.77013	1.9843	0.13446	0.069872	0.009395

ตารางที่ ข.1 ค่าคุณลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จในอากาศ (ต่อ)

	$H_{qn}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
16	-0.10146	0.33759	-0.7738	0.094236	0.98503	-1.0229	0.83996	2.0507	0.13395	0.053672	0.007189
17	-0.10095	0.35838	-0.78271	0.058795	1.0631	-1.0483	0.96034	2.1023	0.13374	0.047796	0.006393
18	-0.19735	0.41774	-0.73632	0.032452	1.0599	-1.3076	0.80106	3.1046	0.13228	0.024432	0.003232
19	-0.0318	0.30455	-0.94209	0.17327	1.1357	-0.59354	1.1998	-0.0416	0.1355	0.057205	0.007751
20	-0.06141	0.34276	-0.82814	0.054676	1.1113	-0.76647	1.0661	0.15715	0.13457	0.080734	0.010864
21	-0.19812	0.43914	-0.78235	0.041045	1.1399	-1.1099	0.82766	0.83361	0.13215	0.052135	0.00689
22	-0.24095	0.41897	-0.79212	-0.06473	0.98807	-1.5301	0.41824	3.8863	0.13245	0.055405	0.007338
23	-0.19839	0.36693	-0.73128	-0.19261	0.8533	-1.9248	0.11632	6.3755	0.13319	0.075707	0.010084
24	-0.11681	0.32958	-0.73425	0.049244	0.99428	-1.4503	0.61801	3.8587	0.13176	0.026483	0.003489
25	-0.16987	0.39112	-0.76846	0.11999	1.0593	-1.3088	0.74994	2.908	0.13161	0.02589	0.003407
26	-0.12852	0.41919	-0.74142	0.14637	1.0289	-1.3255	0.72636	3.1735	0.13195	0.036281	0.004787
27	-0.09401	0.49981	-0.64581	0.007186	1.0822	-1.0288	0.76451	0.53188	0.13341	0.09744	0.013
28	-0.19645	0.45442	-0.74898	-0.08062	0.9327	-1.6088	0.35799	4.5457	0.13315	0.077074	0.010262
29	-0.14339	0.40695	-0.82105	0.45283	0.98925	-1.7194	1.0507	7.6307	0.13498	0.015441	0.002084
30	-0.02333	0.42103	-0.22916	-0.13024	0.7416	-1.7889	-0.24298	9.2674	0.13169	0.095365	0.012559

ตารางที่ ข.1 ค่าคุณลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จในอากาศ (ต่อ)

	$H_{qn}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
31	0.061609	0.29111	-0.20213	-0.27736	0.89047	-0.76064	0.32517	2.2736	0.13188	0.079985	0.010548
32	0.050495	0.21429	-0.17241	-0.38933	0.81226	-0.59616	-0.17575	1.0815	0.13065	0.11254	0.014703
33	0.11897	0.51734	-0.3404	0.47234	0.99398	-0.97014	1.1493	3.1922	0.13496	0.034125	0.004606
34	-0.14933	0.35424	-0.82755	0.087257	0.99082	-1.8326	0.95849	7.7685	0.13424	0.068298	0.009168
35	-0.118	0.351	-0.81417	0.19001	1.0523	-1.8395	1.2523	8.6193	0.13458	0.072667	0.00978
36	-0.11873	0.32426	-0.87422	0.31986	1.0432	-1.9983	1.3995	9.9793	0.13505	0.05611	0.007578
37	-0.11873	0.32426	-0.87422	0.31986	1.0432	-1.9983	1.3995	9.9793	0.13181	0.000375	4.94E-05
38	-0.152	0.45167	-0.6908	0.042702	1.0248	-1.3285	0.78619	3.4491	0.13281	0.036535	0.004852
39	-0.07044	0.31311	-0.76724	0.132	1.0212	-1.0194	0.84231	1.9072	0.13333	0.045207	0.006027
40	-0.20593	0.4361	-0.72822	-0.08762	0.92585	-1.4808	0.38474	4.2278	0.13305	0.044012	0.005856



ตารางที่ ข.2 ค่าคุณลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง

	$H_{qm}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
1	0.063718	3.0215	-0.80297	12.349	3.5704	0.92453	12.44	0.03981	0.027269	-0.07981	-0.00218
2	0.18919	2.4189	-0.75664	7.7536	2.9776	1.1761	8.2067	1.0786	0.033154	-0.06847	-0.00227
3	0.040061	3.6275	-0.89086	18.917	3.013	0.80899	8.3342	0.026554	0.029242	-0.15702	-0.00459
4	0.16249	2.7102	-0.80697	8.9425	2.5472	1.1758	5.4606	1.548	0.035726	-0.08671	-0.0031
5	0.19258	2.678	-0.83208	8.9508	2.4797	1.2673	5.1308	1.6027	0.036491	-0.08979	-0.00328
6	0.23854	2.3682	-0.80644	7.0249	2.3115	1.1957	4.2293	1.3247	0.038894	-0.11153	-0.00434
7	0.28157	2.3031	-0.70562	7.0782	2.4797	1.1231	5.1308	0.99009	0.038634	-0.12856	-0.00497
8	0.2621	2.1361	-0.74669	6.0031	2.3115	1.0375	4.2293	0.70675	0.039158	-0.14099	-0.00552
9	0.27681	2.1229	-0.85125	5.9713	2.1807	0.95166	3.5291	0.36436	0.040561	-0.12004	-0.00487
10	0.35746	1.9349	-0.83058	4.9027	2.0137	0.88822	2.7087	0.11658	0.045408	-0.09671	-0.00439
11	0.4518	1.758	-0.45371	4.0837	2.2563	0.68629	4.0993	-0.42199	0.04419	0.029272	0.001294
12	0.055567	3.3066	-0.79336	14.577	3.4711	0.93863	11.676	0.059391	0.026432	-0.102	-0.0027
13	0.048746	3.737	-0.92637	19.054	3.5974	1.0302	12.415	0.42043	0.027196	-0.14187	-0.00386
14	-0.03833	4.168	-0.94938	25.742	3.5048	0.93367	11.808	0.23804	0.026363	-0.12944	-0.00341
15	0.049273	3.6147	-0.78318	20.47	3.467	1.1537	11.422	1.3266	0.027217	-0.11145	-0.00303

ตารางที่ ข.2 ค่าคุณลักษณะของโครมาติสซาร์จในน้ำมันหม้อแปลง (ต่อ)

	$H_{qm}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
16	0.12733	2.8317	-0.90684	10.264	2.7927	1.3766	6.9116	2.194	0.033481	-0.10194	-0.00341
17	0.14135	2.7958	-0.89077	9.8979	2.6922	1.3429	6.3167	2.035	0.034931	-0.08786	-0.00307
18	0.23372	2.6619	-0.82161	8.8075	2.4797	1.2906	5.1308	1.7993	0.037059	-0.08742	-0.00324
19	0.20731	2.5788	-0.82346	8.2273	2.4313	1.2383	4.8395	1.649	0.037513	-0.10091	-0.00379
20	0.23999	2.6334	-0.74862	9.1328	2.6262	1.1956	5.973	1.2405	0.036527	-0.10546	-0.00385
21	0.28157	2.3031	-0.70562	7.0782	2.4797	1.1231	5.1308	0.99009	0.038634	-0.12856	-0.00497
22	0.23131	2.2064	-0.74493	6.4614	2.4313	1.0939	4.8395	0.87196	0.039158	-0.14099	-0.00552
23	0.31268	2.0736	-0.78208	5.6063	2.1857	0.97471	3.6217	0.49793	0.040616	-0.13484	-0.00548
24	0.27681	2.1229	-0.85125	5.9713	2.1807	0.95166	3.5291	0.36436	0.040561	-0.12004	-0.00487
25	0.24255	2.0177	-0.73671	5.3509	2.3666	0.88824	4.5403	0.17371	0.039209	-0.1234	-0.00484
26	0.28953	1.9609	-0.77001	5.0164	2.2483	0.82381	3.9521	0.004612	0.040518	-0.11688	-0.00474
27	0.25577	1.9983	-0.83047	5.3046	2.2499	0.79139	3.8929	-0.11894	0.040439	-0.10263	-0.00415
28	0.26756	1.972	-0.81342	5.3331	2.1676	0.77382	3.5072	-0.10519	0.040908	-0.08325	-0.00341
29	0.25118	1.9863	-0.73118	5.3323	2.2807	0.86296	4.1066	0.15884	0.039699	-0.10522	-0.00418
30	0.29739	1.9363	-0.75761	5.0399	2.1715	0.80319	3.5833	0.005817	0.040955	-0.09789	-0.00401

ตารางที่ ข.2 ค่าคุณลักษณะของโคโรนาดีสชาร์จในน้ำมันหม้อแปลง (ต่อ)

	$H_{qn}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
31	0.26756	1.972	-0.81342	5.3331	2.1676	0.77382	3.5072	-0.10519	0.041923	-0.07341	-0.00308
32	0.31063	1.912	-0.7383	5.0379	2.1605	0.72498	3.4107	-0.19361	0.043127	-0.06727	-0.0029
33	0.33112	1.8278	-0.79267	4.5731	2.028	0.70364	2.8197	-0.29395	0.044826	-0.05613	-0.00252
34	0.343	1.9131	-0.8525	5.0779	1.9895	1.1232	2.7436	1.8948	0.044398	-0.04286	-0.0019
35	0.46696	1.8224	-0.6545	4.6551	1.8606	1.1184	2.2126	1.9124	0.048279	0.005883	0.000284
36	0.45143	1.8635	-0.5696	4.664	2.1613	1.1162	3.7473	1.7373	0.043773	0.039239	0.001718
37	0.50175	1.9132	-0.50088	4.7988	2.0842	1.1199	3.36	1.7099	0.045642	0.053611	0.002447
38	0.62324	2.0541	-0.55563	5.6284	2.3787	1.1212	5.4915	1.5167	0.046882	0.078929	0.0037
39	0.62728	2.0529	-0.56125	5.5401	2.2998	1.1171	5.07	1.5107	0.047072	0.058086	0.002734
40	0.61062	2.0116	-0.57538	4.9792	2.2525	1.1458	4.6556	1.6179	0.046879	0.049673	0.002329

ตารางที่ ข.3 ค่าคุณลักษณะของศิษาร์จตามพิว

	$H_{qn}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
1	1.8803	0.53677	6.6346	0.3566	0.16818	0.093229	0.30721	-0.14351	0.37233	0.10312	0.038394
2	1.9969	0.44879	7.3167	0.21578	0.23069	0.17619	0.54982	-0.16789	0.36812	0.008484	0.003123
3	1.7428	0.58605	5.8333	0.57214	0.26844	0.21326	0.37851	-0.16079	0.36434	0.027912	0.010169
4	1.4912	0.57122	4.3186	0.60832	0.33685	0.20192	0.38471	-0.2401	0.36227	0.072443	0.026244
5	1.4048	0.5531	3.9985	0.61779	0.4221	0.20179	0.4167	-0.24066	0.36167	0.052094	0.018841
6	1.4092	0.57336	3.7005	0.58631	0.35843	0.19795	0.3034	-0.25509	0.36037	0.085421	0.030783
7	1.3532	0.54245	3.6928	0.5956	0.26226	0.14474	-0.11296	-0.35962	0.35759	0.11083	0.039631
8	1.4214	0.54983	3.8818	0.55128	0.18433	0.1515	-0.20883	-0.25593	0.3552	0.10622	0.037731
9	1.2829	0.52312	3.1246	0.35043	0.22925	0.20781	-0.13068	-0.1971	0.35168	0.1146	0.040301
10	1.328	0.56051	3.0895	0.52322	0.2757	0.22849	-0.26893	-0.13894	0.34987	0.11101	0.03884
11	1.3178	0.53342	2.8989	0.55875	0.25189	0.17738	-0.38382	-0.20436	0.34888	0.11412	0.039814
12	1.3664	0.51206	2.9228	0.47814	0.2884	0.20713	-0.23654	-0.25174	0.34285	0.16011	0.054894
13	1.3778	0.55184	2.7677	0.48181	0.32018	0.21985	-0.35052	-0.15263	0.33971	0.14629	0.049695
14	1.4036	0.79778	2.7611	1.3224	0.359	0.16938	-0.17012	-0.02962	0.33772	0.187	0.063153
15	1.3717	0.80862	2.5566	1.3495	0.42852	0.18894	-0.04282	0.021362	0.33305	0.18389	0.061243

ตารางที่ ข.3 ค่าคุณลักษณะของศิษาร์จตามผิว (ต่อ)

	$H_{qm}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
16	1.2322	0.75549	1.9465	0.90683	0.40664	0.17528	0.006253	0.069026	0.33577	0.14084	0.047291
17	1.2353	0.77127	1.8232	0.8748	0.48693	0.24656	0.33813	0.020879	0.33382	0.11598	0.038715
18	1.6784	0.83906	4.5791	1.1447	0.46002	0.2666	0.51799	0.013195	0.33067	0.14415	0.047667
19	1.6847	0.82001	4.5072	1.0443	0.33751	0.27508	0.68875	0.01499	0.32788	0.1308	0.042886
20	1.6798	1.0182	4.3051	1.7996	0.38224	0.26606	0.49113	0.037055	0.34422	0.098836	0.034022
21	1.7259	1.0071	4.4586	1.6556	0.34807	0.19659	0.40862	0.08401	0.35115	0.04499	0.015798
22	1.7256	1.0207	4.4365	1.6096	0.29403	0.18794	0.16386	0.10413	0.36612	0.095318	0.034897
23	1.7206	0.97688	4.4116	1.4929	0.28589	0.17323	0.054225	0.062412	0.37676	0.091386	0.03443
24	1.8226	1.1267	4.8396	2.1757	0.22885	0.15857	-0.02427	0.010655	0.38982	0.083628	0.032599
25	1.862	1.0868	4.6922	1.9256	0.24904	0.14536	-0.11401	-0.05027	0.40216	0.10217	0.04109
26	1.7932	1.0354	4.5366	1.7924	0.28385	0.18356	0.024191	-0.10773	0.41028	0.12451	0.051085
27	1.9166	0.98056	5.219	1.6117	0.19498	0.15335	-0.13693	-0.18592	0.43728	0.17032	0.074478
28	1.8683	1.4575	5.3051	4.7616	0.25531	0.16623	0.040192	-0.14966	0.44605	0.13398	0.05976
29	1.7577	1.5	4.8775	4.9881	0.25458	0.12695	0.10977	-0.27576	0.45469	0.13963	0.063488
30	1.8162	1.3148	5.0793	3.7383	0.30404	0.13589	0.098546	-0.33014	0.45791	0.10663	0.048826

ตารางที่ ข.3 ค่าคุณลักษณะของศิษาร์จตามผิว (ต่อ)

	$H_{qn}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
31	1.8321	1.2944	5.2537	3.641	0.35548	0.20712	0.24225	-0.24439	0.46384	0.067568	0.03134
32	1.7709	1.2873	5.4409	3.6608	0.32324	0.19995	0.15803	-0.30448	0.46724	0.074382	0.034755
33	1.5248	1.3662	4.7094	4.0918	0.38522	0.2363	0.30888	-0.24774	0.47209	0.072421	0.034189
34	1.3424	1.4709	3.829	4.6787	0.32475	0.29886	0.14789	0.12529	0.47177	0.06692	0.031571
35	1.4529	1.5229	4.2897	4.782	0.31529	0.22361	0.042162	0.070008	0.47614	0.037677	0.01794
36	1.5813	1.3137	4.3798	3.5	0.37425	0.20898	0.094215	0.015143	0.46801	0.067768	0.031716
37	1.5729	1.1137	4.3217	2.6865	0.35316	0.27509	-0.06429	0.12092	0.4648	0.0669	0.031095
38	1.8504	1.1915	6.304	3.0907	0.39237	0.29409	0.074598	0.056746	0.46871	0.075627	0.035447
39	1.8112	1.2715	6.5241	3.4064	0.3595	0.31032	0.049769	0.21149	0.46737	0.10288	0.048081
40	1.7105	1.353	6.0168	3.4641	0.31438	0.35599	-0.08925	0.20576	0.47584	0.10839	0.051579

ตารางที่ ข.4 ค่าคุณลักษณะของคิซาร์จภายใน

	$H_{qn}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
1	0.78319	-0.41592	0.59933	0.59849	0.47683	3.8795	-0.1187	15.183	1.7771	0.013403	0.023819
2	0.4653	-0.36385	0.19292	0.16113	0.69501	3.8257	-0.02326	15.147	1.7583	0.085382	0.15013
3	0.46241	-0.25089	0.14141	0.083032	0.83103	3.593	0.11492	13.106	1.7565	0.10972	0.19272
4	0.3962	-0.1609	-0.02395	-0.02578	1.0348	3.3958	0.5593	11.422	1.7388	0.12291	0.21372
5	0.24761	-0.20039	-0.29655	0.15275	1.084	3.3059	0.71398	10.582	1.7136	0.092225	0.15804
6	0.29878	-0.18897	-0.25598	0.18357	1.0543	3.3801	0.65337	11.02	1.7385	0.10431	0.18134
7	0.36123	-0.27082	-0.08887	0.38161	0.92419	3.5218	0.36369	12.02	1.761	0.094376	0.1662
8	0.37772	-0.31707	-0.03282	0.39683	0.95932	3.397	0.48541	10.931	1.7602	0.09979	0.17565
9	0.31116	-0.31179	-0.17579	0.41594	1.0543	3.3908	0.65745	10.986	1.743	0.10117	0.17634
10	0.29991	-0.32437	-0.18509	0.34433	1.1087	3.3801	0.82287	11.02	1.764	0.12992	0.22919
11	0.30083	-0.35546	-0.15702	0.16892	1.1454	3.1576	0.89534	9.2474	1.7418	0.15613	0.27195
12	0.36077	-0.38464	-0.05287	0.37803	1.0643	2.9415	0.71401	6.6524	1.7464	0.1405	0.24537
13	0.34254	-0.50838	-0.09387	0.51067	0.97659	3.0033	0.55547	7.0201	1.7488	0.12558	0.21962
14	0.54988	-0.52401	0.40619	0.38942	0.90709	3.0399	0.40191	7.2412	1.7783	0.17691	0.31461
15	0.35823	-0.43554	0.18051	-0.16597	0.95473	2.8769	0.40236	7.1117	1.6607	0.12356	0.2052

ตารางที่ ข.4 ค่าคุณลักษณะของคิซซาร์จภายใน (ต่อ)

	$H_{qn}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
16	0.37702	-0.28569	0.29658	-0.37384	0.9399	2.5482	0.41877	5.3995	1.5659	0.098637	0.15446
17	0.35109	-0.26145	0.401	-0.51774	0.94467	2.3939	0.4197	4.6311	1.5145	0.091555	0.13866
18	0.26672	-0.21186	0.22735	-0.52325	1.0647	2.3349	0.88337	4.5708	1.495	0.089327	0.13354
19	0.14846	-0.07683	0.1306	-0.70979	1.2614	2.1154	1.4886	3.526	1.4228	0.11523	0.16394
20	0.039966	0.072569	0.11521	-0.77829	1.2772	1.9643	1.555	2.9045	1.3421	0.12545	0.16836
21	0.012918	0.094177	-0.00462	-0.71997	1.2457	1.9619	1.4296	2.8034	1.3235	0.11069	0.14651
22	-0.04359	0.054499	-0.05338	-0.68692	1.3516	1.8554	1.8667	2.2567	1.3402	0.11722	0.15711
23	0.008613	0.11406	-0.05131	-0.68792	1.3079	1.7498	1.5646	1.9234	1.3482	0.10486	0.14137
24	0.22158	-0.28211	-0.01766	-0.20233	1.066	2.7159	0.77466	6.6379	1.5608	0.087446	0.13648
25	0.24125	-0.35757	-0.00208	-0.10042	1.0661	2.7497	0.69553	6.5184	1.5923	0.067642	0.1077
26	0.19489	-0.20051	-0.06033	-0.29287	1.1219	2.4933	1.0086	5.2417	1.5277	0.076769	0.11728
27	0.29177	-0.43328	-0.09503	0.24338	1.0496	2.9794	0.71422	6.877	1.694	0.12689	0.21495
28	0.35651	-0.45513	0.004058	0.08141	0.93295	2.7862	0.402	5.7631	1.6893	0.13563	0.22913
29	0.54936	-0.52194	0.57942	-0.04989	0.91141	2.8701	0.5065	6.2375	1.7101	0.14285	0.24428
30	0.44458	-0.36751	0.53202	-0.41854	0.95831	2.5825	0.50816	5.7005	1.5672	0.053465	0.083789



ตารางที่ ข.4 ค่าคุณลักษณะของคิซซาร์จภายใน (ต่อ)

	$H_{qn}$				$H_n$				$Q$	$cc$	$mcc$
	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$	$Sk^+$	$Sk^-$	$Ku^+$	$Ku^-$			
31	0.25933	-0.27609	0.34064	-0.62517	1.116	2.3574	0.82335	4.5483	1.5015	0.060421	0.090721
32	0.23567	-0.19147	0.2431	-0.6216	1.1028	2.368	0.90318	4.8339	1.4729	0.098388	0.14492
33	0.20212	-0.15277	0.16281	-0.60584	1.1722	2.2538	1.1941	4.1822	1.4699	0.095375	0.14019
34	0.19486	-0.09046	0.13249	-0.62672	1.1813	2.163	1.2367	3.6794	1.4405	0.08519	0.12271
35	0.1991	-0.21756	-0.06008	-0.34678	1.0819	2.4265	0.91138	4.8965	1.5248	0.068095	0.10383
36	0.35385	-0.43231	-0.06374	0.8381	0.91865	2.9934	0.4214	6.9604	1.7855	0.065235	0.11648
37	0.28945	-0.49465	-0.12389	0.20095	0.98534	2.8883	0.57455	6.3425	1.7029	0.11737	0.19988
38	0.24252	-0.39288	0.000735	-0.16725	1.0124	2.6669	0.57373	6.0547	1.5927	0.054188	0.086304
39	0.37216	-0.36447	0.32365	-0.32774	0.96613	2.626	0.44949	5.9049	1.5857	0.072137	0.11439
40	0.33527	-0.27675	0.22812	-0.39449	0.98106	2.5979	0.57663	6.0273	1.549	0.097623	0.15122

ภาคผนวก ค

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

### การประชุมวิชาการนานาชาติ

Marungsri, B., Boonpoke S., and Oonsivilai, A. (2009) **Noise Cancellation in Partial Discharge Measurement Signal using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS)**, Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS, September 3-5, Hungary.

Boonpoke, S., Marungsri, B., and Oonsivilai, A. (2009) **Noise Reduction Technique for Partial Discharge Measurement Signal using ANFIS**, International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009, Mahasarakham University, Thailand.

### วารสารวิชาการนานาชาติ

Boonpoke, S., and Marungsri, B. (2010) **Pattern Recognition of Partial discharge by using Simplified Fuzzy ARTMAP**, World Academy of Science, Engineering and Technology , Vol. 65 pp. 212-219 2010

Marungsri, B., Boonpoke, S., Rawangpai, A., Oonsivilai, A., and Kritayakornupong, C. (2009) **Study of Tower Grounding Resistance Effected Back Flashover to 500 kV Transmission Line in Thailand by using ATP/EMTP**, WASET, International Journal of Electrical and Electronics Engineering 3, No. 10, 617-624pp. 10 2009



International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009, Mahasarakham University, Thailand

## Noise Reduction Technique for Partial Discharge Measurement Signal using ANFIS

Suphachai Boonpoke, Boonruang Marungsri and Anant Oonsivilai

Alternative and Sustainable Energy Research Unit, Power and Control Research Group  
School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology  
111 University Ave., Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000  
THAILAND

E-mail: [suphachai\\_eesut@hotmail.com](mailto:suphachai_eesut@hotmail.com) , [bmsbvee@sut.ac.th](mailto:bmsbvee@sut.ac.th) , [anant@sut.ac.th](mailto:anant@sut.ac.th)

### Abstract

Partial discharge (PD) measurements taken on-site are frequently affected by noise due to external disturbances. This paper presents an approach to reduction noise of PD signal using a technique based on the artificial neuro-fuzzy inference system (ANFIS). The measurable output noisy PD with -1dB and 10dB SNR level is obtained as the contaminated signal of the interference to compare with the output data of the filter. The white noise source is acquired as the input. Finally, after training, the ANFIS output is demonstrated. Then the estimated information signal is calculated as the difference between the measured signal and the estimated interference. The ANFIS could do a practically superior situation in adaptive de-noising of PD signal.

**Keywords:** Partial Discharges (PD) signal, ANFIS, noise reduction

### 1. Introduction

Partial Discharge is electric discharges that do not completely bridge the electrodes under high voltage stress. Partial Discharge is small electrical sparks that occur within the electric insulation of electrical equipment. Although the magnitude of such discharges is small but they cause degradation of insulation system and may lead to ultimate failure [1].

Partial discharge is one of the factors that could lead to failure of electrical equipment or could destroy insulation and cause ageing of insulation. Such as partial discharge occur in transformer cause ageing of transformer oil and could lead to failure of transformers, leading to power outage and expensive repairs.

Occurrence of PD in electrical insulation is always associated with emission of several signal electrical signal, acoustic signal and chemical reactions, i.e. heat, sound, light and gas. The method to detection PD signal can be group into three categories, based on the PD

manifestation that they measure: chemical, electrical and acoustic detection [2].

Chemical detection: One of the consequences of PDs is chemical change of material. (i.e. oil, solid and gas)[3].

Acoustic detection of PDs is based on the detection of the mechanical waves propagated from the discharge site to the surrounding medium. Acoustic detection has been widely used in diagnostics of transformers. The primary advantage of using acoustic detection is position information is readily available from acoustic systems using sensors at multiple locations [2],[4],[5].

It is well known that Partial discharges generate locally confined impulse currents in nano- to microsecond range (wide band), usually of low magnitude. Depending on the local electromagnetic environment, they are also often hidden in a noise. Electrical detection technique use to detect PD impulse current.

In this paper, electrical detection technique was adopted to measure PD with noisy signal.





Furthermore, Artificial Neuro-Fuzzy System (ANFIS) was used as adaptive de-noising tool.

**2. Artificial Neuro-Fuzzy Inference System**

ANFIS is a neuro-fuzzy system that combines the learning capabilities of neural networks, with the functionality of fuzzy inference systems[6]. ANFIS uses a hybrid learning algorithm to identify parameters of Sugeno-type fuzzy inference systems. It applies a combination of the least-squares method and the backpropagation gradient descent method for training FIS membership function parameters to emulate a given training data set. ANFIS can also be invoked using an optional argument for model validation. The type of model validation that takes place with this option is a checking for model overfitting, and the argument is a data set called the checking data set[8].

**2.1. ANFIS Architecture**

ANFIS structure is a generalized neural network using a Sugeno fuzzy model, as illustrated in Fig.1.

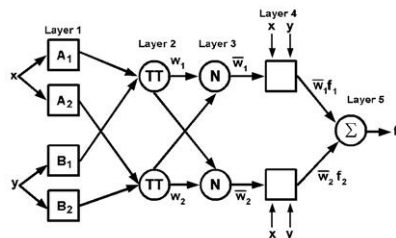


Fig.1: ANFIS structure (type-3 ANFIS)[7]

According to Sugeno fuzzy model, rule sets are as follow:

1. If  $x$  is  $A_1$  and  $y$  is  $B_1$  then  $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$
2. If  $x$  is  $A_2$  and  $y$  is  $B_2$  then  $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

**Layer 1:** Layer 1 is input and fuzzification layer as step 1 in last section. Every node  $i$  in this layer is an adaptive node with a node function:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x), \text{ for } i = 1, 2 \quad (1)$$

$$O_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y), \text{ for } i = 3, 4 \quad (2)$$

**Layer 2:** Layer 2 is the rule layer. Each node in this layer calculates the firing strength of each rule via multiplication.

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

**Layer 3:** Layer 3 is normalization layer. Each neuron in this layer calculates the normalized firing strength of a given rule.

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (4)$$

**Layer 4:** Parameters in this layer are referred to as consequent parameters.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

**Layer 5:** This layer is designed to calculate the summation of output of all incoming signal.

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}, \quad (6)$$

**3. Adaptive Noise Cancellation**

Adaptive noise cancellation which is used to remove noise from useful signals is widely used. This is a useful technique where a signal is submerged in noisy environment. Adaptive noise cancellation adaptively filters a noise reference input to maximally match and subtract out noise from the primary input. The process of using the ANFIS for solving the adaptive noise cancellation problem is given in Fig 2.

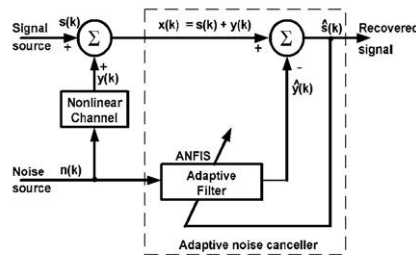


Fig.2: The adaptive noise cancellation system

The information signal  $s(k)$  was recorded with corrupting noise  $y(k)$  that was generated from another noise source through an unknown nonlinear process. The noise  $n$  is Gaussian with zero mean and unit variance.





International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009, Maharakham University, Thailand

The measured signal  $x(k)$  is the sum of the original information signal  $s(k)$  and the interference  $y(k)$

Noise  $n(k)$  passes through the adaptive filter to produce an output  $\hat{y}(k)$  as close a replica as possible of  $y(k)$ . The filter reads just itself continuously to minimize the error between  $y(k)$  and  $\hat{y}(k)$  during this process. Then the output  $\hat{y}(k)$  is subtracted from the primary input to produce system output  $\hat{s}(k)$ , which is the denoised signal.

Adaptive noise canceling makes use of an auxiliary or reference input in addition to the noisy signal from the primary sensor. This scheme operates on the basis of two main assumptions[9].

- (1.) The signal and noise at the input to the primary sensor are uncorrelated.
- (2.) The noise input to the reference sensor is correlated with the noise component at the primary input.

The reference signal is filtered to obtain of the noise, which is than subtracted from the primary signal. As a result, the noise in the noisy signal is attenuated by cancellation. The filtering of the reference signal is done adaptively allowing the filter parameters to be adjusted automatically according the dynamics of the noise.

#### 4. Experimental

The experimental set-up for measurement PD signal is show in Fig.3. Rogowski coil was used as current transducer in this experiment. Due to PD signal was measured in open environment, noisy signal can not avoidable. Adaptive noise cancellation tool was used to de-noise PD signal.

In order to confirm the effectiveness of ANFIS as an adaptive filter, the following procedure was conduct.

- (1) Generate white Gaussian noise  $n(k)$ . (1dB, -1dB, 5dB, -5dB, 10dB)
- (2) Generate noise  $y(k)$  from  $n(k)$  by nonlinear channel.
- (3.) The measured signal  $x(k)$  is the sum of the original PD signal  $s(k)$  and noise  $y(k)$ .
- (4.) Noise  $n(k)$  passes through the ANFIS adaptive filter to produce an output  $\hat{y}(k)$

$$(5.) \hat{s}(k) = s(k) + y(k) - \hat{y}(k)$$

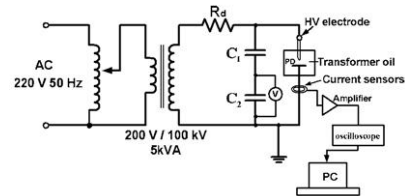


Fig.3: PD experimental circuit

The original PD signal is  $s(k)$ . A 2-input ANFIS was used for training with the generalized bell-shaped built-in membership function. The total number of fuzzy rules for learning is 4. After training, the ANFIS output  $\hat{y}(k)$  was calculated.(the estimated  $\hat{y}(k)$ ) Then the estimated PD signal  $\hat{s}(k)$  is calculated from the  $\hat{s}(k) = s(k) + y(k) - \hat{y}(k)$

The corrupting noise  $y(k)$  produced from noise  $n(k)$  by unknown nonlinear function.

$$y(k) = f(n(k), n(k-1)) = \frac{\sin(n(k))n(k-1)}{1 + [n(k-1)]^2} \dots (7)$$

#### 5. Results and Discussion.

The measurable output noisy PD signal with 5dB, 1dB, -5dB, -1dB and 10dB SNR level is taken as the contaminated version level of the interference, since the noise is not directly available. The white noise source is taken as the input of adaptive filter. The ANFIS output  $\hat{y}(k)$  produced from the adaptive filter is a close replica of  $y(k)$ . The simulation results are illustrated in Fig.4 and Fig.5

As illustrated in Fig.4, Obviously the effectiveness of ANFIS technique for adaptive noise cancellation was confirmed. Near original PD signal was obtained after noise cancellation. As illustrated in Fig.5, near original PD signal was also obtained.

From these simulation results, ANFIS technique has enough capability to use as adaptive noise filter for PD noisy signal.



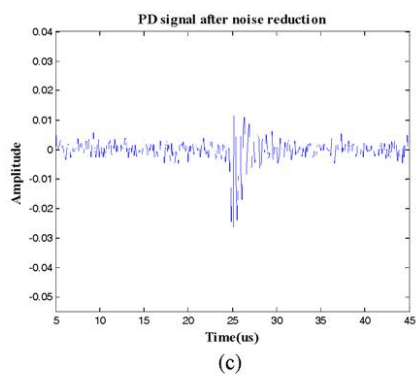
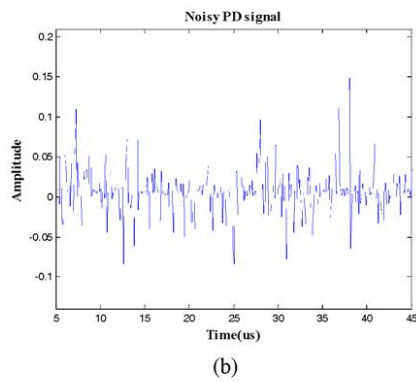
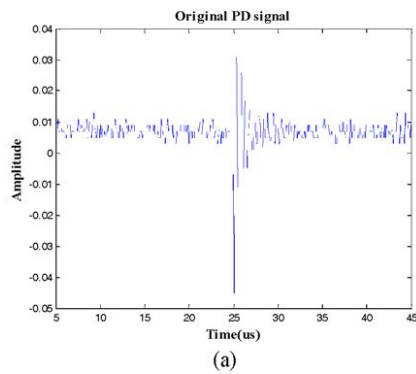


Fig.4: Results of noise reduction, (a) PD signal (b) Noisy PD signal (-1 dB), (c) PD signal after noise reduction

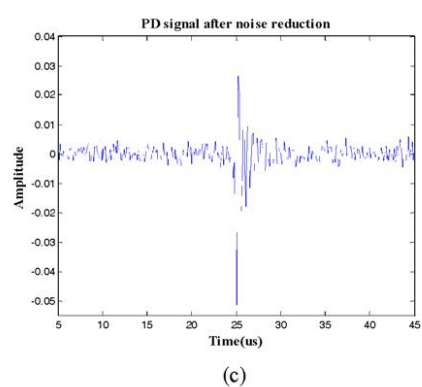
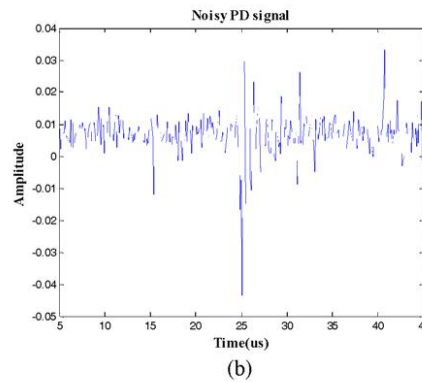
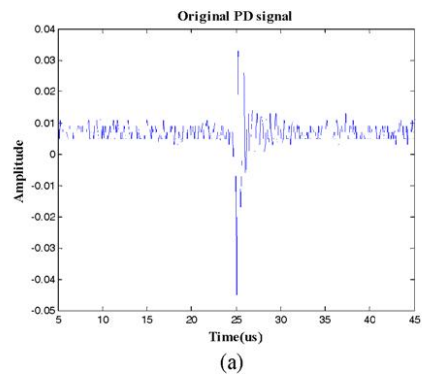


Fig.5: Results of noise reduction, (a) PD signal (b) Noisy PD signal (10 dB), (c) PD signal after noise reduction,





International Conference on Science, Technology and Innovation for Sustainable Well-Being (STISWB), 23-24 July 2009, Mahasarakham University, Thailand

### 6. Conclusion

An adaptive noise cancellation technique was studied and used to de-noise PD signal. In spite of different noise level, near original PD signal was obtained. The simulation results confirmed the effectiveness of ANFIS adaptive noise cancellation technique.

### 7. References

- [1] Kreuger, F.H., Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment, Butterworth & Co. (Publishers) Ltd, 1989.
- [2] Wang X, Li B., Roman H.T., Russo O.L., Chin K. and Farmer K.R., Acousto-optical PD Detection for Transformers, IEEE Transactions on power delivery, Vol. 21, No.3, July 2006.
- [3] Muhamad N.A., Phung B.T. and Blackburn T.R., Dissolved Gas Analysis of Partial Discharge Fault in Biodegradable Transformer Insulation Oil., Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2007.
- [4] Oonsivilai A. and Marungsri B., Application of Artificial Intelligent Technique for Partial Discharges in Oil Insulating Transformer, WSEAS Transaction on Systems, Vol.7, No.10, October 2008.
- [5] Lu Y., Tan X. and Hu X., PD detection and localization by acoustic measurements in an oil-filled transformer, IEEE Science Measurement and Technology, Vol.147, No.2, March 2000.
- [6] Esposito A., Eugene C. Ezin and Carlos A.R-G, Designing a Fast Neuro – fuzzy System for Speech Noise Cancellation , MICA 2000, LNAI 1793, pp. 482-492, 2000.
- [7] Jang J.S.R., ANFIS: Adaptive -Network -Based Fuzzy Inference System, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Vol.23, No.3, May 1993.
- [8] ANFIS, Fuzzy Logic Toolbox, MALAB HELP
- [9] Jerry C. Whitaker, The ELECTRONIC HAND BOOK, CRC Press, pp. 1401.
- [10] Thevaril J. and Kwan H.K., Speech Enhancement using Adaptive Neuro-Fuzzy Filtering, Proceedings of 2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, December 2005, pp.753-756.





# Pattern Recognition of Partial Discharge by Using Simplified Fuzzy ARTMAP

S. Boonpoke and B. Marungsri\*

**Abstract**— This paper presents the effectiveness of artificial intelligent technique to apply for pattern recognition and classification of Partial Discharge (PD). Characteristics of PD signal for pattern recognition and classification are computed from the relation of the voltage phase angle, the discharge magnitude and the repeated existing of partial discharges by using statistical and fractal methods. The simplified fuzzy ARTMAP (SFAM) is used for pattern recognition and classification as artificial intelligent technique. PDs quantities, 13 parameters from statistical method and fractal method results, are inputted to Simplified Fuzzy ARTMAP to train system for pattern recognition and classification. The results confirm the effectiveness of purpose technique.

**Keywords**—Partial discharges, PD Pattern recognition, PD Classification, Artificial intelligent, Simplified Fuzzy ARTMAP, .

## I. INTRODUCTION

**P**ARTIAL discharge (PD) is electrical discharges that do not completely bridge the distance between two electrodes under high voltage stress. Partial discharges are small electrical sparks that occur within the electric insulation of electrical equipment. Although the magnitude of such discharges is usually small, it cause progressive deterioration and may lead to ultimate failure [1],[2].

Partial discharge is one of the factors that could lead to failure of electrical equipment. Also, partial discharges could destroy insulation and cause ageing of insulation. Occurrence of partial discharge in electrical insulation is always associated with emission of several signals (i.e. electrical signal, acoustic pulses and chemical reactions).

Up to now, artificial intelligent techniques have been adopted to many applications in electrical engineering field[3]–[8]. The objective of this work is applying an artificial intelligent technique, simplified fuzzy ARTMAP (SFAM), to recognize the pattern of partial discharge. In this paper, classification of partial discharge is given in Section II, characteristics of partial discharge quantities are given in Section III, partial discharge measurement techniques are detailed in Section IV and following with detail of SFAM is given in Section IV. In addition, experimental results and PDs pattern recognition are illustrated in Section V and Section VI, respectively. Finally, discussion and conclusion are given.

S. Boonpoke is with Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, THAILAND (e-mail: suphachai\_eesut@hotmail.com).

\* B. Manungsri is with Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, THAILAND (corresponding author, phone: +66 4422 4366; fax: +66 4422 4601; e-mail: bmslvee@sut.ac.th).

## II. CLASSIFICATION OF PARTIAL DISCHARGES

Partial discharges are divided into four types: (i) internal discharges, (ii) corona discharges, (iii) surface discharges and (iv) discharges in electrical trees [1],[9].

### A. Internal discharges

Internal discharges occur in inclusions of low dielectric strength. These discharges usually occur in gas-filled cavities, but oil-filled cavities can also break down and cause gaseous discharges afterwards. Internal discharges are capable of degrading the insulation depends on the field strength, the kind of material and the discharges magnitude. (Fig. 1.a)

### B. Corona discharges

Corona discharges occur at sharp points in the electrical field. These discharges may occur in gases and in liquids. They occur usually at the high-voltage side, but at sharp edges at earth potential, or even at half-way the electrodes also may cause corona discharges. (Fig. 1.b)

### C. Surface discharges

Surface discharges may occur in gases or in oil if there is a strong stress component parallel to the dielectric surface. These discharges are known to cause deterioration of dielectrics by heating the dielectric boundary, through charges trapped in the surface and through the formation of chemicals such as nitric acid and ozone. (Fig. 1.c)

### D. Discharges by electrical treeing

Electrical trees can start from defects in the solid insulation. After treeing has started a hollow stem and several branches are generated. (Fig. 1.d)

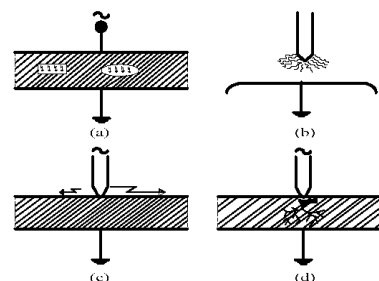


Fig. 1. Types of Partial Discharges.

### III. PARTIAL DISCHARGES DETECTION TECHNIQUES

Occurrence of PDs in electrical insulation is always associated with emission of several signal electrical signal, acoustic signal and chemical reactions, i.e. heat, sound, light and gas. The method to detection PD signal can be grouped into three categories, based on the PD manifestation that they measure: chemical, acoustic and electrical detections [9].

Chemical detection: One of the consequences of PDs is chemical change of material. (i.e. oil, solid and gas)[10].

Acoustic detection of PD is based on the detection of the mechanical waves propagated from the discharge site to the surrounding medium. Acoustic detection has been widely used in diagnostics of transformers. The primary advantage of using acoustic detection is position information is readily available from acoustic systems using sensors at multiple locations [11]-[13].

Electrical partial discharges detection methods are based on the appearance of a partial discharges pulse at the terminals of a test object. Electrical detection includes two methods: Pulse Current Method and Ultra High Frequency Method (UHF).

Pulse Current Method: This method gets the apparent charge by detecting the PD current in detecting impedance [9],[14]. Pulse Current Method is easy for quantitative measurement and it has high sensitivity.

Ultra High Frequency Method (UHF): UHF detection which is based on the detection of electrical resonance at ultrahigh frequencies can be applied to realize not only the phenomena but also the location of a PD source [15] - [17].

In this paper, electrical detection technique was adopted to measure partial discharges signal. Most partial discharges detection systems are integrated into the test circuit in accordance with schemes show in Fig. 2.

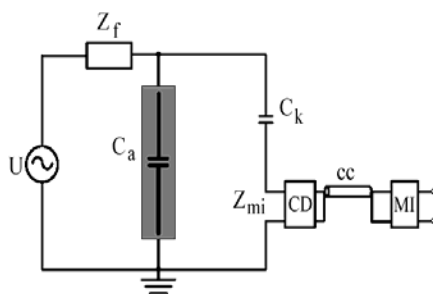


Fig. 2. Basic partial discharge test circuit

- U high-voltage supply
- $Z_{mi}$  input impedance of measuring system
- CC connecting cable
- $C_a$  test object
- $C_k$  coupling capacitor
- CD coupling device
- MI measuring instrument
- $Z_f$  filter

The coupling capacitor,  $C_k$ , shall be of low inductance design and should exhibit a sufficiently low level of partial discharges at the specified test voltage to allow the measurement of the specified partial discharge magnitude.

The high voltage supply shall have sufficiently low level of background noise to allow the specified partial discharge magnitude to be measured at the specified test voltage.

### IV. CHARACTERISTICS OF PARTIAL DISCHARGES

Characteristics of partial discharges for pattern recognition and classification are computed from the relation of the voltage phase angle, the discharge magnitude and the repeated existing of partial discharges by using statistical and fractal methods [1],[9],[14].

#### A. Basic quantities

Quantities of the first group will be termed basic quantities and for their registration the momentary values of the test voltage and the discharge signal are registered. The electrical activity of partial discharges can be represented by two independent quantities:

- (a) Discharge magnitude
- (b) Discharge timing

#### B. Deduced quantities

Quantities of the second group will be termed deduced quantities. For their registration the basic quantities have to be observed during a time span that is much longer than the duration of one voltage cycle. These quantities can be analyzed as a function of time and as a function of the phase angle.

The quantities as function of time describe the changes of the basic quantities in the course of time.

The quantities as function of the phase angle represent the recurrence of partial discharges related to their phase angle. The voltage cycle is divided into phase window representing the angle axis (0-360°). The four quantities can be determines in each phase window.

1. The sum of the discharge magnitudes observed in one phase window (discharge amount).
2. The number of discharges observed in one phase window (pulse count).
3. The average value of discharges observed in one phase (mean pulse height).
4. The maximum value of discharge observed in one phase window (maximum pulse height).

#### C. Statistical operators

Quantities of the third group will be termed as statistical operators. They provide the analysis of some the deduced quantities from the second group.

The pulse count distribution  $H_n(\varphi)$  represents the number of the observed discharges in each phase window as a function of the phase angle.

The mean pulse height distribution  $H_{qn}(\varphi)$  represents the average amplitude in each phase window as a function of the

phase angle.  $H_{qn}(\varphi)$  is derived from the total discharge amount in each phase window divided by the number of discharges in the same phase window.

In the case of a single defect, discharge quantities can be fairly well described by a normal distribution process. Therefore to get a better evaluation of  $H_{qn}(\varphi)$  and  $H_n(\varphi)$  quantities, several statistical parameters can be used. They are here termed as statistical operators. For a discrete distribution function,  $f(x)$ , let's

$$f(x) = P(X = x_i) = p_i \quad (1)$$

where P is the probability:  $x_i$  is the discrete value:  $p_i$  is the probability value for  $x_i$ . The following moments  $u_k$  of a distribution can be defined:

$$u_k = \sum (x_i - a)^k \cdot p_i \quad (2)$$

First moment:  $u$  - mean value of a distribution;  $k=1, a=0$

$$u = \sum x_i \cdot p_i \quad (3)$$

Second moment:  $\sigma^2$  - variance value of a distribution;  $k=2, a=u$

$$\sigma^2 = \sum (x_i - u)^2 \cdot p_i \quad (4)$$

Third moment: skewness  $S_k$  - indicator of the asymmetry of a distribution as compared to a normal distribution;  $k=3, a=u$

$$S_k = \sum \frac{(x_i - u)^3 \cdot p_i}{\sigma^3} \quad (5)$$

Fourth moment: kurtosis  $K_u$  - indicator of the sharpness of a distribution as compared to a normal distribution;  $k=4, a=u$

$$K_u = \sum \frac{(x_i - u)^4 \cdot p_i}{\sigma^4} - 3 \quad (6)$$

The third moment and the fourth moment about the mean are significant with respect to the shape of the distribution.

The skewness,  $S_k$ , indicates the asymmetry of the distribution.  $S_k$  will be zero for asymmetric distribution, positive when the distribution is asymmetric to the left and negative when the distribution is asymmetric to the right.

The kurtosis,  $K_u$ , indicates the degree of sharpness of the distribution. Kurtosis  $K_u$  will be zero for a normal distribution. For a sharper than normal distribution  $K_u$  is positive, and if the distribution is flatter than a normal distribution the  $K_u$  is negative.

The discharges during a voltage cycle occur in two sequences. For each half of the voltage cycle separate discharge patterns can be found. Thus, the  $H_{qn}(\varphi)$  and  $H_n(\varphi)$  quantities are characterized by two distributions. For the positive half of the voltage cycle  $H_{qn}^+(\varphi)$ ,  $H_n^+(\varphi)$  and for the negative half of the voltage cycle  $H_{qn}^-(\varphi)$ ,  $H_n^-(\varphi)$ .

Both the  $H_{qn}(\varphi)$  and  $H_n(\varphi)$  quantities can be described by two skewness,  $S_k^+$ ,  $S_k^-$  and two kurtosis  $K_u^+$ ,  $K_u^-$ . The distributions  $H_{qn}(\varphi)$  and  $H_n(\varphi)$  are also characterized by their mean value, their inception phase and the number of peaks.

Therefore more statistical parameters can be defined, enabling us to compare the mean value, the inception phase and the number of peaks in the both positive and the negative half of the voltage cycle. The distributions  $H_{qn}(\varphi)$  and  $H_n(\varphi)$  both positive and negative half of the voltage cycle the following statistical operators have been introduced by discharge asymmetry,  $Q$ , as the quotient of the mean discharge level in the positive and in the negative half of the voltage cycle.

$$Q = \frac{Q_s^- / N_q^-}{Q_s^+ / N_q^+} \quad (7)$$

The cross-correlation factor  $cc$ , the formula is used to calculate the cross-correlation factor  $cc$ :

$$cc = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i / n}{\sqrt{[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n][\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n]}} \quad (8)$$

The modified cross-correlation factor,  $mcc$ , to evaluate the difference between discharge patterns in the positive and the negative half of the voltage cycle is given in (9).

$$mcc = Q \cdot cc \quad (9)$$

## V. SIMPLIFIED FUZZY ARTMAP

Adaptive Resonance Theory (ART) was invented by Grossberg, in 1976, as a theory of human cognitive information processing [18]. Carpenter and Grossberg introduced the ART family in the form of a wide variety of supervised and unsupervised NNs [19]-[22]. The most advanced model of the ART family, fuzzy ARTMAP (FAM), could handle both binary and analogue data in a supervised manner [23]. The main drawback to the ART family networks, which prevented others from using them, was their intricacy: the inventors had introduced complicated architectures for their networks instead of presenting them as simple algorithms. This problem later was recognized by the inventors and they presented modified model or simplified model of ART family networks [24],[25].

Originally, ART networks were defined in terms of differential equations, but in practice they are implemented using approximations or analytical solutions to these equations, in the limit. ART networks have their own special terminology. The main idea of unsupervised ART networks is as follows:

(1) Find the nearest cluster prototype that 'resonates' with the input pattern.

(2) Update this cluster prototype to be closer to the input.

The simplified fuzzy ARTMAP (SFAM) was developed by removing redundancies. Details are illustrated in [25]. So, the SFAM is much faster than the FAM and easier to understand and simulate. However, it should be made clear that the SFAM can be used only for classification. The SFAM is essentially a two layer net containing an input and an output layer. Fig. 3 illustrates the architecture of simplified fuzzy ARTMAP.

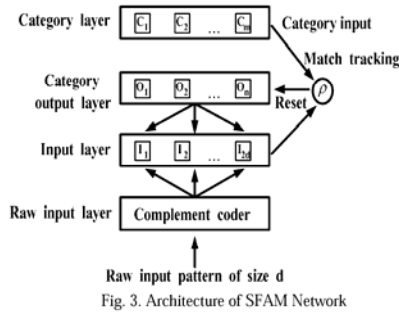


Fig. 3. Architecture of SFAM Network

The main idea of SFAM is as follows[25]:

- (1) Find the nearest subclass prototype that 'resonates' with the input pattern (winner).
- (2) If the labels of the subclass and the input pattern match, update the prototype to be closer to the input pattern.
- (3) Otherwise, reset the winner, temporarily increase the resonance threshold ( $\rho$ ), and try the next winner.
- (4) If the winner is uncommitted, create a new subclass (assign the input vector to be the prototype pattern of the winner, and label it as the class label of the input).

The input to the network flows through the complement coder where the input string is stretched to double the size by adding its complement also. The complement coded input then flows into the input layer and remains there. Weights ( $w$ ) from each of the output category nodes flow down to the input layer. The category layer merely holds the names of the  $M$  number of categories that the network has to learn. Vigilance parameter and match tracking are mechanisms of the network architecture which are primarily employed for network training.

$\rho$  is the vigilance parameter which can range from 0 to 1. It controls the granularity of the output node encoding. Thus, while high vigilance values makes the output node much fussier during pattern encoding, low vigilance renders the output node to be liberal during the encoding of patterns.

The match tracking mechanism of the network is responsible for the adjustment of vigilance values. Thus, an error occurs in the training phase during the classification of patterns.

The SFAM algorithm is as follows [25]:

- (1) Set the vigilance factor equal to its baseline value :

$$\rho = \bar{\rho} \tag{10}$$

- (2) Insert input, and calculate second layer activities:

$$T_j(I) = \frac{|I \wedge w_j|}{\alpha + |w_j|} \quad \text{for } j = 1, \dots, N-19 \tag{11}$$

and for the uncommitted neuron:  $T_N = T_0$

- (3) Find the winner

$$J = \arg \left[ \underset{j}{\text{Max}} (T_j) \right] \tag{12}$$

If the winner neuron is uncommitted, go to step 7.

- (4) Check the resonance condition, i.e. if the input is similar enough to the winner's prototype:

$$\frac{|I \wedge w_j|}{|I|} - \frac{|I \wedge w_j|}{M} \geq \rho \tag{13}$$

If this condition is fulfilled, go to step 5.

If this condition is not fulfilled, reset the winner ( $T_j = -1$ ), go to the step 3, and check the next winner.

- (5) If the class label of the winner matches with the class label of input, update the prototype pattern to be closer to the input pattern:

$$w_j^{(new)} = \beta(I \wedge w_j^{(old)}) + (1 - \beta)w_j^{(old)} \tag{14}$$

and go to step 9, otherwise reset the winner ( $T_j = -1$ ),

temporarily increase the vigilance factor so as to violate the condition of Equation (9), i.e. set  $\rho$  equal to :

$$\rho = \frac{|I \wedge w_j|}{M} + \varepsilon \tag{15}$$

(where  $\varepsilon$  is a small positive number, i.e.  $\varepsilon \approx 0.001$ ).

- (6) If  $\rho > 1$ , terminate the training for this input pattern in the current epoch (data mismatch), and go to step 9, otherwise go to step 3, and try the next winner.

- (7) Create a new subclass, i.e. assign the input vector as the prototype pattern of the winner neuron:

$$w_N = I \tag{16}$$

and set the class label of the winner neuron to be as the class label of input pattern.

- (8) Create a new uncommitted neuron, and:  $N \leftarrow N + 1$ .

- (9) Go to the step 1, and repeat the Algorithm for the next input.

The flow chart of the SFAM Algorithm is presented in Fig. 4.

## VI. EXPERIMENTALS

In this study, test arrangement is shown in Fig. 4. as illustrated in Fig 5., there types of partial discharge generation source, corona discharge, surface discharge and internal discharge, were used. Partial discharge signal was measured by using partial discharge detector (OMICRON, model MPD600). Typical measurement results of each partial discharge generation source are illustrated in Fig. 6, Fig. 7 and Fig. 8, respectively.

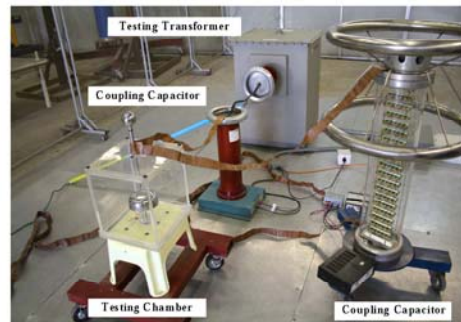


Fig. 5. Test Arrangement.

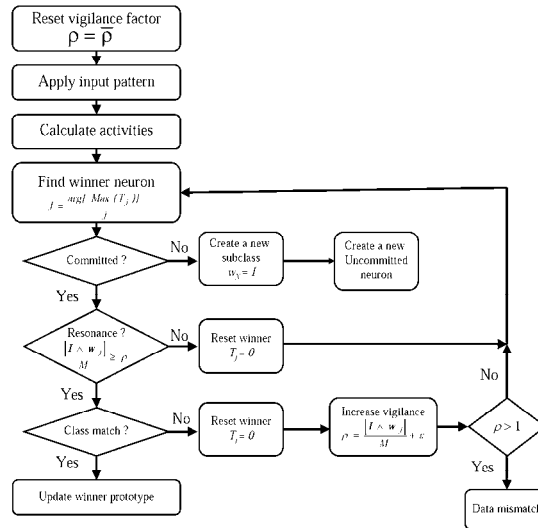


Fig. 4. Flow Chart of the SFAM Training Algorithm for One Input Pattern in One Epoch of Training.



Fig. 6. Electrode Configuration for Partial Discharge Generation Source.

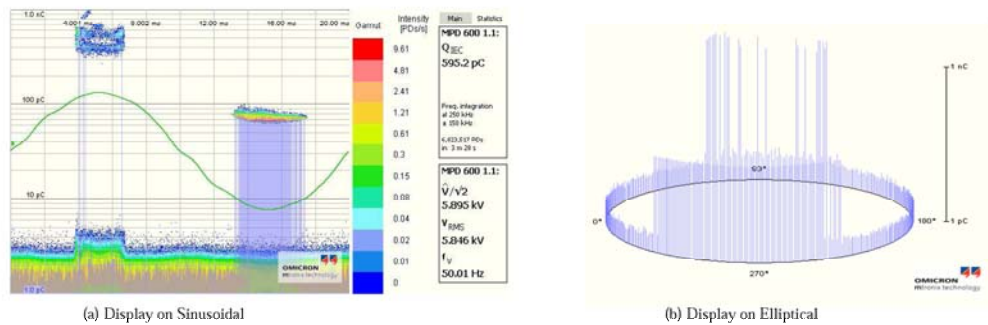


Fig. 7. Partial Discharge Measurement Result from Corona Discharge

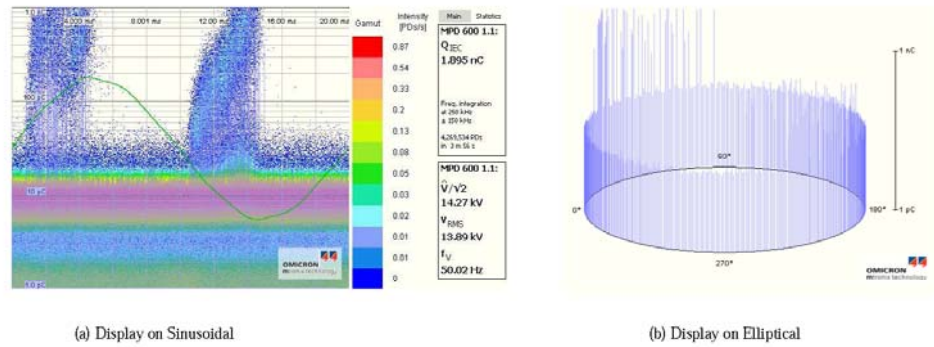


Fig. 8. Partial Discharge Measurement Result from Surface Discharge

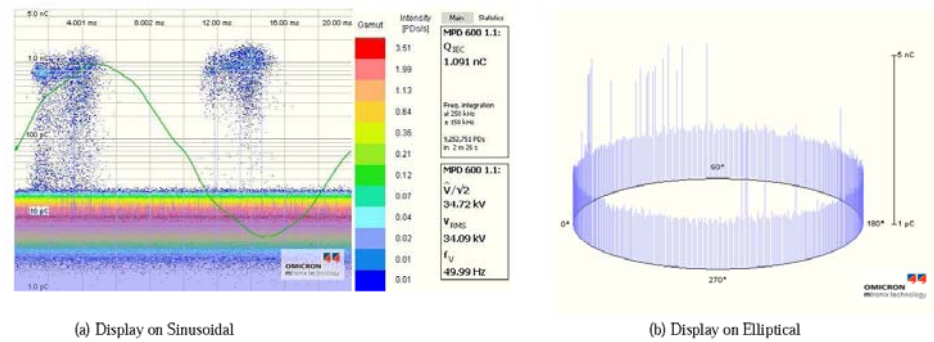


Fig. 9. Partial Discharge Measurement Result from Internal Discharge

Obviously, differences in pattern of partial discharge measurement results were obtained. Each partial discharge generation source generated individual partial discharge pattern. Then, these measurement data are used to test the purpose technique. Characteristics of partial discharge data were calculated by using statistical tools to apply for pattern recognition and classification. These characteristic of partial discharges include skewness, kurtosis, discharge asymmetry, the cross-correlation factor and modified cross-correlation factor. Characteristics of corona discharge, characteristics of surface discharge and characteristics of internal discharge are showed in Table I, Table II and Table III, respectively. These results were used for pattern recognition and classification.

TABLE I CHARACTERISTICS OF CORONA DISCHARGES

No.	Hqn				Hn			
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-
1	1.150	1.010	-1.680	-1.946	1.156	1.129	-1.710	-1.884
2	1.034	1.022	-1.514	-1.953	1.120	1.092	-1.455	-1.781
3	1.061	1.012	-1.950	-1.970	1.108	0.089	-1.638	-2.331

TABLE II CHARACTERISTICS OF SURFACE DISCHARGES

No.	Hqn				Hn			
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-
1	1.525	1.473	-0.390	-0.840	1.976	-0.120	1.597	-2.070
2	1.511	1.302	-0.570	-0.560	1.977	-0.690	1.923	-2.390
3	1.459	1.302	-0.400	-1.000	1.945	-0.630	1.647	-2.360

TABLE III CHARACTERISTICS OF INTERNAL DISCHARGES

No.	Hqn				Hn			
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-
1	1.206	1.200	-1.470	-1.490	1.307	-0.220	-0.960	-2.58
2	1.170	1.154	-1.570	-1.610	1.168	-0.680	-1.960	-2.33
3	1.142	1.100	-1.630	-1.750	1.125	0.500	-1.640	-2.370

The existing characteristics of partial discharge signal, illustrated in [4], were used as reference database to train the simplified fuzzy ARTMAP system. Characteristics of reference partial discharge measurement signal (corona discharges, surface discharges and internal discharges) are illustrated in Table IV, Table V and Table VI, respectively.

TABLE IV CHARACTERISTICS OF CORONA DISCHARGES

No.	Hqn				Hn			
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-
1	1.031	1.018	-1.92	-1.95	1.077	0.947	-1.8	2.08
2	1.031	10.15	-1.92	-1.96	1.089	1.012	-1.77	-1.9
3	1.028	1.006	-1.93	-1.98	1.062	0.951	-1.84	-0.72

TABLE V CHARACTERISTICS OF SURFACE DISCHARGES

No.	Hqn				Hn			
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-
1	1.493	1.471	-0.26	-0.28	1.918	-0.46	1.451	-2.3
2	1.496	1.45	-0.27	-0.39	1.954	-0.59	1.702	-2.35
3	1.486	1.454	-0.34	-0.41	1.919	-0.54	1.408	-2.35

TABLE VI CHARACTERISTICS OF INTERNAL DISCHARGES

No.	Hqn				Hn			
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-
1	1.115	1.153	-1.71	-1.6	1.11	-0.37	-1.73	-2.39
2	1.141	1.152	-1.63	-1.6	1.113	-0.43	-1.71	-2.39
3	1.133	1.153	-1.66	-1.58	1.124	-0.63	-1.68	-2.34

## VII. RESULTS AND DISCUSSION

After well training the simplified fuzzy ARTMAP system by our reference PD characteristics, then PD characteristics from the experimental results were inputted to the SFAM system for classify partial discharge generation source. The obtaining results confirmed the effectiveness of purpose technique. The SFAM could correctly recognize and classify partial discharge generation source from PD measurement signal characteristics. The results are showed in table VII.

TABLE VII CLASSIFICATION RESULTS BY THE SFAM SYSTEM

No. test data	Results of classification	
1	corona	correct
2	corona	correct
3	corona	correct
4	surface	correct
5	surface	correct
6	surface	correct
7	internal	correct
8	internal	correct
9	internal	correct

## VIII. CONCLUSIONS

The experimental for partial discharge measurement was conducted. Differences in partial discharge generation source were used in order to characterize partial discharge measurement signal. Characteristics of partial discharge signal were analyzed by using statistical tool and were used to classify partial discharge generation source using the SFAM

system. Correctly classification results were obtained. The obtaining results confirmed the effectiveness of the purpose technique, the simplified fuzzy ARTMAP system, to apply for pattern recognition and classification of partial discharge generation source from measurement signal.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the high voltage laboratory, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineer, King Mongkut's Institute of Technology, Ladkrabang, Bangkok, Thailand for kind experimental supported.

## REFERENCES

- [1] F.H. Krueger, "Partial Discharge Detection in High - Voltage Equipment", Butterworth & Co. (Publishers) Ltd, 1989.
- [2] E. Kuffel, W.S. Zaengl and J. Kuffel, "High Voltage Engineering: Fundamentals", 2<sup>nd</sup>, Butterworth - Heinemann, 2000.
- [3] B. Marungsri, N. Meeboom and A. Oonsivilai, "Dynamic Model Identification of Induction Motors using Intelligent Search Techniques with taking Core Loss into Account", *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, Vol. 1, No. 8, August 2006, pp. 1438 - 1445.
- [4] A. Oonsivilai and B. Marungsri, "Optimal PID Tuning for AGC system using Adaptive Tabu Search", *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on POWER SYSTEMS*, Beijing, China, September 2007, pp. 42-47.
- [5] A. Oonsivilai and B. Marungsri, "Stability Enhancement for Multi-machine Power System by Optimal PID Tuning of Power System Stabilizer using Particle Swarm Optimization", *WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS*, Issue 5, Volume 3, May 2008, pp. 465 - 474.
- [6] A. Oonsivilai and B. Marungsri, "Optimal PID Tuning for Power System Stabilizers Using Adaptive Particle Swarm Optimization Technique", *INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER CONTROL AND OPTIMIZATION: Innovation in Power Control for Optimal Industry*, AIP Conference Proceedings, Volume 1052, July 2008, pp. 116-123
- [7] B. Marungsri and A. Oonsivilai, "Partial Discharges Localization in Oil Insulating Transformer using Adaptive Tabu Search", *Proceedings of the 12th WSEAS International Conference on CIRCUITS*, Heraklion, Greece, July 22-24, 2008, pp. 290 - 295.
- [8] B. Marungsri and A. Oonsivilai, "Fuzzy ARTMAP Technique for Speech Noise Reduction," *WSEAS International Conference on Signal, Speech and Image Processing*, Beijing, China, pp 20-25, September 2007.
- [9] E. Gulski, Computer - Aided Recognition of Partial Discharges using Statistical Tools. Delft University Press, 1991.
- [10] N.A. Muhamad, B.T. Phung and T.R. Blackburn, "Dissolved Gas Analysis (DGA) of Partial Discharge Fault in Bio-degradable Transformer Insulation Oil", *Universities Power Engineering Conference 2007*, AUPEC 2007, December 2007, pp 1-6.
- [11] X. Wang, B. Li, H. T. Roman, O. L. Russo, K. Chin and K. R. Farmer, "Acousto-optical PD Detection for Transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 3, July 2006, pp. 1068-1073.
- [12] A. Oonsivilai and B. Marungsri, "Application of Artificial Intelligent Technique for Partial Discharges in Oil Insulating Transformer", *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*, Vol.7 No.10, October 2008, pp.920-929.
- [13] Y. Lu, X. Tan and X. Hu, "PD detection and localization by acoustic measurements in an oil-filled transformer", *IEEE Science Measurement and Technology*, Vol.147, No.2, March 2000, pp. 81-85.
- [14] K. Vicitjindavat, "Pattern Recognition of Partial discharge in High Voltage Equipment", Master Degree Thesis, Chulalongkorn University, 2001.

- [15] A. Wichmann, P. Grünwald, and J. Weidner, "Early fault detection in electrical machines by on-line RF monitoring," *Cigre Symp.*, Vienna, Austria, 1987, pp. 05-87.
- [16] J. T. Phillipson, "Experience with RF techniques in the petrochemical industry," *Proc. 4th Int. Conf. Generator and Motor Partial Discharge Testing*, Houston, TX, 1996.
- [17] M. D. Judd, L. Yang, and I. B. B. Hunter, "Partial discharge monitoring for power transformers using UHF sensors. Part 1: Sensors and signal interpretation," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 21, No. 1, Mar./Apr. 2005, pp. 5-14.
- [18] S. Grossberg, "Adaptive pattern classification and universal recoding, II: feedback, expectation, olfaction and illusions", *Biological Cybernetics*, Vol. 23, 1976, pp. 187-202.
- [19] G. A. Carpenter and S. Grossberg, "ART2: Self-organization of stable category recognition codes for analog input patterns", *Applied Optics*, vol. 26, No. 23, 1987, pp. 4919-4930.
- [20] G. A. Carpenter and S. Grossberg, "ART3: Hierarchical search using chemical transmitters in self-organizing pattern recognition architecture," *Neural Networks*, Vol.3, 1990, pp. 129-152.
- [21] G. A. Carpenter, G. S. Grossberg and J. H. Reynolds, "ARTMAP: Supervised real-time learning and classification of non-stationary data by a self-organizing neural network", *Neural Networks*, Vol. 4, 1991, pp. 565-588.
- [22] G. A. Carpenter, G. S. Grossberg and D. B. Rosen, "Fuzzy ART: Fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system", *Neural Networks*, Vol. 4, 1991, pp. 759-771.
- [23] G. A. Carpenter, S. Grossberg, N. Markuzon, J. H. Reynolds, and D. B. Rosen, "Fuzzy ARTMAP: A neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps", *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol.3, No. 5, 1992, pp. 698-713.
- [24] T. Kasuba, "Simplified Fuzzy ARTMAP", *AI Expert*, Vol. 8, No. 11, 1993, pp.18-25.
- [25] M. Vakil-Gahimisheh and N. Pavešić, "A Fast Simplified Fuzzy ARTMAP Network", *Neural Processing Letters*, Vol. 17, 2003, pp. 273-316.



**Suphachai Boonpoke** was born in Surin Province, Thailand, in 1984. He received his B. Eng. in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, in 2005. Recently, he is a graduate student in School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology. His research interesting area is high voltage insulation technology.



**Boonruang Marungsri**, was born in Nakhon Ratchasima Province, Thailand, in 1973. He received his B. Eng. and M. Eng. from Chulalongkorn University, Thailand in 1996 and 1999 and D. Eng. from Chubu University, Kasugai, Aichi, Japan in 2006, all in electrical engineering, respectively. Dr. Marungsri is currently an assistant professor in School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. His areas of interest are high voltage insulation technologies and electrical power system.



## ประวัติผู้เขียน

นายศุภชัย บุญปก เกิดเมื่อวันที่ 10 มิถุนายน พ.ศ. 2527 ณ ตำบลโพนครก อำเภотаตุม จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากโรงเรียนคลองหนองใหญ่ (ทองคำ ปานขำอนุสรณ์) กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนวีรวัฒน์โยธิน จังหวัดสุรินทร์ เมื่อปีการศึกษา 2545 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรี ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับสอง จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2550 ภายหลังสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีได้เข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2550 ในระหว่างการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาได้เป็นผู้สอนปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 3 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการระบบไฟฟ้ากำลัง 2 (2) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า 1 และ (3) ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 2 ทั้งนี้มีความสนใจในด้านการประสานสัมพันธ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง