การรู้จำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

นางสาวเกวริน วิเศษจินดาวัฒน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0537-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PATTERN RECOGNITION OF PARTIAL DISCHARGE IN HIGH VOLTAGE EQUIPMENT

Miss.Kevarin Vicetjindavat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2001
ISBN 974-03-0537-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การรู้จำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง
โดย	นางสาวเกวริน วิเศษจินดาวัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. สำรวย สังข์สะอาด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ กฤษดา วิศวธีรานนท์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. สำรวย สังข์สะอาด)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี)

.... กรรมการ
(อาจารย์ สุวิทย์ นาคพีระยุทธ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นางสาวเกวริน วิเศษจินดาวัฒน์ : การรู้จำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง (PATTERN RECOGNITION OF PARTIAL DISCHARGE IN HIGH VOLTAGE EQUIPMENT) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี, หน้า 95
ISBN 974-03-0537-7

วิทยานิพนธ์นี้เป็นรายงานการศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาออกแบบโปรแกรมการรู้จำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วน (PD) ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงให้มีความสามารถในการจำแนกรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนได้อัตโนมัติ โดยเริ่มจากการจำลองลักษณะของการเกิด PD แบบต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เช่น โคโรนา ดีสชาร์จภายนอก และดีสชาร์จภายใน จากนั้นทำการตรวจวัดและคำนวณค่าคุณลักษณะที่สำคัญเก็บไว้ในฐานข้อมูล ในการคำนวณค่าคุณลักษณะจะใช้วิธีสถิติ ซึ่งคำนวณจากการกระจาย $H_n(\phi)$ (การกระจายขนาดของ PD เฉลี่ยตามมุมเฟสของแรงดัน และการกระจาย $H_{qn}(\phi)$ (การกระจายจำนวนครั้งที่เกิด PD ซ้ำตามมุมเฟสแรงดัน) ร่วมกับวิธีแฟรกตัล ซึ่งคำนวณจากการกระจาย (ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ PD(q) , มุมเฟสของแรงดันทดสอบ (φ) และจำนวนครั้งที่เกิด PD ซ้ำ (n)) จะได้พารามิเตอร์รวมทั้งหมด 13 ค่า โดยพารามิเตอร์ทั้ง 13 ค่านี้จะนำมาใช้ในกระบวนการเรียนรู้และจดจำรูปแบบของการเกิด PD คือ เป็นตัวนำเข้าข้อมูลของนิวรอลเน็ทเวิร์ค จากนั้นจะทำการสอนให้ระบบเกิดการเรียนรู้โดยใช้นิวรอลเน็ทเวิร์คและเจนเนติกอัลกอริทึม โดยนำเจนเนติกอัลกอริทึมมาปรับค่าน้ำหนักให้กับตัวนิวรอลเน็ทเวิร์ค จากผลการทดสอบกับอุปกรณ์ที่เกิดความผิดพร่อง พบว่าสามารถแยกแยะลักษณะการเกิด PD ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้อย่างถูกต้องมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ____________
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ____________
ปีการศึกษา 2544 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ____________

4170681021 : ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: Partial Discharge/Recognition/Artificial Defect/Statistical/ Fractal/ Neural Network/Genetic Algorithm

KEVARIN VICETJINDAVAT : Pattern Recognition of Partial Discharge in High Voltage Equipment. ASSOC. PROF. SAMRUAY SANGKASAAD, Ph.D. Sc.Techn. THESIS CO-ADVISOR: ASSOC. PROF. EKACHAI LEELARASMEE, Ph.D. pp. 95

ISBN 974-03-0537-7

This thesis is a study of Partial Discharge(PD) Pattern Recognition in High Voltage Equipment program to automatically diagnosed. PD Pattern namely Corona, Internal and External discharge were measured from defective modeling. The calculated compulsory characteristics are stored in database by utilizing statistical and fractal method. The result of distribution of average value and repeated existing of PD corresponding voltage phase angle, $H_n(\phi)$, $H_{qn}(\phi)$ provided the statistical value. In addition, the latter method was obtained from the distribution value consisting the correlation between the amplitude of PD, the voltage phase angle and the repeated existing of PD. Using these methods, statistical and, fractal method. The 13 parameters, inputted to Neural Network to training system , were obtained . Moreover the system recognition is utilized Genetics Algorithm to determine the appropriate weight for Neural Network as well. The tested result shown more than 80 percent correct diagnosis.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department __Electrical Engineering__ Student's Signature ____________________________

Field of study __Electrical Power______ Advisor's Signature ____________________________

Academic year ___2001_____________ Co-advisor's Signature __________________________

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สำรวย สังข์สะอาด ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการวิจัย รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลารัศมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์ กฤษดา วิศวธีรานนท์ และ อาจารย์สุวิทย์ นาคพีระยุทธ ที่ได้สละเวลาให้คำวิจารณ์และข้อคิดเห็นในการแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย

ขอขอบคุณ คุณณรงค์ ทองฉิม ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ในการทดสอบดีสชาร์จบางส่วน คุณฉันทกร จำศิลป์ ที่กรุณาให้คำแนะนำต่างๆเกี่ยวกับเรื่องนิวรอลเน็ทเวิร์คและเจนเนติกอัลกอริทึม เจ้าหน้าที่ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งนิสิตปริญญาโทสาขา EMC ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในเรื่องต่างๆ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่ให้ความสะดวกในเรื่องสถานที่ทดสอบ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และ บริษัท บางกอกเคเบิลจำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบ

อนึ่งโครงการวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ สุดท้ายนี้ทางผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

เกวริน วิเศษจินดาวัฒน์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ญ

สารบัญภาพ .... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 บทนำทั่วไป 1

1.2 ที่มาของปัญหา 2

1.3 ผลงานวิจัยที่มีมาในอดีต... 3

1.4 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของงานวิจัย 4

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ... 4

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการตรวจจับและวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน 5

2.1 พฤติกรรมของดีสชาร์จบางส่วน 5

2.1.1 ผลจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วน 5

2.1.2 วงจรสมมูลของดีสชาร์จภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป 6

2.1.3 ธรรมชาติพัลส์ของดีสชาร์จบางส่วน 8

2.2 หลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน 9

2.2.1 วงจรพื้นฐานและการวิเคราะห์วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน 9

2.2.2 การแสดงผลดีสชาร์จบางส่วน 11

2.2.3 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน 11

2.3 เทคนิคการวัดดีสชาร์จบางส่วน 11

2.4 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน 14

2.4.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดีสชาร์จบางส่วน 14

2.4.2 การลดสัญญาณรบกวน 15

2.5 การวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน 17

2.5.1 การวิเคราะห์ PD แบบนิยม 17

2.5.2 การวิเคราะห์ดิสชาร์จบางส่วนโดยกระบวนการรู้จำรูปแบบ 20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

2.5.3 ฐานข้อมูลสำหรับการจำแนกรูปแบบ 30

2.5.4 การจำแนกประเภท 30

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับนิวรอลเน็ทเวิร์ค 33

2.6.1 ความหมายของนิวรอลเน็ทเวิร์ค.. 33

2.6.2 แบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาท....................................... 35

2.6.3 การเรียนรู้โครงข่าย... 38

2.6.4 สถาปัตยกรรมของนิวรอลเน็ทเวิร์ค...................................... 38

2.6.4.1 ข่ายงานชั้นเดียว.. 39

2.6.4.2 ข่ายงานหลายชั้น... 39

2.6.5 แอคติเวชั่นฟังก์ชั่น.. 40

2.6.6 การหาค่าความผิดพลาด... 42

2.6.7 การปรับปรุงค่าน้ำหนัก.. 43

2.7 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเจนเนติกอัลกอริทึม.... 44

2.7.1 เจนเนติกอัลกอริทึม.. 45

2.7.2 พันธุศาสตร์กับเจนเนติกอัลกอริทึม 45

2.7.3 ความหมายของเจนเนติกอัลกอริทึม.. 47

2.7.4 เจนเนติกอัลกอริทึมอย่างง่าย.. 48

บทที่ 3 การออกแบบโปรแกรมการเรียนรู้และแบบจำลอง.. 53

3.1 การออกแบบการเรียนรู้โดยใช้นิวรอลเน็ทเวิร์คร่วมกับเจนเนติกอัลกอริทึม 53

3.1.1 การออกแบบนิวรอลเน็ทเวิร์คที่ใช้ในการจำแนกประเภท PD.......... 54

3.1.2 ขั้นตอนการสอน NN โดยใช้ GA ในการปรับค่าน้ำหนัก................ 56

3.1.3 ขั้นตอนการปรับค่าน้ำหนักโดยใช้ GA.................................. 58

3.2 การออกแบบแบบจำลองการเกิด PD... 61

3.3 การออกแบบโปรแกรมการรู้จำรูปแบบการเกิด PD.................................. 64

3.3.1 ขั้นตอนการคำนวณหาคุณลักษณะของรูปแบบการเกิด PD........ 64

3.3.2 ขั้นตอนในการสอน.. 66

3.3.3 ขั้นตอนการจำแนก... 67

บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล... 69

4.1 การเก็บฐานข้อมูล.. 69

สารบัญ

หน้า

4.2 การทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น.. 71
4.3 การทดสอบวัดและจำแนกประเภทการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง....... 77
4.3.1 การทดสอบ PD ที่ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง........................ 77
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย...
4.3.2 การทดสอบ PD ที่โรงงานบางกอกเคเบิล................................ 80
4.3.3 การทดสอบ PD ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิต 83
แห่งประเทศไทย...
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ... 85
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 86
5.1 สรุป 86
5.2 ข้อเสนอแนะ 86
รายการอ้างอิง 87
ภาคผนวก 91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์... 96

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ 2

2.1 วงจรสมมูล PD แบบทั่วไป... 6

2.2 ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรที่เกิด PD แบบ ก)โคโรนา ข) ดีสชาร์จตามผิว....................... 7

2.3 แสดงแรงดันตกคร่อมโพรงกาซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD............ 8

2.4 ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแกปเล็กๆ.............................. 9

2.5 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD... 10

2.6 วงจรสำหรับการปรับเทียบ... 11

2.7 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ.. 13

2.8 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ.. 14

2.9 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน.. 15

2.10 การลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี“หน้าต่างเวลา”.. 16

2.11 รูปแบบการเกิดโคโรนา... 18

2.12 รูปแบบการเกิดดีสชาร์จตามผิว... 18

2.13 รูปแบบการเกิดดีสชาร์จภายใน... 19

2.14 สัญญาณรบกวนแบบต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด 20

2.15 กระบวนการรู้จำโดยทั่วไป.. 21

2.16 การกระจายแบบ $H_n(\phi, q)$ 22

2.17 การกระจายอื่นๆ ที่คำนวณได้จาก $H_n(\phi, q)$ 22

2.18 ตัวอย่างของรูปแบบการกระจายเนื่องจากผลพารามิเตอร์ทางสถิติ...................... 25

2.19 ขั้นตอนการคำนวณคุณลักษณะแฟรกตัล... 26

2.20 การหา p(m, L)โดยการนับจำนวนจุดที่อยู่ในกล่อง.................................... 27

2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างlog(L) กับlog(N(L)).. 27

2.22 กราฟระหว่างความยาวด้านของกล่อง L กับลาคิวนาริตี Λ............................ 28

2.23 การกระจายของ PDในรูปแบบต่างๆกัน.. 29

2.24 ค่าของคุณลักษณะแฟรกตัลที่คำนวณได้จากการกระจาย................................ 29

2.25 โครงสร้างฐานข้อมูล.. 30

2.26 การจำแนกแบบนิยมที่ใช้ Centour score... 31

2.27 โครงสร้างของตัวจำแนกแบบโครงข่ายเชิงประสาท...................................... 31

2.28 โครงสร้างของเซลล์ประสาทและการส่งสัญญาณกระแสประสาท........................ 34

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.29 แบบจำลองเซลล์ประสาทของ McCulloch-Pitts และ โครงข่ายลอจิกพื้นฐาน..........	36
2.30 โครงข่ายเชื่อมต่อแบบจำลองเซลล์ประสาท..	37
2.31 แสดงตัวอย่างเพอเซปทรอนอย่างง่าย..	39
2.32 แบ๊กพรอเพเกชันที่มี 1 ชั้นแอบแฝง..	40
2.33 แสดงฟังก์ชั่นซิกมอยด์..	41
2.34 แสดงฟังก์ชั่นขั้นบันไดและฟังก์ชั่นลาดเอียง	41
2.35 เปรียบเทียบลักษณะระหว่างเจนเนติกอัลกอริทึมกับลักษณะทางพันธุศาสตร์..........	46
2.36 ขั้นตอนของ GAs อย่างง่าย...	48
2.37 การรีโปรดักชั่นอย่างง่ายด้วยวิธีการใช้วงล้อรูลเล็ททีมีขนาดของแต่ละช่องเป็นสัดส่วนกับค่าความเหมาะสม..	50
2.38 การครอสโอเวอร์อย่างง่ายเพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสตริงและการแลกเปลี่ยนข่าวสารโดยเลือกตำแหน่งไขว้แบบสุ่ม..	51
3.1 วิธีการทางเจนเนติกอัลกอริทึม...	54
3.2 สถาปัตยกรรมของแบกเพเกชันที่ออกแบบสร้าง	55
3.3 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสอน	57
3.4 การส่งค่าน้ำหนักให้กับสายสตริงในเจนเนติกอัลกอริทึม	58
3.5 ตำแหน่งในการครอสโอเวอร์	60
3.6 การจำลองการเกิดโคโรนาในอากาศ...	61
3.7 การจำลองการเกิดดีสชาร์จภายใน..	62
3.8 การจำลองดีสชาร์จตามผิว..	63
3.9 แบบจำลองที่ได้ทำการจำลองความบกพร่องแบบต่าง ๆ	63
3.10ลำดับของการเรียกใช้ฟอร์มต่างๆในโปรแกรม...	64
3.11 แสดงหน้าจอฟอร์ม 3D..	66
3.12 แสดงหน้าจอฟอร์มการสอน...	67
3.13 แสดงหน้าจอฟอร์มการจำแนก...	68
4.1 อุปกรณ์ทดสอบ..	69
4.2 PD ที่เกิดจากตัวจำลอง PD ต่างๆ..	70
4.3 ลักษณะการกระจายของข้อมูล PD และค่าทางสถิติของ PD ที่เกิดจากสาเหตุต่างๆ.....	72
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูล	73

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

4.5 ฐานข้อมูลที่โปรแกรมสร้างขึ้น……………………………………………………….….. 74

4.6 ฟอร์มการสอนให้กับระบบ…………………………………………………………..…… 74

4.7 กราฟแสดงผลการสอน ……………………………………………………………….. 75

4.8 ผลการทดสอบ PD แบบโคโรนา……………………………………………………... 77

4.9 การทดสอบ PD แบบดีสชาร์จภายใน …………...…………………………...……… 78

4.10 การทดสอบ PD แบบดีสชาร์จตามผิว ………………………………………...……. 79

4.11 การทดสอบ PD แบบดีสชาร์จตามผิว ที่บางกอกเคเบิล……………………...……. 80

4.12 การทดสอบ PD แบบโคโรนาที่ขั้วแรงสูง ที่บางกอกเคเบิล………………………...… 81

4.13 การทดสอบ PD แบบโคโรนาที่ขั้วแรงต่ำ ที่บางกอกเคเบิล…………………………..… 82

4.14 การทดสอบ PD แบบดีสชาร์จภายในตัว CT……………………………………….. 83

4.15 ผลการทดสอบโคโรนา + ดีสชาร์จภายใน ในตัว CT………………………………… 84

4.16 ผลการทดสอบโคโรนา ที่ EGAT……………………………………………………… 84

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง หน้า

2.1 พารามิเตอร์ทางสถิติของการกระจาย 25

2.2 ผลการจำแนกโดยใช้ Centour score 32

2.3 เปรียบเทียบคำศัพท์ระหว่างพันธุศาสตร์และเจนเนติกอัลกอริทึม........................... 47

3.1 พารามิเตอร์ทางสถิติของ PD แบบโคโรนาทางด้านแรงต่ำ 65

4.1 การจำแนกข้อมูลที่ใช้สอน 76

4.2 การจำแนกข้อมูลที่ใช้ทดสอบ 76

4.3 ความถูกต้องในการจำแนกรูปแบบการเกิด PD 76

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ฉนวนเป็นส่วนประกอบที่มีความสำคัญในระบบไฟฟ้าแรงสูง ความล้มเหลวในระบบไฟฟ้าอาจจะเกิดจากความด้อยคุณภาพของฉนวน หรือความบกพร่องของการออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์ อาจจะทำให้เกิดดีสชาร์จบางส่วน(PD) ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ฉนวนเสื่อมคุณภาพและอายุการใช้งานของอุปกรณ์จะสั้นลง ดังนั้นเราจึงถือเอาดีสชาร์จบางส่วนเป็นแฟกเตอร์ที่สำคัญที่จะบ่งชี้ถึงคุณภาพของการฉนวนอุปกรณ์ การออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจึงต้องป้องกันหรือหลีกเลี่ยงมิให้มี PD เกิดขึ้น โดยการออกแบบลักษณะอุปกรณ์ให้มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำกว่าค่าวิกฤตของฉนวนและใช้เทคนิคในการฉนวนที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่ออกแบบหรือผลิตอาจมี PD เกิดขึ้นโดยมิได้ตั้งใจ ซึ่งอาจเกิดจากความบกพร่องของระบบฉนวนในระหว่างการผลิต หรือคุณภาพการฉนวนต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด ดังนั้นมาตรฐานจึงกำหนดให้มีการวัดหรือตรวจจับ PD ก่อนนำอุปกรณ์ไปใช้งาน โดยการวัดด้วยเครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยในการวิเคราะห์และประเมินคุณสมบัติของการฉนวน

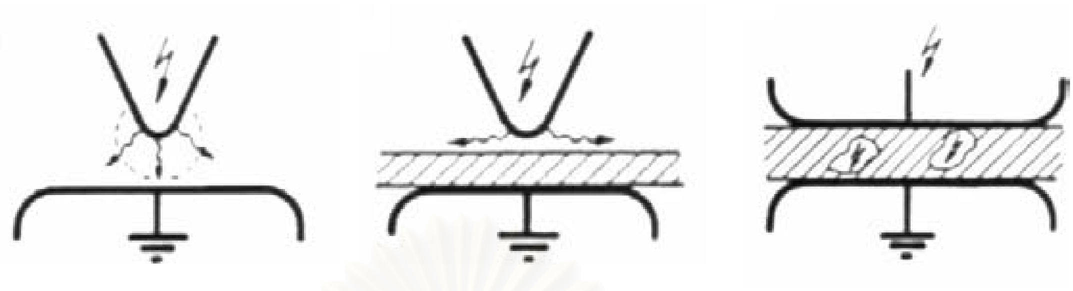
ดีสชาร์จบางส่วน (Partial Discharge, PD) เป็นดีสชาร์จทางไฟฟ้าที่ไม่เชื่อมต่อถึงกันระหว่างขั้วของอุปกรณ์ไฟฟ้า[1] โดยการเกิดสปาร์กในเนื้อฉนวนเพียงบางส่วนตรงบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต

ดีสชาร์จบางส่วนอาจแบ่งตามลักษณะที่เกิดได้ 3 แบบ[1,2] คือ

1) โคโรนาดีสชาร์จ (Corona discharge) เกิดขึ้นในอากาศตรงบริเวณรอบๆอิเล็กโทรดปลายแหลมหรือขอบคมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น เช่น สายตัวนำแรงสูงที่มีขนาดเล็กเกินไป หรือผิวสายตัวนำไม่เรียบพอ ทำให้อากาศรอบๆบริเวณนั้นเกิดไอออไนเซชันดังรูปที่ 1.1 ก)

2) ดีสชาร์จตามผิว (Surface discharge) เกิดบริเวณผิวของฉนวนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวเดียวกับผิวสูง อาจเกิดร่องรอยกัดกร่อนซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้า (tracking) ดังรูปที่ 1.1 ข)

3) ดีสชาร์จภายใน (Internal discharge) เกิดขึ้นในเนื้อฉนวนที่มีความคงทนไดอิเล็กตริกต่ำหรือมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น จึงทำให้เนื้อฉนวนส่วนนี้เกิดเบรกดาวน์ก่อน ดีสชาร์จภายในเกิดขึ้นเนื่องจากมีโพรงอากาศหรือสิ่งแปลกปลอมในเนื้อฉนวนที่เป็นของแข็งหรือของเหลว ตัวอย่างของดีสชาร์จภายในแสดงดังรูปที่ 1.1 ค)



ก) ข) ค)

รูปที่ 1.1 ดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ

ก) โคโรนาดีสชาร์จ ข) ดีสชาร์จตามผิว ค) ดีสชาร์จภายใน

การเกิด PD ในระบบฉนวนจะเกิดขึ้นได้หลายกรณี ความบกพร่องของการฉนวนที่ทำให้เกิด PD แต่ละแบบจะมีลักษณะรูปแบบ (Pattern) ของ PD ไม่เหมือนกัน ถึงแม้ว่าจะเป็นความบกพร่องชนิดเดียวกันก็ตาม ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาและแยกแยะหาคุณลักษณะของ PD เพื่อใช้ในการระบุว่า PD ที่เกิดขึ้นเป็นชนิดแบบใด เช่น โคโรนาดีสชาร์จ ดีสชาร์จตามผิว หรือดีสชาร์จภายใน เป็นต้น ข้อมูลดังกล่าวมีความสำคัญต่อผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในอดีตนั้นการเรียนรู้และจดจำรูปแบบของการเกิด PD กระทำโดยการใช้สายตาสังเกตที่สัญญาณวงรีบนจอของออสซิลโลสโคปและนำไปแปลความหมาย[1] ซึ่งการแปลความหมายจะขึ้นกับความรู้และประสบการณ์ของผู้ทดสอบ การนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการวิเคราะห์ PD เป็นการเปิดโอกาสให้สามารถทำการรู้จำรูปแบบของการเกิด PD ทำให้เกิดความสะดวกต่อผู้ทดสอบสามารถวิเคราะห์จำแนกประเภทและบอกถึงสาเหตุของความบกพร่องที่เกิดขึ้นในระบบฉนวนโดยอัตโนมัติได้

1.2 ที่มาของปัญหา

ปัจจุบันมีโรงงานภายในประเทศสามารถผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้แล้วหลายชนิด เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า เคเบิลแรงสูง ลูกถ้วยฉนวน สวิตช์เกียร์ กับดักแรงดันเกินเป็นต้น ซึ่งต้องตรวจสอบวัดค่าดีสชาร์จบางส่วนตามที่มาตราฐานกำหนด และวิเคราะห์สาเหตุของความบกพร่องที่ทำให้เกิด PD เพื่อแก้ไขกระบวนการผลิต การออกแบบและการเลือกใช้วัสดุฉนวนให้เหมาะสม การไฟฟ้าต่างๆ ที่ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านี้ในระบบส่งจ่ายต้องมีการตรวจวัด PD หลังจากการซ่อมบำรุง เมื่อตรวจวัด PD แล้วพบว่าเกินกว่าที่มาตรฐานยอมรับได้ก็จะต้องมีการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตรวจสอบและวิเคราะห์หาสาเหตุตามที่กล่าวมาข้างต้น ปัจจุบันได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการตรวจวัดและวิเคราะห์การเกิด PD โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางด้านการรู้จำรูปแบบของแหล่งกำเนิด PD ต่างๆ และประเมินค่าหาผลลัพธ์ของการเกิด PD ทำให้มีความสะดวกต่อผู้ทดสอบสามารถประเมินผลได้โดยอัตโนมัติ

1.3 ผลงานวิจัยที่มีมาในอดีต

การตรวจวัดวิเคราะห์ PD นั้น ในระบบการฉนวน เพื่อหาที่มาของข้อบกพร่องมีมาตั้งแต่ในราวปี 1950 โดยใช้วิธีการต่างๆ ตัวอย่างที่สำคัญ เช่น การสังเกต รูปแบบของสัญญาณบนรูปลิสซาจูส์ (Lissajous traces) ซึ่งริเริ่มโดย Kreuger และ Mole[1] ซึ่งการจำแนกประเภทในตอนนั้นต้องใช้ความรู้และประสบการณ์ของผู้ทดสอบ เพื่อบ่งบอกถึงประเภทของ PD ที่เกิดขึ้น โดยต่อมาได้มีการวิจัยเพื่อจำแนกรูปแบบของการเกิด PD โดยใช้วิธีทางสถิติ ในการหารูปแบบการกระจายของการเกิด PD [2] โดยปัจจุบันในต่างประเทศการวิเคราะห์ PD จะเน้นไปที่การศึกษาในด้านลึกในเรื่องกลไกที่เกี่ยวข้องกับการเกิด PD และในด้านการสร้างแบบจำลอง (modeling) ที่เหมาะสมสำหรับลักษณะการฉนวนแบบต่างๆ นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิธีการเรียนรู้และจดจำการเกิด PD ด้วยวิธีต่างๆ เช่น Neural Network, Centour Score หรือ Genetic Algorithm[3]

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องตรวจจับ PD ในประเทศไทย ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2525 โดยการออกแบบและประกอบสร้างมิเตอร์กึ่งค่ายอดเพื่อใช้วัด PD ในเทอมของคลื่นรบกวนวิทยุซึ่งมีขีดจำกัดในการใช้งาน[4] ในปี พ.ศ. 2533 ได้มีงานวิจัยออกแบบสร้างเครื่องตรวจจับดีสชาร์จสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้สำเร็จ[5] และเป็นพื้นฐานทางการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับ PD ในเวลาต่อมา ในปี พ.ศ. 2541 ได้มีการวิจัยเพื่อออกแบบสร้างระบบตรวจหาตำแหน่งที่เกิดดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลแรงสูง โดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐานและใช้ FPGA ซึ่งเป็นไอซีดิจิตอลที่สามารถโปรแกรมการทำงานในระดับฮาร์ดแวร์ได้ มาประมวลผลสัญญาณดิจิตอลและควบคุมการทำงานของอุปกรณ์วัด โดยมีการใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิตอลในขั้นตอนต่างๆของการตรวจจับและตรวจหาตำแหน่งที่เกิด PD ในสายเคเบิลแรงสูงด้วย[6] และเมื่อไม่นานมานี้ในปี พ.ศ. 2542 ได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาออกแบบและสร้างเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐาน โดยออกแบบสร้างให้สามารถบันทึกค่าประจุที่ปรากฏ (q) ที่เกิดขึ้นตามมุมเฟสของแรงดัน (Φ) และค่าแรงดันทดสอบ (U) ได้ตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ ซึ่งสามารถคำนวณเมตริกซ์การกระจายของค่าเก็บประจุที่ปรากฏเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ PD แล้วนำรูปแบบเหล่านี้มาผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์และจำแนกประเภทก็จะสามารถบอกสาเหตุของความบกพร่องที่ทำให้เกิด PD ได้[7] ผลการศึกษาวิจัยออกแบบสร้างเครื่องตรวจจับ PD ที่กล่าวมาข้างต้นนี้ช่วยให้สามารถสร้างเครื่องตรวจจับ PD ให้กับ

ภาคอุตสาหกรรมการผลิต Lightning Arrester ของบริษัทอินทรอนิกส์ งานวิจัยที่เกี่ยวการกับการพัฒนาออกแบบสร้างเครื่องตรวจจับและวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐานที่ผ่านมานั้น ออกแบบสร้างให้สามารถวัดค่าประจุที่ปรากฏ(q) ที่เกิดขึ้นตามมุมเฟสของแรงดัน (Φ) และค่าแรงดันทดสอบ (U) ได้ตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ ซึ่งจะบอกถึงสภาพของการฉนวนในขณะนั้น สามารถใช้จำแนกสาเหตุในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้หลายชนิด แต่ยังไม่สามารถที่จะเรียนรู้จดจำรูปแบบและจำแนกรูปแบบของอุปกรณ์แรงสูงต่างๆได้โดยอัตโนมัติ

1.4 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐานให้มีความสามารถในการเรียนรู้และจดจำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนได้โดยการพัฒนาโปรแกรมในการรู้จำ และทำการจำแนกรูปแบบการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ได้ 3 ประเภทอย่างชัดเจนซึ่งจะทำการจำลองการเกิด PD ในรูปแบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลในการรู้จำและจำแนกประเภท เพื่อสามารถบอกสาเหตุการเกิด PD

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทำให้เกิดการพัฒนาเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้คอมพิวเตอร์เป็นฐานสามารถวินิจฉัยจำแนกหาสาเหตุการเกิด PD ได้โดยอัตโนมัติ

2) ช่วยให้อุตสาหกรรมอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงสามารถทำการวิเคราะห์ PD ที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3) เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีและบุคลากรในด้านนี้

4) เป็นประโยชน์ต่อการเรียน การสอน และการวิจัยในด้านนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนและวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน

รายงานการวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบโปรแกรมในการวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง และจำลองการเกิดดีสชาร์จบางส่วนเพื่อเก็บเป็นฐานข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนที่จะเกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจริง เริ่มจากการศึกษาพฤติกรรมของ PD หลักการตรวจจับ PD การแสดงผลการตรวจจับ PD การลดสัญญาณรบกวนตลอดจนถึงการศึกษาวิธีการต่างๆในการวิเคราะห์ PD จากผลงานในอดีตเพื่อใช้ในการพัฒนาซอฟแวร์ที่ใช้วิเคราะห์ PD ตามลำดับ ดังมีรายละเอียดดังนี้

2.1 พฤติกรรมของดีสชาร์จบางส่วน

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนมีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เมื่อเกิดดีสชาร์จขึ้น[8] พลังงานการกระทบจากอิเล็กตรอนหรืออิออนพลังงานสูงจะทำให้ฉนวนเกิดความร้อนและการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นเหตุให้ฉนวนเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง นำไปสู่การเบรกดาวน์ได้ในที่สุด ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนั้นแล้วดีสชาร์จบางส่วนยังก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ(Radio interference) ซึ่งจะส่งผลรบกวนต่อระบบสื่อสาร มาตรฐานจึงกำหนดให้มีการทดสอบตรวจวัดค่า PD

2.1.1 ผลจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

เมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วนจะเกิดผลสืบเนื่องต่างๆได้แก่[4] สัญญาณพัลส์ทางไฟฟ้า เสียง การสูญเสียของไดอิเล็กตริก แสง การเพิ่มขึ้นของความดันกาซ และปฏิกิริยาเคมี เราสามารถสังเกตและตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนได้หลายทางโดยการตรวจวัดสัญญาณที่กล่าวมา ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันดังต่อไปนี้

1) การฟังเสียง hissing ที่เกิดจาก PD เป็นวิธีที่ง่ายและเก่าแก่ที่สุด แต่วิธีนี้มีความไวต่ำและถูกรบกวนโดยเสียงอื่นๆจากภายนอกได้ง่าย

2) การวัดการสูญเสียของไดอิเล็กตริกโดยการวัดค่า $\tan\delta$ สามารถสังเกตการเกิด PD ได้จากค่า $\tan\delta$ ที่เพิ่มขึ้นและมีความสัมพันธ์กับแรงดันทดสอบ เนื่องจากพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาขณะเกิด PD จะทำให้ตัวประกอบการสูญเสีย (Dissipation factor) มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการสังเกตดังกล่าวไม่ชัดเจนแม้ว่าจะเกิด PD ปริมาณมาก เนื่องจากพลังงานสูญเสียจาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเกิด PD ซึ่งเกิดเฉพาะบางบริเวณของเนื้อฉนวนอาจมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการสูญเสียของไดอิเล็กตริกซึ่งเกิดขึ้นในปริมาตรทั้งหมดของฉนวน

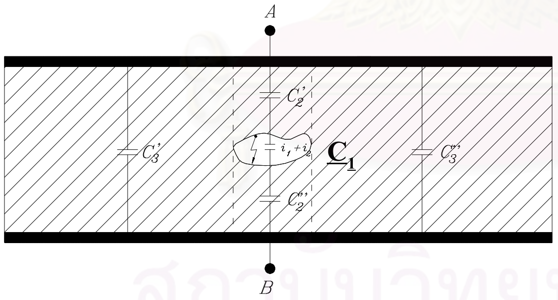
3) การตรวจวัด PD ทางแสง มีข้อจำกัดในเรื่องตำแหน่งที่เกิด PD ในวัสดุทดสอบต้องโปร่งแสง จึงไม่สามารถกระทำได้ในหลายกรณี

4) การตรวจวัดการเพิ่มขึ้นของความดันกาซและปฏิกิริยาเคมี มีข้อจำกัดที่การเปลี่ยนแปลงต้องใช้ระยะเวลานาน จึงไม่เหมาะที่จะใช้ติดตามการเกิด PD

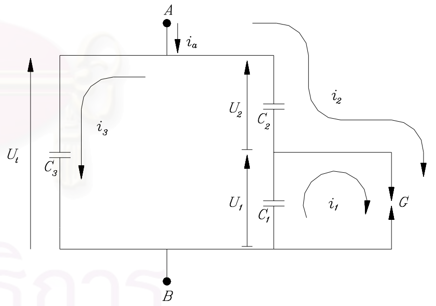
5) การวัดทางไฟฟ้า เป็นวิธีการวัดที่นิยมใช้กันมากที่สุดและมาตรฐานสากลแนะนำให้ใช้ได้แก่ เนื่องจากมีความไวสูง สามารถติดตามการเกิด PD ได้อย่างรวดเร็ว สามารถจำแนกสัญญาณที่เกิดจาก PD ออกจากสัญญาณอื่นๆได้ และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณ PD ที่เกิดขึ้น การวัดปริมาณของดีสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากลนั้นจะวัดในเทอมของ “ประจุที่ปรากฏ” (Apparent charge) [9] การตรวจจับ PD ในโครงการวิจัยนี้จะใช้วิธีวัดทางไฟฟ้า

2.1.2 วงจรสมมูลของดีสชาร์จภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป

วงจรสมมูลสำหรับฉนวนของอุปกรณ์ขณะเกิด PD อาจแทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า C_1, C_2, C_3 และ สปาร์กแกป G ดังรูปที่ 2.1[1] โดยฉนวนส่วนที่บกพร่องซึ่งปกติแล้วจะเป็นโพรงกาซขนาดเล็กๆจะแทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า C_1 และสปาร์กแกป G ฉนวนที่อยู่ในแนวเดียวกับส่วนที่บกพร่องจะแทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า C_2 และฉนวนส่วนที่มีสภาพดีจะแทนด้วยค่าความจุไฟฟ้า C_3



ก)



ข)

รูปที่ 2.1 วงจรสมมูล PD แบบทั่วไป

จากรูปที่ 2.1 เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสายของอุปกรณ์ (ขั้ว A-B) ในรูปที่ 2.1 ก) จะทำให้เกิด แรงดันตกคร่อมส่วนต่างๆของฉนวนแสดงดังรูปที่ 2.1 ข) ถ้าเกิดแรงดันตกคร่อมโพรงกาซสูงเกินกว่าค่าแรงดันที่โพรงกาซสามารถทนได้ ทำให้เกิดเบรกดาวน์หรือดีสชาร์จเฉพาะบริเวณโพรงกาซนี้ จึงเรียกว่าเกิด “ดีสชาร์จบางส่วน” หรือ “PD” ภายในอุปกรณ์นั้น จากรูปที่ 2.1 ข) จะได้

$$C_3 = C_3^{'} + C_3^{''} \tag{2.1}$$

$$C_2 = \frac{C_2^{'} C_2^{''}}{C_2^{'} + C_2^{''}} \qquad (2.2)$$

$$C_3 >> C_1 >> C_2 \qquad (2.3)$$

จากเหตุผลในสมการ(2.3) โดยที่ C_a คือค่าความจุไฟฟ้ารวมของวัสดุทดสอบ จะได้ว่า

$$C_a = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_3 \approx C_3 \qquad (2.4)$$

จากรูปที่ 2.1 ข.)แรงดันตกที่ขั้วสาย ΔU_t เนื่องจากการเกิด PDสามารถคำนวณได้โดยเปรียบเทียบประจุที่สะสมก่อนและหลังการเกิด PD ได้ดังนี้

$$C_3 U_t + C_2 (U_t - \Delta U_1) = C_3 U_t^{'} + C_2 U_t^{'} \qquad (2.5)$$

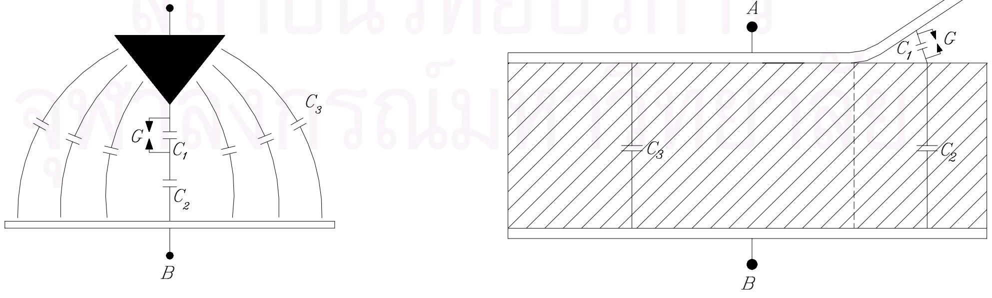
จะได้

$$\Delta U_t = (U_t - U_t^{'}) = \frac{C_2 \Delta U_1}{(C_2 + C_3)} \qquad (2.6)$$

โดยที่ U_t คือ แรงตกคร่อมขั้วสายก่อนการเกิด PD

$U_t^{/}$ คือ แรงตกคร่อมขั้วสายหลังการเกิด PD

วงจรสมมูลในรูปที่ 2.1 ข.) สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับ PD ที่เกิดในบริเวณปลายแหลมหรือขอบคมของอิเล็กโตรด ซึ่ง PD ลักษณะนี้เรียกว่า “โคโรนา” และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับดีสชาร์จตามผิว ได้เช่นเดียวกันโดยสามารถแทนอากาศรอบๆหรือฉนวนส่วนต่างๆ ด้วยค่าความจุไฟฟ้าดังรูปที่ 2.2 ตามลำดับ[1]



ก) ข)

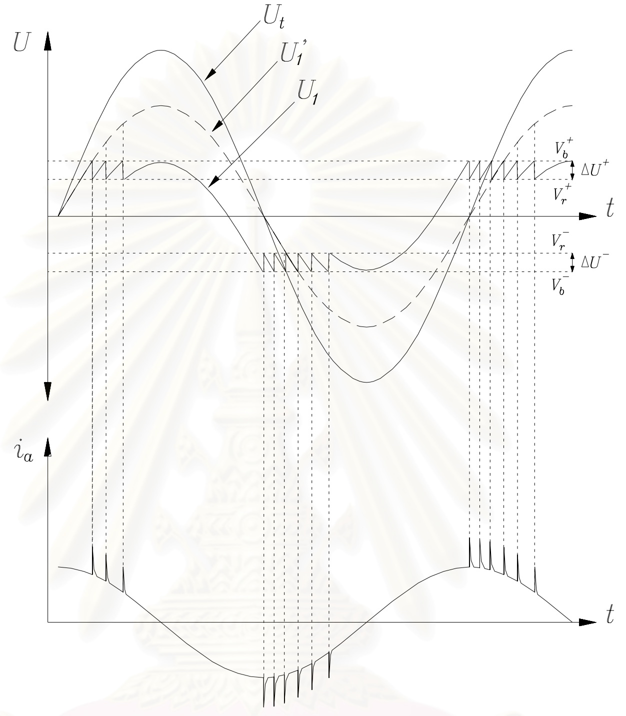
รูปที่ 2.2 แสดงค่าความจุไฟฟ้าของวงจรที่เกิด PD แบบ ก) โคโรนา ข) ดีสชาร์จตามผิว

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.3 ธรรมชาติพัลล์ของดีสชาร์จบางส่วน

2.1.3.1 การดีสชาร์จซ้ำ

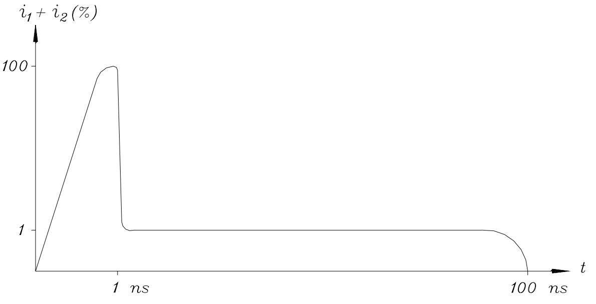
ในทางปฏิบัติ PD อาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังรูปที่ 2.3 โดยที่ U_t คือแรงดันตกคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์ V_b คือแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงกาซ V_r คือแรงดันหลังเบรกดาวน์ของโพรงกาซ U_1 คือแรงดันคร่อมโพรงกาซ $U_1^{/}$ คือแรงดันคร่อมโพรงกาซถ้าไม่มีการเกิด PD และ i_a คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ตามลำดับ[1]



รูปที่ 2.3 แสดงแรงดันตกคร่อมโพรงกาซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD

2.1.3.2 ลักษณะรูปร่างของกระแสดีสชาร์จบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแกปหรือโพรงกาซเล็ก ในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.4 ขณะเกิด PD กระแสที่ไหลผ่านแกปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแกปสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแกปหมดกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว และกระแสที่ลดลงนี้จะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก[10] แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ จะพบว่าความกว้างของกระแสพัลส์ที่เกิดจาก PD ในฉนวนจะอยู่ในช่วงเวลา 1.5 นาโนวินาทีถึงช่วงเวลาเป็นหลัก 100 นาโนวินาที ดังนั้นกระแสพัลส์ดังกล่าวจึงมีสเปกตรัมของความถี่ที่มีแบนด์วิดต์กว้าง 10 เมกะเฮิรตซ์ขึ้นไป และอาจจะมีความกว้างถึง 200 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งการเกิด PD จากลักษณะการเกิดทรีอิ้ง(treeing) ในเนื้อฉนวนจะมีช่วงเวลาของกระแสพัลส์กว้างที่สุด[11]



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแกปเล็กๆ

2.2 หลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

การตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธี โดยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่างๆ ของ PD การวัดผลของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์[1]

2.2.1 วงจรพื้นฐานและการวิเคราะห์วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

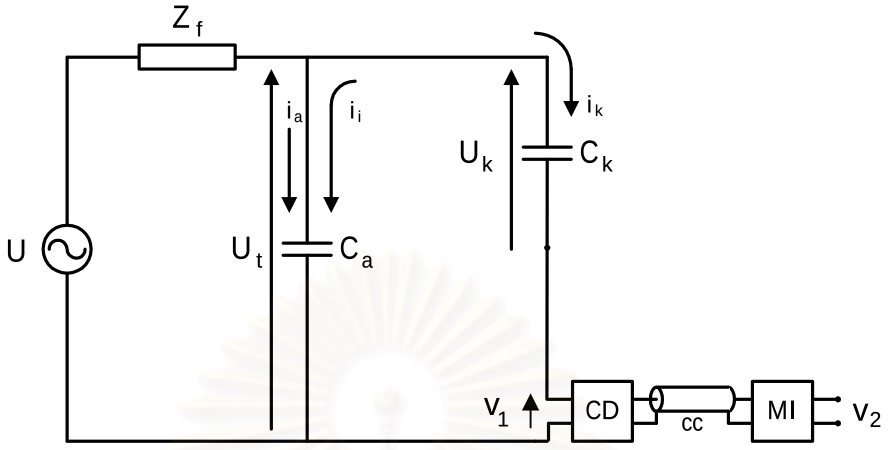
วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 1998 (ฉบับร่าง)[12]จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงหรือแรงดันทดสอบ U ตัวกรองสัญญาณ (Filter) จากแหล่งจ่ายหรืออิมพีแดนซ์ Z_f วัสดุทดสอบ (Test object) C_a ตัวเก็บประจุคับปลิง(Coupling capacitor) C_k อุปกรณ์รับสัญญาณ (Coupling device) CD สายเคเบิลนำสัญญาณ(Connecting cable) CC และเครื่องมือวัด(Measuring instrument) MI ตามลำดับ แสดงดัง รูปที่ 2.5

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง U ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบซึ่งควรเป็นหม้อแปลงทดสอบที่ปลอด PD ที่แรงดันทดสอบ เป็นต้น

2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์ Z_f ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์ และ PD ที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายเป็นต้น และหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกัน PD จากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่ายตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้และปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรอง เช่น ตัวเหนี่ยวนำ (High voltage inductor) หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ (High voltage low–pass filter) เป็นต้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบเป็น

แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองอีก เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทดสอบมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว โดยเฉพาะหม้อแปลงปลอด PD



รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

3) ตัวเก็บประจุคับปลิง C_k ใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อหรือคับปลิงสัญญาณความถี่สูงให้ครบวงจรระหว่าง C_a และ C_k CD ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ต่ำสำหรับ PD ดังนั้นตัวเก็บประจุคับปลิงต้องเป็นชนิดที่มีค่าความเหนี่ยวนำภายในต่ำ ปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ

4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกันคือทำหน้าที่อินทิเกรต (Integrate) กระแสพัลส์ i_i ที่ไหลในวงจรทดสอบ เนื่องจากการเกิด PD โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD กับ MI อุปกรณ์รับสัญญาณ จะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) และฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบมิให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่สำคัญอีก 3 ประการ คือ เป็นวงจรขยายสัญญาณ(Amplifier) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ และเป็นอุปกรณ์แสดงผล PD

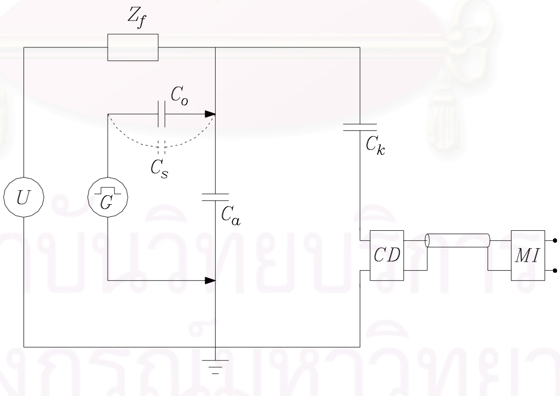
หลักการทำงานของวงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD เริ่มจากค่อยๆป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย U ผ่านตัวกรอง Z_f ให้กับวงจรทดสอบจนกระทั่งเกิด PD ที่วัสดุทดสอบ C_a(ถ้าฉนวนของวัสดุทดสอบนั้นมีความบกพร่อง) ทำให้เกิดแรงดันตกที่ขั้วของ C_a ตามสมการ (2.6) C_k จะดีสชาร์จประจุไปที่ C_a เพื่อชดเชยแรงดันตกนั้น ผลดังกล่าวทำให้เกิดกระแสพัลส์ i_i ไหลวนครบวงจรซึ่งประกอบด้วย C_k ,C_a และ CD ดังนั้น CD และ MI วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง C_a กับ C_k โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์ i_i เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

2.2.2 การแสดงผลของดีสชาร์จบางส่วน

การแสดงหรือวัดผลของดีสชาร์จบางส่วนสามารถทำได้ทั้งทางมิเตอร์ ทางจอภาพของออสซิลโลสโคป และทางเครื่องบันทึก[5] ค่าของดีสชาร์จบางส่วนที่มาตรฐานกำหนด โดยปกติจะแสดงในเทอมของ ”ประจุที่ปรากฏ” ของ PD หรือ “ขนาดของดีสชาร์จ” (Discharge magnitude) ”q” มีหน่วยเป็นพิโคคูลอมบ์(pC) สัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD คือ v_2 จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ q ดังนั้นค่ายอดของ v_2 คือ $v_{2(peak)}$ จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับ q ด้วย [5] จากเหตุผลดังกล่าวการอ่านค่า q จึงนิยมอ่านจากค่ายอดของ v_2 ซึ่งอ่านได้จากจอภาพของออสซิลโลสโคป หรือมิเตอร์อ่านค่ายอดก็ได้

2.2.3 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน (Discharge calibrator)

สัญญาณเอาต์พุต v_2 แปรผันตามขนาดของตัวเก็บประจุคับปลิงและวัสดุทดสอบ จึงต้องมีการปรับเทียบด้วยค่า PD มาตรฐานก่อนทำการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบโดยใช้เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน เพื่อใช้ในการจำลองการเกิด PD ด้วยการส่งผ่านกระแสพัลส์ที่มีขนาดของประจุมาตรฐาน q_0 ที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ดังรูปที่ 2.6 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันรูปขั้น หรือแรงดันแบบสี่เหลี่ยม U_0 ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุขนาดเล็ก (Calibrating capacitor) C_0 ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้ $C_0 \leq 0.1C_a$ ถ้า C_0 เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ และกำหนดช่วงเวลาขึ้น t_r ของ U_0เป็น $t_r \leq$ 60ns [12] ในการปรับเทียบต้องพิจารณาผลของค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ C_s ด้วย คือต้องทำให้ $C_0 >> C_s$



รูปที่ 2.6 วงจรสำหรับการปรับเทียบ

2.3 เทคนิคการวัดดีสชาร์จบางส่วน

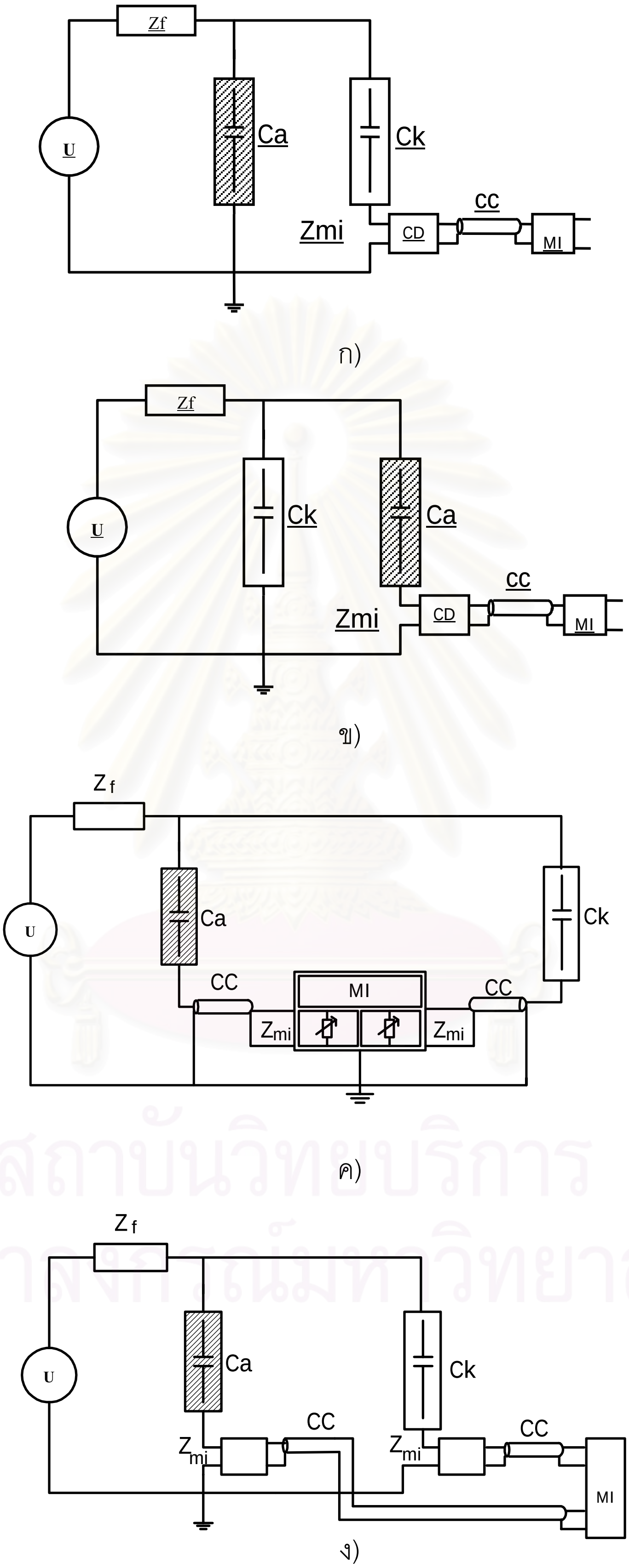
โดยปกติวัสดุทดสอบทั่วไป อาจแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุชนิดองค์ประกอบแบบลัมป์หรือตัวเก็บประจุธรรมดา วงจรทดสอบ PD ตามมาตรฐานต่างๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน ในที่นี้ใช้วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC [12,13] โดยรูปที่ 2.7 ก) และรูปที่ 2.7 ข) เป็นวงจรทดสอบแบบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีตรง ข้อดีของวงจรรูปที่ 2.7 ก) และวงจรรูปที่ 2.7 ข) คือขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์โดยตรง ในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดเบรกดาวน์ อุปกรณ์รับสัญญาณจะไม่ได้รับความเสียหายและเหมาะสำหรับทดสอบวัสดุทดสอบที่มีขั้วแรงดันต่ำหรือชีลด์หรือ Screen ขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ชีลด์ของเคเบิลจะต่อลงกราวด์โดยตรง ในรูปที่ 2.7 ค) เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุล วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบคอมมอนโมด (Common mode) ในรูปที่2.7 ง) เป็นวงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณได้(Polarity discrimination) มีข้อดีเช่นเดียวกับวงจรทดสอบแบบสมดุล แต่มีความสามารถเพิ่มเติมในการแยกขั้วสัญญาณรบกวนจากภายนอกออกจาก PD ภายในวงจรทดสอบได้ แต่ข้อเสียของวงจรในรูปที่ 2.7ข), 2.7 ค) และ 2.7 ง) คือ อาจทำให้เครื่องวัดได้รับความเสียหายในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดเบรกดาวน์ และไม่เหมาะในการทดสอบวัสดุทดสอบที่มีชีลด์ขนาดใหญ่ เนื่องจากชีลด์ไม่ได้ต่อลงกราวด์โดยตรง ดังนั้นถ้ามีสัญญาณรบกวนที่ชีลด์จะทำให้ความไวในการวัด PD ลดลง

การปรับเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ (Pulse area) q_{cal} ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ถ้าเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่า PD ได้ a_1 ดังนั้น Scale factor $K_1 = q_{cal}/a_1$ หลังจากทำการปรับเทียบเสร็จแล้วต้องเอาเครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ (ในกรณีที่ C_O เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ) ขณะทำการทดสอบที่แรงดันตามมาตรฐานกำหนด ถ้าในขณะนั้นเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่าได้ a_2 ดังนั้นประจุที่ปรากฏของ PD คือ $q = K_1a_2$ และความไวของวงจรทดสอบ $q_{min} = 2K_1h_n$ เมื่อ h_n คือค่าสูงสุดของระดับสัญญาณรบกวนพื้นหลัง (Background noise) ที่อ่านจากเครื่องตรวจจับ PD หลังการปรับเทียบก่อนการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบ[14]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.7 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ

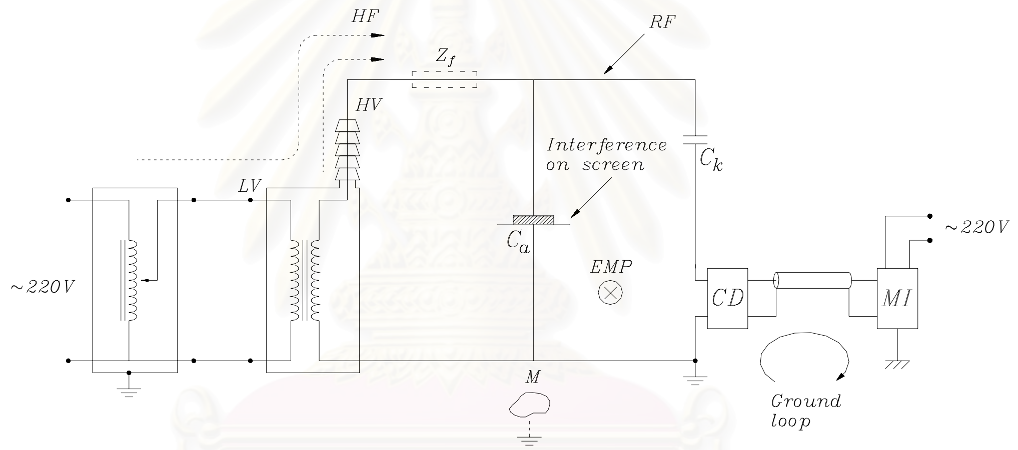
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.4 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน

เนื่องจากสัญญาณ PD มีขนาดเล็ก ดังนั้นในการทดสอบ PD สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นย่อมมีผลต่อค่าที่วัดได้ แต่เราสามารถลดสัญญาณรบกวนให้เหลือน้อยลงเพื่อให้วงจรทดสอบมีความไวสูงขึ้นได้ โดยมีรายละเอียดของสัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบ และ วิธีการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ดังต่อไปนี้

2.4.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดีสชาร์จบางส่วน

สัญญาณรบกวนประกอบด้วย สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางอากาศ และทางแหล่งจ่าย นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการดีสชาร์จของอุปกรณ์ที่เป็นโลหะและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบหรือกราวด์ไม่ดี การเกิดกราวด์ลูป (ground loop) และเกิดสัญญาณออสซิลเลตเนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ไม่ดีหรือหลวม เป็นต้น รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ

โดยที่ HF คือ สัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายได้แก่ ฮาร์มอนิกสูงๆ จากเมนโดยตรง จากอุปกรณ์พวกไธริสเตอร์ และ PD จากหม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น

RF คือ คลื่นรบกวนวิทยุซึ่งอาจจะเป็นคลื่นวิทยุโดยตรง คลื่นรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูง หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่อยู่ใกล้เคียง

EMP คือ สัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการทำงานของสวิตซ์หรือไธริสเตอร์

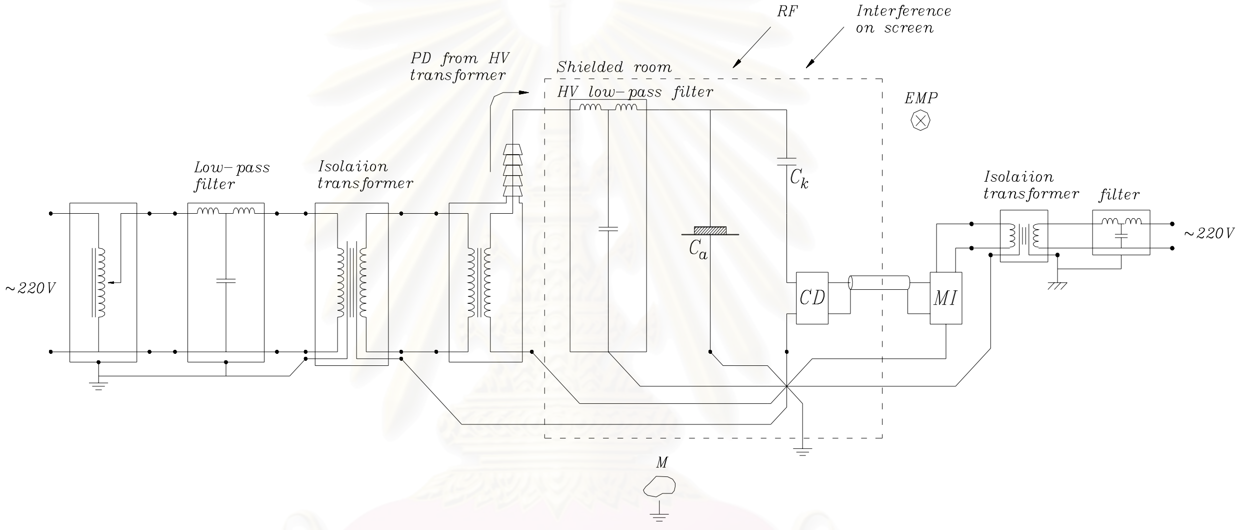
Interference on screen คือ สัญญาณรบกวนที่ชีลด์ หรือสกรีน หรือที่ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบที่มีชีลด์ขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น

ground loop คือ การเกิดครบวงรอบของสายดิน

M คือ โลหะที่ไม่ได้ต่อลงดินและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ

2.4.2 การลดสัญญาณรบกวน

การลดสัญญาณความถี่สูง เช่น พวกฮาร์มอนิกสูงๆ จะใช้ตัวกรองแรงดันต่ำ และอาจจะเพิ่มหม้อแปลงขดลวดแยก(Isolation Transformer)ช่วยก็ได้ โดยต่อไว้ทางด้านขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดสอบ ในกรณีที่เกิด PD ในหม้อแปลงทดสอบจะต้องใช้ตัวกรองแรงดันสูงต่อทางด้านขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงทดสอบ การลดสัญญาณรบกวน RF และ EMP ซึ่งเข้ามาทางอากาศ ทำได้โดยการทดสอบในห้องชีลด์ การแก้ปัญหาเรื่องกราวด์ลูปทำได้โดยการต่อกราวด์รวมกันเพียงจุดเดียว ตัวอย่างการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนในข้อ 2.4.1 แสดงในรูปที่ 2.9

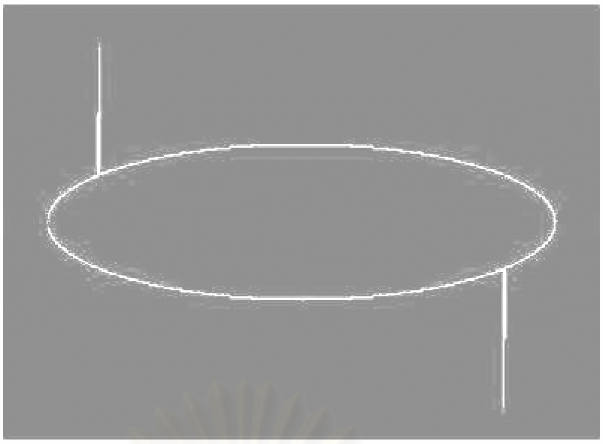


รูปที่ 2.9 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน

นอกจากการลดสัญญาณรบกวนโดยตรงแล้ว ยังมีวิธีการลดสัญญาณรบกวนทางอ้อมอีกหลายวิธีด้วยกัน ที่นิยมใช้กันมากคือ[15]

1) วงจรทดสอบแบบสมดุล ใช้ลดสัญญาณรบกวนแบบคอมมอนโมด เช่น สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางแหล่งจ่าย เป็นต้น

2) การลดสัญญาณรบกวนโดยวิธี “หน้าต่างเวลา” (Time window method) วิธีนี้เป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน โดยจะลดสัญญาณรบกวนที่ซิงโครไนซ์กับความถี่ของแหล่งจ่ายเท่านั้น เช่น สัญญาณรบกวนเนื่องจากการทำงานของไธริสเตอร์ เป็นต้น ด้วยการใช้สวิตซ์ตัดหรือเปิดวงจรตรงตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวน เพื่อไม่ให้ไปปรากฏที่เอาต์พุตของเครื่องจับ PD ดังรูปที่ 2.10 ก) และ 2.10 ข)



ก)

ข)

รูปที่ 2.10 การลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี “หน้าต่างเวลา”

3) การลดสัญญาณรบกวนโดยใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล[16] (Digital signal processing, DSP) วิธีนี้นิยมใช้ในการลดสัญญาณรบกวนแบบแถบความถี่แคบ (narrow-band noise) เช่นสัญญาณวิทยุ AM (แบนด์วิดต์ของแต่ละสถานีประมาณ 9 กิโลเฮิรตซ์) ออกจากสัญญาณ PD ซึ่งมีแถบความถี่กว้างหลายร้อยกิโลเฮิรตซ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 การวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน

เมื่อตรวจพบ PD ในระบบการฉนวนของอุปกรณ์ ก็จะต้องทำการหาสาเหตุโดยสังเกตจากลักษณะของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ การหาสาเหตุของการเกิด PD นี้มีความสำคัญสำหรับผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในกระบวนการวิเคราะห์ PD จุดประสงค์หลักของการวิเคราะห์ คือ สามารถบอกถึงสาเหตุของการเกิด PD ในเนื้อฉนวนเนื่องจากผลของดีสชาร์จตัวอย่างเช่น การเกิดดีสชาร์จภายใน ดีสชาร์จตามผิว และการเกิดโคโรนา เพื่อนำข้อมูลนี้มาประเมินความเสียหายที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากการดีสชาร์จ หรือแก้ไขปรับปรุงกระบวนการผลิตฉนวนของอุปกรณ์ ในการวิเคราะห์ PD มีคำถามที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1) สามารถวิเคราะห์และบอกลักษณะสำคัญของข้อมูล จากรูปคลื่นการกระจายอย่างไร

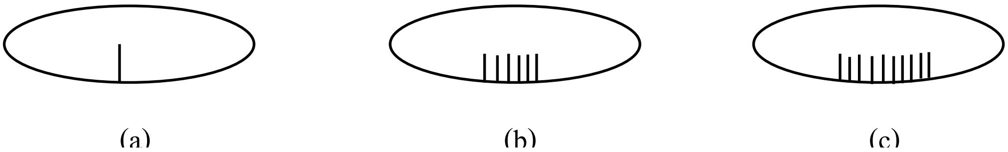
2) สามารถแยกความแตกต่างของความบกพร่องที่เกิดขึ้นจากข้อมูลที่มีอย่างไร

2.5.1 การวิเคราะห์ PD แบบนิยม

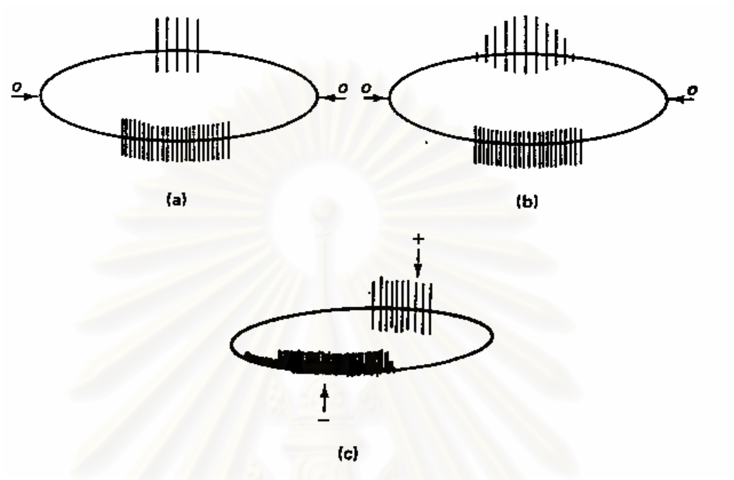
โดยทั่วไปการวิเคราะห์ PD นั้นจะทำการวิเคราะห์จากสัญญาณรูปวงรีที่ได้จากการตรวจจับ PD โดยดูลักษณะของพัลส์ PD ที่ปรากฏบนรูปวงรีซึ่งในแต่รูปแบบของการเกิด PD จะมีตำแหน่งของพัลส์ที่เกิดขึ้นในเฟสแรงดันแตกต่างกัน รูปแบบของการเกิด PD แต่ละรูปแบบที่มีความแตกต่างกันจะเป็นตัวบอกถึงชนิดและแหล่งกำเนิดของการเกิด PD ทำให้สามารถนำมาวิเคราะห์และวินิจฉัยหาสาเหตุของการเกิดได้ดังนี้

2.5.1.1 รูปแบบ PD แบบโคโรนา

การเกิดโคโรนา จะแสดงดังรูปที่ 2.11 ถ้าดีสชาร์จปรากฏทางด้านลบของรูปคลื่น แสดงว่าเกิดโคโรนาทางด้านแรงสูง แต่ถ้าดีสชาร์จปรากฏทางด้านบวกของรูปคลื่นแสดงว่าเกิดโคโรนาทางด้านกราวด์ ลักษณะของโคโรนาทางด้านแรงสูงที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟส 270 องศา สำหรับในกรณีแรงดันเริ่มต้น และเมื่อแรงดันสูงขึ้น PD จะเกิดในช่วง 90 องศาด้วย โดยขนาดของ PD จะมีค่าใกล้เคียงกัน



ก) การเกิดโคโรนาในกาซ เช่น อากาศ และกาซ SF_6

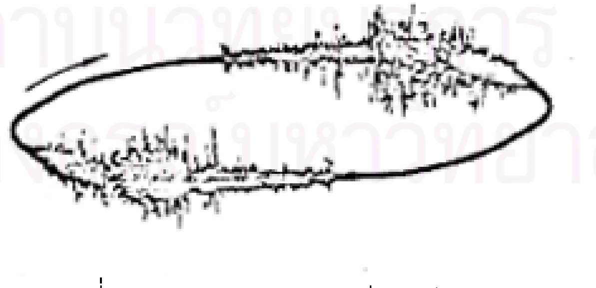


ข) การเกิดโคโรนาในน้ำมัน

รูปที่ 2.11 รูปแบบการเกิดโคโรนา

2.5.1.2 **รูปแบบ PD แบบดีสชาร์จตามผิว**

ดีสชาร์จตามผิว จะแสดงดังรูปที่ 2.12 ลักษณะของดีสชาร์จตามผิวที่แสดงบนฐานเวลารูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0 - 90 องศา และ 180-270 องศา



รูปที่ 2.12 รูปแบบการเกิดดีสชาร์จตามผิว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.1.3 รูปแบบ PD แบบดีสชาร์จภายใน

ดีสชาร์จภายใน จะแสดงดังรูปที่ 2.13 ลักษณะของดีสชาร์จภายในที่แสดงบนฐานเวลา รูปวงรี PD จะเกิดในช่วงมุมเฟสระหว่าง 0 - 90 องศา และ 180-270องศา เช่นเดียวกับดีสชาร์จตามผิวแต่ลักษณะการกระจายของพัลส์ PD จะน้อยกว่า

รูปที่ 2.13 รูปแบบการเกิดดีสชาร์จภายใน

2.5.1.4 รูปแบบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น

สัญญาณรบกวน จะแสดงดังรูปที่ 2.14 ในการตรวจจับ PD บ่อยครั้งที่มีสัญญาณรบกวนจากภายนอกเข้ามาจนทำให้การวัดค่า PD ผิดพลาด และได้ผลมากกว่าความเป็นจริงทำให้เกิดความเข้าใจผิดว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นไม่ได้คุณภาพ กล่าวคือ ค่า PD ที่วัดได้สูงกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด[1] สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด PD แบบต่างๆมีดังนี้

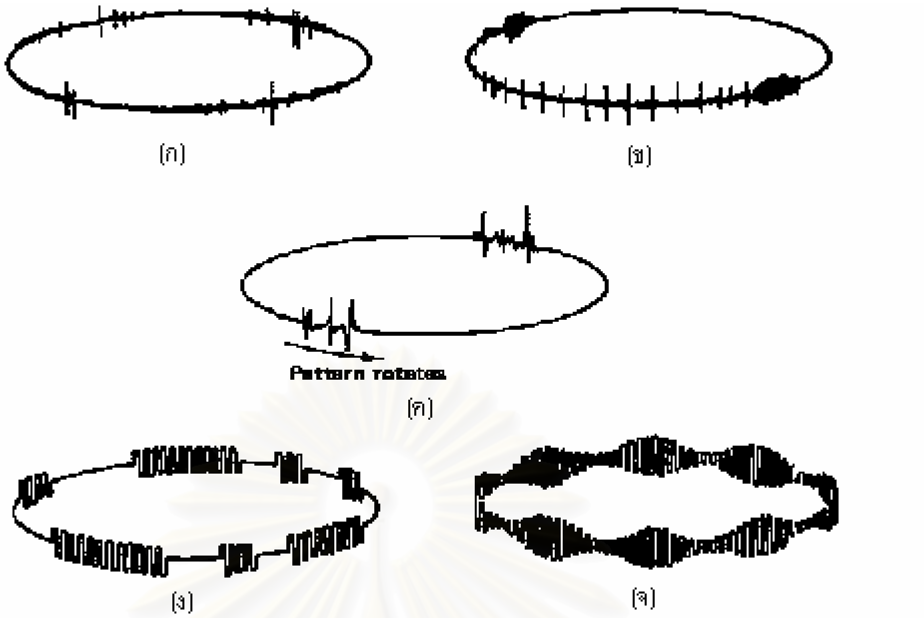
1) สัญญาณรบกวนเนื่องจากไทริสเตอร์ ดังแสดงในรูป 2.14ก) ลักษณะของสัญญาณรบกวนชนิดนี้จะเกิดเป็นพัลส์คู่

2) สัญญาณรบกวนเนื่องจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ ดังแสดงในรูป 2.14ข)

3) สัญญาณรบกวนเนื่องจากเครื่องจักรกลไฟฟ้าแบบอะซิงโครนัส ดังแสดงในรูป 2.14ค)

4) สัญญาณรบกวนเนื่องจากของคลื่นรบกวนในการส่งสัญญาณสื่อสาร ดังแสดงในรูป 2.14ง) ลักษณะของสัญญาณรบกวน คือ จะมีคลื่นรบกวนความที่สูงเข้ามาในวงจรวัด

5) สัญญาณรบกวนเนื่องจากของคลื่นรบกวนวิทยุ ดังแสดงในรูป 2.14จ) ลักษณะของสัญญาณรบกวน คือ จะมีคลื่นรบกวนความที่สูงเข้ามาในวงจรวัดเช่นเดียวกับสัญญาณรบกวนเนื่องจากของคลื่นรบกวนในการส่งสัญญาณสื่อสาร

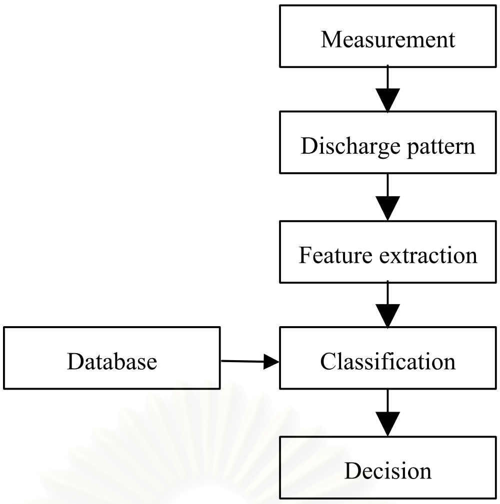


รูปที่ 2.14 สัญญาณรบกวนแบบต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการวัด

เป็นเวลาหลายสิบปีที่การวิเคราะห์และการรู้จำรูปแบบของการเกิด PD กระทำโดยการใช้สายตาสังเกตสัญญาณที่แสดงแบบวงรีบนจอของออสซิลโลสโคป[1,16]ซึ่งการแปลความหมายจะขึ้นกับความรู้และประสบการณ์ของผู้ทดสอบ การนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้ในการตรวจวัด PD เป็นการเปิดโอกาสให้สามารถทำการรู้จำรูปแบบของการเกิด PD โดยอัตโนมัติได้ [17-18]

2.5.2 **การวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนโดยกระบวนการเรียนรู้และจดจำรูปแบบ**

กระบวนการเรียนรู้และจดจำรูปแบบของการเกิด PD โดยอัตโนมัติแสดงไว้ในรูปที่ 2.15 ประกอบด้วยการตรวจวัด ซึ่งจะได้รูปแบบของการเกิด PD (Discharge pattern) จากนั้นจะทำการคำนวณหาคุณลักษณะจากรูปแบบที่ได้ (Feature extraction) แล้วนำคุณลักษณะที่คำนวณได้นั้นมาทำการจำแนกประเภท(Classification) โดยอ้างอิงกับฐานข้อมูล (Database) เพื่อนำมาสู่กระบวนการตัดสินใจในที่สุด



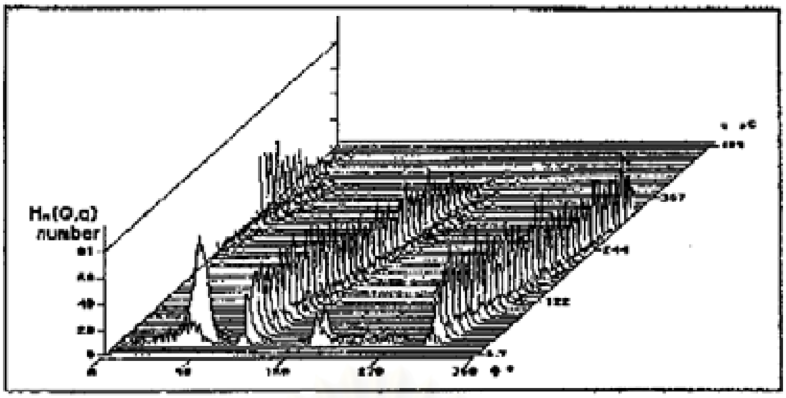
รูปที่ 2.15 กระบวนการรู้จำโดยทั่วไป

2.5.2.1 สัญญาณที่ใช้ในการรู้จำรูปแบบดีสชาร์จบางส่วน

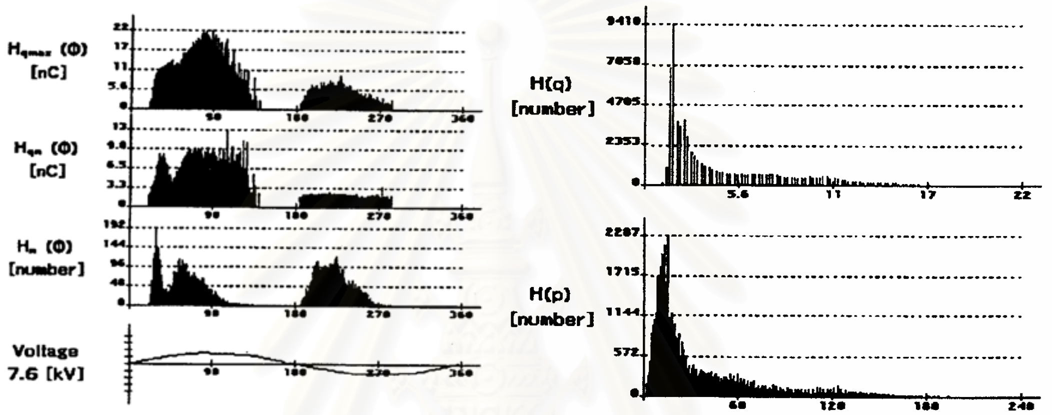
การตรวจวัดสัญญาณ PD เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุที่เกิดดีสชาร์จบางส่วนนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่จะเลือกใช้วิธีการตรวจวัดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า เนื่องจากสามารถใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้หลายประเภทและเป็นที่นิยมใช้กันมาก นอกจากนั้นแล้วยังสามารถแบ่งรูปแบบสัญญาณที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้สองประเภทคือ รูปแบบการกระจายและลักษณะรูปร่างของสัญญาณพัลส์ PD

การตรวจวัดสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในขั้วสายของอุปกรณ์ จะสามารถสังเกตรูปแบบการกระจายของสัญญาณต่างๆได้ดังนี้

1) การกระจาย $\mathrm{H_n}(\phi, \mathrm{q})$ คือความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของประจุที่ปรากฏ กับมุมเฟสของแรงดันทดสอบ และจำนวนครั้งที่เกิด PD ซ้ำมีลักษณะดังรูปที่ 2.16 การกระจายอื่นๆที่สามารถคำนวณหาจาก $H_n(\phi,q)$ ได้แก่ การกระจายขนาด PD ที่มากที่สุดตามมุมเฟส $H_{q\max}(\phi)$ การกระจายขนาด PD เฉลี่ยตามมุมเฟส $H_{qn}(\phi)$ การกระจายจำนวนครั้งที่เกิด PD ซ้ำตามมุมเฟส $H_n(\phi)$ การกระจายจำนวนครั้งที่เกิด PD ซ้ำตามขนาด PD $H(q)$ การกระจายจำนวนครั้งที่เกิด PD ซ้ำตามค่าพลังงานดีสชาร์จ $H(p)$ [19] ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยที่การกระจายเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างกระบวนการเสื่อมสภาพ (Aging) ของฉนวน ซึ่งจะบอกถึงสภาพของการฉนวนในขณะนั้น สามารถใช้จำแนกสาเหตุในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้หลายชนิด และนิยมใช้กันโดยทั่วไป [4]



รูปที่ 2.16 การกระจายแบบ $H_n(\phi, q)$



รูปที่ 2.17 การกระจายอื่นๆ ที่คำนวณได้จาก $H_n(\phi, q)$

2) ลักษณะของสัญญาณพัลส์ PD จะทำการตรวจวัดสัญญาณโดยใช้เทคนิคการแยกชัดทางเวลา (Time-resolved techniques) ซึ่งเครื่องมือที่ใช้มีแบนด์วิดต์ประมาณ 500 เมกะเฮิรตซ์ ลักษณะสัญญาณพัลส์ที่ตรวจจับได้ จะแตกต่างกันไปตามสาเหตุของ PD เช่น วัตถุแปลกปลอมที่ปะปนอยู่ภายในเนื้อฉนวนเกิดการนำไฟฟ้า โลหะที่อยู่ในบริเวณทดสอบไม่ได้ต่อลงกราวด์ และเกิดทรีอิ้ง (Treeing) ใน GIS (Gas insulated system) เป็นต้น รูปร่างของสัญญาณพัลส์ PD ที่ตรวจวัดได้โดยวิธีนี้ยังแตกต่างจากรูปร่างของพัลส์ที่เกิดจากสัญญาณรบกวน ทำให้สามารถแยกสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณ PD ได้อย่างมีประสิทธิภาพ[10]

3) การกระจายของสัญญาณพัลส์ PD แบบมีเงื่อนไข (Conditional PD distribution) $p_1(\phi_i^-, Q^+)\,d\phi_i^-$ คือความน่าจะเป็นที่สัญญาณพัลส์ลูกที่ i จะเกิดขึ้นในช่วงครึ่งลบของแรงดันทดสอบระหว่างมุมเฟส ϕ_i^- กับ $\phi_i^- + d\phi_i^-$ เมื่อผลรวมของประจุทั้งหมดที่เกิดจาก PD ในช่วงครึ่งบวกของแรงดันทดสอบมีค่าเท่ากับ Q^+ [6]

4) การกระจายของความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์ (Interpulse distribution) คำนวณได้จากค่าสหสัมพัทธ์ของค่าความแตกต่างของแรงดันทดสอบ กับ เวลาระหว่างพัลส์ที่เกิดขึ้นติดกัน การกระจายนี้จะเปลี่ยนไปตามระยะต่างๆของการขยายตัวของทรีอิ้งในฉนวน [8]

2.5.2.2 การคำนวณค่าคุณลักษณะจากรูปแบบที่ได้

การคำนวณค่าคุณลักษณะจากรูปแบบที่ได้ เป็นเทคนิคสำหรับการรู้จำรูปแบบ PD มีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อลดมิติของข้อมูลลง โดยการคำนวณหาเฉพาะคุณลักษณะหรือคุณสมบัติที่สำคัญของรูปแบบ ซึ่งคุณลักษณะที่ได้นี้จะยังคงความสามารถในการจำแนกไว้ เช่นเดียวกับที่รูปแบบเดิมมีคุณลักษณะที่หาได้นี้ควรมีมิติน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้สามารถจำแนกประเภทได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น ตัวอย่างเช่น การคำนวณพารามิเตอร์ทางสถิติ $H_{q\max}(\phi)$, $H_{qn}(\phi)$, $H_n(\phi)$, $H(q)$ และ $H(p)$ ซึ่งมีทั้งหมด 29 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และในรูปที่ 2.18 ซึ่งสามารถอธิบายเป็นฟังก์ชั่นทางคณิตศาสตร์โดยกำหนดตัวแปรต่างๆ เช่น Skewness, Kurtosis

,Crosscorrelation factor และอื่นๆทำให้สามารถลดมิติของการกระจาย $H_n(\phi,q)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นอาร์เรย์ 2 มิติขนาดใหญ่ลงได้มาก นอกจากวิธีทางสถิติแล้วยังมีอีกหลายวิธีในการลดมิติการกระจายได้โดยวิธีที่นิยมอีกวิธีหนึ่งก็คือ วิธีแฟรกตัล(Fractal) ซึ่งเป็นการบรรยายคุณสมบัติของรูปทรงที่ส่วนย่อย[23] ของรูปทรงนั้นมีความคล้ายคลึง (ในเชิงรูปร่าง หรือ ในเชิงพารามิเตอร์ทางสถิติ) กับรูปทรงทั้งหมด กล่าวคือมีคุณสมบัติ self similarity มาใช้ในการอธิบายรูปแบบการกระจายของการเบรกดาวน์ในเนื้อฉนวน วิธีนี้ทำให้พารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการจำแนกกลุ่มข้อมูลลดลงเหลือเพียง 2 มิติเท่านั้น คือ มิติแฟรกตัล (Fractal dimension) ซึ่งแสดงถึงความขรุขระ (roughness) และ

ลาคิวนาริตี (Lacunarity) ซึ่งแสดงถึงความแน่น (denseness) ของพื้นผิวการกระจายที่พิจารณา แฟรกตัลเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงวิธีหนึ่งในการลดมิติของการกระจายซึ่งยังคงความสามารถในการจำแนกรูปแบบไว้ [3] โดยไม่จำเป็นต้องทำการลดมิติอีก

การคำนวณค่าทางสถิติและวิธีแฟรกตัลมีขั้นตอนดังนี้ ซึ่งวิธีแฟรกตัลจะใช้วิธี Box counting ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปมีขั้นตอนดังรูปที่ 2.19[23]

2.5.2.2.1 ตัวดำเนินการทางสถิติ (Statistical Operators)

การศึกษาความแตกต่างระหว่างจำนวนประจุเฉลี่ยต่อเฟสของแรงดัน ($H_{qn}(\varphi^+)$,$H_{qn}(\varphi^-)$) และ จำนวนครั้งของการเกิดดีสชาร์จต่อเฟสของแรงดัน ($H_n(\varphi^+)$,$H_n(\varphi^-)$) ในรูปคลื่นแรงดันทั้งบวกและลบ[24-25]โดยจะมีการพิจารณาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1) Discharge asymmetry

Discharge asymmetry Q แสดงถึงผลต่างของการกระจาย $H_{qn}(\varphi^+)$,$H_{qn}(\varphi^-)$

ถ้าค่า Q = 1 ความแตกต่างระหว่างขนาดประจุที่เท่ากัน และ

Q = 0 ความแตกต่างระหว่างขนาดประจุแตกต่างกันมาก

$$Q = \frac{Q_s^- / N^-}{Q_s^+ / N^+} \qquad (2.22)$$

โดยที่ Q_s^+ และ Q_s^- เป็นผลรวมของการกระจายประจุ $H_{qn}(\varphi^+)$,$H_{qn}(\varphi^-)$

N^+ และ N^- เป็นจำนวนของการกระจายประจุ $H_{qn}(\varphi^+)$,$H_{qn}(\varphi^-)$

2) The cross correlation factor (cc)

The cross correlation factor (cc) แสดงถึงความแตกต่างของรูปแบบการกระจาย $H_{qn}(\varphi^+)$,$H_{qn}(\varphi^-)$

ถ้าค่า cc = 1 รูปแบบการกระจายจะมีลักษณะสมมาตรกันระหว่างรูปคลื่นแรงดันบวกและลบ

cc = 0 รูปแบบการกระจายจะมีลักษณะไม่สมมาตรกันระหว่างรูปเคลื่อนแรงดันบวกและลบ

$$cc = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i / n}{\sqrt{[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n][\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n]}} \qquad \underline{(2.23)}$$

เมื่อ x_i เป็นขนาดประจุในแต่ละเฟสทางด้านรูปคลื่นแรงดันบวก

y_i เป็นขนาดประจุในแต่ละเฟสทางด้านรูปคลื่นแรงดันลบ

n เป็นจำนวนของเฟสต่อครึ่งรูปคลื่น

3) The modified cross correlation factor (mcc)

$$mcc = Q \times cc \qquad \underline{(2.24)}$$

mcc แสดงถึงความแตกต่างระหว่างรูปแบบของประจุในรูปคลื่นบวกและลบ

4) ความเบ้เอียงของการกระจาย (Skewness)

Sk แสดงถึงความความเบ้เอียงของรูปแบบการกระจายเทียบกับการกระจายปกติทั้งใน $H_{qn}(\varphi)$ และ $H_n(\varphi)$ โดย ถ้าการกระจายสมมาตร Sk = 0,เบ้ไปทางซ้าย Sk >0 และถ้าเบ้ไปทางขวา Sk <0

$$Sk = \frac{\sum (x_i - \mu)^3 \times P_i}{\sigma^3} \qquad \underline{(2.25)}$$

เมื่อ X_i เป็นจำนวนของข้อมูล

P_i เป็นความน่าจะเป็นของการเกิดค่า Xi

μ เป็นค่าเฉลี่ยของการกระจาย

σ เป็นความแตกต่างของข้อมูล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

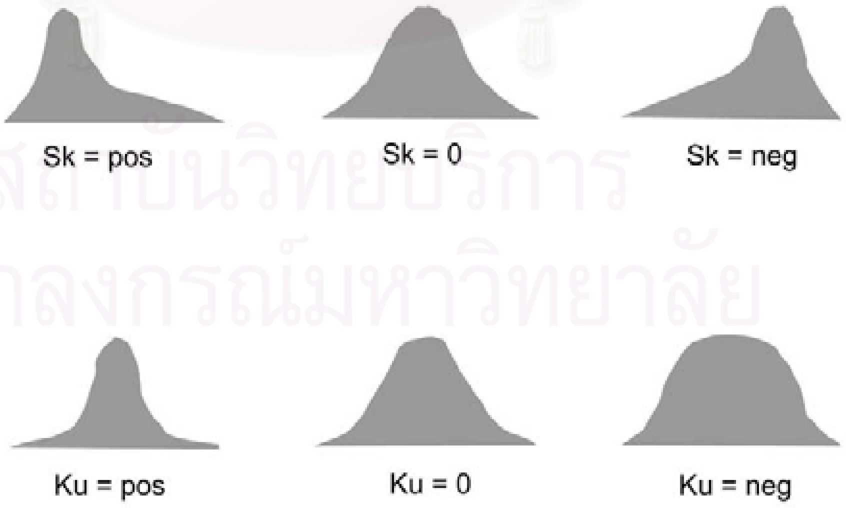
5) ความแหลมคม (Kurtusis)

Ku แสดงถึงความแหลมคมของการกระจายข้อมูลเทียบกับการกระจายปกติ โดยถ้าค่า Ku = 0 การกระจายจะมีลักษณะแหลมคมเหมือนการกระจายปกติ , Ku > 0 ลักษณะการกระจายจะมีความแหลมคมกว่าการกระจายปกติ และ Ku < 0 ลักษณะการกระจายจะมีความป้านกว่าการกระจายปกติ

$$Ku = \frac{\sum (x_i - \mu)^4 \times P_i}{\sigma^4} - 3 \qquad \underline{(2.26)}$$

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ทางสถิติของการกระจาย

Feature	Distribution				
	$H_{qmax}(\varphi)$	$H_{qn}(\varphi)$	$H_n(\varphi)$	$H(q)$	$H(p)$
Skewness+	−0.04	−0.04	0.18	1.24	1.75
Skewness-	0.27	0.24	0.34		
Kurtosis+	−0.88	−0.93	−0.94	0.70	2.65
Kurtosis-	−0.72	−0.80	−0.64		
Peaks+	4.00	3.00	2.00		
Peaks-	2.00	3.00	3.00		
Asymmetry	−0.55	−0.53	−0.02		
cc	0.50	0.49	0.36		
Phase		14.30			



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างของรูปแบบการกระจายเนื่องจากผลพารามิเตอร์ทางสถิติ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

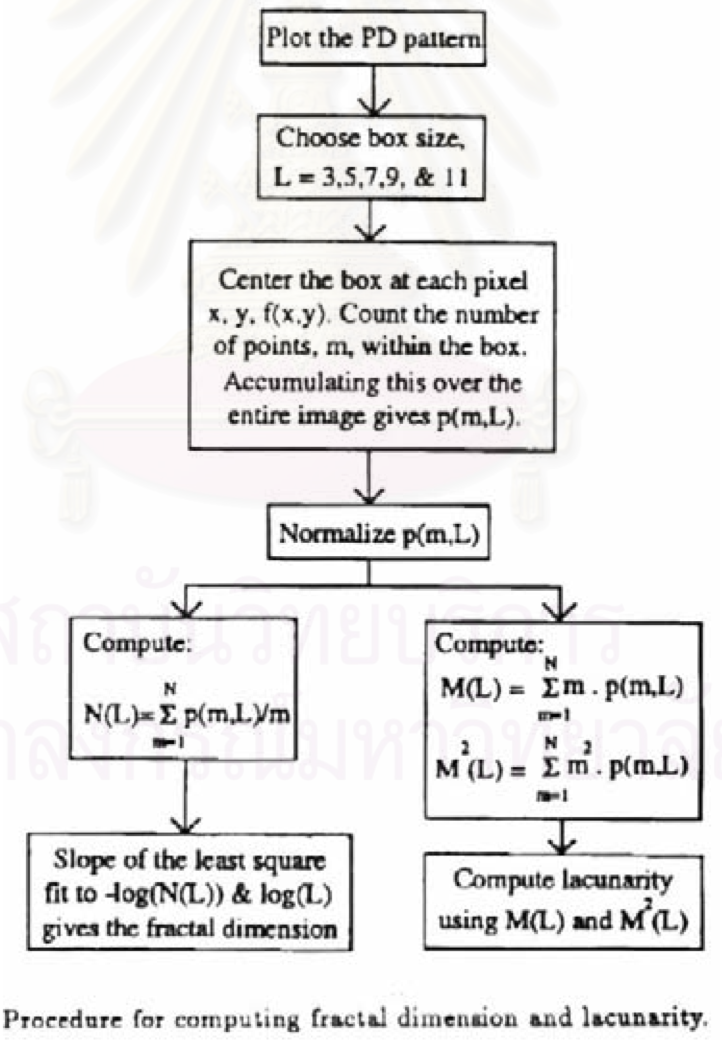
2.5.2.2.2 การคำนวณทางแฟรกตัล

1) หลังจากเก็บข้อมูลการกระจาย $H_n(\phi, q)$ จะกำหนดความยาวด้านของ "กล่อง" ซึ่งมีลักษณะเป็นลูกบาศก์ขนาด L^3 ที่จะใช้ในการหา p(m, L) ซึ่งหมายถึงความน่าจะเป็นของการที่จะมีจำนวนของจุดข้อมูลบนพื้นผิวการกระจาย m จุดอยู่ในกล่องที่แต่ละด้านยาวเท่ากับ L

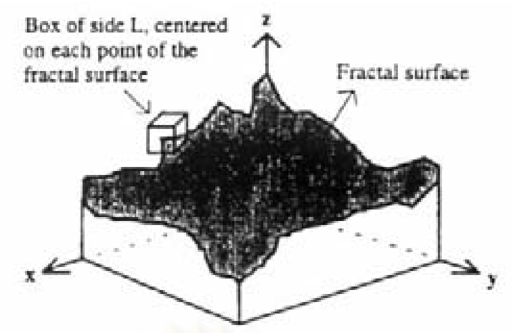
2) จัดวางตำแหน่งกล่อง ให้จุดศูนย์กลางของกล่องอยู่ที่จุดข้อมูลต่างๆ แล้วนับจำนวนของจุดข้อมูลที่อยู่ภายในกล่องดังรูปที่ 2.20 ทำซ้ำจนทั่วทุกจุดบนพื้นผิว จะได้การกระจายของจำนวนจุดข้อมูล m ที่อยู่ในกล่องซึ่งมีความยาวด้าน L ต่างๆกัน เมื่อนอร์มัลไลซ์การกระจายนี้จะได้ p(m, L) โดยที่

$$\sum_{m=1}^{N} p(m, L) = 1 \qquad (2.27)$$

เมื่อ N คือจำนวนจุดมากที่สุดในกล่องที่เป็นไปได้



รูปที่ 2.19 ขั้นตอนการคำนวณคุณลักษณะแฟรกตัล



รูปที่ 2.20 การหา p(m, L) โดยการนับจำนวนจุดที่อยู่ในกล่อง

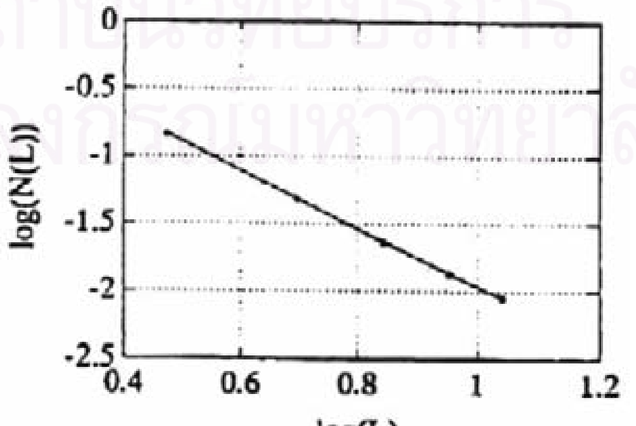
3) คำนวณ N(L) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนกล่องต่อจุดข้อมูลหนึ่งจุด หาได้จาก

$$N(L) = \sum_{m=1}^{N} \frac{1}{m} p(m, L) \quad (2.28)$$

4) เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญของพื้นผิวที่มีคุณสมบัติแฟรกตัลคือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนกล่องต่อจุดข้อมูลหนึ่งจุดจะแปรผันกับความยาวด้านของกล่องแบบเอกซ์โพเนนเชียล กล่าวคือ

$$N(L) = K \cdot L^{-D} \quad (2.29)$$

โดยคำอธิบายและการพิสูจน์แสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง[27] จากสมการ(2.28) และ(2.29) จะสามารถคำนวณมิติแฟรกตัลได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนนอน คือ log(L) กับ แกนตั้ง คือ log(N(L)) ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างlog(L) กับ log(N(L))

5) คำนวณ M(L) และ M^2(L) ซึ่งเป็นโมเมนต์อันดับที่ 1 และ 2 ของมวลแฟรกตัล[23] ค่าดังกล่าวเป็นฟังก์ชันของ L ซึ่งหาได้จาก

$$M(L) = \sum_{m=1}^{N} m \cdot p(m,L) \qquad (2.30)$$

$$M^2(L) = \sum_{m=1}^{N} m^2 \cdot p(m,L) \qquad (2.31)$$

6) คำนวณลาคิวนาริตี Λ โดยใช้ค่า M(L) และ M^2(L) ที่ได้ ดังนี้

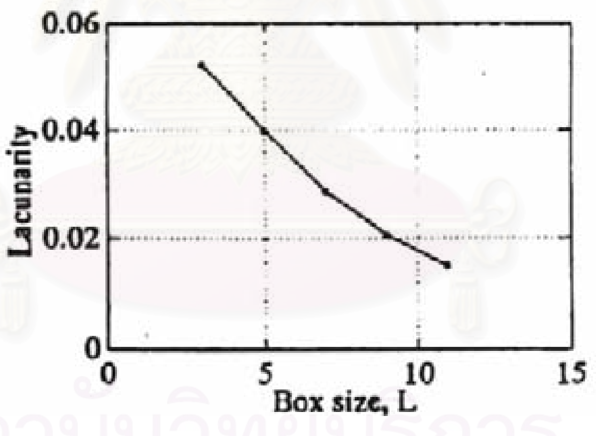
$$\Lambda = E\left[\left(\frac{M}{E(M)} - 1\right)^2\right] \qquad (2.32)$$

หรือ

$$\Lambda = \frac{M^2(L) - [M(L)^2]}{[M(L)^2]} \qquad (2.33)$$

โดยที่ E[.] คือ ค่าคาดหวัง (Expectation) ของข้อมูล

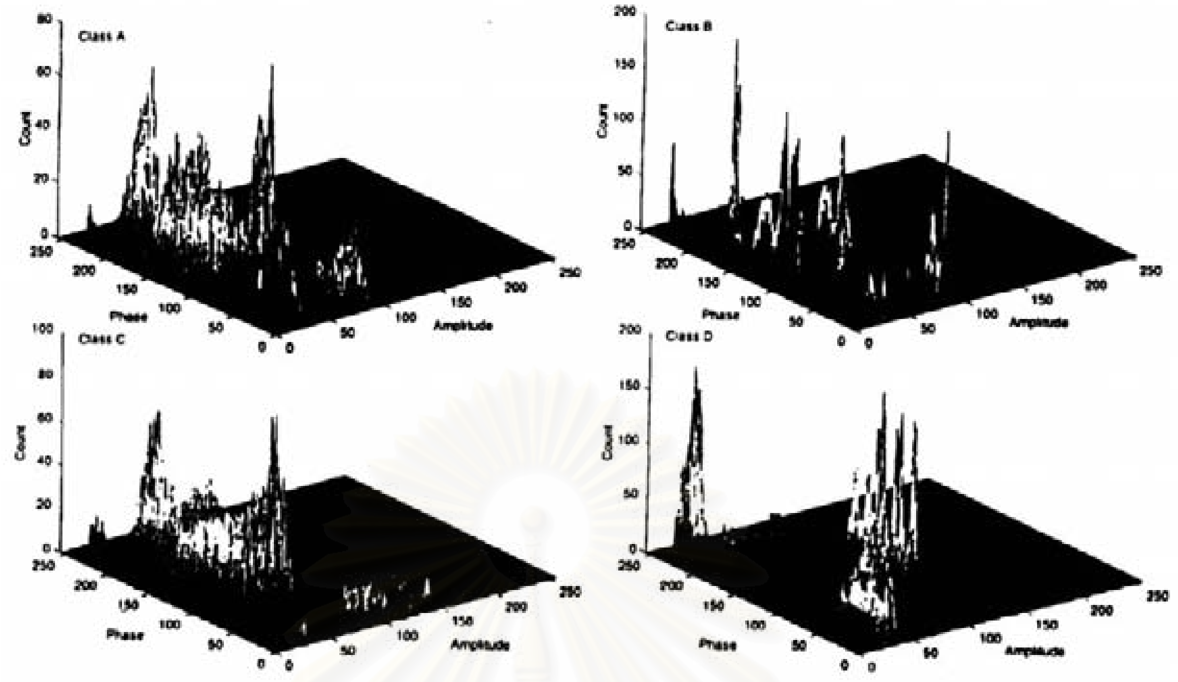
จากรูปที่ 2.22 จะเห็นว่า ลาคิวนาริตีที่คำนวณได้จะเป็นฟังก์ชันของ L



รูปที่ 2.22 กราฟระหว่างความยาวด้านของกล่อง L กับลาคิวนาริตี Λ

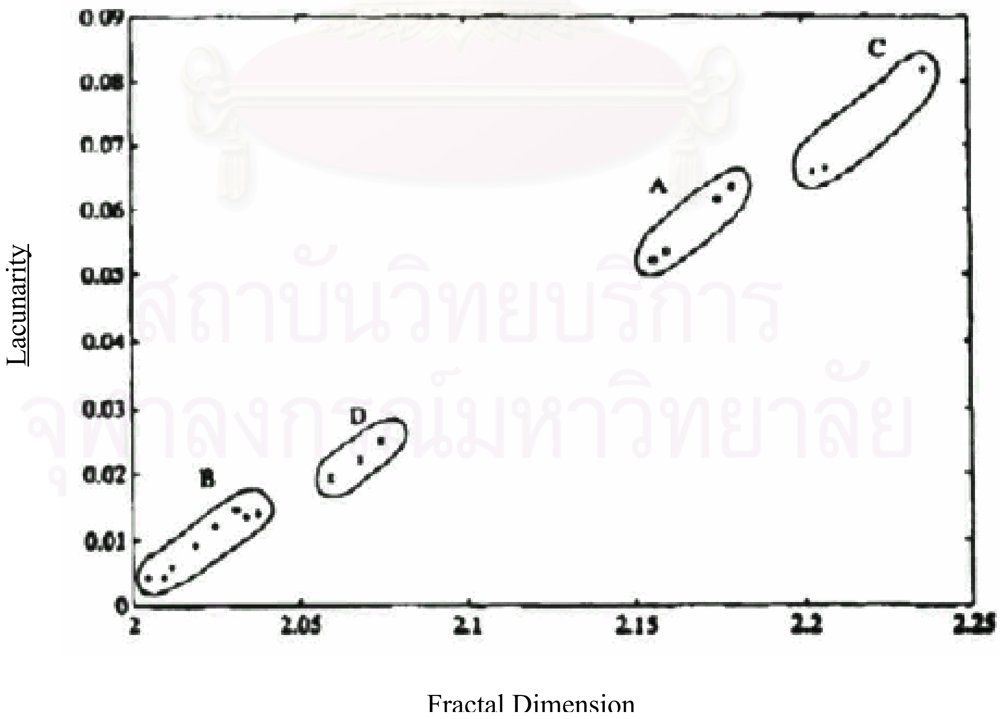
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการคำนวณมิติแฟรกตัล และลาคิวนาริตีนั้น สัญญาณ PD ที่นำมาคำนวณจะบันทึกไว้ในเมตริกซ์ขนาด 2 มิติที่วางตัวในแนวราบ โดยจัดเรียงข้อมูลตามมุมเฟสและขนาด ตามแนวแถว (row) และ หลัก(column) ตามลำดับ ส่วนแกนตั้งคือจำนวนครั้งของการเกิด PD ที่ขนาดและมุมเฟสนั้นๆ ซึ่งจะแสดงตัวอย่างรูปแบบการกระจายของ PD ในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การกระจายของ PDในรูปแบบต่างๆกัน

เราสามารถคำนวณคุณลักษณะแฟรกตัลจากรูปแบบการกระจายของ PD ที่ได้จากทั้ง 6 ขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งรูปแบบการกระจายที่แตกต่างกันจะให้ค่าคุณลักษณะแฟรกตัลที่แตกต่างกัน และรูปแบบการกระจายที่คล้ายกันจะเกาะกลุ่มกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.24

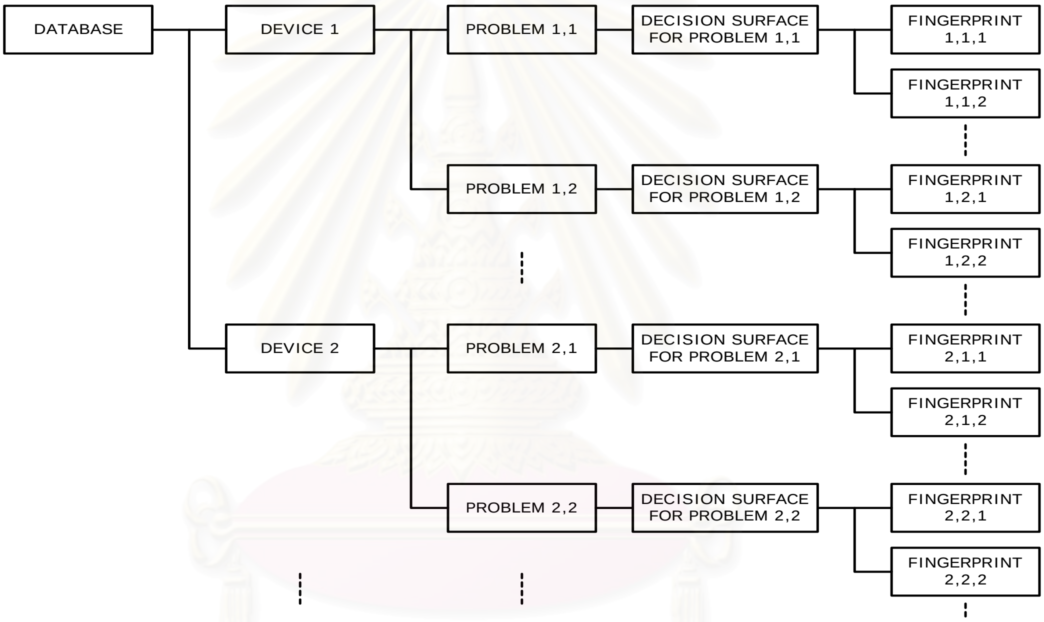


รูปที่ 2.24 ค่าของคุณลักษณะแฟรกตัลที่คำนวณได้จากการกระจาย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5.3 ฐานข้อมูลสำหรับการจำแนกรูปแบบ

ฐานข้อมูลที่นิยมใช้กันในการจำแนกรูปแบบ PD มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.25 โดยจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ระดับ ระดับล่างสุดประกอบด้วย รูปแบบเฉพาะ (Fingerprint) ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการรู้จำรูปแบบ PD ระดับต่อมาประกอบด้วยกลุ่มของรูปแบบเฉพาะของแต่ละสาเหตุ พร้อมด้วยขอบเขตหรือ กฏเกณฑ์ เพื่อการจำแนกปัญหาต่างๆที่เป็นไปได้สำหรับแต่ละสาเหตุของอุปกรณ์แต่ละชนิด และระดับบนสุดประกอบด้วยอุปกรณ์ชนิดต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง หรือ GIS เป็นต้น การจัดเก็บข้อมูลในลักษณะดังกล่าวเนื่องจากอุปกรณ์แต่ละชนิดจะเกิดปัญหาที่แตกต่างกัน ปัญหาที่เกิดกับอุปกรณ์ชนิดหนึ่งอาจไม่เกิดกับอุปกรณ์อื่นๆ ดังนั้นการจำแนกจะถูกต้องและรวดเร็วถ้าทำการคำนวณเพื่อจำแนกปัญหาเท่าที่เป็นไปได้เท่านั้น



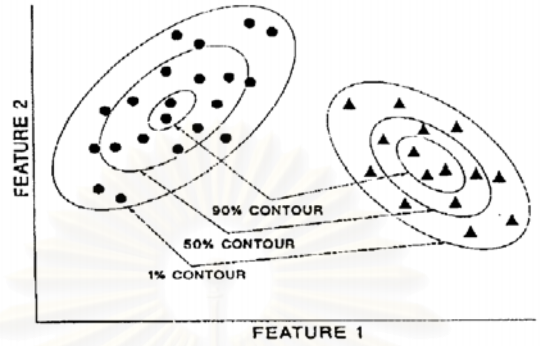
รูปที่ 2.25 โครงสร้างฐานข้อมูล

ในการทำฐานข้อมูลพื้นฐานคือ การจำลองรูปแบบเฉพาะของข้อบกพร่องในการเกิด PD โดยทำการจำลองสถานการณ์ต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นได้จริงในกรณีต่างๆ เช่น จำลองการเกิดโคโรนา การเกิดดีสชาร์จภายใน การเกิดดีสชาร์จตามผิว เป็นต้น แล้วทำการบันทึกคุณลักษณะของการเกิด PD แต่ละกรณีไว้ในฐานข้อมูล

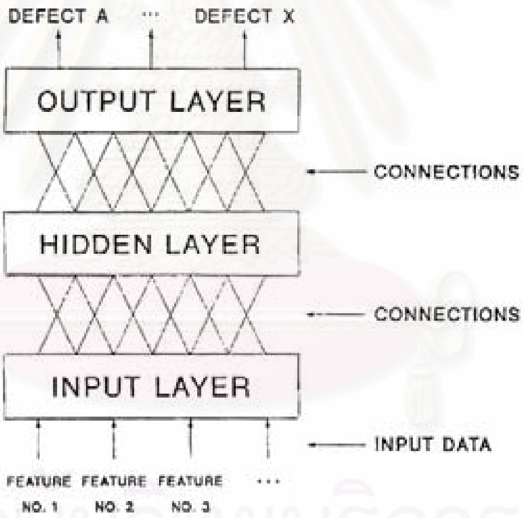
2.5.4 การจำแนกประเภท

วัตถุประสงค์ของการจำแนกประเภทคือ เพื่อระบุสาเหตุที่ทำให้เกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยการพิจารณาเปรียบเทียบคุณลักษณะที่คำนวณได้กับฐานข้อมูล PD ได้มีการนำวิธีการต่างๆมาใช้สร้างขอบเขตในการจำแนกประเภทหลายวิธี ตัวอย่างวิธีที่นิยมใช้ในการจำแนก

สาเหตุของ PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเช่น ตัวจำแนกแบบนิยม (Conventional classifier) ตัวจำแนกแบบโครงข่ายเชิงประสาท (Neural network) Fuzzy Logic และ เจนเนติกอัลกอริทึ่มเป็นต้น[10] ซึ่งจะกล่าวโดยระเอียดในบทต่อไปตัวอย่างของการจำแนกแบบนิยมที่ใช้ Centour score และตัวจำแนกที่ใช้โครงข่ายเชิงประสาทแสดงในรูปที่ 2.26 และรูปที่ 2.27 ตามลำดับ



รูปที่ 2.26 การจำแนกแบบนิยมที่ใช้ Centour score



รูปที่ 2.27 โครงสร้างของตัวจำแนกแบบโครงข่ายเชิงประสาท

ตัวจำแนกแบบนิยมมีหลายแบบเช่น Bayes classifier, Parzen classifier, Nearest neighbor classifier, Discriminant function classifier และ Centour score เป็นต้น มีหลักการร่วมกันดังนี้คือหลังจากที่มีการจัดกลุ่มให้กับข้อมูลคุณลักษณะที่ได้ จะทำการคำนวณค่าทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของกลุ่มข้อมูล จากนั้นจะคำนวณระยะห่างระหว่างพิกัดของข้อมูลที่ต้องการจำแนกสาเหตุ กับพิกัดซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มข้อมูลแต่ละกลุ่ม เนื่องจากวิธีนี้ต้องมีการกำหนดกลุ่มที่เหมาะสมให้กับแต่ละข้อมูลทุกตัว จึงไม่เกิดความผิดพลาดในการแบ่งกลุ่ม

จากตัวอย่างการจำแนกสาเหตุของ PD โดยใช้ Centour score ในตารางที่ 2.2[17] จะพบว่าได้ผลถูกต้องทุกกรณี แม้ว่าวิธีนี้จะมีปัญหาบ้างกับข้อมูลที่มีการกระจายแบบเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มย่อยหลายกลุ่ม แต่ก็สามารถแก้ปัญหาได้โดยการแบ่งกลุ่มข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อยๆที่มีการกระจายของข้อมูลแต่ละกลุ่มเป็นแบบปกติ ซึ่งพบว่าตัวจำแนกแบบนิยมให้ผลดีในการจำแนกทั้งปัญหาที่สร้างขึ้นเพื่อการทดสอบ และปัญหาที่เกิดจริงในอุปกรณ์
ไฟฟ้าแรงสูง

ตารางที่ 2.2 ผลการจำแนกโดยใช้ Centour score

Centour Score

Surface Discharge in air	99%
Narrow cavity	15%
Surface Discharge in SF_6	3%

ตัวจำแนกแบบโครงข่ายเชิงประสาทมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็มีวิธีการทำงานแตกต่างกันไป เช่น ชนิด Back-propagation (BP) , Multi-Layered Perceptron(MLP) , Kohenen Self-Organizing map(SOM) และ Learning Vector Quantization(LVQ) ซึ่งประกอบด้วยระดับชั้นต่างๆ (Layer) ได้แก่ Input Layer Hidden Layer และ Output Layer ซึ่งแต่ละชั้นจะมีกิ่งเชื่อมโยง (Connection) ระหว่างชั้น การจัดกลุ่มข้อมูลจะใช้ระนาบหลายมิติ (Hyperplane) เป็นตัวแบ่ง โดยตำแหน่งและมุมเอียงของระนาบหลายมิติ รวมทั้งตรรกะที่กำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับกลุ่ม ข้อมูลจะขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ของกิ่งเชื่อมโยงแต่ละกิ่ง วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องจัดกลุ่มให้กับข้อมูล เนื่องจากโครงข่ายเชิงประสาทมีการเรียนรู้โดยการปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่กิ่งเชื่อมโยงต่างๆ ได้เอง แต่ก็มีข้อจำกัดคือ จำนวนของโหนด (Node) ในแต่ละชั้นที่น้อยเกินไป จะทำให้เงื่อนไขของการจัดกลุ่มข้อมูลไม่เพียงพอ ส่วนจำนวนโหนดที่เหมาะสมไม่สามารถหาได้ง่ายนัก เนื่องจากขึ้นกับลักษณะการกระจายของกลุ่มข้อมูล และพบว่าแม้จำนวนของโหนดจะเพียงพอ โอกาสที่ตำแหน่งของระนาบหลายมิติที่สร้างขึ้นจะอยู่ไกลจากกลุ่มข้อมูลจริงก็ยังมีอยู่ นอกจากนั้นแล้ววิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณนานมากเมื่อเทียบกับการจำแนกแบบอื่นๆ[17] ซึ่งพบว่าการใช้โครงข่ายเชิงประสาทชนิด Back-propagation(BP) สามารถใช้ได้ดีในการจำแนกลักษณะการเกิด PD แต่จะมีปัญหาบางประการสำหรับกลุ่มข้อมูลบางกลุ่มที่ไกลออกไปจากกลุ่มในฐานข้อมูลแต่ในปัจจุบันสามารถแก้ไขโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึมร่วม เช่น การนำเจนเนติกมาใช้ในการหาจำนวนโหนดที่เหมาะสม [36] ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้วิธีทางนิวรอลเน็ทเวิร์กโดยใช้ เจนเนติกอัลกอริทึม โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีในหัวข้อถัดไป

2.6 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับนิวรอลเน็ตเวิร์ค

ปัจจุบันวิศวกรและนักวิทยาศาสตร์แขนงต่างๆ ได้พยายามที่จะพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ให้มีความฉลาดยิ่งขึ้น โดยพยายามให้เครื่องคอมพิวเตอร์มีการเรียนรู้และสามารถตัดสินใจได้เองหรือส่วนช่วยในการตัดสินใจข้างต้นๆได้ ระบบแบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาทหรือระบบแบบจำลองนิวรอลเน็ตเวิร์ค(Artificial neural network system: ANNS) เป็นตัวอย่างหนึ่งที่จะทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ต่างๆมีศักยภาพเพิ่มขึ้น

การทำงานของระบบ ANNS นั้นจะถอดแบบมาจากการทำงานระบบสมองของมนุษย์ คือจะส่งผ่านข้อมูลกันโดยการเชื่อมต่อของโหนดกันเป็นโครงข่ายร่างแห และมีการทำงานในลักษณะขนาน ซึ่งในหัวข้อถัดไปจะอธิบายลักษณะการทำงานของระบบเซลล์ประสาทมนุษย์เพื่อเทียบเคียงการทำงานและทำให้สามารถเข้าใจการทำงานของ ANNS ได้ดีขึ้น[29]

2.6.1 ความหมายของนิวรอลเน็ทเวิร์ค

นิวรอลเน็ทเวิร์ค หรือที่เรียกว่า นิวรอลเน็ทเวิร์คเทียม (Artificial neural network) เป็นระบบการประมวลผลที่เลียนแบบลักษณะทั่วไปทางชีววิทยาของระบบสมองดังรูปที่ นิวรอลเน็ทเวิร์คเทียมถูกพัฒนาขึ้นตามรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการจดจำของมนุษย์โดยมีสมมติฐานว่า

1) การประมวลผลข้อมูลต่างๆเกิดที่ส่วนประกอบเล็กๆ จำนวนมากที่เรียกว่านิวรอล (Neuron)

2) การส่งสัญญาณต่างๆระหว่างนิวรอลใช้เชื่อมต่อระหว่างนิวรอลที่เรียกว่า คอนเนกชันลิงค์ (Connection link)

3) แต่ละการเชื่อมต่อดังกล่าวนั้นจะมีค่าน้ำหนักที่ต่างกัน เพื่อบอกว่านิวรอลได้รับอิทธิพลลักษณะใดจากนิวรอลอื่น

4) แต่ละนิวรอลจะได้รับข้อมูลจากนิวรอลอื่น โดยการผ่านแอกติเวชั่นฟังก์ชั่น (Activation function)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.28 โครงสร้างของเซลล์ประสาทและการส่งสัญญาณกระแสประสาท

นิวรอลเน็ทเวิร์คประกอบด้วยกลุ่มของหน่วยประมวลผล (Processing element) ที่เรียกกันหลายอย่างว่า นิวรอล หรือหน่วย (Unit) หรือเซล (Cell) หรือโหนด (Node) แต่ละนิวรอลเชื่อมต่อด้วยค่าน้ำหนัก และค่าน้ำหนักชุดนั้นเป็นตัวแสดงถึงความรู้ที่จะนำไปใช้ในการแก้ไขหลายรูปแบบซึ่งจะกล่าวต่อไป

ลักษณะของหน่วยประมวลผลย่อยของนิวรอลเน็ทเวิร์ค อาจจะอธิบายได้ตามคุณสมบัติทางชีววิทยาของนิวรอลได้ดังนี้คือ หน่วยประมวลผลย่อยจะได้รับสัญญาณจากภายนอกมากมายแต่ละสัญญาณจะถูกปรับปรุงด้วยค่าน้ำหนักที่ได้รับจากหน่วยประมวลผลอื่นๆ และทำการรวบรวมสัญญาณ เมื่อสภาพแวดล้อมเหมาะสมก็จะส่งสัญญาณไปยังหน่วยประมวลผลย่อยอื่นๆถัดไป

ชั้น (Layer) ในนิวรอลเน็ทเวิร์ค คือกลุ่มของหน่วยประมวลผลย่อยกลุ่มหนึ่ง ที่ทำการคำนวณแล้วส่งผลลัพธ์ไปยังชั้นถัดไป จนกระทั่งถึงชั้นสุดท้ายซึ่งอาจมีเพียงหนึ่งหน่วยประมวลผลหรือมากกว่าจะเป็นผลลัพธ์ของเน็ทเวิร์ค เรียกชั้นแรกนี้ว่าเป็นชั้นนำเข้าข้อมูล (Input layer) และชั้นสุดท้ายเป็นชั้นผลลัพธ์ (Output layer) และชั้นระหว่างชั้นแรกและชั้นสุดท้าย คือ ชั้นแอบแฝง (Hidden layer) ซึ่งชั้นแอบแฝงนี้อาจมีมากกว่า 1 ชั้นขึ้นไปก็ได้

ลักษณะที่สำคัญและเหมือนกันอย่างหนึ่งระหว่างนิวรอลเน็ทเวิร์คทางชีววิทยาและนิวรอลเน็ทเวิร์คเทียมคือ (Fault tolerance) ซึ่งนิวรอลเน็ทเวิร์คทางชีววิทยาจะมีลักษณะ 2 แบบดังนี้คือ

1) สามารถจดจำสัญญาณนำเข้า (Input signal) ต่างๆ ที่แตกต่างจากที่เคยเจอมาก่อน เช่น จดจำบุคคลที่ไม่ได้พบมานาน

2) สามารถเรียนรู้ต่อไปในขณะที่มีบางเซลล์ตายไป เพราะสมองประกอบด้วยนิวรอลมากกว่าพันล้านเซลล์ แม้บางเซลล์ตายไปก็จะมีเซลล์อื่นที่จะถูกสอนขึ้นมาทำหน้าที่แทน

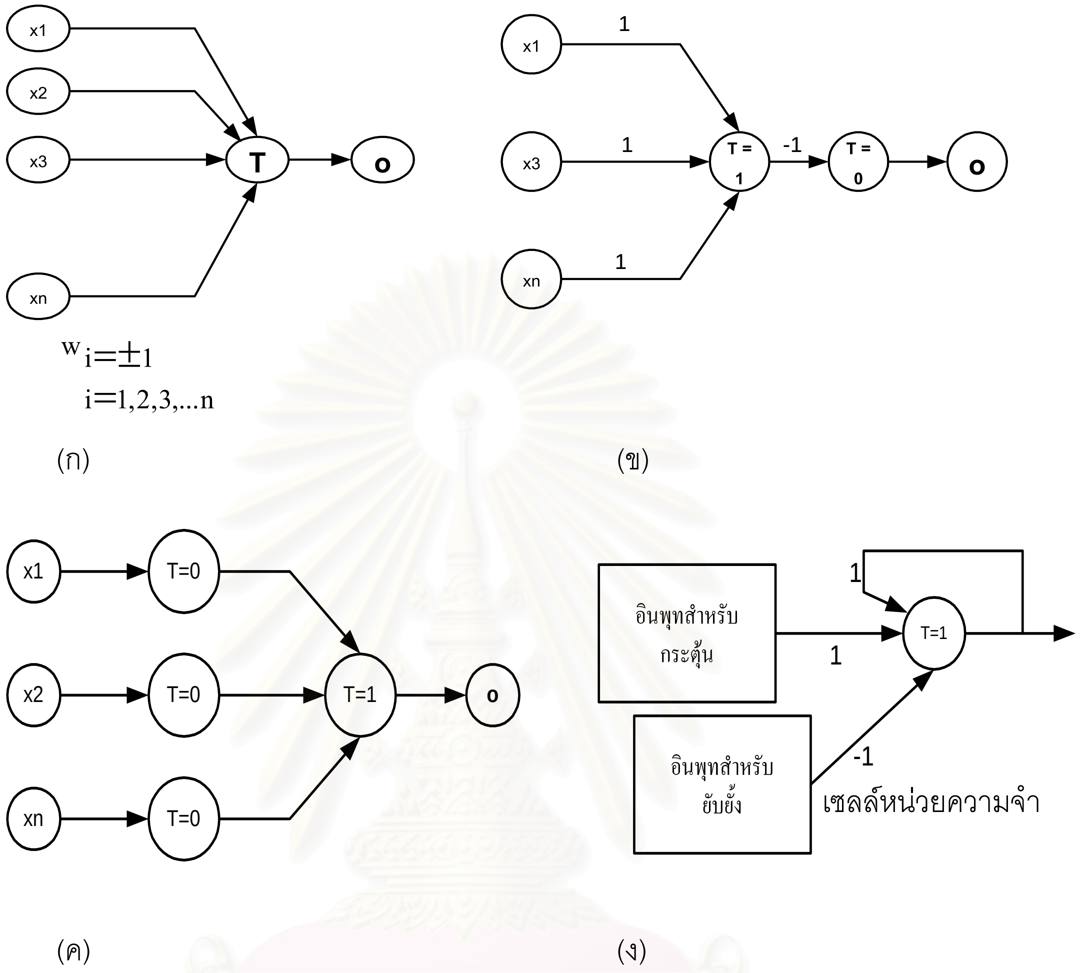
2.6.2 แบบจำลองโครงข่ายเซลล์ประสาท

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาถึงระบบการทำงานของแบบจำลองระบบประสาทที่จะใช้ในการประมวลผลโดยเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้ในการควบคุม (รักษาสมดุล) ระบบต่างๆแบบจำลองที่จะกล่าวนำเป็นแบบแรกในที่นี้เสนอโดย McCulloch และ Pitts ในปี ค.ศ. 1943 ซึ่งแบบจำลองของเซลล์ประสาทแสดงในรูปที่ 2.29 ก) อินพุท x_i สำหรับ I = 1,2,3,.....,n จะมีค่าเป็น {0,1} ซึ่งจะขึ้นอยู่กับสัญญาณอินพุทสัญญาณจากเซลล์อื่นในขณะนั้นว่าจะมีหรือไม่มีสัญญาณ ส่วนสัญญาณที่จะส่งต่อไปยังเซลล์ถัดไปซึ่งเป็นเซลล์สำแดงผล(เซลล์ของผลลัพธ์ จะแทนด้วย o) และ Firing Level ของแบบจำลองนี้ถูกกำหนดโดย[30]

$$0^{k-1} = \begin{cases} 1 & ;\text{ถ้า} \quad \sum_{i=1}^{n} w_i x_i^k \geq T \\ 0 & ;\text{ถ้า} \quad \sum_{i=1}^{n} w_i x_i^k < T \end{cases} \tag{2.34}$$

โดยที่ k = 0,1,2,... เป็นช่วงเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง w_i เป็นค่าน้ำหนักที่เชื่อมต่อกับอินพุทที่ i ซึ่งถ้า w_i = +1 แสดงสภาวะการกระตุ้นของซิแนปส์ และถ้า w_i = -1 ซิแนปส์จะมีการยับยั้งการส่งผ่านสัญญาณและ T เป็นค่าความต่างศักย์เทรชโฮลด์หรือขีดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งถ้าผลรวมของผลคูณระหว่างค่าน้ำหนักกับสัญญาณอินพุทจะต้องมากกว่า T จึงจะมีสัญญาณผ่านไปยังเซลล์อื่นได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

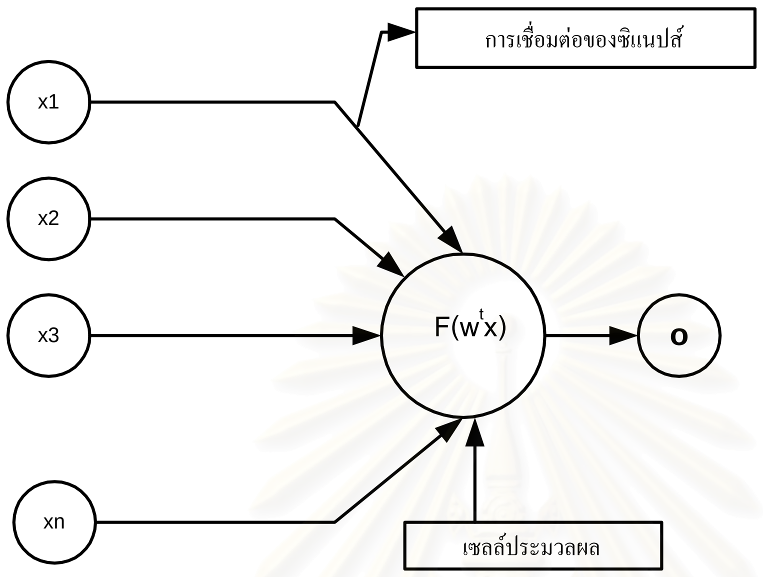


รูปที่ 2.29 แบบจำลองเซลล์ประสาทของ McCulloch-Pitts และ โครงข่ายลอจิกพื้นฐาน
(ก) ไดอะแกรมแบบจำลอง (ข) เกต NOR (ค) เกต NAND (ง) เซลล์หน่วยความจำ

แบบจำลองของ McCulloch-Pitts แม้จะเป็นโครงข่ายแบบง่ายๆ แต่แบบจำลองนี้สามารถใช้แทนตัวดำเนินการทางลอจิกได้ คือ ตัวดำเนินการ NOT, OR และ AND เมื่อเรากำหนดค่าน้ำหนักและค่าเทรชโฮลด์ที่เหมาะสมให้กับโครงข่าย ในรูปที่ 2.29 ข) และ 2.29 ค) เป็นแบบจำลองที่ใช้แทนตัวดำเนินการเป็น Gates ที่ใช้ในพีชคณิตบูลีน คือ NOR และ NAND ซึ่งจะมีอินพุทสามตัว และในรูปที่ 2.29 ง) เป็นเซลล์ที่ใช้แทนหน่วยความจำซึ่งเป็นโครงข่ายที่มีการป้อนกลับจากเอาท์พุท

Artificial Neural network ANN เป็นแบบจำลองที่ใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาแบบจำลองและระบบการเรียนรู้ชนิดต่างๆ ซึ่งโครงข่ายนี้จะคล้ายกับแบบจำลองของ McCulloch-Pitts ส่วนที่

ต่างกันคือ ค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง เนื่องจากค่าตัวแปรในแบบจำลอง ANN เป็นเลขจำนวนจริง และค่าน้ำหนักได้จากการเรียนรู้ ซึ่งแบบจำลองนี้แสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 โครงข่ายเชื่อมต่อแบบจำลองเซลล์ประสาท

จากรูปที่ 2.30 แสดงโครงข่ายการเชื่อมต่อของแบบจำลองเซลล์ประสาทที่สามารถสอนให้โครงข่ายตัดสินใจได้ โดยมี x_i เป็นสัญญาณอินพุท และ w_i เป็นค่าน้ำหนักที่ได้จากการสอนโครงข่ายและแต่ละโหนดในโครงข่ายจะใช้แทนเซลล์ ซึ่งบางครั้งจะเรียกว่าหน่วยประมวลผลพื้นฐาน(Process element unit) และมีซิแนปส์ซึ่งจะเชื่อมต่อโหนดเพื่อใช้ส่งสัญญาณ การกระตุ้นหรือยับยั้งสัญญาณจะขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนัก w_i และสำหรับสัญญาณเอาท์พุทสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$o = f(W^t X) \qquad (2.35)$$

โดยที่ W เป็นเวกเตอร์ของค่าน้ำหนักซึ่งสามารถกำหนดได้ดังนี้

$$W = [w_1, w_2, w_3 \ldots, w_n]$$

และ X เป็นเวกเตอร์อินพุท

$$X = [x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n]^t$$

เมื่อ t เป็นตัวดำเนินการทรานสโพสต์ของเมตริกซ์ฟังก์ชั่นกำหนดสัญญาณเอาท์พุทในสมการที่ (2.35) เรียกว่าแอกติเวชั่นฟังก์ชั่น (Activation function) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับกราฟของศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน แอกติเวชั่นฟังก์ชั่น มีด้วยกันสองชนิดคือ ชนิดที่เป็นเชิงเส้นและชนิดที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังจะกล่าวต่อไป

2.6.3 การเรียนรู้ของโครงข่าย

การเรียนรู้ของ ANNS จะมีประสิทธิภาพเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับค่าน้ำหนักของโครงข่าย ซึ่งการสอน (Training) โครงข่ายก็คือการหาค่าน้ำหนักที่เหมาะสมให้แก่โครงข่ายนั้นๆ วิธีการสอน ANNS มีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ[30]

1. การสอนแบบชี้นำ(Supervised Learning) การสอนโดยวิธีนี้จะกำหนดเซตของการสอนให้กับโครงข่ายซึ่งเซตนี้จะประกอบด้วย อินพุทและเอาท์พุทที่ต้องการ (Output Desired) เมื่อป้อนอินพุทให้กับโครงข่ายๆ ก็จะทำการประมวลจนได้คำตอบและค่าน้ำหนักออกมาชุดหนึ่ง สำหรับคำตอบที่ได้จากโครงข่ายจะถูกนำมาคำนวณค่าความผิดพลาดโดยวัดเป็นระยะทางว่ามีความห่างจากคำตอบที่ต้องการของอินพุทในชุดเดียวกันมากน้อยเพียงใด ถ้ายังมีความผิดพลาดสูงอยู่ก็จะทำการปรับค่าน้ำหนัก และทำการสอนต่อไปจนกว่าค่าความผิดพลาดระหว่างคำตอบของโครงข่ายกับเอาท์พุทที่ต้องการมีค่าน้อยพอที่จะยอมรับได้ จึงจะหยุดการสอนและค่าน้ำหนักที่ได้ก็จะเป็นเหมือนฟังก์ชั่นในการแปลงข้อมูล

2. การสอนแบบไม่มีการชี้นำ (Unsupervised Learning) การสอนโดยวิธีนี้จะป้อนอินพุทเข้าสู่โครงข่าย และภายในโครงข่ายจะมีเอาท์พุทโหนดหลายโหนดด้วยกัน โดยแต่ละโหนดจะแทนกลุ่มของข้อมูลที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน เมื่อป้อนอินพุทเข้าสู่โครงข่ายๆจะคำนวณค่าความสัมพัทธ์ที่มีอยู่ภายในเซตของอินพุทโดยอาศัยค่าน้ำหนักเป็นตัวแยกความแตกต่างของอินพุท ไปเก็บไว้ในโหนดเอาท์พุทของโครงข่าย การสอนโดยวิธีจะไม่สามารถระบุได้เอาท์พุทโหนดใดเป็นของข้อมูลกลุ่มไหน ผู้ใช้จะต้องกำหนดเอง ซึ่งต่างจากการสอนแบบชี้นำที่โครงข่ายสามารถระบุกลุ่มของเอาท์พุทได้อย่างแน่นอน

2.6.4 สถาปัตยกรรมของนิวรอลเน็ทเวิร์ค

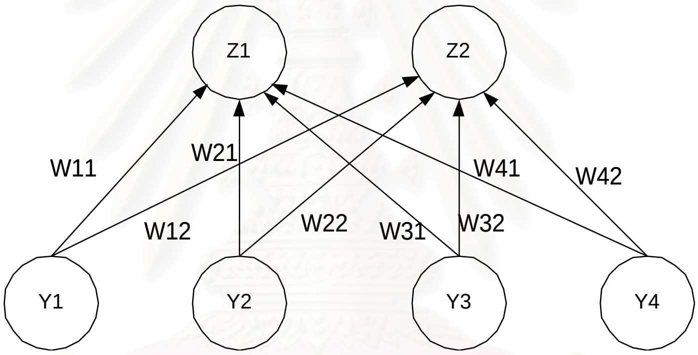
สามารถแบ่งประเภทนิวรอลเน็ทเวิร์คตามจำนวนชั้นของข่ายงานแบบกว้างๆได้ 2 แบบคือ ข่ายงานชั้นเดียว (Single layer) และข่ายงานหลายชั้น (Multi-layer network) ในบางเอกสารกล่าวว่าข่ายงาน 2 ชั้น เป็นประเภทที่ไม่มีชั้นแอบแฝง คือจะมีชั้นนำเข้าข้อมูลและชั้นผลลัพธ์เท่านั้น แต่ในบางเอกสารไม่นับชั้นนำเข้าข้อมูลเนื่องจากที่ชั้นนี้จะไม่มีการประมวลผล จะนับเฉพาะชั้นที่มีการประมวลผลเท่านั้น ดังนั้นถ้าเป็นข่ายงานสองชั้นจะมีชั้นแอบแฝง 1 ชั้น หรือการนับจำนวนชั้นจะนับจำนวนชั้นของค่าน้ำหนักที่เชื่อมต่อระหว่างนิวรอลเท่านั้น

รูปแบบส่วนใหญ่ของงานที่พัฒนาขึ้นจากนิวรอลเน็ทเวิร์คจะเป็นข่ายงาน 2 ชั้น และมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่เป็น 1 ชั้น และยังพอมีบางกรณีที่เป็นข่ายงาน 3 ชั้นหรือมากกว่า

2.6.4.1 ข่ายงานชั้นเดียว

นิวรอลเน็ทเวิร์คที่เป็นแบบข่ายงานชั้นเดียว จะมีการรับสัญญาณเข้า และประมวลผลที่ชั้นนั้น รวมทั้งการหาผลลัพธ์ก็ทำที่ชั้นนั้นด้วย ข่ายงานรูปแบบนี้ จะมีความสามารถด้านการติดตั้งวงจรไอซี (Integrated circuit implement) หรือการควบคุมแนวทางประกอบชิ้นส่วน (Assembly line control) และที่ใช้กันทั่วไป คือการจดจำรูปแบบ (Pattern recognition)

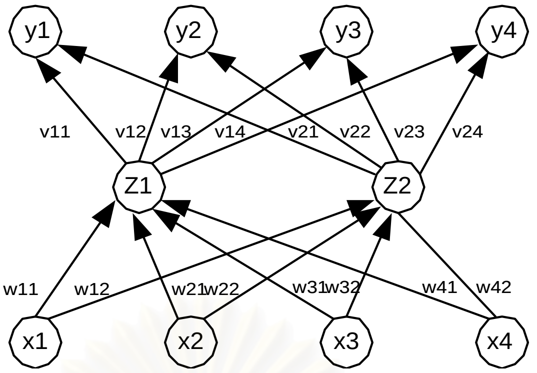
ตัวอย่างของข่ายงานชั้นเดียว คือ เพอเซปทรอนแบบง่าย (Simple perceptron) และฮอปฟิวเน็ทเวิร์ค (Hopfield network) เพอเซปทรอนแบบง่าย จะติดต่อกันระหว่างนิวรอลคนละชั้นกัน ชั้นนำเข้าข้อมูลจะเก็บนิวรอลที่เป็นข้อมูลนำเข้า ชั้นถัดไปเก็บนิวรอลที่เป็นข้อมูลผลลัพธ์ จะไม่มีการเชื่อมติดกันระหว่างนิวรอลในชั้นเดียวกัน ดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงตัวอย่างเพอเซปทรอนอย่างง่าย

2.6.4.2 ข่ายงานหลายชั้น

เป็นข่ายงานที่มีชั้นแอบแฝง ตั้งแต่ 1 ชั้นขึ้นไป ในกรณีของข่ายงานชั้นเดียวสามารถแก้ปัญหาง่ายๆได้ แต่กรณีปัญหาที่ซับซ้อนจะไม่สามารถแก้ปัญหาด้วยข่ายงานชั้นเดียวได้ การแก้ปัญหานี้ต้องใช้ข่ายงานสองชั้นเป็นอย่างน้อย เช่น งานประเภทจดจำลายมือ มีความจำเป็นต้องใช้ข่ายงานหลายชั้น ตัวอย่างของข่ายงานสองชั้น คือ แบกพรอเพเกชั่นอย่างง่าย (Simple backpropagation) ดังรูปที่ 2.32 และ บอลทซแมน แมชชีน (Boltzman machine) เป็นต้น



รูปที่ 2.32 แบ๊กพรอเพเกชันที่มี 1 ชั้นแอบแฝง

2.6.5 แอคติเวชั่นฟังก์ชั่น (Activation function)

ลักษณะสำคัญที่ใช้กำหนดวิธีการประมวลผลคือ แอคติเวชันฟังก์ชั่น และรูปแบบการติดต่อระหว่างนิวรอลที่ทำการรับส่งสัญญาณต่าง ๆ ปกติในแต่ละชั้น มักจะใช้แอคติเวชันฟังก์ชั่นเดียวกัน และรูปแบบการติดต่อระหว่างนิวรอลก็เป็นรูปแบบเดียวกัน เช่น ในหลาย ๆ ประเภทของนิวรอลเนตเวิร์กจะมีลักษณะการติดต่อระหว่างนิวรอลแบบถึงกันหมด (Fully connected)

แอคติเวชันฟังก์ชั่น เป็นหลักการทำงานพื้นฐานของนิวรอลเนตเวิร์ก ที่เกี่ยวกับการรวบรวมค่าน้ำหนักและข้อมูลนำเข้าต่าง ๆ แล้วทำการปรับปรุงเพื่อส่งออกไปให้กับนิวรอลอื่น ผลลัพธ์ของทุกนิวรอลก่อนที่จะส่งไปยังนิวรอลถัดไป จะผ่านฟังก์ชั่นนี้และจะทำหน้าที่ลดขนาดของผลลัพธ์ เพื่อทำให้ผลลัพธ์มีความหมายสำหรับปัญหา ฟังก์ชั่นที่ใช้กันบ่อย คือ ฟังก์ชั่นซิกมอยด์ ฟังก์ชั่นขั้นบันได (Step function) , ฟังก์ชั่นลาดเอียง (Ramp function) และฟังก์ชั่นเส้นตรง(Linear function)

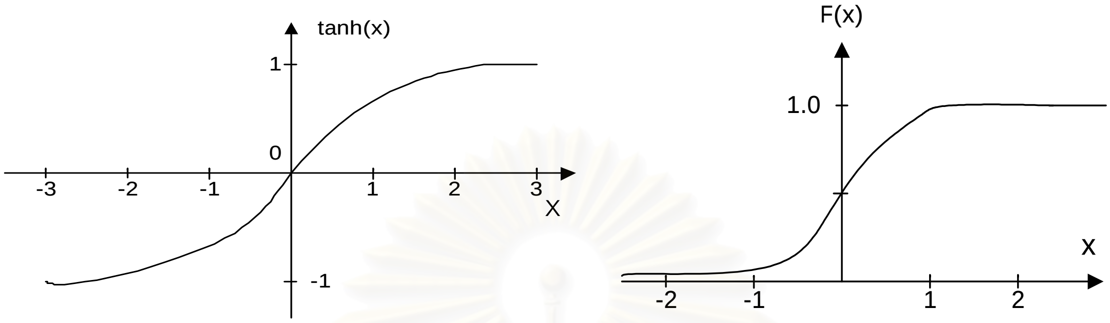
1) ฟังก์ชั่นซิกมอยด์ จะทำให้ผลลัพท์จากแอคติเวชั่นมีค่าระหว่าง [0,1]   จะเห็นว่าจะมีมากกว่า 1   ฟังก์ชั่นที่ใช้ชื่อซิกมอยด์เช่นกัน ฟังก์ชั่นเหล่านั้นจะแตกต่างกันที่สูตรและขนาดของช่วงและทุกฟังก์ชั่นจะสามารถสร้างกราฟที่มีหน้าตาคล้ายตัว S   เช่น ฟังก์ชั่นไฮเปอร์บอลิคแทนเจนท์ (Hyperbolic tangent function) และ ฟังก์ชั่นโลจิสติก (logistic function)

กรณี ฟังก์ชั่นไฮเปอร์บอลิคแทนเจนท์ จะมีสูตรตาม (2.36) จะทำให้ค่าผลลัพธ์มีค่าอยู่ในช่วง –1 และ 1 สามารถสร้างกราฟได้ตามรูป 2.33ก)

$$F(x) = \tanh(x) = (e^{x} - e^{-x}) / (e^{x} + e^{-x}) \quad (2.36)$$

กรณีฟังก์ชั่นโลจิสติค จะมีสูตรตาม (2.37) จะทำให้ค่าผลลัพธ์มีค่าอยู่ในช่วง 0 และ 1 โดยจะสามารถสร้างกราฟได้ตามรูป 2.33ข)

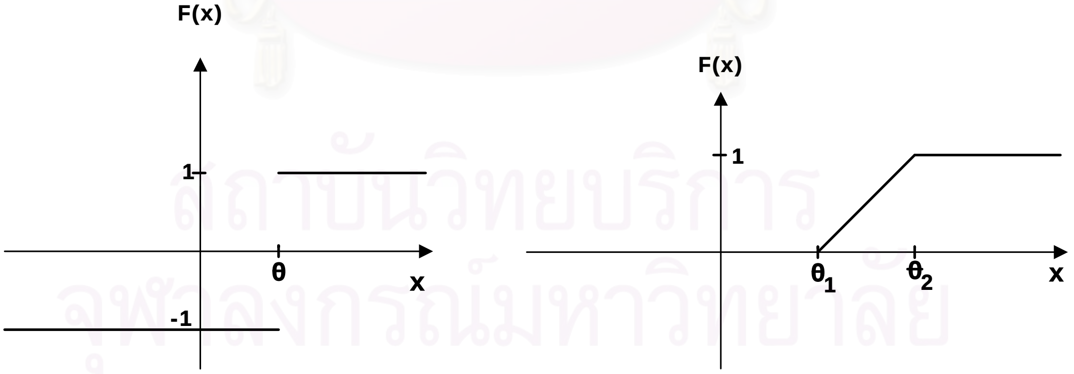
$$F(x) = 1 / (1 + e^{-x}) \qquad (2.37)$$



ก) แสดงฟังก์ชั่นไฮเปอร์บอลิคแทนเจนท์ ข) แสดงฟังก์ชั่นโลจิสติค

รูปที่ 2.33 แสดงฟังก์ชั่นซิกมอยด์

2) ฟังก์ชั่นขั้นบันได เป็นฟังก์ชั่นที่ใช้กันบ่อย มีลักษณะคล้ายขั้นบันได มีค่าเริ่มต้นที่ 0 และมีค่าเป็น 0 เมื่อฟังก์ชั่นนั้นอยู่ทางซ้ายของค่าขีดแบ่ง (θ) และจะกระโดดเป็น 1 เมื่ออยู่ทางขวาของค่าขีดแบ่งและมีค่าเป็น 1 ต่อไปถ้ายังอยู่ทางขวา นอกจาก 0 และ 1 แล้วยังสามารถใช้ค่าอื่นที่จะเป็นช่วงของฟังก์ชั่นได้ ตามรูป 2.34ก)



ก) แสดงฟังก์ชั่นขั้นบันได ข) แสดงฟังก์ชั่นลาดเอียง

รูปที่ 2.34 แสดงฟังก์ชั่นขั้นบันได และฟังก์ชั่นลาดเอียง

3) ฟังก์ชั่นลาดเอียง จากฟังก์ชั่นขั้นบันไดที่ค่ากระโดดจาก 0 เป็น 1 ได้เลย ก็เปลี่ยนรูปแบบเป็นเส้นตรงคล้ายทางลาดแทน ดังนั้นค่าเปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 จะได้กราฟดังรูป 2.34ข)

4) ฟังก์ชั่นเส้นตรง จะมีรูปแบบดังนี้

$$F(x) = \alpha x + \beta \tag{2.38}$$

ถ้า α เป็น 1 แล้ว ฟังก์ชั่นขีดแบ่งนี้มีค่าเป็นการเพิ่มค่าความเบี่ยงเบน(β) เท่านั้น

แอคติเวชันฟังก์ชั่นสำหรับแบ็กพรอเพเกชันจะมีลักษณะสำคัญหลายประการ คือ จะต้องเป็นแบบต่อเนื่อง และมีลักษณะการหาค่าอนุพันธ์ และต้องการสูตรการคำนวณที่ง่ายมีประสิทธิภาพ และสามารถหาค่าผลลัพธ์ที่อยู่ในขอบเขตได้

ลักษณะของแอคติเวชั่นฟังก์ชั่นสำหรับแบ็กพรอเพเกชัน จะให้ผลลัพธ์ที่สามารถสร้างกราฟออกเป็นรูปตัว S ได้ ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชั่นโลจิสติค (Logistic function) หรือฟังก์ชั่นไบ นารี (Binary sigmoid) ที่ให้ผลลัพธ์อยู่ในช่วง (0,1) และฟังก์ชั่นไฮเปอร์บอลิคแทนเจนท์ (Hyperbolic tangent function) หรือฟังก์ชั่นไบโพลา (Bipolar sigmoid) ที่ให้ผลลัพธ์อยู่ในช่วง (-1,1) หรืออาจเป็นค่าอื่น เช่น (-0.5,0.5) แต่มีลักษณะที่เป็นช่วงของค่าบวกและลบ

จากการคำนวณหาผลลัพธ์ของนิวรอลเน็ทเวิร์คด้วยสูตร ตาม(2.39) คือผลบวกของผลคูณข้อมูลนำเข้ากับค่าน้ำหนัก อาจทำให้ผลลัพธ์นั้นกระจัดกระจายเนื่องจากการกำหนดค่าน้ำหนักเริ่มต้นเป็นค่าสุ่มดังนั้นจำเป็นต้องผ่านกระบวนการวัดค่าเพื่อให้ค่านั้นมีความหมายขึ้น โดยผ่านเข้าสู่ฟังก์ชั่นซิกมอยด์เพื่อจำกัดขอบเขตผลลัพธ์ ดังเช่นเมื่อใช้ฟังก์ชั่นโลจิสติคจะใช้สูตรตาม (2.40) และเมื่อใช้ฟังก์ชั่นไฮเปอร์บอลิคแทนเจนท์จะใช้สูตรตาม (2.41) เพื่อหาผลลัพธ์แล้วส่งผลลัพธ์ไปเป็นข้อมูลนำเข้าในชั้นถัดไป

$$net = \Sigma w_i i_i \tag{2.39}$$

$$F(x) = 1 / (1 + \exp(-x)) \tag{2.40}$$

$$F(x) = \tanh(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x}) \tag{2.41}$$

2.6.6 การหาค่าความผิดพลาด

นิวรอลเน็ทเวิร์ค จะมีการประมาณการค่าความผิดพลาดโดยใช้วิธีคำนวณหาค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดกำลังสอง อาจกำหนดวิธีการหรือฟังก์ชั่นอื่น ๆ ในการประมาณการค่าความผิดพลาดได้ แต่อย่างไรก็ตามวิธีประมาณการค่าความผิดพลาดก็นิยมที่จะใช้วิธีที่สามารถช่วยลดความแตกต่างระหว่างค่าเป้าหมายกับค่าผลลัพธ์ได้

กรณีนิวรอลเน็ทเวิร์ค การที่จะตรวจสอบว่าระบบเรียนรู้แล้วและสมควรจะหยุดสอนเมื่อใดนั้น วิธีที่นิยมใช้ที่สุดเพราะเข้าใจง่ายคือจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุด ว่าน้อยจนยอมรับได้แล้วหรือไม่มีทางหาค่าที่น้อยกว่านี้ได้อีก

จากหลักการหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง ตามที่รูเมลฮาร์ท และ แมคคลีแลน (Rumelhart and McClelland) ได้กำหนดความหมายของค่าความผิดพลาดไว้ โดยหาผลรวมของผลต่างของค่าเป้าหมายกับค่าผลลัพธ์ทุก ๆ หน่วยในชั้นผลลัพธ์ สำหรับทุก ๆ ชุดข้อมูลการสอน (Trainning ยattern) ตาม (2.42) แล้วหาค่ารากของกำลังสองของผลรวมดังกล่าว ซึ่งจะเป็นการประมาณค่าความผิดพลาดทั้งหมด แล้วหารด้วยจำนวนชุดที่ใช้สอนทั้งหมด ซึ่งจะได้เป็นค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดจากการสอน

$$E_p = \sum_{i=1}^{n} (t_{pi} - o_{pi})^2 \qquad (2.42)$$

เมื่อ p เป็นดัชนีมีค่าอยู่ในขอบเขตจำนวนชุดของข้อมูลนำเข้า

i มีค่าอยู่ในขอบเขตจำนวนของผลลัพธ์

E_p แทนค่าความผิดพลาดของชุดการสอนที่ p

t_{pi} เป็นค่าเป้าหมาย (target) สำหรับผลลัพธ์ที่ i ในชุดการสอนที่ p

o_{pi}เป็นผลลัพธ์ที่ได้ สำหรับลำดับที่ i ในชุดการสอนที่ p

2.6.7 การปรับปรุงค่าน้ำหนัก

เมื่อนิวรอลเนตเวิร์กพัฒนาขึ้นในรูปแบบของการเรียนรู้แบบมีครู จะต้องกำหนดขั้นตอนการเรียนรู้ที่เหมาะสม ซึ่งขึ้นกับทฤษฎีของรูปแบบในการแก้ไขปัญหานั้นๆ สมการเริ่มต้นในการปรับปรุงค่าน้ำหนักจะเป็นการหาค่าอนุพันธ์ หลังจากปรับปรุงสมการอนุพันธ์ให้ง่ายขึ้นโดยการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรที่เหมาะสม จึงทำให้สมการที่ซับซ้อนเป็นเพียงสมการพีชคณิตเพื่อให้ง่ายและคำนวณได้รวดเร็ว

กฎการเรียนรู้ที่สำคัญมี 2 รูปแบบ คือ การเรียนรู้ของเฮบเบียน (Hebbian learning) และการเรียนรู้ของเดลต้า (Delta learning) นอกจาก 2 รูปแบบนี้แล้ว จะมีกฎการเรียนรู้อื่นๆ ที่ปรับปรุงจากพื้นฐานของกฎ 2 กฎนี้

1) กฎของเฮบ (Hebb's rule)

โดยโดนัล เฮบ (Donald Hebb) เป็นกฎที่เกี่ยวกับการวัดค่าแอคติเวชั่น (ค่าผลรวมของการคูณระหว่างค่าข้อมูลนำเข้ากับค่าน้ำหนักที่เป็นคู่กัน) ของนิวรอลแรกที่จะมีผลต่อแอคติเวชั่นของนิวรอลที่ 2 จึงได้สูตรที่ใช้ปรับปรุงค่าน้ำหนัก ดังนี้

$$\Delta w_{ij} = \mu a_i a_j \tag{2.43}$$

เมื่อ μ เป็นอัตราการเรียนรู้ (learning rate)

a_i เป็นค่าแอคติเวชั่น ของนิวรอลที่ i

a_j เป็นค่าแอคติเวชั่น ของนิวรอลที่ j

2) กฎของเดลต้า Delta rule

เรียกอีกอย่างว่า Least Mean Squared Error Rule (LMS) โดยมีจุดหมายว่าจะหาชุดของค่าน้ำหนักที่ทำให้ค่ากำลังสองของค่าความผิดพลาด มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจำเป็นสำหรับการสอนรอบถัดไป โดยใช้วิธีการคำนวณเพื่อปรับปรุงค่าน้ำหนักดังนี้

$$\Delta w_{ij} = 2\mu x_i \left(\text{desired output value} - \text{computed output value}\right)_j \tag{2.44}$$

μ เป็นอัตราการเรียนรู้ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1 แต่ไม่เป็นค่าลบ

x_i เป็นค่านิวรอลลำดับที่ i

ขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ในแบ็กพรอเพเกชันถูกกำหนดขึ้นหลากหลายรูปแบบ แต่ที่ได้รับการนิยมมากที่สุดเป็นกฎเดลต้า โดยรูเมลฮาร์ทและสมาชิกของกลุ่มพีดีพี (Parallel distribute processing) ได้ร่วมกันวิจัยขึ้น เป็นขั้นตอนวิธีการเรียนรู้ที่นำไปใช้ได้กับข่ายงานทุกรูปแบบรวมทั้งข่ายงานหลายชั้นด้วย โดยไม่จำกัดว่าจะใช้แอคติเวชั่นแบบใด แต่ต้องเป็นการเรียนรู้แบบมีครู

2.7 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับเจนเนติกอัลกอริทึม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของเจนเนติกอัลกอริทึม กับตัวอย่างการคำนวณหาค่าคำตอบของเจนเนติกอัลกอริทึมอย่างง่าย (Simple genetic algorithms) เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการนำเจนเนติกอัลกอริทึมไปใช้ในการแก้ปัญหาการทำ Optimizaton และตัวอย่างการคำนวณหาคำตอบของเจนเนติกอัลกอริทึมเพื่อนำไปสู่การนำเจนเนติกอัลกอริทึมไปประยุกต์ใช้ในการปรับค่าน้ำหนักของนิวรอลต่อไป

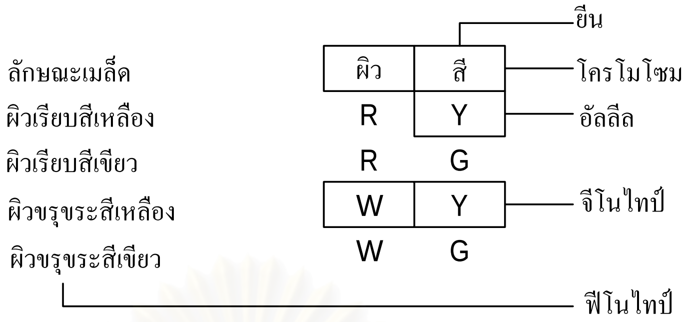
2.7.1 เจนเนติกอัลกอริทึม

ในปัจจุบันการหาคำตอบบางปัญหา เช่น ปัญหาการจัดสรรทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดและปัญหาในการคำนวณต้นทุนต่ำสุด เป็นต้น สามารถหาคำตอบได้หลายวิธี วิธีการที่ง่ายที่สุดในการหาคำตอบคือวิธีทางฮิวริสติกต่างๆ ซึ่งอาจได้คำตอบที่ไม่ดีนัก ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ได้นำความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีหรือกฏเกณฑ์ทางธรรมชาติมาช่วยในการหาคำตอบหรือศึกษาวิจัย โดยมีเป้าหมายหลักในการใช้ประโยชน์ของความคงทน (Robustness) ต่อความไม่เที่ยงตรงแม่นยำ (Accuracy) ความไม่แน่นอน (Uncertainty) หรือความคลุมเครือของปัญหา (Vague) หลักการเหล่านี้สามารถพบได้จากวิธีการต่างๆ เช่น ระบบโครงข่ายประสาทเทียม ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) และ GAs [34] ปัญหาที่พบส่วนใหญ่เป็นปัญหาที่ไม่เที่ยงตรงและคลุมเครือ ซึ่งต้องการหาคำตอบที่เที่ยงตรงและมีความแน่นอนสูงมากก็ย่อมมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก ดังนั้นวิธีการที่สามารถแก้ปัญหาที่คลุมเครือโดยได้คำตอบที่ใกล้เคียงสามารถยอมรับได้ ใช้เวลาในการคำตอบไม่นานนักและมีค่าใช้จ่ายพอประมาณ ย่อมดีกว่าวิธีที่ได้ความเที่ยงตรงสูงแต่มีค่าใช้จ่ายที่สูง วิธีการหาคำตอบที่ดีอย่างหนึ่งได้แก่วิธีการของ GAs โดยอาศัยทฤษฎีในการถ่ายทอดลักษณะต่างๆทางกรรมพันธ์ไปสู่ยังลูกหลาน ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาใช้ในการหาคำตอบที่ต้องการได้[33]

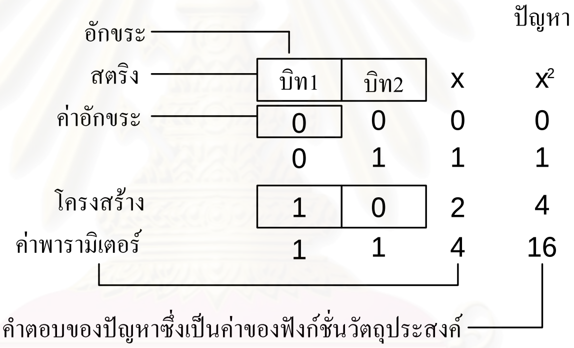
2.7.2 พันธุศาสตร์กับเจนเนติกอัลกอริทึม

Mendel บิดาแห่งพันธุศาสตร์ ค้นพบว่าลักษณะต่างๆของสิ่งมีชีวิต เช่น ลักษณะผิวของเมล็ดพืช สีของเมล็ดพืช ฯลฯ ที่ถูกถ่ายทอดไปยังลูกหลานนั้นถูกควบคุมโดยหน่วยควบคุมลักษณะที่เรียกว่ายีน (Gene) และลักษณะย่อยของยีนเรียกว่าอัลลีล (Allele) เช่น ยีนควบคุมลักษณะผิวของเมล็ดจะมีอัลลีลเป็นผิวเรียบและผิวขรุขระ เป็นต้น ซึ่งแต่ละยีนจะเรียงตัวอยู่บน โครโมโซม (Chromosome) ภายในเซลล์ ตำแหน่งของยีนแต่ละยีนบนโครโมโซมเรียกว่า โลกัส (Logus) และแต่ละแบบของชุดยีนเรียกว่า จีโนไทป์ (Genotype) ซึ่งแสดงว่าลักษณะภายนอกที่ปรากฏ ซึ่งเรียกว่า ฟีโนไทป์ (Phenotype) ดังรูปที่ 2.35 ก[35]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) ลักษณะทางพันธุศาสตร์ของโครโมโซมควบคุมลักษณะของเมล็ดถั่ว ซึ่งมียีนลักษณะของผิวเมล็ด คือ มีลักษณะเรียบ (R) หรือขรุขระ(W) และยีนลักษณะสีของเมล็ดคือมีสีเหลือง (Y) และสีเขียว (G)



ข) ลักษณะทางเจนเนติก แสดงถึงการแก้ปัญหาการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชั่น $f(X) = X^2$ โดยที่ x มีค่าอยู่ระหว่าง (0,4) และค่าของ x ถูกแปลงในรูปไบนารี่สตริง

รูปที่ 2.35 เปรียบเทียบลักษณะระหว่างเจนเนติกอัลกอริทึมกับลักษณะทางพันธุศาสตร์

การแก้ปัญหาทางด้านคณิตศาสตร์ด้วย GAs พารามิเตอร์ต่างๆจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของสตริง (String) หรือโครโมโซมประกอบด้วยอักขระ (Character) หรือ บิท (Bit) แต่ละตำแหน่งของโครโมโซมจะเก็บค่าอักขระหรือค่าของบิทที่แสดงโครงสร้างของแต่ละโครโมโซมที่ให้คำตอบของปัญหาแตกต่างกัน ดังรูปที่ 2.35 ซึ่งมีการประยุกต์ใช้ GAs กับการแก้ปัญหาการหาค่าสูงสุดของ $f(X) = X^2$ โดยที่ X อยู่ในช่วง [0,4] และสามารถสรุปความหมายทางพันธุศาสตร์เทียบกับ GAs ได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคำศัพท์ระหว่างพันธุศาสตร์และเจนเนติกอัลกอริทึม

พันธุศาสตร์	เจนเนติกอัลกอริทึม
โครโมโซม (Chromosome)	สตริง (String)
ยีน (Gene)	คุณลักษณะ,บิท (Character,bit)
อัลลีล (Allele)	ค่าของคุณลักษณะ,ค่าบิท (bit value)
โลกัส (Locus)	ตำแหน่ง (String position)
จีโนไทป์ (Genotype)	โครงสร้าง (Structure)
พีโนไทป์ (Phenotype)	โครงสร้างคำตอบ (A decode structure)

2.7.3 ความหมายของเจนเนติกอัลกอริทึม

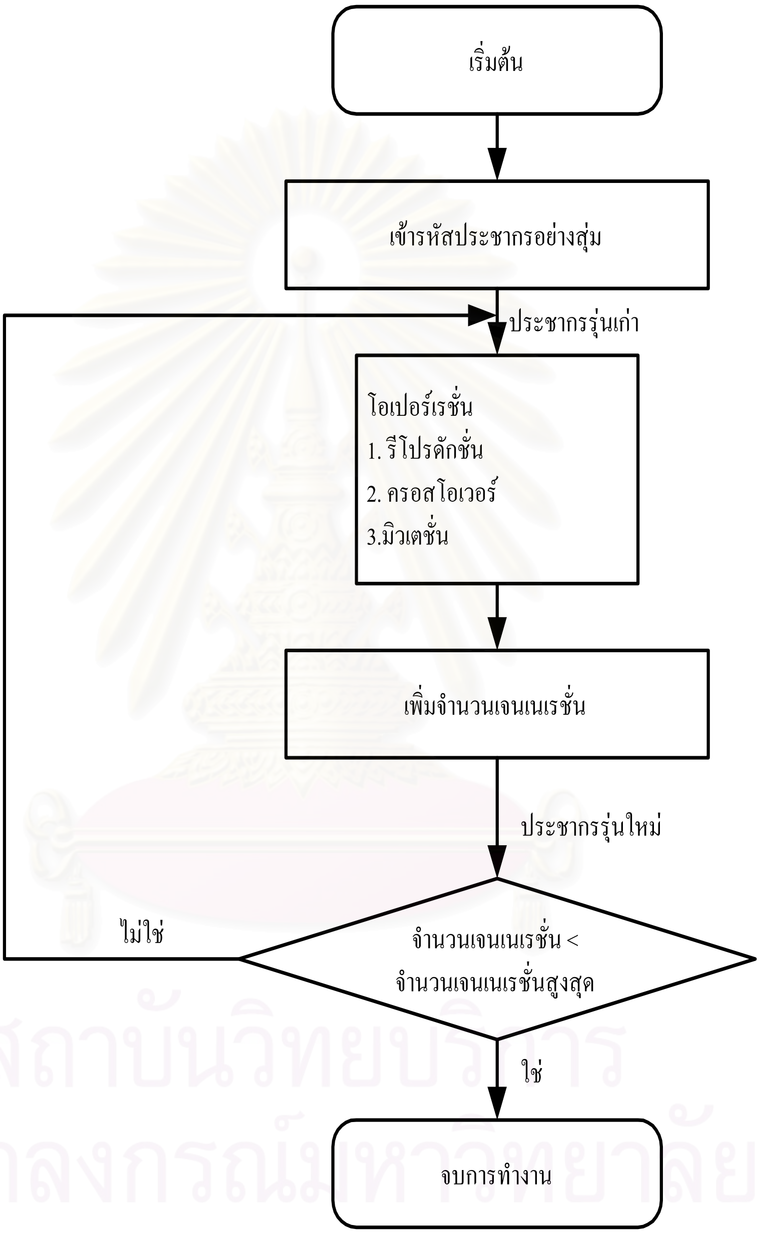
GAs เป็นวิธีการค้นหาคำตอบโดยมีพื้นฐานมาจากกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติ (Natural selection) และกระบวนการคัดเลือกทางพันธุศาสตร์ (Natural genetics selection) โดยการคัดเลือกสตริง ที่มีความเหมาะสมจากกลุ่มของสตริงทั้งหมดด้วยวิธีการสุ่ม จากการนำสตริงเหล่านี้ไปเข้ากระบวนการคัดเลือกสตริงที่มีความเหมาะสม ซึ่งสตริงที่มีความเหมาะสมนี้คือคำตอบที่ดีที่สุดหรือใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด GAs ไม่ใช้เป็นการสุ่มแบบง่ายๆ แต่มันเป็นการใช้ข้อมูลในอดีตอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อพิจารณาจุดที่จะต้องค้นหาใหม่ โดยคาดหวังว่าสมรรถนะของการค้นหาจะดีขึ้น[34]

GAs พัฒนาขึ้นโดย Holland และคณะโดยมีเป้าหมายในการวิจัย 2 อย่างคือ ข้อแรก เพื่อสรุปและดัดแปลงการใช้กระบวนการทางธรรมชาติให้ถูกต้องมากที่สุด สองเพื่อออกแบบสร้างซอฟแวร์ที่รักษากลไกทางธรรมชาติ และ GAs แตกต่างกับวิธีค้นหาและการทำ Optimization แบบอื่นๆ[35] คือ

- GAs ทำงานโดยการเข้ารหัสสตริงเป็นชุดพารามิเตอร์
- GAs เป็นการค้นหาทั้งประชากรไม่ใช้ค้นหาจากเพียงตำแหน่งๆเดียว
- GAs ใช้ข่าวสารที่เป็นผลลัพธ์(ฟังก์ชั่นเป้าหมาย) โดยไม่ใช้อนุพันธ์หรือความรู้อื่นๆ
- GAs จะเป็นวิธี Probabilistic ไม่ใช่ Deterministic

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.4 **เจนเนติกอัลกอริทึมอย่างง่าย** (Simple Genetic Algorithms)



รูปที่ 2.36 ขั้นตอนของ GAs อย่างง่าย

ขั้นตอนการทำ GAs อย่างง่าย หรือ SGA ดังรูปที่ 2.36 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้[35]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7.4.1 การเข้ารหัสและสร้างประชากรเริ่มต้นอย่างสุ่ม

ขั้นตอนแรกของ GAs คือ การเข้ารหัสหรือการแปลงค่าพารามิเตอร์ให้อยู่ในรูปของสตริงที่มีความยาวแน่นอน ซึ่งวิธีการเข้ารหัสนี้ขึ้นอยู่กับรูปแบบของปัญหาแต่ละปัญหา สำหรับ SGA ใช้การเข้ารหัสแบบไบนารี่ (Binary coding)

ตัวอย่างเช่น ต้องการหาค่าสูงสุดของฟังก์ชั่น $f(x) = x^2$ โดยที่ x มีค่าอยู่ระหว่าง (0,31) ในที่นี้ฟังก์ชั่นวัตถุประสงค์ (Objective Function) คือ f(x) หรือ x^2 ซึ่งวิธีการเข้ารหัสแบบไบนารี่ โดยแปลงพารามิเตอร์ x ให้อยู่ในรูปไบนารี่ 5 บิท ค่าพารามิเตอร์ของ x จะมีค่าอยู่ในช่วง 00000 จนถึง 11111 (0 ถึง 31)

เมื่อกำหนดวิธีการเข้ารหัสแล้ว จำเป็นที่จะต้องสร้างประชาการเริ่มต้น (Initial population) โดยวิธีการสุ่มเพื่อที่จะผ่านขั้นตอนของ SGA ต่อไป สมมติว่าสุ่มประชากรเริ่มต้น 4 สตริงได้เป็น

01101

11000

01000

10011

ค่าสตริงของประชากรเริ่มต้น เกิดจากการสุมค่า ทั้งหมด 20ครั้งหรือสตริงแต่ละตัวทำการสุ่ม 5 ครั้ง

2.7.4.2 ประชากรรุ่นเก่า (Old population)

ประชากรรุ่นเก่า คือสตริงที่จะถูกคัดเลือกไปเป็นต้นแบบสำหรับสร้างประชากรรุ่นใหม่ (New population) โดยประชากรรุ่นเก่าชุดแรกคือประชากรเริ่มต้นนั้นเอง

2.7.4.3 การดำเนินการของ SGA

SGA ประกอบไปด้วยตัวปฏิบัติการ 3 อย่างได้แก่ รีโปรดักชั่น (Reproduction) การครอสโอเวอร์ (Crossover) และการมิวเตชั่น (Mutation) ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้[34]

1) รีโปรดักชั่น คือ กระบวนที่สตริงแต่ละตัวเลียนแบบค่าฟังก์ชั่นเป้าหมาย f(x) โดยที่ฟังก์ชั่นนี้อาจเป็นการวัด ผลตอบแทน ค่าอรรถประโยชน์ หรือสิ่งที่ต้องการให้เป็นค่าสูงสุด หรือค่าความเหมาะสม (Fitness) สตริงที่มีความเหมาะสมสูงกว่าก็จะมีความน่าจะเป็นในการสนับสนุนลูกหลานรุ่นต่อไปสูงด้วย ตัวปฏิบัติการนี้เกิดขึ้นจากกระบวนการคัดเลือกตามธรรมชาติตามทฤษฎีผู้อยู่รอดที่มีความเหมาะสม (Survival of Fittest) ของชาล์ส ดาร์วิน ประชากรที่มีความเหมาะสมในธรรมชาติจะมีความสามารถในการรอดพ้นจากผู้ล่า โรคภัยไข้เจ็บ อุปสรรคอื่นๆที่ต่อต้านการเจริญเติบโตเป็นผู้ใหญ่

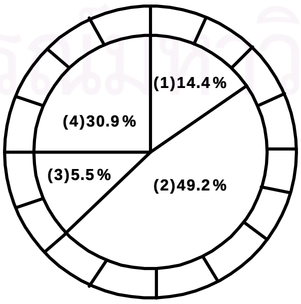
และสามารถสืบพันธุ์ต่อไปได้ ส่วนฟังก์ชั่นเป้าหมายจะเป็นสิ่งที่ใช้พิจารณาว่าสตริงที่สร้างขึ้นจะมีชีวิตอยู่หรือตายจากไป

ตัวปฏิบัติการรีโปรดักชั่นสามารถสร้างได้หลายวิธี วิธีที่ง่ายคือสร้างวงล้อรูลเล็ทที่มีจำนวนช่องเท่ากับจำนวนประชากรสตริง และขนาดของช่องก็เป็นสัดส่วนกับค่าความเหมาะสม ดังรูปที่ 2.37 และค่าความเหมาะสมของฟังก์ชั่นเป้าหมายของประชากรทั้งแสดงอยู่ในตาราง 2.4

ค่าความเหมาะสมทั้งหมดโดยรวมจะได้ 1170 และค่ารายละเอียดต่างๆแสดงดังในตารางที่ 2.5 แสดงถึงวงล้อรูลเล็ทสำหรับการรีโปรดักชั่น ซึ่งสร้างจากสัดส่วนของค่าความเหมาะสมของสตริงทั้งหมด เช่น สตริงหมายเลข 1 มีค่าความเหมาะสมเป็น 169 หรือ 14.4%(169/1170)ของค่าความเหมาะสมโดยรวมของทั้งประชากร ในการทำการรีโปรดักชั่นจะหมุนวงล้อเป็นจำนวน 4 ครั้งหรือเท่ากับจำนวนสตริง เช่น สตริงหมายเลข 1 มีค่าความเหมาะสมเป็น 169 หรือ 14.4% ของค่าความเหมาะสมทั้งหมดดังนั้นเมื่อหมุนวงล้อรูลเล็ท 1 ครั้งก็จะมีความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกเท่ากับ 0.144 ในการหมุนรูลเล็ทแต่ละครั้งจะได้ตัวแทนในการสืบพันธุ์ (Reproduction candidate) สตริงที่มีความเหมาะสมสูงจะถูกคัดเลือกสำหรับการสืบพันธุ์สำหรับสตริงลูกหลานในรุ่นต่อไป เมื่อสตริงมีรูปร่างแน่นอนแล้วก็จะถูกส่งไปเข้าเมทติ้งพูล (Mating pool) เพื่อที่จะผ่านกระบวนการของตัวปฏิบัติการอื่นต่อไป

ตารางที่ 2.4 กลุ่มประชากรตัวอย่างและค่าความเหมาะสม

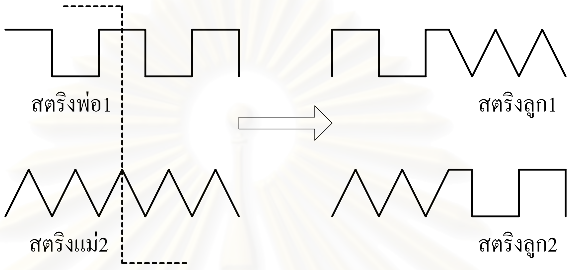
No.	สตริง	ค่าความเหมาะสม	% โดยรวม
1	01101	169	14.40
2	11000	576	49.20
3	01000	64	5.50
4	10011	361	30.90
รวม		1170	100.00



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.37 การรีโปรดักชั่นอย่างง่ายด้วยวิธีการใช้วงล้อรูลเล็ทที่มีขนาดของแต่ละช่องเป็นสัดส่วนกับค่าความเหมาะสม

2) การครอสโอเวอร์ หลังจากประชากรทั้งหมดผ่านกระบวนการรีโปรดักชั่นแล้ว จะทำการจับคู่สมาชิกในเมทติ้งพูลหรือกลุ่มประชากรทั้งหมดอย่างสุ่มและทำการไขว้สลับค่าที่อยู่หลังตำแหน่งที่เลือกไว้จากการสุ่มหรือ ทำการแลกเปลี่ยนสวนกัน



รูปที่ 2.38 การครอสโอเวอร์อย่างง่ายเพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงสตริงและการแลกเปลี่ยนข่าวสารโดยเลือกตำแหน่งไขว้แบบสุ่ม

การเลือกตำแหน่งที่จะทำการครอสโอเวอร์ จะทำการสุ่มค่าที่เป็นจำนวนเต็มตำแหน่งที่ k ช่วงของสตริงที่เลือกจะอยู่ในช่วง (2, t-1) โดยที่ t คือตำแหน่งสุดท้ายของสตริงใหม่ทั้งสองก็จะมีการสลับอักขระตั้งแต่ตำแหน่งที่ k+1 จนถึง t ยกตัวอย่างเช่น พิจารณาสตริง A_1,A_2 จากประชากรเริ่มต้น

A_1 = 0110 1

A_2 = 1100 0

สมมติว่าเลือกจำนวนสุ่มระหว่าง 1 ถึง 4 และได้ค่า k = 4 (แสดงโดยใช้สัญลักษณ์ "|" แทนการแยก) ผลของการครอสโอเวอร์สตริงที่เป็นประชากรรุ่นใหม่จะมีสัญลักษณ์ " ' "

A'_1 = 01100

A'_2 = 11001

3) การมิวเตชั่น มิวเตชั่นเป็นสิ่งจำเป็นถึงแม้ว่ารีโปรดักชั่นและครอสโอเวอร์ช่วยในการค้นหาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพในบางครั้งก็มีการสูญเสียส่วนทีสำคัญไป (ค่า 1 หรือ 0 ในบางตำแหน่ง) การมิวเตชั่นจะป้องกันส่วนที่สูญเสียที่ไม่อาจเรียกกลับได้ (Irrecovery loss) ในบางครั้งการหาคำตอบ SGA คำตอบอาจติดอยู่ใน Local optima การมิวเตชั่นด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้คำตอบสามารถหลุดออกจาก Local optima หรืออาจกล่าวได้ว่าโอเปอร์เรเตอร์ของการมิวเตชั่นเป็นการ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เปลี่ยนแปลงค่าตำแหน่งแบบสุ่ม จากปัญหาที่พิจารณาค่าจะเปลี่ยนแปลงจาก 0 เป็น 1 หรือ 1 เป็น 0 โดยการเลือกตำแหน่งที่จะทำการมิวเตชั่นอย่างสุ่ม อัตราการมิวเตชั่นในธรรมชาติจะมีค่าค่อนข้างต่ำ ในการนำไปใช้งานจะต้องมีการพิจารณาอย่างเหมาะสม

2.7.4.4 ประชากรรุ่นใหม่

สตริงทั้งหมดที่ได้จากกระบวนการของ GAs เรียกว่าประชากรรุ่นใหม่หรือเจนเนอเรชั่น (Generation) รุ่นใหม่ซึ่งจะกลายเป็นประชากรรุ่นเก่า สำหรับการดำเนินการต่อไป กระบวนการของ SGA จะทำซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าจำนวนเจนเนอเรชั่นจะมากกว่าจำนวนเจนเนอเรชั่นที่กำหนดไว้สูงสุด

Surech (1995) ได้พิจารณาถึงการหาขนาดของประชากร จากอัตราส่วนของวิธีการที่ทั้งหมดของคำตอบที่เป็นไปไม่ได้และอัตราส่วนของวิธีการที่ทั้งหมดของคำตอบทีเป็นไปได้

$$\lim_{n\to\infty}\frac{n^n}{n!} \approx \lim_{n\to\infty}\frac{(2\pi)^{1/2}\left(\frac{n}{e}\right)^n}{n^n} \qquad (2.54)$$

$$= \lim_{n\to\infty}\frac{(2\pi)^{1/2}}{e^n} = 0$$

จากสมการที่ (2.54) ให้

n คือขนาดของปัญหา

$n!$ คือจำนวนวิธีการที่จัดเรียงหรือจำนวนวิธีการจัดเรียงที่เป็นไปได้

n^n คือจำนวนวิธีการที่จัดเรียงหรือจำนวนวิธีการจัดเรียงที่เป็นไปไม่ได้ (n.n…n)

สามารถสรุปได้ว่า ความน่าจะเป็นของในการสร้างประชากรคำตอบอย่างสุ่ม มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ n มีค่ามากขึ้น สมมติว่า n มีค่าเป็น 8 ดังนั้น $8! / 8^8 = 1/416.1 = 2.403*10^{-3}$ หรืออาจกล่าวได้ว่า โอกาสที่จะได้คำตอบที่ถูกต้องเป็น 1 ใน 416 ของคำตอบที่เป็นไปไม่ได้ ถ้ากำหนดจำนวนประชากรเป็น 100 และทำการคำนวณเพียงแค่ 1 เจนเนอเรชั่นก็ไม่อาจคาดได้ว่าจะได้คำตอบที่ดี การกำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้นและจำนวนเจนเนเรชั่นทั้งหมดจึงมีผลในการหาคำตอบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3
การออกแบบโปรแกรมการเรียนรู้ PD และแบบจำลองการเกิด PD

ในงานวิจัยนี้เลือกออกแบบสร้างแบบจำลองการเกิด PD เพื่อนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลในการทดสอบและออกแบบกระบวนการเรียนรู้โดยใช้วิธีนิวรอลเน็ทเวิร์คร่วมกับเจนเนติกอัลกอริทึม ซึ่งเจนเนติกอัลกอริทึมจะทำหน้าที่ในการปรับค่าน้ำหนักให้กับนิวรอลเน็ทเวิร์ค เพื่อจะได้ค่าน้ำหนักที่มีค่าเหมาะสมที่สุด ที่ใช้ในการทำการจำแนกประเภทของการเกิด PD

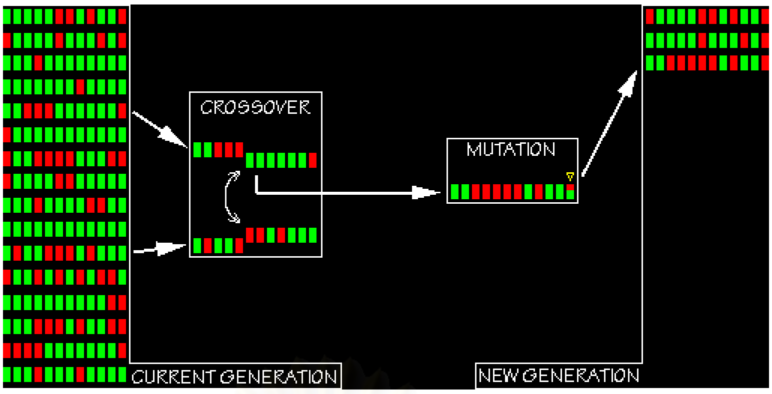
3.1 การออกแบบกระบวนการเรียนรู้โดยใช้นิวรอลเน็ทเวิร์คร่วมกับเจนเนติกอัลกอริทึม

การใช้นิวรอลเน็ทเวิร์คร่วมกับเจนเนติกอัลกอริทึมมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การนำเจนเนติกอัลกอริทึมมาใช้ในการหาจำนวนโหนดหรือชั้นที่เหมาะสมของนิวรอลเน็ทเวิร์ค การนำเจนเนติกอัลกอริทึมมาใช้ในการปรับค่าน้ำหนักที่เหมาะสมของนิวรอลเน็ทเวิร์คเป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้โครงข่ายแบบ Multilayer Percepton ซึ่งมีความสามารถในการจำแนกรูปแบบ PD ได้ดี แต่ในกระบวนการปรับปรุงค่าน้ำหนักแทนที่จะใช้สมการทางคณิตศาสตร์ตามวิธีทั่วไป ในที่นี้จะใช้เจนเนติกอัลกอริทึม เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งในการหาคำตอบที่เหมาะสม

การนำเจนเนติกอัลกอริทึมมาใช้ในการปรับค่าน้ำหนักของนิวรอลเน็ทเวิร์คนั้นค่าน้ำหนักของนิวรอลเน็ทเวิร์ค คือสิ่งที่ต้องการให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อใช้ในการจำแนกประเภทของการเกิด PD โดยค่าน้ำหนักที่ผ่านกระบวนการเจนเนติกอัลกอริทึมแล้วจะต้องให้ค่าผิดพลาดของระบบนิวรอลเน็ทเวิร์ครวมมีค่าต่ำ ค่าน้ำหนักแต่ละตัวจะมีค่าความเหมาะสมที่คำนวณจากฟังชั่นความเหมาะสมแตกต่างกัน จากนั้นระบบจะทำการเลือกค่าน้ำหนักที่ให้ความเหมาะสมสูงสุด แล้วนำค่าน้ำหนักที่ได้มาใช้ในการจำแนกประเภท PD นอกจากนี้เจนเนติกอัลกอริทึมจะช่วยในการแก้ปัญหาของการปรับค่าน้ำหนักแบบวิธีนิวรอลเน็ทเวิร์คทั่วไป คือ ปัญหาเกี่ยวกับ local minimum ในกระบวนการปรับค่าน้ำหนัก

ซึ่งขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของเจนเนติกอัลกอริทึมจะต้องใช้หลักการของการสุ่ม (Randomization) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วิธีการทางเจนเนติกอัลกอริทึม

3.1.1 การออกแบบนิวรอลเน็ทเวิร์คที่ใช้ในการจำแนกประเภท PD

การจำแนกประเภทของการเกิด PD โดยใช้นิวรอลเน็ทเวิร์คที่จะเสนอในงานวิจัยนี้เป็นนิวรอลเน็ทเวิร์คที่มีโครงข่ายการเชื่อมโยงแบบ Multilayer Percepton ที่มี 3 ชั้น โดยแต่ละชั้นประกอบด้วย

1) ชั้นนำเข้าข้อมูล มีจำนวนโหนดเท่ากับ 13 โหนด อินพุทของนิวรอลเน็ทเวิร์คได้มาจากการคำนวณค่าทางสถิติและแฟรกตัลที่มีทั้งหมด 13 พารามิเตอร์

2) ชั้นแอบแฝงมี 1 ชั้นมีจำนวนเท่ากับ 26 โหนด

3) ชั้นผลลัพธ์มีจำนวนโหนดเท่ากับจำนวนประเภทที่ต้องการจำแนก

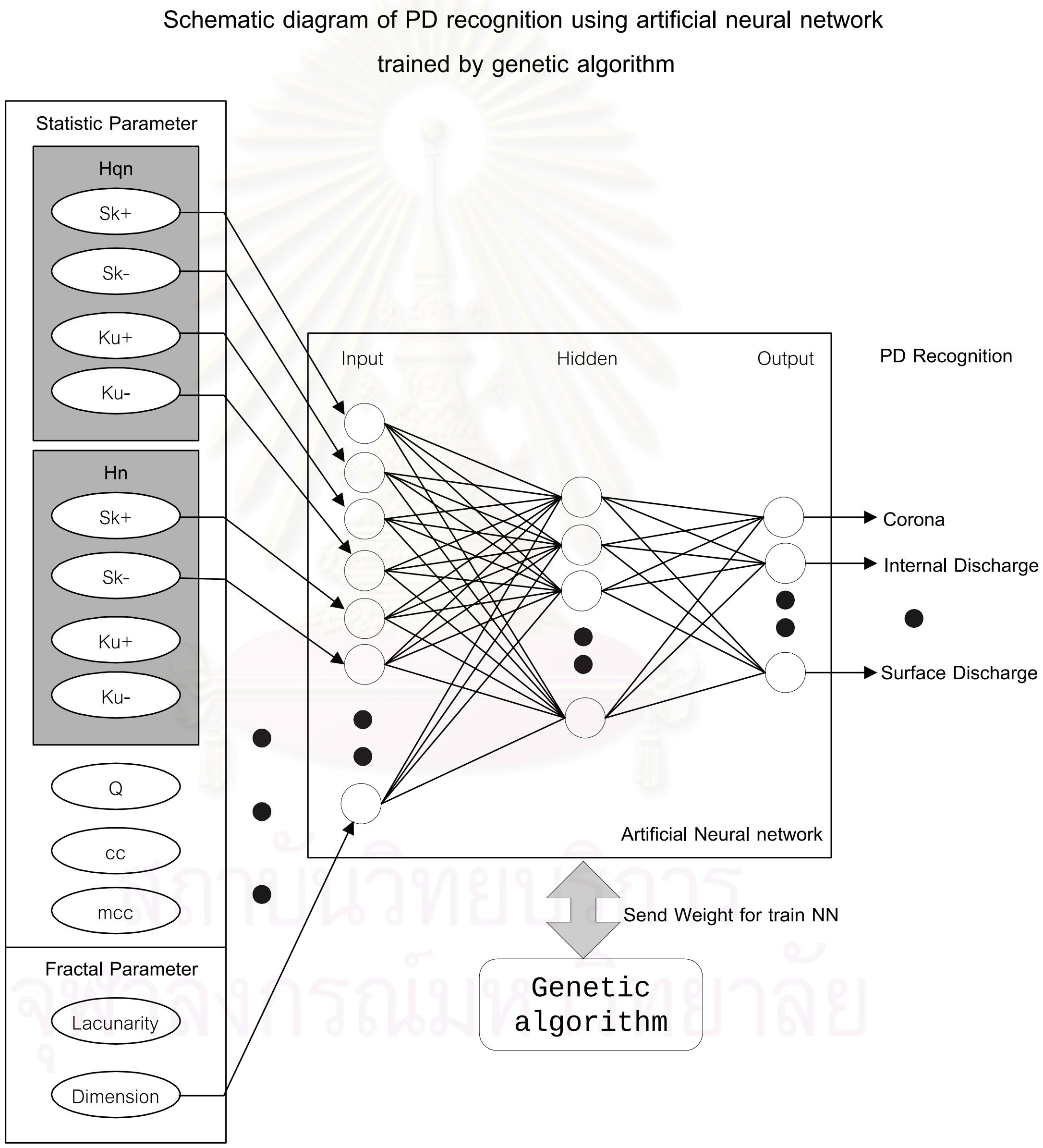
ข้อมูลในการสอนจะมีทั้งหมด 6 ประเภทนั้นคือชนิดของการเกิด PD เช่น โคโรนาที่ด้านแรงสูง โคโรนาที่ด้านแรงต่ำ ดีสชาร์จภายใน ดีสชาร์จภายนอก เป็นต้น ประเภทละ 20 ชุดข้อมูล ดังนั้นมีข้อมูลการสอนรวม 120 ชุดข้อมูล และข้อมูลในการทดสอบทั้งหมด 120 ชุดข้อมูลโดยข้อมูลในการสอนและการทดสอบเป็นข้อมูลคนละชุดกัน เงื่อนไขในการหยุดสอน คือ ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดรวมของแต่ละชุดข้อมูลการสอนต้องมีค่าน้อยกว่า 0.05

การคำนวณค่าผลลัพธ์ในแต่ละชั้น ในรูปที่ 3.2 เป็นรูปโครงสร้างของนิวรอลเน็ทเวิร์คที่มีการเชื่อมโยงของโครงข่ายแบบ Multilayer Percepton ซึ่งมี 3 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นชั้นนำเข้าข้อมูลซึ่งมีหน่วยประมวลผลเท่ากับ 13 โหนด และข้อมูลที่อยู่ในชั้นนำเข้าข้อมูลทุกโหนดจะถูกส่งต่อไปยังชั้นแอบแฝงซึ่งประกอบด้วยหน่วยประมวลผล 23 โหนด สุดท้านข้อมูลผลลัพธ์ในชั้นนี้จะถูกส่งไปยังชั้นผลลัพธ์ที่มีจำนวนโหนดเท่ากับประเภทที่ต้องการจำแนก การคำนวณค่าผลลัพธ์ในแต่ละชั้นกำหนดดังนี้

$$net = \Sigma w_i i_i \qquad (3.1)$$

ผลลัพธ์ของโหนดในชั้นแอบแฝงจนถึงชั้นผลลัพธ์จะถูกกำหนดโดยแอกติเวชั่นฟังก์ชั่น ในที่นี้จะใช้ซิกมอยด์ฟังก์ชั่น ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นที่ใช้ในการกำหนดค่าของผลลัพธ์ สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$F(x) = 1 / (1 + e^{-x}) \tag{3.2}$$



รูปที่ 3.2 สถาปัตยกรรมของแบกเพเกชันที่ออกแบบสร้าง

3.1.2 ขั้นตอนการสอนนิวรอลเน็ทเวิร์คโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึมในการปรับค่าน้ำหนัก

การกำหนดข้อมูลนำเข้าที่ใช้ในการสอนนิวรอลเน็ทเวิร์ค ลักษณะของข้อมูลนำเข้าจะประกอบด้วย ค่าอินพุทที่ได้จากการคำนวณค่าทางสถิติและค่าแฟรกตัล และค่าเป้าหมายที่กำหนดเอาไว้เพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าผลลัพธ์ที่คำนวณได้ เมื่อทำการกำหนดข้อมูลในการสอนให้กับนิวรอลเน็ทเวิร์คและเจนเนติกอัลกอริทึมแล้วจากนั้นจะทำการสอนให้กับระบบโดยมีไดอะแกรมการสอนดังรูปที่ 3.3 และมีขั้นตอนดังนี้

1) การจองเนื้อที่สำหรับตัวแปรพารามิเตอร์ และโครงสร้างของระบบ ในชั้นต่าง ๆ

2) การรับค่าชุดข้อมูลนำเข้าที่ประกอบด้วยกลุ่มข้อมูล 2 กลุ่มคือกลุ่มข้อมูลนำเข้าที่เป็นค่าของแต่ละโหนดในชั้นนำเข้าข้อมูล(ได้มาจากการคำนวณค่าคุณลักษณะของรูปแบบการเกิด PD) และกลุ่มข้อมูลเป้าหมายที่เป็นค่าเป้าหมายของแต่ละโหนดในชั้นผลลัพธ์ที่ถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูล

3) ทำการสุ่มชุดค่าน้ำหนักขึ้นมา 200 ชุด โดยแต่ละชุดจะมีจำนวนเท่ากับจำนวนโหนดของค่าน้ำหนักในระบบ

4) ทำการคำนวณหาค่าผลลัพธ์จากค่าน้ำหนักและค่าข้อมูลนำเข้าในชั้นนำเข้าข้อมูลในทุกชุดค่าน้ำหนัก แล้วส่งผลลัพธ์นั้นไปเป็นข้อมูลนำเข้าของแต่ละโหนดในชั้นแอบแฝง และในทำนองเดียวกันก็จะคำนวณหาผลลัพธ์จากชุดข้อมูลนำเข้าหรือผลลัพธ์จากชั้นที่ผ่านมากับค่าน้ำหนักในชั้นนี้ แล้วส่งไปเป็นค่าข้อมูลนำเข้าในชั้นถัดไป จนกระทั่งถึงชั้นผลลัพธ์

5) เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณจาก (4) ของแต่ละโหนดในชั้นผลลัพธ์กับค่าเป้าหมายแต่ละโหนดในชั้นผลลัพธ์ เพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองจากสมการ

$$E = (y - t)^2 \qquad (3.3)$$

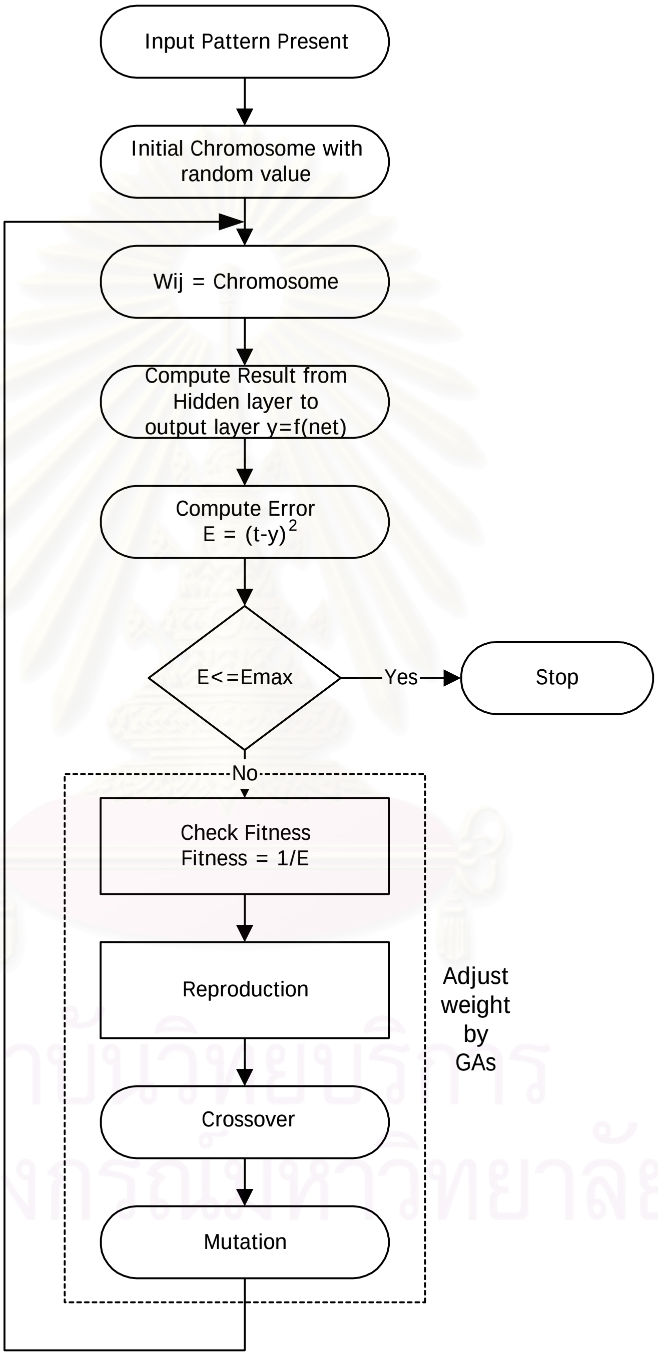
6) จาก (5) หากค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองที่คำนวณจาก (5) มีค่าน้อยกว่าเงื่อนไขที่กำหนด หรือหากจำนวนรอบในการสอนครบตามเงื่อนไขที่กำหนด ก็จะหยุดการสอนและบันทึกชุดของค่าน้ำหนักทั้งหมดลงแฟ้มข้อมูล

7) นำค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดกำลังสอง มาหาค่าฟังก์ชั่นความเหมาะสมซึ่งมีค่าดังนี้ ฟังก์ชั่นความเหมาะสม = 1/(ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง)

8) จากข้อ (5) หากค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองที่คำนวณยังมากอยู่ โปรแกรมจะเข้าสู่กระบวนการทางเจนเนติกอัลกอริทึม คือ การรีโปรดักชั่น การครอสโอเวอร์ และการมิวเตชั่น

9) หลังจากนั้นจะส่งค่าของชุดน้ำหนักที่ผ่านกระบวนการทางเจนเนติกอัลกอริทึมมายังค่าน้ำหนักและทำการประมวลผลตาม (4)-(8) จนกว่าค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองที่คำนวณ

ได้ในชั้นผลลัพธ์จาก (4) มีค่าน้อยกว่าเงื่อนไขที่กำหนดก็จะหยุดการสอนและบันทึกชุดของค่าน้ำหนักทั้งหมดลงแฟ้มข้อมูล



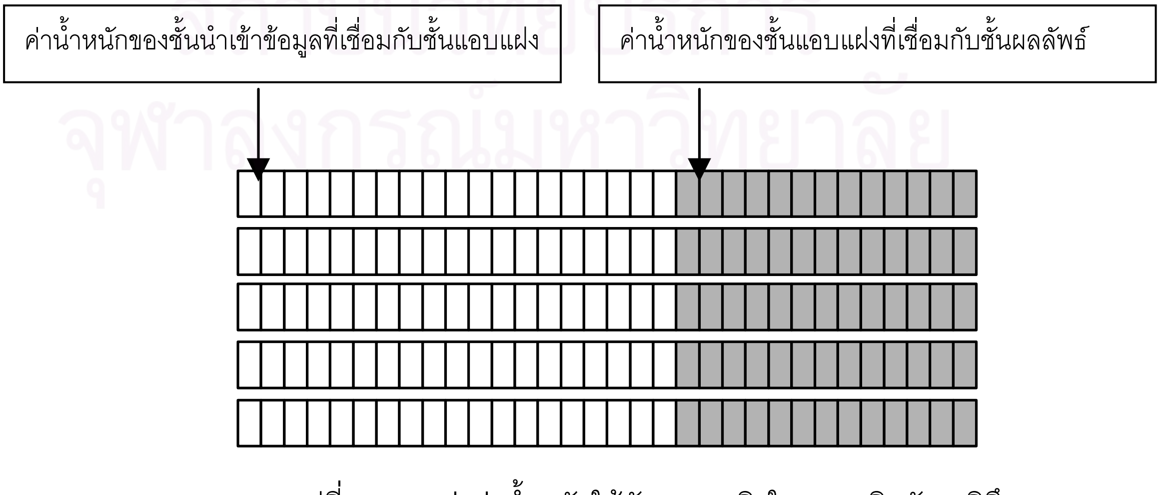
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรมแสดงกระบวนการสอน

3.1.3 ขั้นตอนการปรับค่าน้ำหนักโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึม

การสอนเพื่อให้นิวรอลเน็ทเวิร์คเกิดการเรียนรู้นั้นจะต้องการการสอนหลายๆรอบจนกว่าระบบจะเกิดการเรียนรู้ ซึ่งการเรียนรู้จะวัดได้จากค่าเฉลี่ยความผิดพลาดในชั้นผลลัพธ์ ถ้าค่าความเฉลี่ยความผิดพลาดน้อยกว่าที่ตั้งไว้ก็จะหยุดกระบวนการสอน และถ้ายังไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ก็ยังทำการสอนต่อไปโดยการปรับค่าน้ำหนักเพื่อใช้ในการคำนวณรอบต่อไป โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการปรับค่าน้ำหนักของนิวรอลเน็ทเวิร์คโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึม สิ่งสำคัญของเจนเนติกอัลกอริทึม คือการเข้ารหัสสตริงให้ตรงกับรูปแบบปัญหาก่อนโดยในที่นี้ปัญหาคือ ค่าน้ำหนักของนิวรอลเน็ทเวิร์ค โดยขั้นแรกเริ่มจากทำการสุ่มค่าน้ำหนักซึ่งอยู่ในรูปของสตริงขึ้นมาจากนั้นจึงนำชุดค่าน้ำหนักทั้งหมดผ่านกระบวนการ รีโปรดักชั่น ครอสโอเวอร์ และมิวเตชั่นตามลำดับ เพื่อให้ได้ชุดค่าน้ำหนักใหม่ โดยที่ในแต่ละขั้นตอนมีการเก็บคำตอบที่ดีที่สุดไว้ จากนั้นชุดค่าน้ำหนักก็จะผ่านกระบวนการอิลิทิส (Elitist) ซึ่งจะเก็บชุดค่าน้ำหนักที่ดีที่สุดในรอบนั้นไว้ โดยถ้าในรอบถัดไปชุดค่าน้ำหนักที่ไม่ดีกว่าชุดค่าน้ำหนักในรอบปัจจุบัน ก็จะแทนที่ชุดค่าน้ำหนักที่ไม่ดีด้วยชุดค่าน้ำหนักที่ดีของรอบปัจจุบัน

3.1.3.1 การเข้ารหัสสตริงให้กับค่าน้ำหนัก

ปัญหาในงานวิจัยนี้เป็นการปรับค่าน้ำหนักให้กับนิวรอลเน็ทเวิร์ค เพื่อหาค่าน้ำหนักที่เหมาะสมให้กับนิวรอลเน็ทเวิร์ค วิธีการเข้ารหัสให้กับชุดน้ำหนัก แสดงดังรูปที่ 3.4 วิธีการเข้ารหัสสตริงกับค่าน้ำหนักของนิวรอลเน็ทเวิร์คนั้นจะนำค่าน้ำหนักที่เชื่อมระหว่างชั้นที่ i โหนดที่ j มาทำการต่อกันไปเรื่อยๆ เพื่อง่ายต่อการส่งค่าสตริงของค่าน้ำหนักนี้ให้กับนิวรอลเน็ทเวิร์คในการหาค่าความเหมาะสมของชุดค่าน้ำหนักแต่ละชุด โดยชุดค่าน้ำหนักทั้งหมดจะได้จากการสุ่มค่าขึ้นมาซึ่งค่าน้ำหนักจะอยู่ระหว่าง –1 ถึง 1



รูปที่ 3.4 การส่งค่าน้ำหนักให้กับสายสตริงในเจนเนติกอัลกอริทึม

3.1.3.2 กระบวนการรีโปรดักชั่น

กระบวนการรีโปรดักชั่น เป็นการคัดเลือกค่าชุดน้ำหนักที่ดีไปยังรอบถัดไป โดยชุดค่าน้ำหนักที่มีค่าความเหมาะสมสูง หรือชุดค่าน้ำหนักที่ให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดรวมในนิวรอลเน็ทเวิร์คต่ำมีโอกาสที่จะถูกคัดเลือกมากกว่าชุดค่าน้ำหนักที่ให้ค่าค่าเฉลี่ยความผิดพลาดรวมในนิวรอลเน็ทเวิร์คสูง

ดังนั้นในกระบวนการรีโปรดักชั่นจะต้องสร้างฟังก์ชั่นความเหมาะสมขึ้นมาเพื่อเป็นการกำหนดว่าชุดน้ำหนักของนิวรอลเน็ทเวิร์คที่สร้างขึ้นควรจะถูกคัดเลือกหรือไม่ สำหรับวิธีการคัดเลือกชุดน้ำหนักไปยังรอบถัดไป คือวิธีการของวงล้อรูลเล็ท ซึ่งจะสุ่มจำนวนครั้งที่ชุดค่าน้ำหนักใดๆ จะถูกคัดเลือกตามค่าความน่าจะเป็นที่สร้างขึ้นจากฟังก์ชั่นความเหมาะสม

กระบวนการคัดเลือกค่าน้ำหนักใหม่จะใช้หลักการของวงล้อรูลเล็ท ที่มีความกว้างของช่องเป็นสัดส่วนตามค่าความเหมาะสม การสร้างวงล้อรูลเล็ทมีวิธีการดังนี้

1) หาค่าความเหมาะสมโดยรวมของชุดค่าน้ำหนักทั้งหมด เนื่องจากสมการวัตถุประสงค์เป็นการหาค่าความเหมาะสมที่มากที่สุด ดังนั้นค่าความเหมาะสมที่มากที่สุดในชุดค่าน้ำหนักจึงควรมีความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือกมากที่สุด ในคือ ขนาดของช่องในวงล้อรูลเล็ทสำหรับค่าความเหมาะสมที่มากจะมีขนาดกว้างที่สุด

ค่าความเหมาะสม = 1/E (E = ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดที่เกิดจากชุดค่าน้ำหนักแต่ละชุด)

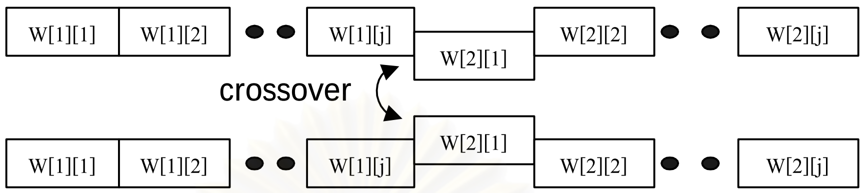
2) หาค่าความเหมาะสมรวมทั้งหมด เพื่อใช่ในการหาความกว้างของช่องรูลเล็ทซึ่งก็คือหาค่าความน่าจะเป็นในการคัดเลือกของชุดค่าน้ำหนัก โดยค่าความน่าจะเป็นในการคัดเลือกของชุดน้ำหนักหาได้จาก

ค่าความกว้างของช่องรูลเล็ท = ค่าความเหมาะสมของชุดน้ำหนัก/ค่าความเหมาะสมรวม

3.1.3.3 กระบวนการครอสโอเวอร์

กระบวนการครอสโอเวอร์ คือกระบวนการจับคู่ชุดค่าน้ำหนัก แล้วทำการเปลี่ยนส่วนซึ่งกันและกันเพื่อให้ได้ชุดค่าน้ำหนักใหม่ เนื่องจากปัญหาในการปรับค่าน้ำหนักของนิวรอลเน็ทเวิร์คนั้น ไม่ได้ใช้การเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง การครอสโอเวอร์แบบธรรมดา หรือการครอสโอเวอร์แบบตำแหน่งเดียวไม่สามารถนำมาใช้ได้ เนื่องจากการครอสโอเวอร์แบบตำแหน่งเดียวอาจทำให้ค่าน้ำหนักมีลักษณะไม่ถูกต้อง จึงได้นำการครอสโอเวอร์แบบ Multipoint มาใช้ โดยทำการเลือก

ชุดน้ำหนักขึ้นมา 2 ชุดจากการสุ่มและจะต้องไม่ใช่ชุดน้ำหนักเดียวกัน เมื่อเลือกชุดน้ำหนักขึ้นมา 2 ชุดได้แล้วจะทำการสลับไขว้ตำแหน่งของค่าน้ำหนักในชุดน้ำหนักนั้นๆ การสลับไขว้กันนั้นจะสลับตำแหน่งของค่าน้ำหนักที่เชื่อมจากโหนดหนึ่งไปยังชั้นถัดไป ดังแสดงในรูป 3.5



W[i][j] = ค่าน้ำหนักที่เชื่อมในชั้นที่ i โหนดที่ j

รูปที่ 3.5 ตำแหน่งในการครอสโอเวอร์

ในการครอสโอเวอร์ จะต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์เพื่อหาจำนวนของสตริงจากประชากรทั้งหมดที่จะเกิดการครอสโอเวอร์ ค่าพารามิเตอร์นี้คือค่าความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์ (Probability of Crossover, Pc) ขั้นตอนการสุ่มชุดค่าน้ำหนักที่เกิดการครอสโอเวอร์ตามค่าความน่าจะเป็นของการครอสโอเวอร์ มีดังต่อไปนี้

1) สุ่มชุดค่าน้ำหนักมา 2 ชุด โดยไม่ซ้ำกัน
2) สร้างค่าสุ่ม (Random number) r ที่มีค่าอยู่ในช่วง [0…1]
3) ถ้า r < Pc (ในที่นี้ตั้ง Pc = 0.7) เลือกตำแหน่งดังกล่าวในการทำการครอสโอเวอร์

3.1.3.4 กระบวนการมิวเตชัน

กระบวนการมิวเตชัน เป็นการเปลี่ยนค่าบางตำแหน่งของชุดค่าน้ำหนักทั้งหมด เพื่อให้ได้ชุดค่าน้ำหนักใหม่ โดยการเลือกตำแหน่งอย่างสุ่ม และทำการสุ่มตำแหน่งในชุดน้ำหนักนั้นๆ เพื่อทำการสลับค่ากับตำแหน่งที่ถูกเลือกในครั้งแรก โดยมีการกำหนดค่าความน่าเป็นในการมิวเตชันเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ เพื่อควบคุมจำนวนตำแน่งที่จะมิวเตชั่น

จะพบว่ากระบวนการมิวเตชั่นเป็นการกระทำแบบตำแหน่งต่อตำแหน่ง จำเป็นต้องกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการมิวเตชั่น (Probability mutation)หรือตำแหน่งที่คาดว่าจะมีการมิวเตชั่น (Expected mutation) หรือ Pm ดังนั้นทุกตำแหน่งในชุดน้ำหนักที่ผ่านการครอสโอเวอร์นั้นมีโอกาสที่จะถูกมิวเตชั่นได้ทุกตำแหน่ง ขั้นตอนของการมิวเตชั่นมีดังนี้

1) สร้างค่าสุ่ม r อยู่ในช่วง [0..1] สำหรับทุกตำแหน่ง

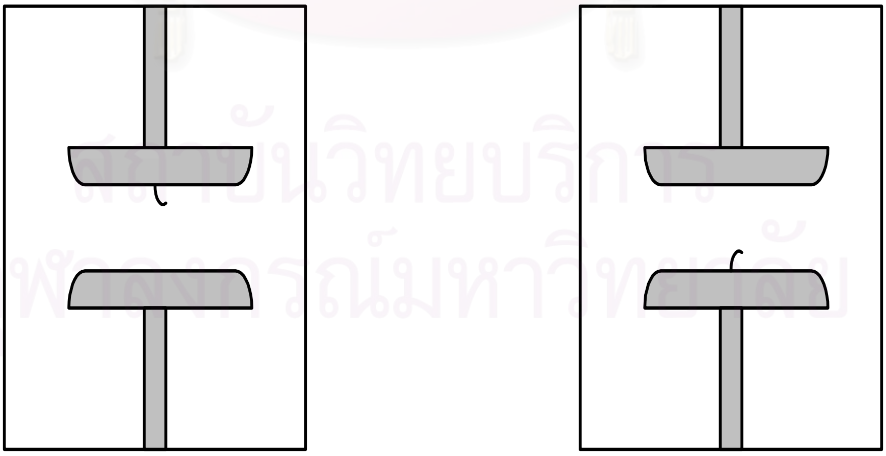
2) ตำแหน่งใดที่ r < Pm (ในที่นี้ Pm = 0.01) เพื่อเลือกตำแหน่งในการทำมิวเตชั่นโดยทำการสุ่มค่าน้ำหนักเข้ามาใหม่โดยมีช่วงอยู่ระหว่าง –1 ถึง 1

หลังจากที่ผ่านกระบวนการคัดเลือก ครอสโอเวอร์ และมิวเตชั่นแล้ว ชุดค่าน้ำหนักใหม่ก็พร้อมที่จะเข้าสู่กระบวนการคัดเลือกในรอบต่อไป กระบวนการคัดเลือกของชุดค่าน้ำหนักใหม่ใช้กระบวนการของวงล้อรูลเล็ทที่มีขนาดของช่องเป็นสัดส่วนกับค่าความเหมาะสม กระบวนการทั้งหมดจะเกิดซ้ำๆกันเป็นไปตามกระบวนการเจนเนติกอัลกอริทึม จนกระทั่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้

3.2 การออกแบบแบบจำลองการเกิด PD

แบบจำลองที่ออกแบบขึ้นจะเป็นการจำลองรูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่สามารถเกิดขึ้นได้จริงในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การจำลองรูปแบบการเกิด PD จะทำการทดลองใน chamber ขนาดของอิเล็กโตรดแผ่นราบมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 cm โดยแบบจำลองจะมีรูปแบบของความบกพร่องแบบต่างๆ ดังนี้

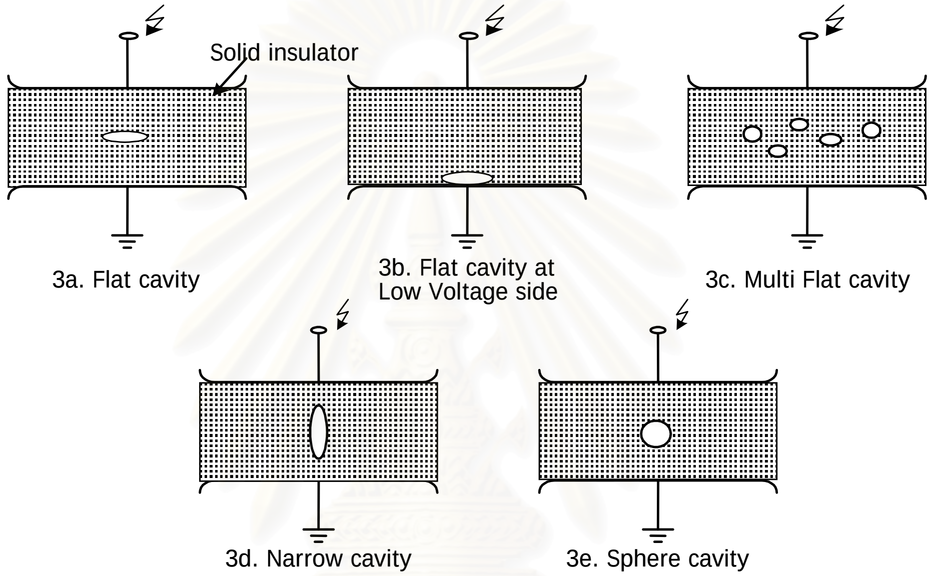
1) การจำลองการเกิดโคโรนาในอากาศ เป็นดีสชาร์จที่เกิดขึ้นบริเวณที่มีปลายแหลมซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง โดยการนำเส้นลวดทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.1 cm ยาว 1.5 cm มาติดกับอิเล็กโตรดทางด้านแรงดันสูง และด้านแรงดันต่ำโดยระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด 10 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.6 เมื่อทำการป้อนแรงดันจะเกิดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณปลายของขดลวดมีผลทำให้เกิดโคโรนาขึ้นมา



ก) โคโรนาที่ด้านแรงสูง ข) โคโรนาที่ด้านแรงต่ำ

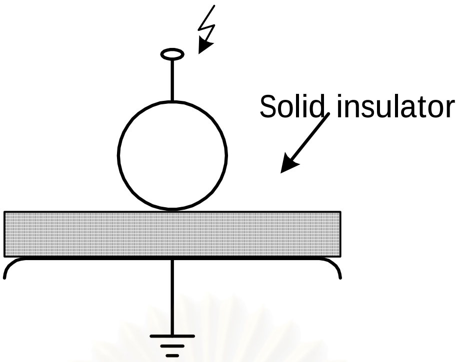
รูปที่ 3.6 การจำลองการเกิดโคโรนาในอากาศ

2) การจำลองการเกิดดีสชาร์จภายในฉนวนแข็งจะทำโดยการจำลองโพรงอากาศเล็กๆให้เกิดขึ้นภายในแผ่น Acrylic ขนาด 13x13x2.5 cm ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมส่วนต่างๆของฉนวนแสดงดังรูปที่ 2.1ก) ในหัวข้อ 2.1.2 การจำลองจะกระทำใน Chamber น้ำมันเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดวาบไฟข้ามฉนวนแข็ง ถ้าเกิดแรงดันตกคร่อมโพรงกาซสูงเกินกว่าค่าแรงดันที่โพรงกาซสามารถทนได้ ทำให้เกิดเบรกดาวน์หรือดีสชาร์จเฉพาะบริเวณโพรงกาซ โดยมีรูปแบบการจำลองแบบต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.7



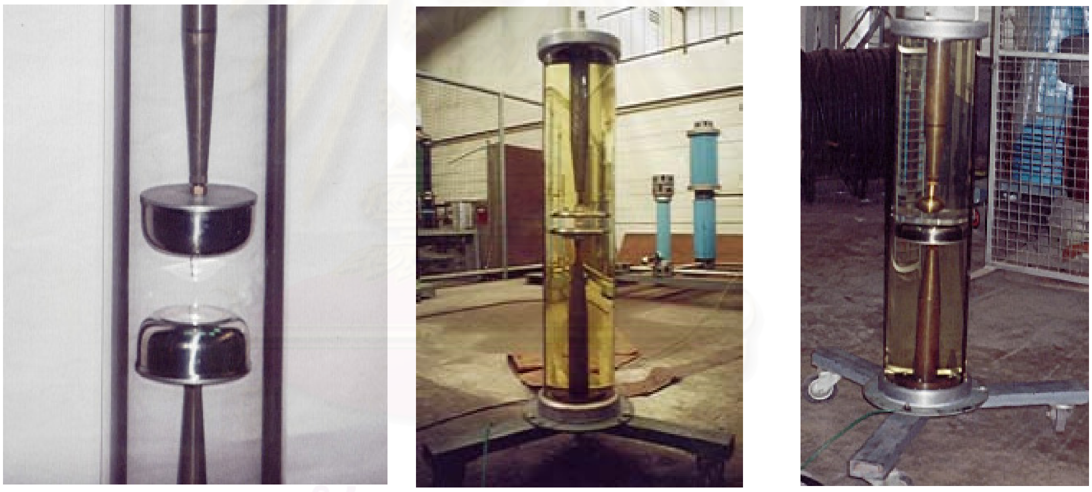
รูปที่ 3.7 การจำลองการเกิดดีสชาร์จภายใน

3) การจำลองการเกิดดีสชาร์จตามผิว ทำโดยใช้แผ่น Acrylic คั่นระหว่างอิเล็กโตรดทรงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 5 cm และอิเล็กโตรดแผ่นราบเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 12 cm การนำแผ่น Acrylic ขนาด 13x13x2.5 cm มาคั่นจะทำให้มีรอยต่อของฉนวน 2 ชนิดซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี้ต่างกัน คือ อากาศกับแผ่น Acrylic ดังแสดงในรูป 3.8 ซึ่งบริเวณรอยต่อของฉนวน 2 ชนิดจะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง



รูปที่ 3.8 การจำลองดีสชาร์จตามผิว

หลังจากที่ทำการออกแบบเสร็จแล้วได้ทำการประกอบสร้างแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 3.9



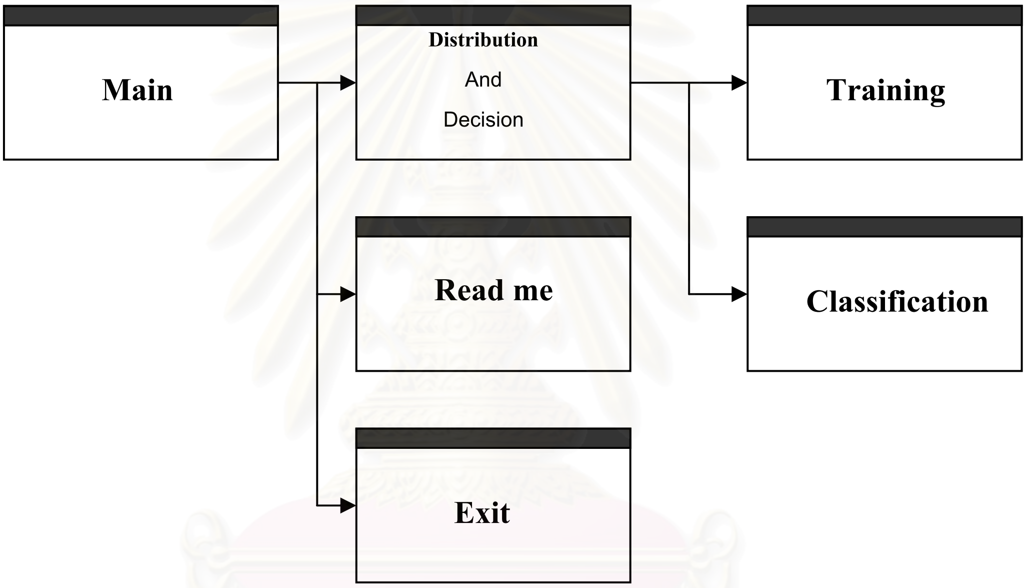
ก) โคโรนา ข) ดีสชาร์จภายใน ค) ดีสชาร์จภายนอก

รูปที่ 3.9 แบบจำลองที่ได้ทำการจำลองความบกพร่องแบบต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 การออกแบบโปรแกรมการรู้จำรูปแบบการเกิด PD

โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยขั้นตอนหลักสำคัญ 3 ส่วน คือขั้นตอนการคำนวณคุณลักษณะของรูปแบบการเกิด PD ขั้นตอนการสอน และขั้นตอนการทดสอบ ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีความต้องการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆให้กับระบบเพื่อให้ระบบมีความยืดหยุ่นสามารถนำมาปรับปรุงใช้งานแก้ปัญหารูปแบบอื่นได้ โดยโปรแกรมจะพัฒนาด้วยภาษา C++ ซึ่งใช้คอมไพเลอร์ (Complier) Borland C++ Builder เวอร์ชั่น 3.0 ของบริษัท Inprise Corporation ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ 98 (WINDOWS 98) โดยมีลำดับของการเรียกใช้ฟอร์มต่างๆดังรูปที่ 3.10 โดยมีรายละเอียดขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.10 ลำดับของการเรียกใช้ฟอร์มต่างๆในโปรแกรม

3.3.1 ขั้นตอนการคำนวณหาคุณลักษณะของรูปแบบการเกิด PD

ในการวิจัยนี้จะทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางสถิติของ $H_n(\phi)$, $H_{qn}(\phi)$ มิติแฟรกตัล และ ลาคิวนาริตี ของรูปแบบการเกิด PD ที่ได้มาจากการตรวจจับซึ่งมีทั้งหมด 13 ค่าดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3.1 และรายละเอียดเพิ่มในภาคผนวก ซึ่งสามารถลดมิติของการกระจาย $H_n(\phi, q)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นอาร์เรย์ 2 มิติขนาดใหญ่ลงได้มากซึ่งมีรายละเอียดการคำนวณในหัวข้อที่ 2.5.2

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ทางสถิติของ PD แบบโคโรนาทางด้านแรงต่ำ

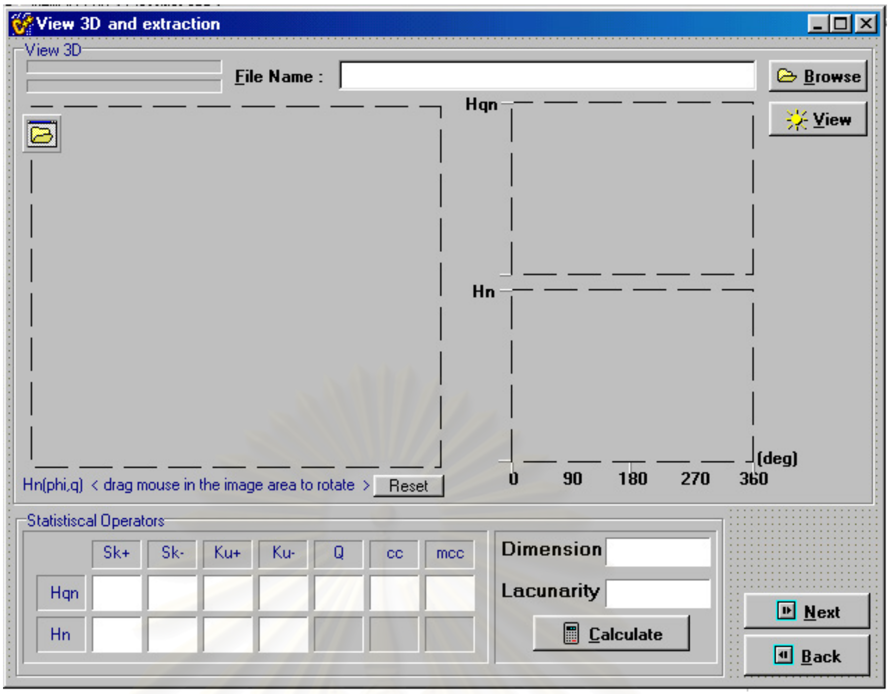
Feature	Distribution		
	$H_{qn}(\phi)$	$H_n(\phi)$	$H_n(\phi,q)$
Skewness+	1.013	1.056	
Skewness-	1.085	-0.307	
Kurtosis +	-1.973	-1.851	
Kurtosis-	-1.871	-2.833	
Q			6.975
Cc			0.681
mcc			3.75
Dimension			2.085
Lacunarity			0.011

โปรแกรมในส่วนของการคำนวณหาค่าคุณลักษณะของรูปแบบการเกิด PD ประกอบด้วยฟอร์ม (form) 1 ฟอร์ม โดยจะปรากฏขึ้นเมื่อกดปุ่ม "Analysis" ในฟอร์ม 3D ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งมีรายละเอียดของฟังก์ชั่นต่างๆดังนี้

1) การโหลดข้อมูลการกระจายของ PD โดยกดปุ่ม **Browse** โปรแกรมจะทำการอ่านข้อมูลจากไฟล์ที่บันทึกได้จากการทดลอง

2) การแสดงผลการกระจาย PD โดยการกดปุ่ม **View** โปรแกรมจะนำข้อมูลที่โหลดขึ้นมาไปแสดงผลในกรอบแสดงภาพหลัก และกรอบแสดงภาพรองอีก 2 กรอบ โดยในกรอบภาพหลักจะแสดงการกระจาย 3 มิติ และกรอบภาพรองจะแสดงการกระจายแบบ 2 มิติ

3) การคำนวณหาค่าทางสถิติ จากข้อมูลการกระจาย PD โดยกดปุ่ม **Calculate**



รูปที่ 3.11 แสดงหน้าจอฟอร์ม 3D

3.3.2 ขั้นตอนในการสอน

ในการออกแบบโปรแกรมการรู้จำรูปแบบการเกิด PD ในส่วนของการจำแนกนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการสอน จะมีหน้าที่ในการสอนรูปแบบของการเกิด PD ในรูปแบบต่างๆให้ระบบมีความสามารถในการเรียนรู้ซึ่งผลของการสอนจะอยู่ในลักษณะของค่าน้ำหนัก ส่วนของการจำแนกจะทำการนำค่าน้ำหนักที่ได้จากการสอนมาทำการคำนวณเพื่อจำแนกประเภทของการเกิด PD

เมื่อกดปุ่ม

ในฟอร์ม 3D จะเข้าสู่ฟอร์มClassification ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยในฟอร์มนี้จะมีให้เลือก 2 โหมด คือ โหมด Trainning และ โหมด Classification ในส่วนนี้จะเลือกไปที่โหมด Trainning จะเข้าสู่ฟอร์ม Trainning ซึ่งจะมีรายละเอียดของฟังก์ชั่นต่างๆดังนี้

1) ในส่วนของ Group Box “Add Database” จะเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการเพิ่มชนิดของอุปกรณ์และความบกพร่องของอุปกรณ์แต่ละชนิดลงไปในฐานข้อมูลโดยจะต้องเลือกโหมดใน Combo box ก่อนว่าจะทำการเพิ่ม ชนิดของอุปกรณ์หรือความบกพร่องของอุปกรณ์ ในการเพิ่มชนิดของอุปกรณ์นั้นสามารถเพิ่มได้ทันทีโดยการพิมพ์ชื่อใน text box และกดปุ่ม

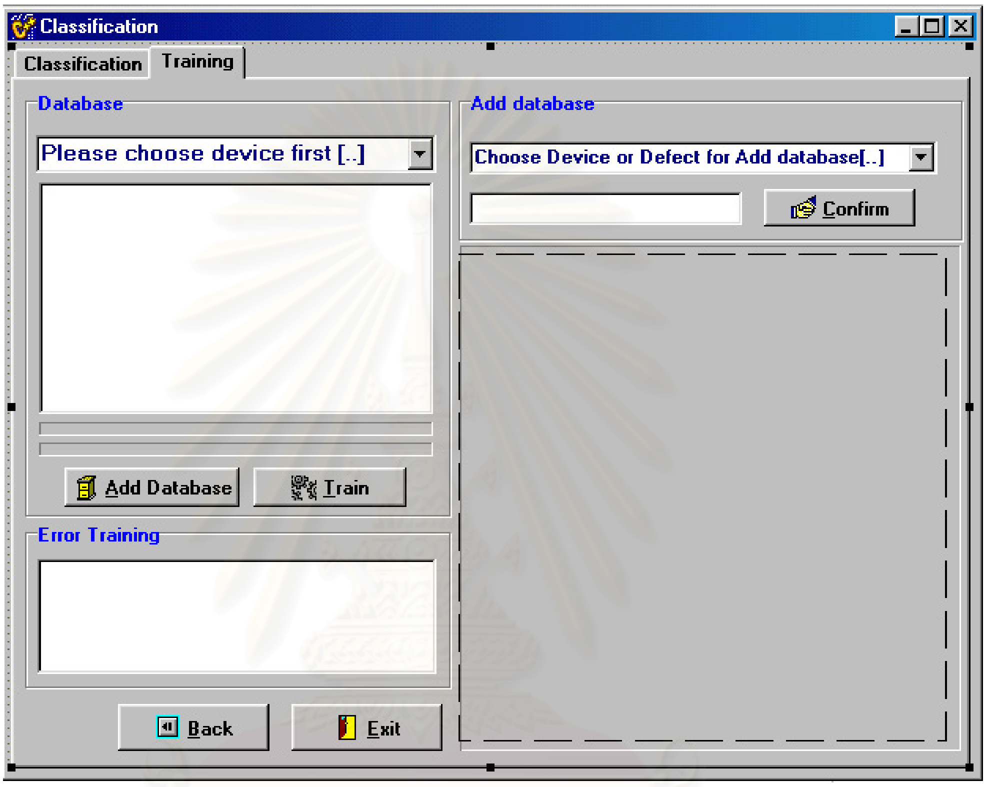
ชื่อของอุปกรณ์จะถูกบันทึกลงในฐานข้อมูลทันที แต่ถ้าจะทำการเพิ่มความบกพร่องของอุปกรณ์จะต้องทำการเลือกชนิดของอุปกรณ์เสียก่อน เพื่อที่จะทราบว่าจะเพิ่มความบกพร่องลงในอุปกรณ์ชนิดใด

2) ในส่วนของ Group Box “Database” ปุ่ม

จะทำหน้าที่ในการนำค่าทางสถิติที่คำนวณได้จากฟอร์ม 3D มาบันทึกร่วมกับค่าเป้าหมายที่ได้จากการเลือกชนิดของอุปกรณ์และชนิดของความบกพร่องเพื่อเป็นข้อมูลใช้ในการสอนต่อไป

3) ปุ่ม

จะทำหน้าที่ในการสอนให้กับระบบ



รูปที่ 3.12 แสดงหน้าจอฟอร์มการสอน

3.3.3 ขั้นตอนการจำแนก

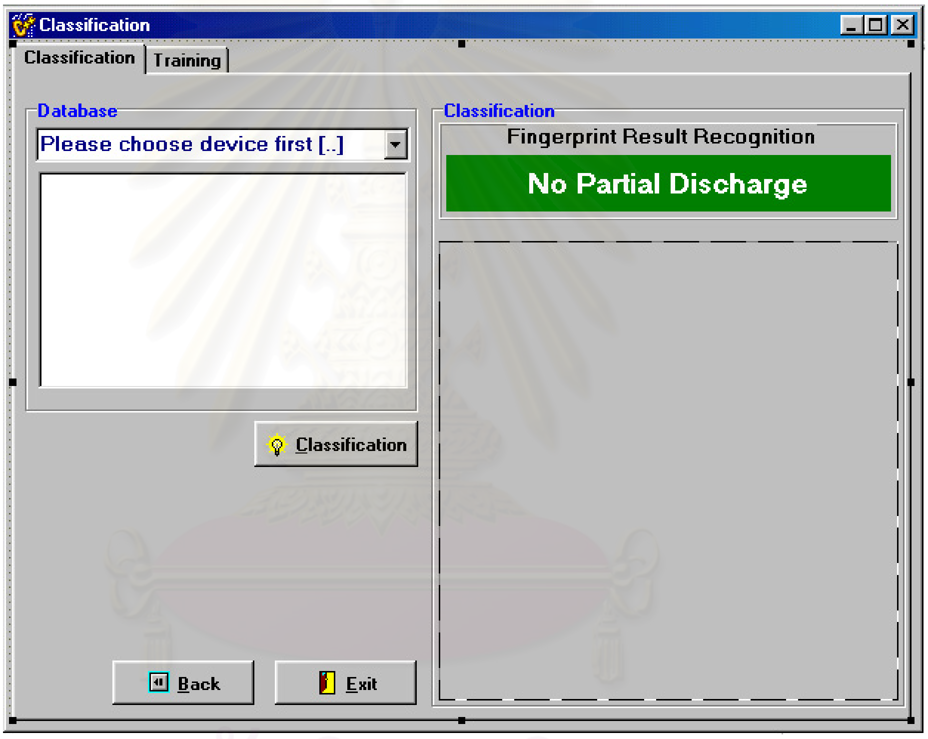
เมื่อต้องการจำแนกประเภทของการเกิด PD จะต้องเลือกไปยังโหมด Classification จากฟอร์ม Classification แสดงดังรูปที่ 3.13 ในการทำงานของโหมดนี้จะต้องทำการเลือกชนิดของอุปกรณ์ที่จะทำการจำแนกจากนั้นเมื่อกดปุ่ม Classification โปรแกรมจะโหลดค่าคำนวณทางสถิติทั้ง 13 ค่าในฟอร์ม 3D มาคำนวณแล้วทำการจำแนกแสดงผลในกรอบภาพ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1) การจองเนื้อที่สำหรับตัวแปรพารามิเตอร์และโครงสร้างของระบบในชั้นต่างๆรวมทั้งนำค่าน้ำหนักที่บันทึกซึ่งได้จากกระบวนการสอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) การรับค่าชุดข้อมูลนำเข้าที่ใช้ทดสอบซึ่งจะประกอบด้วยกลุ่มข้อมูลเพียงกลุ่มเดียวคือ กลุ่มข้อมูลนำเข้าที่เป็นค่าของแต่ละโหนดในชั้นนำเข้าข้อมูล (ค่าคำนวณทางสถิติและค่าแฟรกตัลทั้ง 13 ค่า) เพราะในขั้นตอนนี้จะทำการประมวลผลเพียงรอบเดียว โดยไม่มีการปรับปรุงค่าน้ำหนักและไม่มีการเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลเป้าหมาย

3) การคำนวณหาค่าผลลัพธ์จากชุดข้อมูลนำเข้ากับชุดของค่าน้ำหนักในชั้นนำเข้าข้อมูล แล้วส่งผลลัพธ์ให้กับชั้นถัดไปซึ่งผลลัพธ์นี้จะเป็นชุดข้อมูลนำเข้าให้กับชั้นถัดไปด้วย แล้วทำการคำนวณหาผลลัพธ์จนกระทั่งถึงชั้นผลลัพธ์ จะถือว่าเป็นผลลัพธ์ของชุดข้อมูลในชั้นทดสอบ



รูปที่ 3.13 แสดงหน้าจอฟอร์มการจำแนก

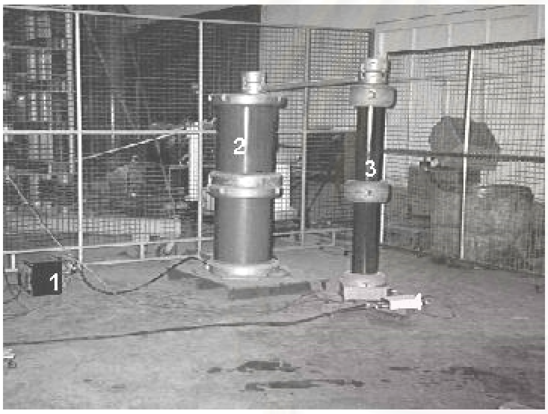
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
การทดสอบและประเมินผล

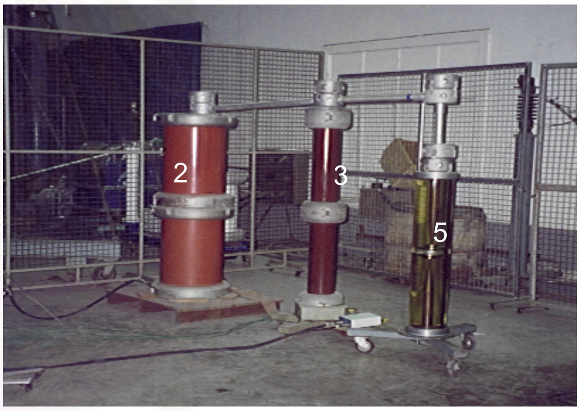
การทดสอบคุณสมบัติต่างๆเพื่อให้มั่นใจได้ว่า โปรแกรมวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนที่สร้างขึ้นนั้นมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยมีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

4.1 การเก็บฐานข้อมูล

การทดสอบเก็บฐานข้อมูลจะกระทำโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ PD มาตรวจจับ PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้วงจรทดสอบแบบวิธีตรง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ก) และ ข) จากนั้นจะทำการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบที่จำลองความบกพร่องขึ้นมา และทำการทดสอบเก็บผลเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างฐานข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ PD ด้วยโปรแกรมที่สร้างขึ้นต่อไป



ก)

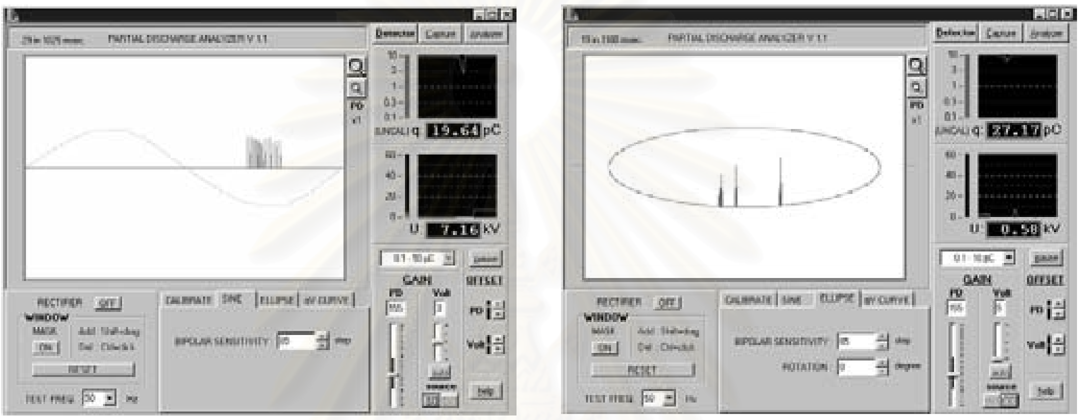


ข)

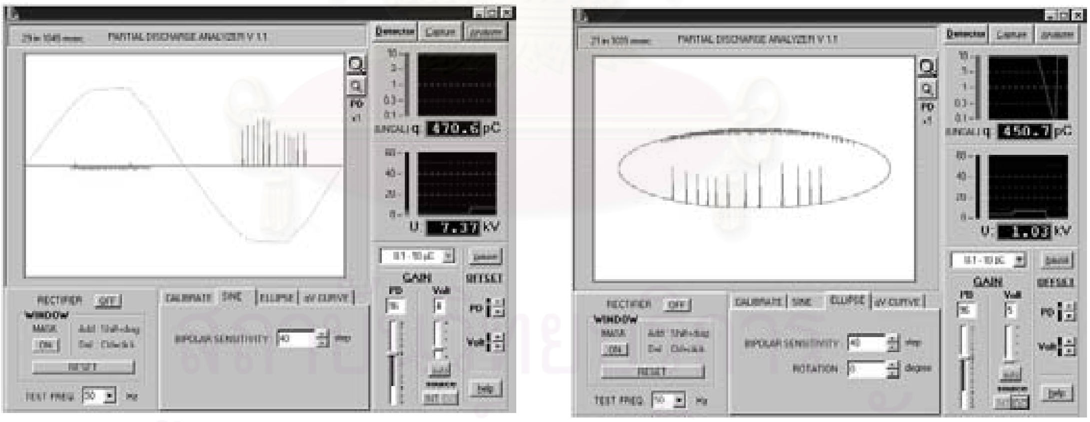
รูปที่ 4.1 อุปกรณ์ทดสอบมีดังนี้ 1) หม้อแปลงขดลวดแยก (Isolating transformer) 2) หม้อแปลงทดสอบ 200kV 10kVA 3) Coupling capacitor 40 pF 4) อุปกรณ์รับสัญญาณ (CD) 5) อุปกรณ์ทดสอบที่จำลองขึ้น

เริ่มต้นการทดสอบด้วยการสอบเทียบวงจรทดสอบดังรูป 4.1ก) โดยการใช้เครื่องสอบเทียบดีสชาร์จมาตรฐานป้อนประจุสอบเทียบคร่อมที่ขั้วไฟฟ้าของวัสดุทดสอบ แล้วทำการสอบเทียบตามค่าประจุที่ป้อนคร่อมวัสดุขณะทำการสอบเทียบ และปรับระดับเส้นแสดงความสูงของสัญญาณให้เท่ากับความสูงของสัญญาณสอบเทียบ เมื่อทำการสอบเทียบเรียบร้อยแล้ว พบว่าเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จ

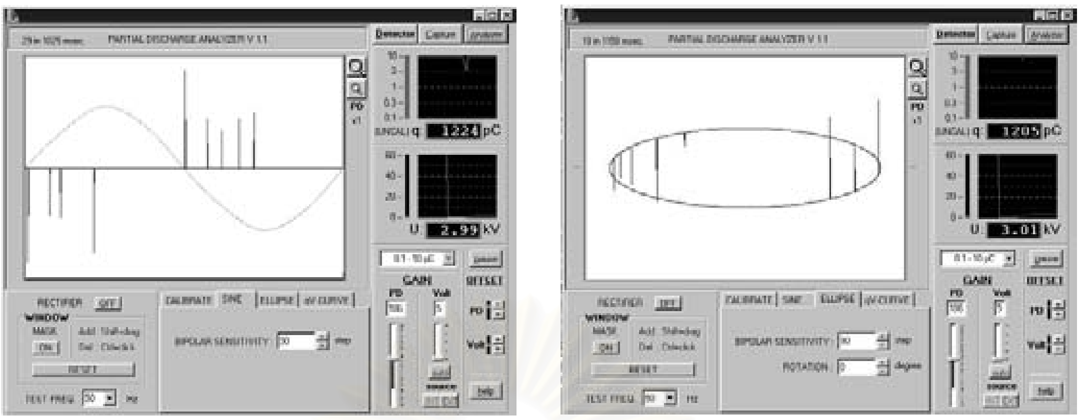
บางส่วนอ่านค่าสัญญาณรบกวนสภาพแวดล้อมได้ 0.67 พิโคคูลอมบ์ แสดงว่าความไวในการวัด PD ขณะนั้น คือ 1.34 พิโคคูลอมบ์ เมื่อป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบเริ่มจากศูนย์และเพิ่มแรงดันขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง 100 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันพิกัดของเครื่องวัดพบว่าไม่เกิด PD ใดๆ จึงนำตัวจำลอง PD ที่สร้างขึ้นแบบต่างๆต่อเข้าไปดังรูป 4.1 ข) แล้วทำการป้อนแรงดันเข้าวงจรอีกครั้ง ในการจำลอง PD แบบต่างๆจะเกิดขึ้นที่ระดับแรงดันแตกต่างกัน โดยผลการทดสอบที่แสดงบนเครื่องวัดของการจำลอง PD แต่ละแบบแสดงดังรูปที่ 4.2



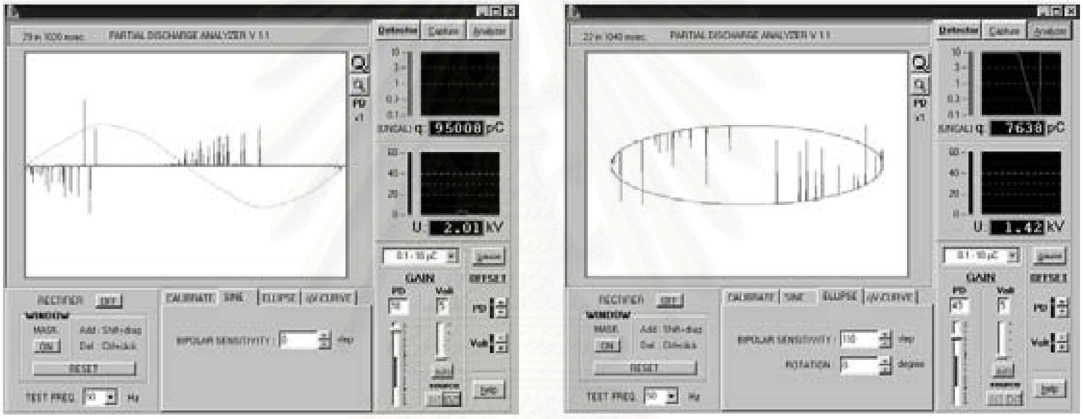
ก) PD ที่เกิดจากการจำลองการโคโรนาที่ขั้วแรงสูงที่แรงดันเริ่มต้น



ข) PD ที่เกิดจากการจำลองการโคโรนาที่ขั้วแรงสูงที่แรงดันสูงขึ้น



ค) PD ที่เกิดจากการจำลองดีสชาร์จภายใน



ง) PD ที่เกิดจากการจำลองดีสชาร์จตามผิว

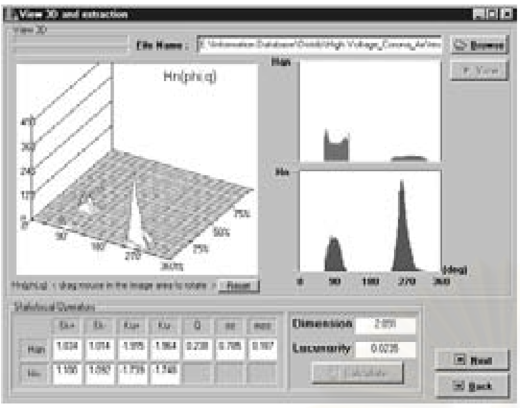
รูปที่ 4.2 PD ที่เกิดจากตัวจำลอง PD แบบต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

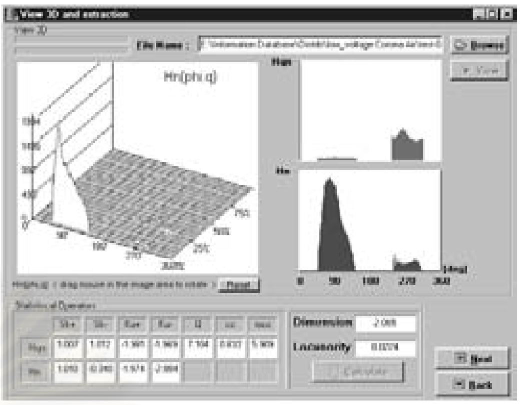
หลังจากทำการทดสอบตัวจำลอง PD ที่สร้างขึ้นทั้งหมดจะทำการเก็บข้อมูลไว้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าทางสถิติ และค่าแฟรกตัล เพื่อทำการจำแนกประเภท PD ต่อไป

4.2 **การทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น**

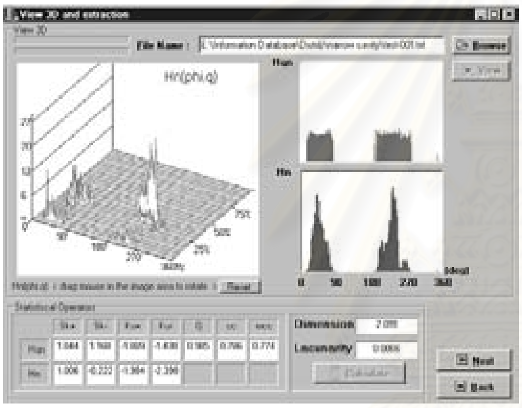
จากผลการตรวจจับ PD ที่ได้ทำการบันทึกไว้ในขณะทดสอบ เพื่อใช้ในการสอนให้กับระบบเมื่อทำการวิเคราะห์ PD ต้องทำการคำนวณค่าทางสถิติเพื่อที่จะเก็บคุณลักษณะสำคัญของรูปแบบนั้นๆไว้ดังในรูปที่ 4.3 โดยค่าทางสถิติที่เก็บในแต่ละครั้งของรูปแบบการเกิดชนิดเดียวกันจะมีค่าใกล้เคียงกันดังแสดงในภาคผนวก ก



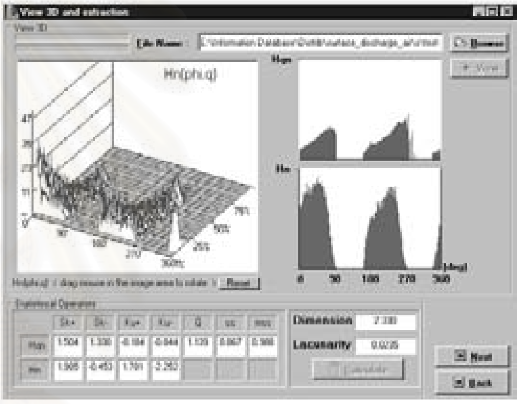
ก) โคโรนาที่ด้านแรงดันสูง



ข) โคโรนาที่ด้านแรงดันต่ำ



ค) ดีสชาร์จภายใน

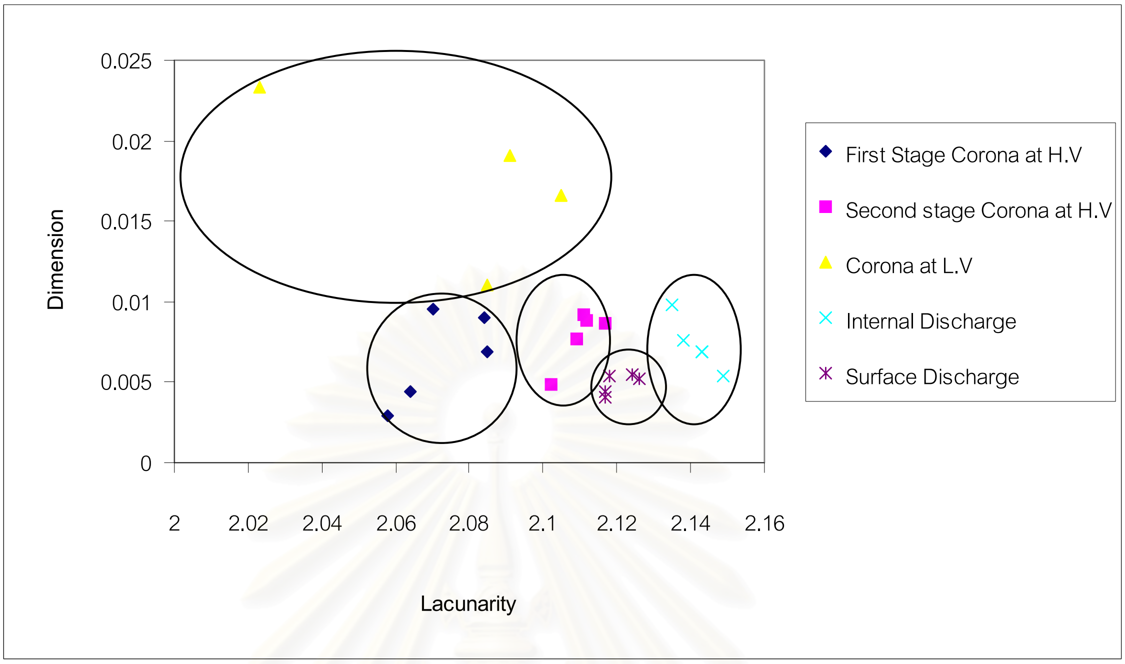


ง) ดีสชาร์จตามผิว

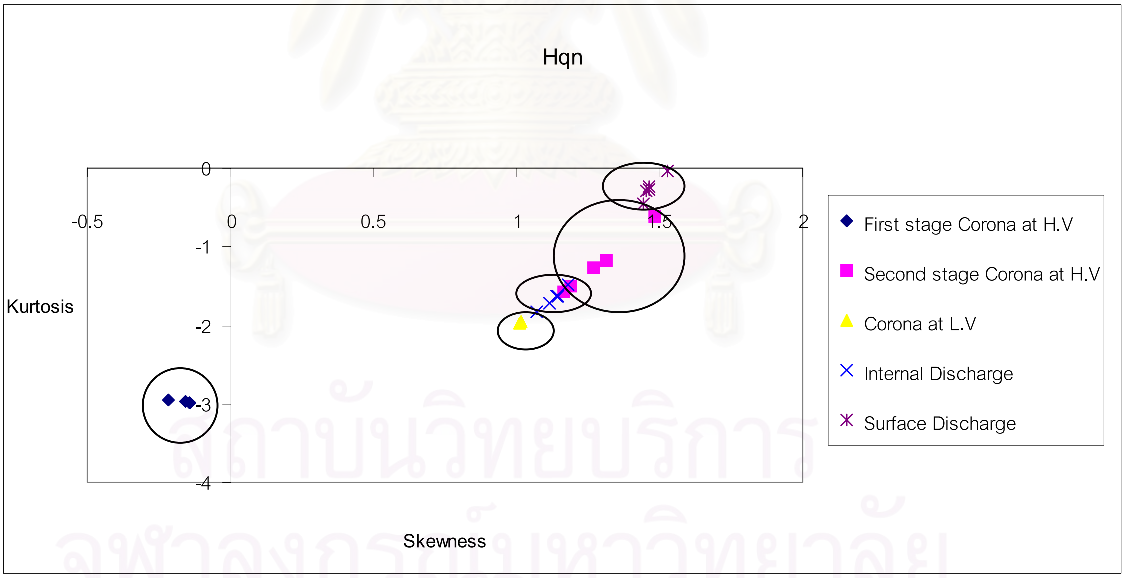
รูปที่ 4.3 ลักษณะการกระจายของข้อมูล PD และค่าทางสถิติของ PD ที่เกิดจากสาเหตุต่างๆ

หลังจากที่ทำการคำนวณค่าทางสถิติและค่าแฟรกตัลของการเกิด PD จะพบว่าค่าทางสถิติและแฟรกตัลสามารถบอกถึงลักษณะเด่นของ PD ได้ละประเภทได้ดีดังแสดงในรูปที่ 4.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ข้อมูลแต่ละกลุ่มของค่าแฟรกตัล

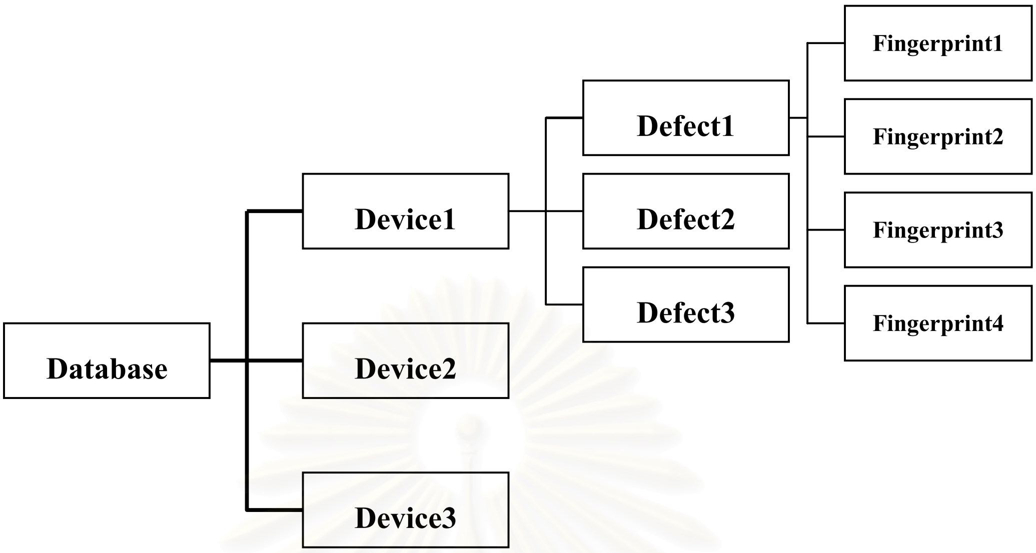


ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ข้อมูลแต่ละกลุ่มของค่าสถิติ

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของกลุ่มข้อมูล

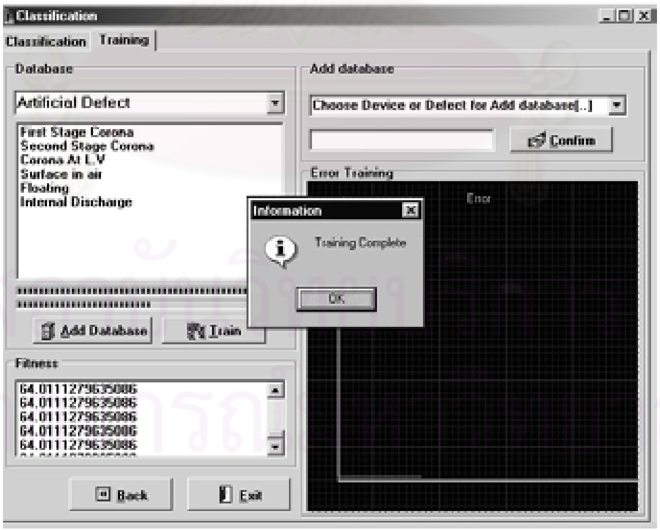
จากนั้นก็จะทำการบันทึกข้อมูลในการคำนวณไว้โดยแบ่งตามสาเหตุของการเกิด PD และชนิดของอุปกรณ์ไว้ในฐานข้อมูล โดยในโปรแกรมจะทำการสร้างฐานข้อมูลขึ้นมาดังรูปที่ 4.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



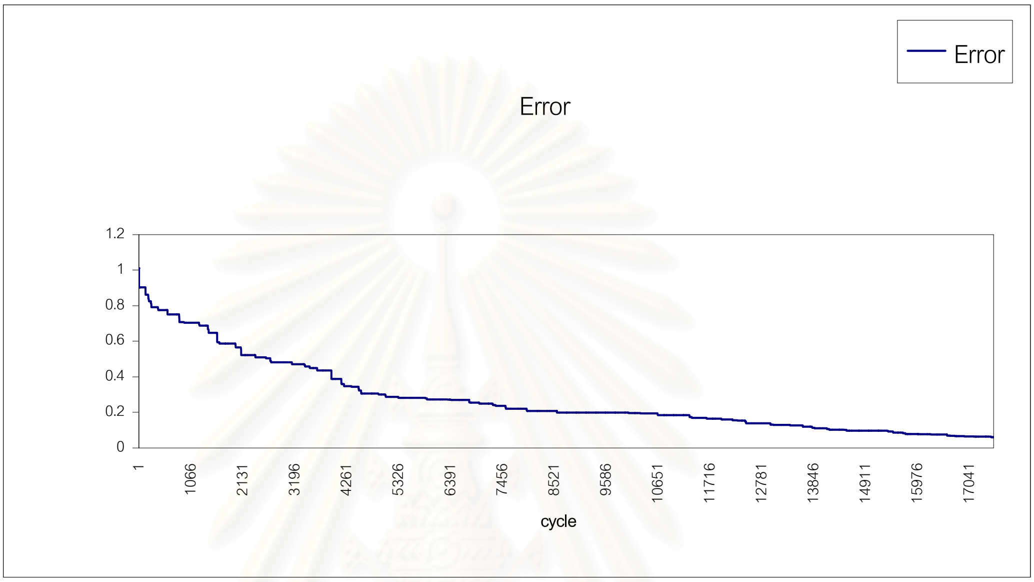
รูปที่ 4.5 ฐานข้อมูลที่โปรแกรมสร้างขึ้น

ในกรณีในฐานข้อมูลไม่มีข้อมูลก็สามารถเพิ่มข้อมูลเข้าไปในฐานข้อมูลได้หลังจากนั้นจะทำการสอนให้กับระบบเพื่อให้ระบบมีความสามารถในการจำแนกรูปแบบการเกิด PD ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.6

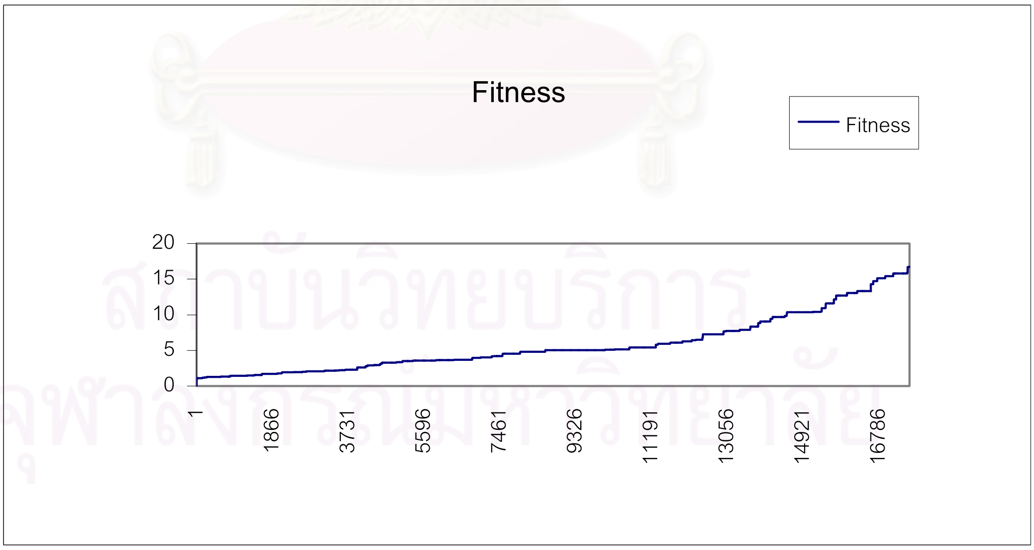


รูปที่ 4.6 ฟอร์มการสอนให้กับระบบ

ในกระบวนการเรียนรู้จะหยุดการสอนก็ต่อเมื่อเป็นไปตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้คือ ค่าผิดพลาดเฉลี่ยของค่าน้ำหนักแต่ละชุดต้องน้อยกว่า 0.05 ค่าความเหมาะสมและค่าความผิดพลาดของระบบต่อจำนวนรอบของการสอนแสดงดังรูปที่ 4.7



ก) กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของระบบในระหว่างการสอน



ข) กราฟแสดงค่าความเหมาะสมของระบบในระหว่างการสอน

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการสอน

ต้องมีเมื่อระบบได้รับการสอนเสร็จสิ้นแล้วระบบดังกล่าวจะมีความสามารถในการจำแนกรูปแบบการเกิด PD ได้ นั้นคือได้ค่าน้ำหนักที่เหมาะสมของระบบ ในการทดสอบระบบการรู้จำจะทำโดยการนำข้อมูลที่ใช้สอนและข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบมาทดสอบกับโปรแกรมจะได้ผลตามตารางที่ 4.1และตารางที่ 4.2 ความถูกต้องของผลการจำแนกรูปแบบของการเกิด PD แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 การจำแนกข้อมูลที่ใช้สอน

Input \ Output	First Stage Corona at H.V	Second Stage Corona at H.V	Corona at L.V	Internal Discharge	Surface Discharge	Floating object
First Stage Corona at H.V	100	-	-	-	-	-
Second Stage Corona at H.V	-	100	-	-	-	-
Corona at L.V	-	-	100	-	-	-
Internal Discharge	-	-	-	100	-	-
Surface Discharge	-	-	-	-	100	-
Floating object	-	-	-	-	-	100

ตารางที่ 4.2 การจำแนกข้อมูลที่ใช้ทดสอบ

Input \ Output	First Stage Corona at H.V	Second Stage Corona at H.V	Corona at L.V	Internal Discharge	Surface Discharge	Floating object
First Stage Corona at H.V	75	-	10	15	-	-
Second Stage Corona at H.V	-	85	-	15	-	-
Corona at L.V	-	-	90	10	-	-
Internal Discharge	-	5	-	95	-	-
Surface Discharge	-	-	-	-	100	-
Floating object	-	5	-	-	-	95

ตารางที่ 4.3 ความถูกต้องในการจำแนกรูปแบบการเกิด PD

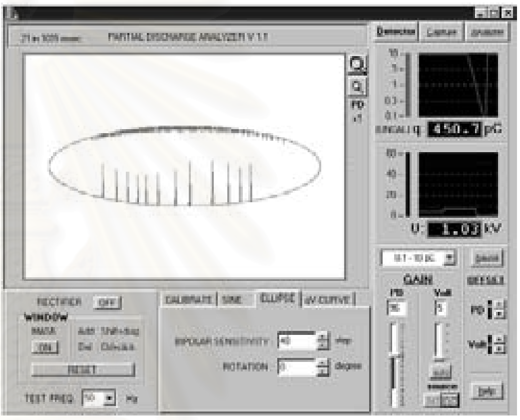
Defect class	Success rate
First Stage Corona at H.V	75%
Second Stage Corona at H.V	85%
Corona at L.V	90%
Internal Discharge	95%
Sureface Discharge	100%
Floating object	95%

4.3 การทดสอบใช้งานจริงโปรแกรมการจำแนกประเภทของการเกิด PD

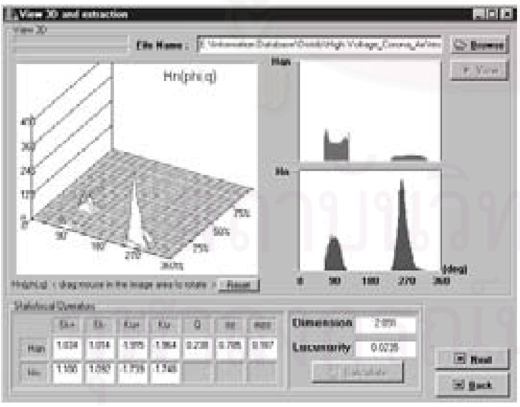
4.3.1 การทดสอบ PD ที่เกิดในตัวเก็บประจุในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจริงจะทำโดยนำวัสดุทดสอบที่มี PD เกิดขึ้นดังในรูปที่ 4.8 ก) เป็นการเกิดโคโรนาที่ขั้วแรงสูงของตัวเก็บประจุขนาด 100 pF จากนั้นเก็บผลและทำการคำนวณค่าทางสถิติและค่าแฟรกตัลจากนั้นทำการคำนวณเพื่อจำแนกสาเหตุการเกิด PD โดยอ้างอิงกับฐานข้อมูลที่สร้างขึ้น โดยผลการวัดและจำแนกแสดงดังรูปที่ 4.8

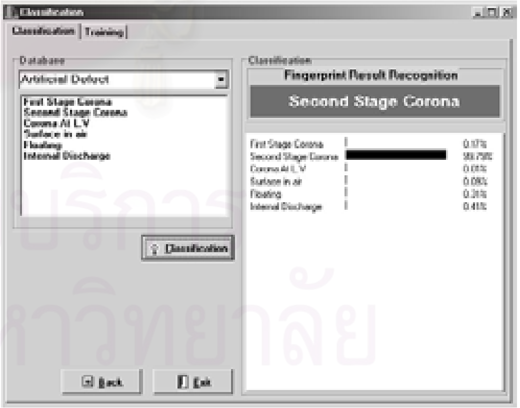
ก) วัสดุทดสอบ C = 100 pF



ข) สัญญาณ PD ที่แสดงในรูปวงรี



ค) ลักษณะการกระจายของโคโรนา

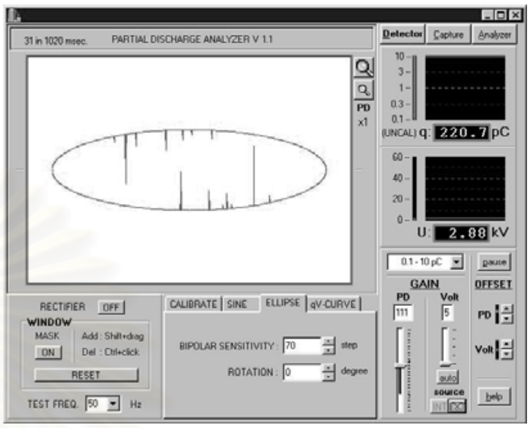


ง) ผลการจำแนก

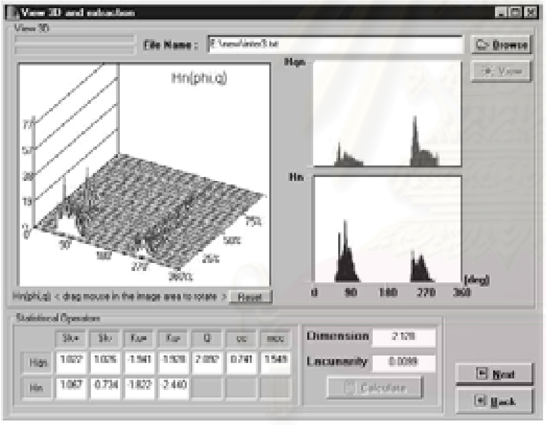
รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบ PD แบบโคโรนา

ผลการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 24 kV 240/480 V 37.5 kVA พบว่ามีดีสชาร์จภายในเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.9

ก) วงจรทดสอบ



ข) สัญญาณ PD ที่แสดงในรูปวงรี



ค) ลักษณะการกระจายของดีสชาร์จภายใน

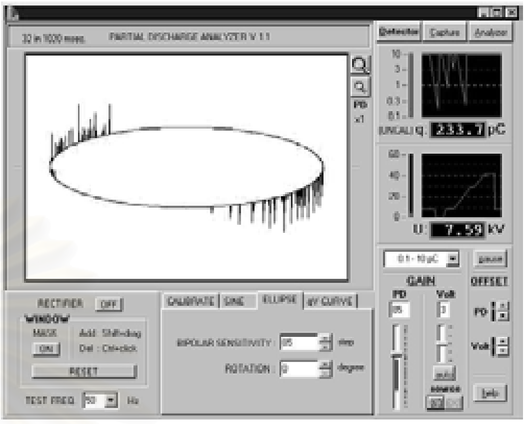
ง) ผลการจำแนก

รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบ PD แบบดีสชาร์จภายใน

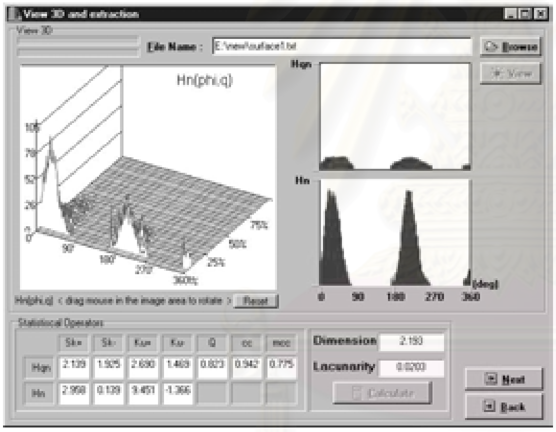
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดสอบลักษณะของการเกิดดีสชาร์จตามผิว ทดสอบโดยการนำสายแรงสูงพันรอบแท่งฉนวนดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งลักษณะดังกล่าวจะเกิดกระแสไหลตามผิวของแท่งฉนวนไปยังกราวด์

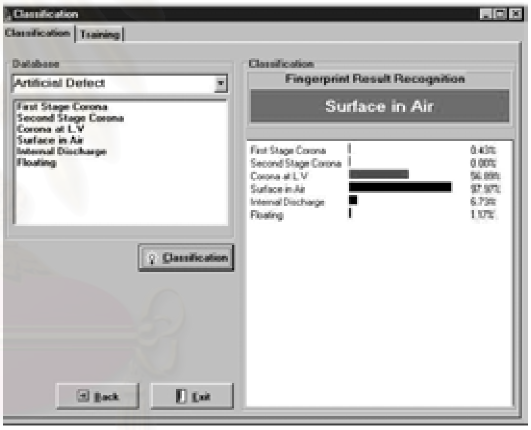
ก) วงจรทดสอบ



ข) สัญญาณ PD ที่แสดงในรูปวงรี



ค) ลักษณะการกระจายของดีสชาร์จตามผิว



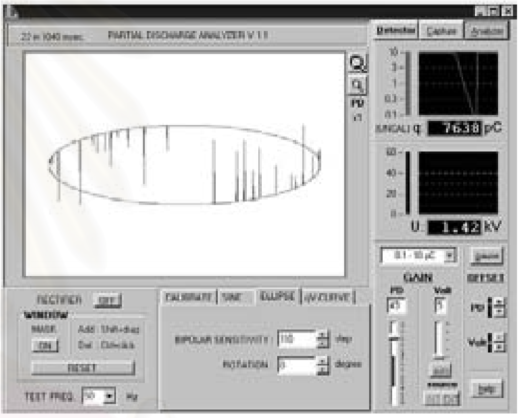
ง) ผลการจำแนก

รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบ PD แบบดีสชาร์จตามผิว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

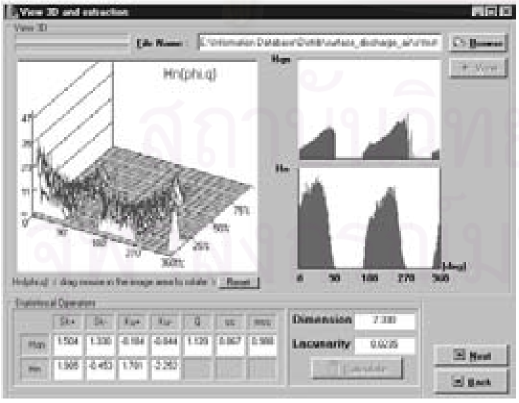
4.3.2 การทดสอบ PD ที่โรงงานบางกอกเคเบิล

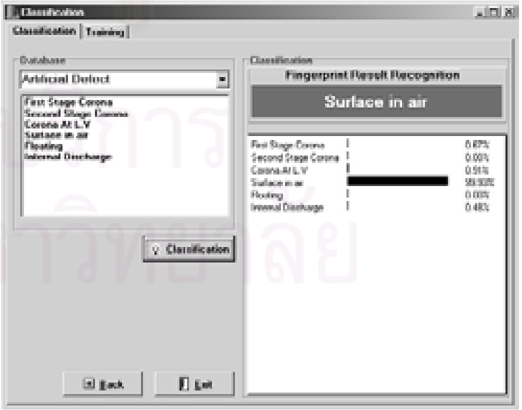
ทำการทดสอบเคเบิลที่โรงงานบางกอกเคเบิลวัสดุทดสอบเป็น เคเบิล XLPE CV-AWA 1x185 mm^2 ความยาว 203 m 12/21 kV เมื่อป้อนแรงดันที่ระดับ 21 kV เป็นเวลา 1 นาที และลดแรงดันลงมาที่ 18 kV พบว่าไม่มี PD เกิดขึ้น จึงได้ทำการจำลองดีสชาร์จตามผิวให้กับเคเบิล โดยการนำสายแรงสูงพาดตัวเก็บประจุคับปลิงเพื่อให้เกิดกระแสไหลตามผิวดังรูปที่ 4.11 ก) และผลการทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.11 ข) 4.11 ค) และ 4.11 ง)



ก) วงจรทดสอบ

ข) สัญญาณ PD ที่แสดงในรูปวงรี





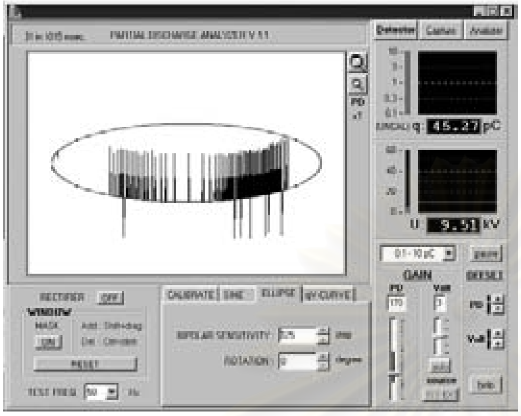
ค) ลักษณะการกระจายของดีสชาร์จตามผิว

ง) ผลการจำแนก

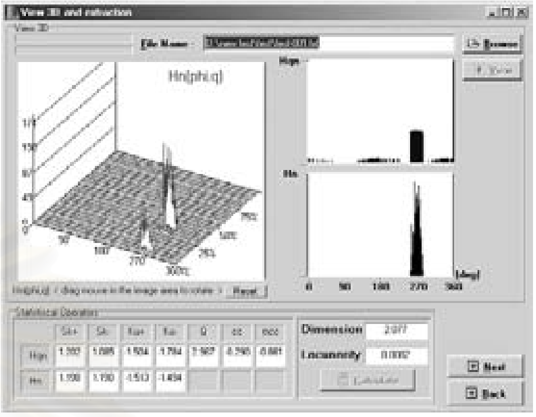
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบ PD แบบดีสชาร์จตามผิว ที่บางกอกเคเบิล

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

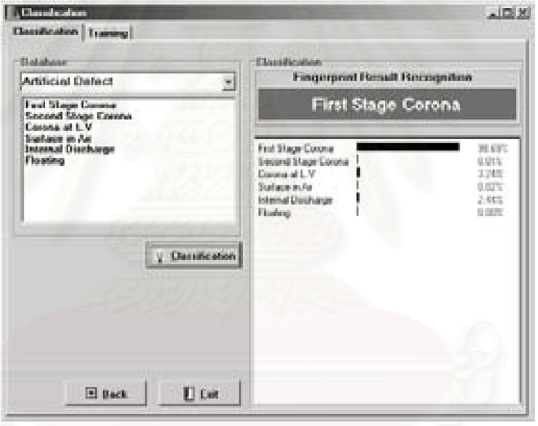
ผลการทดสอบโคโรนาที่ขั้วแรงสูง จากรูปที่ 4.11ก) ทำการต่อลวดทองแดงที่ขั้วแรงสูงของตัวเก็บประจุคับปลิง ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.12



ก) สัญญาณ PD ที่แสดงในรูปวงรี



ข) ลักษณะการกระจายของโคโรนาที่ขั้วแรงสูง

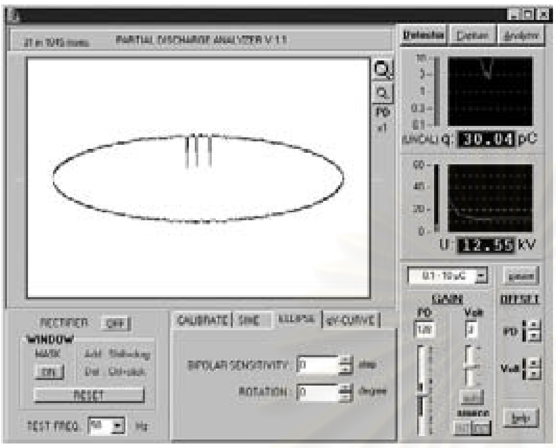


ค) ผลการจำแนก

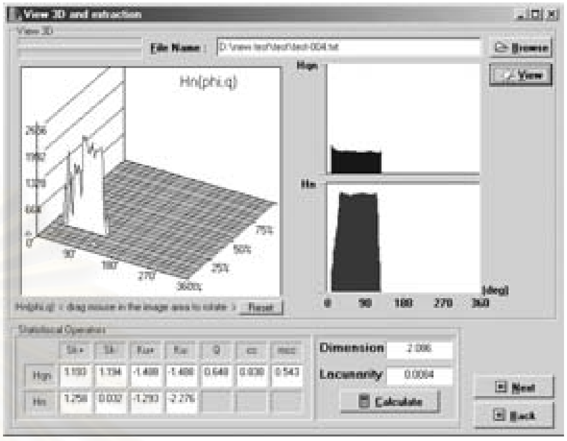
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบ PD แบบโคโรนาที่ขั้วแรงสูง ที่บางกอกเคเบิล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

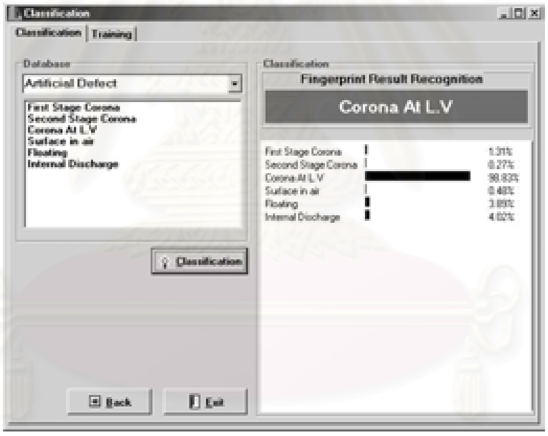
ผลการทดสอบโคโรนาที่ขั้วแรงต่ำ จากรูปที่ 4.11ก) ทำการต่อลวดทองแดงที่ด้านกราวด์ของ Coupling capacitor ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.13



ก) สัญญาณ PD ที่แสดงในรูปวงรี



ข) ลักษณะการกระจายของโคโรนาที่ด้านกราวด์



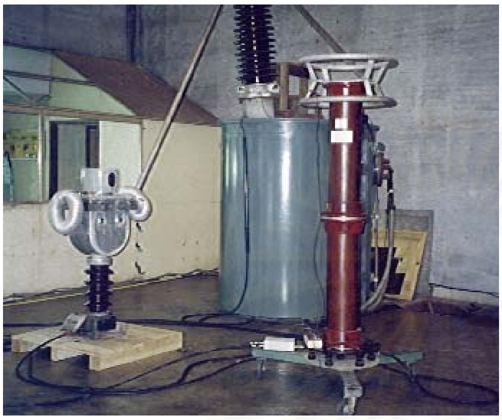
ค) ผลการจำแนก

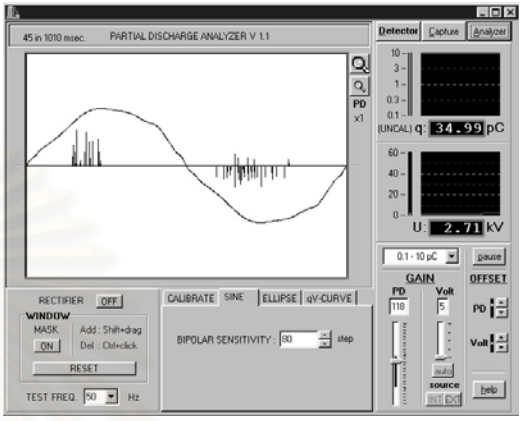
รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบ PD แบบโคโรนาที่ขั้วแรงต่ำ ที่บางกอกเคเบิล

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 การทดสอบ PD ที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

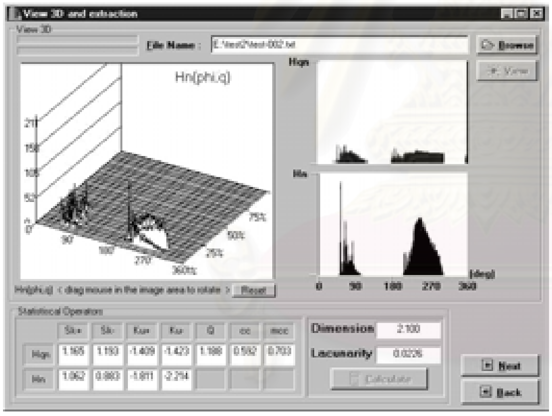
ผลการทดสอบ CT AGU-38 36/70/200 kV insulator class A แสดงดังรูปที่ 4.14

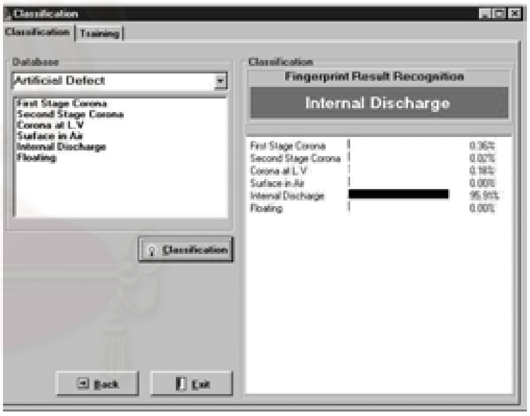




ก) วงจรทดสอบ

ข) สัญญาณ PD ที่แสดงในรูปวงรี





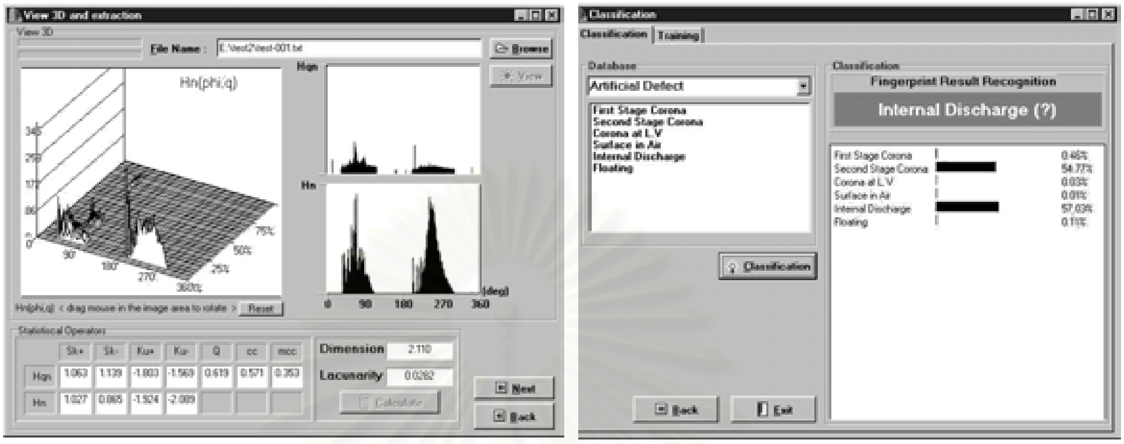
ค) ลักษณะการกระจายของดีสชาร์จภายใน

ง) ผลการจำแนก

รูปที่ 4.14 การทดสอบ PD แบบดีสชาร์จภายในตัว CT

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

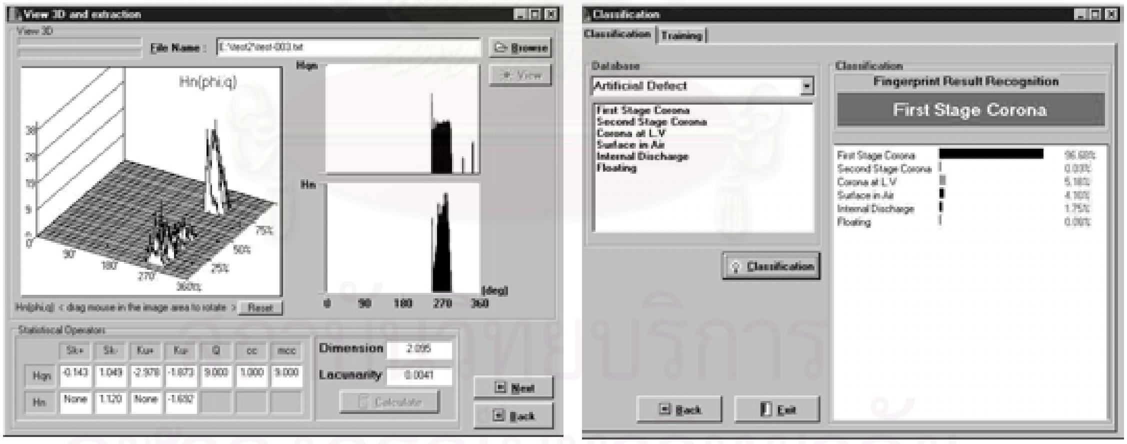
ผลการทดสอบโคโรนา + ดีสชาร์จภายใน ทำโดยต่อขดลวดปลายแหลมเข้าไปที่ด้านแรงสูงของ CT แสดงดังรูปที่ 4.15



ก) ลักษณะการกระจาย ข) ผลการจำแนก

รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบโคโรนา + ดีสชาร์จภายใน ในตัว CT

ผลการทดสอบโคโรนาที่ EGAT ทำโดยนำขดลวดทองแดงต่อด้านขั้วแรงสูงของ CT แต่แรงดันที่ป้อนต้องต่ำกว่าการเกิดดีสชาร์จภายใน CT แสดงดังรูปที่ 4.16



ก) ลักษณะการกระจาย ข) ผลการจำแนก

รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบโคโรนา ที่ EGAT

4.4 การวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากการนำโปรแกรมการรู้จำรูปแบบการเกิดดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงมาใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุของการเกิด PD ที่เกิดขึ้นจริงในโรงงานอุตสาหกรรม และห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จะเห็นได้ว่าโปรแกรมสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ โดยการแสดงผลของการตรวจจับ PD เมื่อทดสอบแบบจำลองการเกิด PD ที่ได้ทำการจำลองขึ้นแบบต่างๆ พบว่ารูปแบบที่สังเกตได้บนฐานเวลารูปวงรีสอดคล้องกับรูปแบบของสัญญาณ PD ที่แสดงไว้ในรายงานการวิจัยของ CIGRE[37] นั้นคือแบบจำลองที่ได้ทำขึ้นมีรูปแบบสัญญาณ PD ตรงตามที่ได้ออกแบบไว้

โปรแกรมการรู้จำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่พัฒนาขึ้น ได้ทำการจำลองรูปแบบของการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเพื่อเก็บเป็นฐานข้อมูลสำหรับการจำแนกประเภทของ PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป และได้นำการคำนวณค่าทางสถิติจากการกระจาย $H_{qn}(\phi)$ และ $H_n(\phi)$ บอกถึงความแหลมคม ความเบ้ของการกระจาย และความสมมาตรของเฟสแรงดันบวกและลบ และคำนวณคุณลักษณะแฟรกตัลจากการกระจาย $\mathrm{H_n(\phi, q)}$ บอกถึงความขรุขระและความหนาแน่นของการกระจาย มาใช้ในการคำนวณค่าคุณลักษณะของการเกิด PD ซึ่งค่าเหล่านี้จะมีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดสำหรับการเกิด PD แต่ละแบบ เมื่อนำค่าเหล่านี้เป็นอินพุทให้กับนิวรอลเน็ทเวิร์ค โดยงานวิจัยนี้เลือกนิวรอลเน็ทเวิร์คซึ่งให้ผลของการจำแนก PD ได้ดี และในการปรับค่าน้ำหนักของนิวรอลเน็ทเวิร์คนั้นจะใช้เจนเนติกอัลกอริทึมมาใช้ปรับค่าน้ำหนักเพื่อให้ค่าน้ำหนักที่ได้มีความเหมาะสมเมื่อนำไปใช้ในการจำแนกทำให้มีความถูกต้องในการจำแนกสูง ซึ่งผลของการทดสอบที่ได้ในโรงงานอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงนั้นมีความถูกต้องในการจำแนกหาสาเหตุของการเกิด PD ในระดับที่น่าพอใจ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

ระบบการรู้จำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่พัฒนาขึ้นมีคุณสมบัติตามที่ได้ทดสอบมาแล้วในบทที่ 4 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ฐานข้อมูลของการเกิด PD สามารถนำมาอ้างอิงสำหรับการจำแนกการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง 3 ชนิด คือ การเกิดโคโรนา (ทั้งทางด้านแรงสูงและทางด้านแรงต่ำ) การเกิดดีสชาร์จภายใน และการเกิดดีสชาร์จตามผิว

2) โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีความยืดหยุ่นสูง สามารถเพิ่มฐานข้อมูลได้ไม่จำกัดและสามารถจำแนกประเภทการเกิด PD ได้รวดเร็ว

3) ความถูกต้องของการจำแนกประเภทการเกิด PD สูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์

4) เทคนิคการวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิด PD จะใช้การคำนวณค่าคุณลักษณะ คือ คำนวณค่าทางสถิติจากการกระจาย $H_{qn}(\phi)$ และ $H_n(\phi)$ และ คำนวณคุณลักษณะแฟรกตัลจากการกระจาย $\mathrm{H_n}(\phi, \mathrm{q})$ ส่วนการจำแนกสาเหตุ ใช้วิธีทางนิวรอลเน็ทเวิร์คและวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในระบบรู้จำรูปแบบของการเกิดดีสชาร์จบางส่วนนั้น ส่วนสำคัญอย่างหนึ่งในการจำแนกก็คือการมีฐานข้อมูลที่ดี และเลือกวิธีในการคำนวณค่าคุณลักษณะของรูปแบบการเกิด PD ที่สามารถบอกถึงลักษณะของการเกิด PD นั้นๆ ได้ ฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นในกรณีของการเกิดดีสชาร์จภายในนั้นในการกำหนดขนาดและจำนวนของฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในเนื้อฉนวนทำได้ยาก เนื่องจากมีปัจจัยหลายประการที่ไม่สามารถควบคุมได้ และจำเป็นที่จะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการจำลองเพื่อให้ได้รูปแบบที่ต้องการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงไม่มีการแยกลักษณะการเกิดดีสชาร์จภายในเป็นแบบย่อยๆ รวมทั้งฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นยังไม่ครอบคลุมลักษณะของการเกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงครบทุกกรณี โดยเฉพาะในกรณีของการเกิด PD ที่มีมากกว่า 1 รูปแบบภายในอุปกรณ์ชิ้นหนึ่งๆ การจำแนกย่อมทำได้ยากขึ้น จึงควรมีการพัฒนาในส่วนนี้ต่อไป โดยที่สามารถอาศัยแนวคิดและรูปแบบดังที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ให้เกิดประโยชน์ได้ ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะรองรับได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

[1] Kreuger, F .H. *Discharge Detection in High Voltage Equipment* . 2nd ed. London: Butterworth. 1989. pp7-85.

[2] Kreuger,F.H , Gulski , E and Krida ,V .Classification of Partial Discharge*. IEEE Transactions on Electrical Insulation* Vol 28, No.6 (December 1993)

[3] Krivda, A. Automated Recognition of Partial Discharge, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol.2 No.5 (Oct 1995)

[4] นุชากร ภูมิวัฒน์. “***การวัดแรงดันคลื่นวิทยุที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง***”, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.

[5] ณรงค์ ทองฉิม. “***เครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง***”, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.

[6] Tongchim . N, Yodpetch. S,Vudhichamnong .R and Sangkasaad. S. “*Design and construction of a PC-based PD Detector and Locator for HV cable using FPGA*”, Proceeding of the 10th international symposium on High-Voltage Engineering(ISH99), Vol 5. London UK., 1999.

[7] รัฐภูมิ วุฒิจำนงค์. “***เครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เป็นฐาน*** ”. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

[8] สำรวย สังข์สะอาด, ***วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง***, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2528.

[9] Kuffel ,E. and Zaengl ,W. S. *High Voltage Engineering : Fundamental* . 1st ed. Oxford: Pergamon,1984.pp.433-461.

[10] ณรงค์ ทองฉิม, สันติ ยอดเพชร และ รัฐภูมิ วุฒิจำนงค์. “***รายงานผลการวิจัยเรื่องระบบตรวจหาตำแหน่งที่เกิดดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิลไฟฟ้าแรงดันสูง***”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ตุลาคม 2541.

[11] IEC 60270 , *Partial Discharge Measurement.*1988

[12] IEC Standard Publ. No.270 , *Partial Discharge Measurements.* 1981.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[13] IEC Standard Publ. No 885-3 , ***Test Methods for Partial Discharge Measurements.***1988.

[14] Osvath , P. , "Prespective of Partial Discharge Detection and Location" ,***IEEE-Thailand Section Seminar*** , Chulalongkorn University , 1988.

[15] Mashikian, M. S., Palmieri, F., Bansai, R. and Northrop, R. B. "***Location of Partial Discharges in Shielded Cables in the Presence of High Noise.***" Trans. IEEE EI-27 1992, pp.37-43.

[16] Working Group 21.03 Cigre, "***Recognition of Discharges***", Electra, Vol. 11, 1969. pp. 61-98.

[17] Okamoto, T. and Tanaka, T., "Novel Partial Discharge Measurement: Computer-aided Measurement Systems", ***IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.21***,1986. pp. 1015-1019.

[18] Kranz, H. G. and Krump, R., "Partial Discharge Diagnosis Using Statistical Optimization on a PC-based System" ***IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.27*** ,1992, pp. 93-98.

[19] Gulski, E. "Discharge Pattern Recognition in High Voltage Equipment", ***IEE Proceedings on Science , Measurement and Technology.*** Vol.142, 1995 pp.51-61.

[20] Kranz, H.G "Diagnosis of Partial Discharge Using Neural Network and Minimun Distance Classifiers" , ***IEEE Transaction on Dielectics and Electrical Insulation Vol.28***, : 1993 pp.1016-1024

[21] Campbell, S. R., Stone, G. S. and Sedding S. G. "Application of Pulse Width Analysis to Partial Discharge Detection", ***IEEE International Symposium on Electrical Insulation.*** Baltimore, USA. : 1992. pp. 345-348.

[22] Hoof, M. and Patsch,R. "Pulse-sequence Analysis: A New Method for Investigating the Physics of PD-induced Aging", ***IEE Proceedings on Science, Measurement and Technology*** Vol. 142, : 1995. pp. 95-101.

[23] Hauschild,W. and Mosch,W. "***Statistical Techniques for High-voltage Engineering'***, UK: Peter Peregrinus, 1992.

[24] Kreuger F.H , Gulski E and Krivda. A, "Classification of Partial Discharges" ***IEEE Transaction an Electrical Insulation Vol.28***, No.6, December 1993.

[25] Gulski E. and Kreuger.F.H. ,"Computer-aided recognition Discharge source" *IEEE Transaction an Electrical Insulation Vol.27* No.1,February 1992.

[26] Satish, L. and Zaengl, W. S., "Can Fractal be used for Recognizing 3-D Partial Discharge Patterns?", *IEEE Transaction of Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 2, pp. 352-359, 1995.

[27] Yu-Bock Cho, Joo-Young Oh. "An Overview of Application of Artificial Neural Network to Partial Discharge Pattern Classification" , *Proceedings of the 5th InternationalConference on Properties and Applications of Dielectric Materials* ,1997.

[28] Chen S. S.,Keller J. M. and Crownover, R. M.,"On the calculation of Fractal Features from Images", *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 10, pp. 1087-1090, 1993.

[29] Hertz,J.,Krogh,A.,and Palman,R.G.,"*Introduction to the Theory of Neural Computation*",USA : Addison – Wesley Publishing Company,1990.

[30] สาธิต อินทจักร์ ., "***การหาขอบภาพโดยใช้แบบจำลองฟัซซี่และนิวรอลเน็ทเวิร์ค***" , วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[31] Dan,P.W.,"*Artificial Neural Networks*", Singapore : Simon Schusfer(Asia),1996.

[32] Laurene,F.,"*Fundamentals of Neural Networks*",USA : Prectice Hall International,1994.

[33] อุทัย ธิติประยูรวงศ์. "***การจัดลำดับการกลั่นที่เหมาะสมโดยการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุการ***", วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

[34] Devid E.Goldberg*,"Genetic Algorithm in Searh,Optimization, and Machine Learning*",USA:Addison-Wesley publishing Company,Inc.1989 .

[35] ชนะ เยี่ยงกมลสิงห์. "***การประยุกต์ใช้เจนเนติกอัลกอริทึ่มในการออกแบบผังโรงงาน***", วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

[36] Srinivas. M .and Patnaik.L.M. , "Learning Neural Network Weights Using Genetic Algorithm-Improving Performance by Searh-Space Reduction" , *IEEE Transaction* ,pp 2331-2336 ,1991.

[37] Working Group 31.03 CIGRE, *" Recognition of Discharge",* Electra Vol 11,pp61-98, 1969

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างตารางแสดงค่าทางสถิติและแฟรกตัลของการจำลองการเกิด PD แบบต่างๆ

ตารางค่าสถิติและแฟรกตัลของการจำลองการเกิด PD แบบ Corona at High Voltage side in air

ครั้งที่	Hqn				Hn				Q	cc	mcc	Fractal Analysis	
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-				Dimension	Lacunarity
1	1.188	1.077	-1.51	-1.98	1.22	1.093	-1.39	-1.7	0.359	0.512	0.184	2.148	0.0088
2	1.312	1.016	-1.17	-1.96	1.334	1.131	-1.05	-1.63	0.424	0.302	0.128	2.117	0.0087
3	1.482	1.025	-0.62	-1.94	1.339	1.126	-1.07	-1.66	0.425	0.213	0.09	2.111	0.0092
4	1.27	1.022	-1.28	-1.94	1.152	1.106	-1.59	-1.7	0.815	0.317	0.258	2.109	0.0077
5	1.166	1.008	-1.57	-1.98	1.191	1.167	-1.48	-1.5	0.384	0.607	0.233	2.111	0.0087
6	1.277	1.028	-1.25	-1.93	1.144	1.112	-1.61	-1.68	0.778	0.321	0.249	2.102	0.0049
7	1.016	1.024	-1.96	-1.94	1.03	1.038	-1.92	-1.89	0.227	0.743	0.169	2.087	0.0187
8	1.1	1.03	-1.74	-1.92	1.179	1.102	-1.53	-1.73	0.382	0.618	0.236	2.076	0.006
9	1.025	1.007	-1.94	-1.98	1.063	0.965	-1.84	-2.04	0.321	0.757	0.243	2.077	0.236
10	1.028	1.006	-1.93	-1.98	1.062	0.951	-1.84	-0.72	0.336	0.757	0.254	2.079	0.0259
11	1.034	1.005	-1.91	-1.99	1.091	0.981	-1.76	-2	0.331	0.765	0.238	2.139	0.028
12	1.031	1.018	-1.92	-1.95	1.077	0.947	-1.8	-2.08	0.175	0.742	0.13	2.107	0.0244
13	1.034	1.015	-1.91	-1.96	1.089	1.012	-1.77	-1.9	0.226	0.766	0.176	2.125	0.0235
14	1.025	1.021	-1.94	-1.95	1.072	0.939	-1.81	-2.07	0.231	0.754	0.174	2.093	0.0235
15	1.034	1.014	-1.92	-1.96	1.1	1.092	-1.74	-1.75	0.238	0.785	0.187	2.091	0.0235
16	1.02	1.02	-1.95	-1.95	1.053	0.919	-1.86	-2.13	0.239	0.764	0.183	2.106	0.0276
17	1.026	1.01	-1.94	-1.97	1.085	1.036	-1.78	-1.86	0.242	0.779	0.189	2.107	0.0234
18	1.01	1.02	-1.97	-1.95	1.022	0.942	-1.94	-2.08	0.236	0.776	0.183	2.13	0.0298
19	1.061	1.021	-1.84	-1.95	1.138	0.085	-1.64	-2.33	0.258	0.776	0.2	2.073	0.0177
20	1.025	1.012	-1.94	-1.97	1.086	1.08	-1.78	-1.77	0.248	0.773	0.192	2.109	0.022
Avg	1.108	1.02	-1.71	-1.96	1.126	0.991	-1.66	-1.81	0.344	0.641	0.195	2.10485	0.0289
Min	1.01	1.005	-1.97	-1.99	1.022	0.085	-1.94	-2.33	0.175	0.213	0.09	2.073	0.0049
Max	1.482	1.077	-0.62	-1.92	1.339	1.167	-1.05	-0.72	0.815	0.785	0.258	2.148	0.236
SD	0.132	0.015	0.368	0.02	0.089	0.227	0.251	0.331	0.171	0.195	0.046	0.0208813	0.04945802

ตารางค่าสถิติและแฟรกตัลของการจำลองการเกิด PD แบบ Corona at low Voltage side in air

ครั้งที่	Hqn				Hn				Q	cc	mcc	Fractal Analysis	
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-				Dimension	Lacunarity
1	1.014	1.085	-1.96	-1.78	1.056	-0.41	-1.85	-2.83	6.975	0.681	4.75	2.085	0.011
2	1.015	1.017	-1.96	-1.96	1.021	-0.44	-1.94	-2.81	5.225	0.876	4.576	2.105	0.0166
3	1.01	1.019	-1.98	-1.95	1.015	-0.32	-1.96	-2.9	7.591	0.806	6.117	2.091	0.0191
4	1.015	1.017	-1.96	-1.96	1.021	-0.44	-1.94	-2.81	5.225	0.876	4.576	2.105	0.0166
5	1.009	1.015	-1.98	-1.96	1.066	-0.3	-1.98	-2.91	8.54	0.797	6.803	2.023	0.0233
6	1.007	1.012	-1.98	-1.97	1.01	-0.34	-1.97	-2.88	7.104	0.832	5.909	2.065	0.0224
7	1.013	1.02	-1.97	-1.95	1.071	-0.68	-1.81	-2.52	3.717	0.861	3.202	2.159	0.0228
8	1.007	1.012	-1.98	-1.97	1.01	-0.34	-1.97	-2.88	7.104	0.832	5.909	2.065	0.0224
9	1.015	1.015	-1.96	-1.96	1.045	-0.6	-1.88	-2.64	4	0.847	3.387	2.138	0.0315
10	1.012	1.017	-1.97	-1.96	1.064	-0.64	-1.83	-2.58	3.954	0.864	3.415	2.147	0.0342
11	1.005	1.014	-1.97	-1.96	1.03	-0.52	-1.92	-2.73	5.2	0.888	4.616	2.119	0.0312
12	1.011	1.008	-1.97	-1.98	1.048	-0.62	-1.87	-2.61	3.7	0.604	2.233	2.15	0.0337
13	1.008	1.015	-1.98	-1.96	1.053	-0.66	-1.86	-2.56	3.751	825	3.093	2.133	0.0324
14	1.008	1.011	-1.98	-1.97	1.05	-0.63	-1.87	-2.6	3.639	0.447	1.626	2.141	0.032
15	1.016	1.065	-1.96	-1.83	1.074	-0.67	-1.8	-2.55	4.233	0.811	3.435	2.1	0.0176
16	1.006	1.031	-1.99	-1.92	1.059	-0.66	-1.84	-2.56	4.11	0.881	3.62	2.121	0.0245
17	1.01	1.012	-1.97	-1.97	1.025	-0.53	-1.93	-2.72	4.614	0.868	4.003	2.149	0.033
18	1.007	1.012	-1.98	-1.97	1.072	-0.68	-1.81	-2.53	3.658	0.57	2.034	2.14	0.0317
19	1.01	1.01	-1.97	-1.97	1.048	-0.61	-1.87	-2.62	4.065	0.866	3.523	2.149	0.0308
20	1.014	1.032	-1.96	-1.92	1.04	-0.57	-1.89	-2.67	4.341	0.755	3.277	2.105	0.0251
Avg	1.011	1.022	-1.97	-1.94	1.044	-0.53	-1.89	-2.7	5.037	42	4.005	2.1145	0.025595
Min	1.005	1.008	-1.99	-1.98	1.01	-0.68	-1.98	-2.91	3.639	0.447	1.626	2.023	0.011
Max	1.016	1.085	-1.96	-1.78	1.074	-0.3	-1.8	-2.52	8.54	825	6.803	2.159	0.0342
SD	0.003	0.019	0.008	0.05	0.021	0.134	0.059	0.137	1.549	184.3	1.4	0.0356614	0.00699033

ตารางค่าสถิติและแฟรกตัลของการจำลองการเกิด PD แบบ Surface in air

ครั้งที่	Hqn				Hn				Q	cc	mcc	Fractal Analysis	
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-				Dimension	Lacunarity
1	1.442	1.464	-0.45	-0.27	1.986	-0.68	1.967	-2.51	1.462	0.83	1.213	2.325	0.0299
2	1.461	1.302	-0.23	-1	1.939	1.906	1.607	1.43	0.805	0.794	0.639	2.297	0.0199
3	1.453	1.17	-0.3	-1.49	1.942	1.899	1.667	1.569	0.786	0.65	0.511	2.312	0.0217
4	1.529	1.23	-0.03	-1.3	1.747	1.841	0.47	1.268	0.861	0.66	0.568	2.323	0.0402
5	1.465	1.241	-0.27	-1.24	1.925	1.797	1.466	1.178	0.881	0.77	0.679	2.322	0.0227
6	1.463	1.188	-0.28	-1.43	1.956	1.332	1.613	-0.07	0.901	0.726	0.653	2.33	0.0242
7	1.446	1.189	-0.39	-1.41	1.995	-0.1	1.813	-2.05	1.093	0.756	0.827	2.356	0.029
8	1.529	1.278	-0.05	-1.13	1.714	1.867	2.9	1.211	0.873	0.734	0.641	2.337	0.0294
9	1.504	1.33	-0.18	-0.84	1.985	-0.45	1.781	-2.25	1.139	0.867	0.988	2.33	0.0235
10	1.457	1.379	-0.4	-0.67	1.967	-0.35	1.669	-2.21	1.072	0.954	1.022	2.353	0.0263
11	1.486	1.423	-0.25	-0.49	1.955	-0.12	1.597	-2.07	1.009	0.963	0.971	2.335	0.0263
12	1.501	1.383	-0.18	-0.64	1.968	-0.41	1.754	-2.25	1.134	0.918	1.041	2.345	0.0237
13	1.467	1.45	-0.36	-0.36	1.943	-0.57	1.62	-2.34	1.176	0.941	1.107	2.36	0.0231
14	1.511	1.479	-0.18	-0.22	1.977	-0.69	1.923	-2.39	1.355	0.914	1.239	2.32	0.0383
15	1.481	1.428	-0.41	-0.5	1.919	-0.61	1.365	-2.39	1.081	0.859	0.929	2.358	0.0405
16	1.516	1.471	-0.16	-0.25	1.976	-0.69	1.919	-2.39	1.364	0.905	1.234	2.311	0.0346
17	1.493	1.471	-0.26	-0.28	1.918	-0.46	1.451	-2.3	1.163	0.944	1.097	2.336	0.0202
18	1.496	1.45	-0.27	-0.39	1.954	-0.59	1.702	-2.35	1.206	0.875	1.055	2.33	0.0339
19	1.459	1.302	-0.39	-1	1.952	-0.63	1.647	-2.36	1.225	0.856	1.048	2.338	0.0206
20	1.486	1.454	-0.34	-0.41	1.919	-0.54	1.408	-2.35	1.078	0.892	0.962	2.348	0.0371
Avg	1.482	1.354	-0.27	-0.77	1.932	0.188	1.667	-1.28	1.083	0.84	0.921	2.3333	0.028255
Min	1.442	1.17	-0.45	-1.49	1.714	-0.69	0.47	-2.51	0.786	0.65	0.511	2.297	0.0199
Max	1.529	1.479	-0.03	-0.22	1.995	1.906	2.9	1.569	1.462	0.963	1.239	2.36	0.0405
SD	0.027	0.109	0.115	0.447	0.073	1.083	0.428	1.63	0.191	0.097	0.23	0.0168682	0.00691904

ตารางค่าสถิติและแฟรกตัลของการจำลองการเกิด PD แบบ Internal Discharge

ครั้งที่	Hqn				Hn				Q	cc	mcc	Fractal Analysis	
	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-	Sk+	Sk-	Ku+	Ku-				Dimension	Lacunarity
1	1.124	1.172	-1.7	-1.54	1.226	-0.76	-1.43	-2.34	1.132	0.578	0.654	2.112	0.0039
2	1.178	1.142	-1.48	-1.62	1.145	-0.73	-1.64	-2.32	1.171	0.778	0.911	2.149	0.0054
3	1.504	1.479	0.103	-0.02	1.345	-0.28	0.708	-2.37	1.015	0.961	0.975	2.143	0.0069
4	1.504	1.479	0.103	-0.02	1.345	-0.28	-0.71	-2.37	1.015	0.961	0.975	2.143	0.0069
5	1.206	1.2	-1.47	-1.49	1.307	-0.22	-0.96	-2.38	1.038	0.978	1.015	2.138	0.0076
6	1.491	1.202	-0.03	-1.49	1.524	-0.21	0.305	-2.31	1.063	0.962	1.022	2.135	0.0098
7	1.193	1.178	-1.51	-1.55	1.24	-0.11	-1.36	-2.36	1.036	0.964	1	2.123	0.0069
8	1.192	1.482	-1.51	-0.17	1.226	-0.25	-1.43	-2.37	1.059	0.92	0.974	2.129	0.0088
9	1.186	1.165	-1.53	-1.59	1.189	-0.43	-1.52	-2.38	1.037	0.922	0.956	2.131	0.007
10	1.17	1.154	-1.57	-1.61	1.168	-0.68	-1.56	-2.33	1.149	0.789	0.906	2.159	0.0076
11	1.147	1.175	-1.63	-1.54	1.18	-0.71	-1.52	-2.32	1.191	0.802	0.956	2.153	0.0074
12	1.115	1.106	-1.71	-1.73	1.132	-0.76	-1.64	-2.33	1.25	0.751	0.939	2.156	0.0043
13	1.178	1.142	-1.48	-1.62	1.145	-0.73	-1.64	-2.32	1.172	0.778	0.911	2.149	0.0054
14	1.073	1.103	-1.83	-1.73	1.077	-0.61	-1.82	-2.34	1.057	0.847	0.896	2.171	0.0112
15	1.142	1.1	-1.63	-1.75	1.125	-0.5	-1.64	-2.37	1.073	0.737	0.79	2.153	0.0109
16	1.115	1.153	-1.71	-1.6	1.11	-0.37	-1.73	-2.39	1.107	0.855	0.946	2.151	0.013
17	1.141	1.152	-1.63	-1.6	1.113	-0.43	-1.71	-2.39	1.136	0.799	0.908	2.155	0.014
18	1.133	1.153	-1.66	-1.58	1.124	-0.63	-1.68	-2.34	1.125	0.84	0.945	2.151	0.0133
19	1.104	1.106	-1.73	-1.71	1.073	-0.69	-1.81	-2.32	1.304	0.89	1.161	2.15	0.0124
20													
Avg	1.205	1.202	-1.35	-1.37	1.2	-0.49	-1.3	-2.35	1.112	0.848	0.939	2.1447895	0.00856316
Min	1.073	1.1	-1.83	-1.75	1.073	-0.76	-1.82	-2.39	1.015	0.578	0.654	2.112	0.0039
Max	1.504	1.482	0.103	-0.02	1.524	-0.11	0.708	-2.31	1.304	0.978	1.161	2.171	0.014
SD	0.136	0.127	0.633	0.583	0.114	0.222	0.698	0.026	0.081	0.104	0.1	0.0140063	0.00311166

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวเกวริน วิเศษจินดาวัฒน์ เกิดวันที่ 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2520 จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2541 โดยวิจัยทางด้าน Electromagnetic compatibility (EMC)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย