เครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เป็นฐาน

นายรัฐภูมิ วุฒิจำนงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-672-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19919692

A MICROCOMPUTER-BASED PARTIAL DISCHARGE ANALYZER FOR HIGH VOLTAGE EQUIPMENT

Mr. Rattapoom Vudhichamnong

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 1999

ISBN 974-333-672-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ที่ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เป็นฐาน
โดย	นายรัฐภูมิ วุฒิจำนงค์
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ กฤษดา วิศวธีรานนท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี)

นายรัฐภูมิ วุฒิจำนงค์ : เครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เป็นฐาน (A MICROCOMPUTER-BASED PARTIAL DISCHARGE ANALYZER FOR HIGH VOLTAGE EQUIPMENT)
อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด , 109 หน้า.
ISBN 974-333-672-9

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นรายงานการศึกษาค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาออกแบบและประกอบสร้างเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เป็นฐาน เพื่อใช้ในการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน (PD) ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEC60270 ลักษณะของระบบวัดที่ใช้เป็นแบบวิธีตรง โดยมีช่วงความถี่ที่วัด 40 ถึง 420 กิโลเฮิรตซ์ ความไวของภาคตรวจจับ PD เมื่อใช้ทดสอบวัสดุทดสอบทั่วไปที่มีค่าความจุถึง 1 นาโนฟารัด และใช้ตัวเก็บประจุคัปปลิงขนาด 1 นาโนฟารัดซึ่งจะให้ความไวดีกว่า 1 พิโคคูลอมบ์ วงจรภาคดิจิทัลของเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนโปรแกรมไว้ใน Field Programmable Gate Arrays (FPGA) บนแผงวงจรที่ออกแบบให้ติดตั้งอยู่ภายในคอมพิวเตอร์ เครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนจะประมวลผลและแสดงผลแบบเวลาจริง ในการใช้เครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้เกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เครื่องจะตรวจวัดและบันทึกข้อมูลลงในไฟล์ คำนวณเมทริกซ์การกระจาย $H_n(\phi,q)$ และแสดงผลแบบ 3 มิติ คำนวณค่าคุณลักษณะทางแฟรกทัลจากการกระจาย $H_n(\phi,q)$ อธิบายการวิเคราะห์ค่าคุณลักษณะและจำแนกกลุ่มข้อมูลโดยใช้วิธี Centour score เพื่อหาสาเหตุที่ทำให้เกิด PD โดยอัตโนมัติ เครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนนี้มีข้อดีที่สามารถใช้งานได้สะดวกและสามารถใช้ทดสอบในห้องที่ไม่มีชีลด์ได้หากมีสัญญาณรบกวนไม่มากนัก

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา 2542

4070392621: ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: PARTIAL DISCHARGE ANALYZER / INSULATION DIAGNOSIS / FPGA / FRACTAL / CENTOUR SCORE / AUTOMATIC CLASSIFICATION

RATTAPOOM VUDHICHAMNONG: A MICROCOMPUTER-BASED PARTIAL DISCHARGE ANALYZER FOR HIGH VOLTAGE EQUIPMENT

THESIS ADVISOR: SAMRUAY SANGKASAAD, Dr. Sc. Techn. 109 pp.

ISBN 974-333-672-9

This thesis presents the development, design and construction of a microcomputer-based partial discharge (PD) analyzer for detecting PD in high voltage equipment in accordance with IEC60270. The PD measuring system was designed for straight method with the measuring frequency range of 40 to 420 kHz. The sensitivity of the detector is better than 1 pC for a test object having capacitance upto 1 nF with coupling capacitance of 1 nF. Digital circuits of the PD analyzer were programmed into a Field Programmable Gate Arrays (FPGA) on the PCB which was fitted inside a PC. The measuring system operates in real time for processing and displaying PD data. The application of the analyzer for analyzing PD data for insulation diagnosis in high-voltage equipment was illustrated. PD signal is measured and recorded to a file. $H_n(\phi,q)$ distribution matrix is calculated and displayed in a 3-dimensional distribution. Fractal features are derived from $H_n(\phi,q)$ distribution, and automatic classification of defects using Centour score method was explained. The designed partial discharge analyzer has advantages of easy operation and that measurements without a shielded chamber can be performed in moderate environmental interference.

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต _____

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

ปีการศึกษา 2542

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาในการวิจัย และกรุณาให้คำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณอย่างสูงต่อ รองศาสตราจารย์กฤษดา วิศวธีรานนท์ รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลารัศมี และ อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล ที่ได้สละเวลาให้คำวิจารณ์และข้อคิดเห็นในการแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณ คุณณรงค์ ทองฉิม ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง ที่กรุณาถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ในการทดสอบดีสชาร์จบางส่วนและการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ คุณธนพร ทองเผือก บริษัทไมโครอิเล็กทรอนิกส์เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ที่ช่วยพัฒนาวงจรดิจิทัลสำหรับใช้ใน FPGA อาจารย์วรุตม์ ทวีทรัพย์ ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ช่วยพัฒนาดีไวซ์ไดรเวอร์สำหรับการอินเตอร์เฟสการ์ดวงจรกับคอมพิวเตอร์ คุณเอกชัย ตันติกนกพร ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับเรื่องซอฟต์แวร์ ขอขอบคุณ คุณธเนศ วอทอง คุณทวีศักดิ์ พุสดี คุณวิเชียร จั่นเจริญ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง รวมทั้งนิสิตปริญญาโทสาขา EMC ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในด้านต่างๆด้วยดี

อนึ่ง โครงการวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ในโครงการเมธีวิจัยอาวุโส ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดาและ มารดา ที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจตลอดมา

รัฐภูมิ วุฒิจำนงค์

มีนาคม 2543

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 บทนำทั่วไป 1

1.2 ที่มาของปัญหา 2

1.3 ประวัติการศึกษาวิจัย 3

1.4 วัตถุประสงค์และขอบข่ายของงานวิจัย 4

บทที่ 2 หลักการตรวจจับและวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน 5

2.1 พฤติกรรมของดีสชาร์จบางส่วน 5

2.1.1 ผลจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วน 5

2.1.2 วงจรสมมูลของดีสชาร์จภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป 6

2.1.3 รูปแบบพัลส์ของดีสชาร์จบางส่วน 8

2.2 หลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน 9

2.2.1 วงจรพื้นฐานและการวิเคราะห์วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน 9

2.2.2 การแสดงผลดีสชาร์จบางส่วน 18

2.2.3 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน 18

2.3 เทคนิคการวัดดีสชาร์จบางส่วน 19

2.4 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน 21

2.4.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดีสชาร์จบางส่วน 21

2.4.2 การลดสัญญาณรบกวน 22

2.5 คุณสมบัติตามมาตรฐานของเครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน 24

2.5.1 ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC270 24

2.5.2 ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC60270 24

2.6 การวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน 27
2.6.1 สัญญาณใช้ในการรู้จำรูปแบบดีสชาร์จบางส่วน 27
2.6.2 การคำนวณค่าคุณลักษณะจากรูปแบบที่ได้ 31
2.6.3 ฐานข้อมูลสำหรับการจำแนกรูปแบบ 37
2.6.4 การจำแนกประเภท 37
บทที่ 3 การออกแบบและประกอบสร้าง 42
3.1 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์และการทำงาน 42
3.2 อุปกรณ์รับสัญญาณและวงจรภาคแอนะลอก 45
3.2.1 วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน 45
3.2.2 วงจรวัดแรงดันทดสอบ 48
3.2.3 วงจรแปลงสัญญาณแอนะลอกเป็นดิจิตอล 48
3.3 วงจรภาคดิจิตอล 51
3.3.1 การออกแบบวงจรดิจิตอลโดยใช้ภาษา VHDL 51
3.3.2 โหมดการทำงานของวงจรภาคดิจิตอล 52
3.3.3 ส่วนประกอบของวงจรภาคดิจิตอล 53
3.3.4 รายละเอียดการทำงานของวงจรภาคดิจิตอล 57
3.4 ดีไวซ์ไดรเวอร์ 66
3.4.1 ส่วนประกอบของระบบปฏิบัติการวินโดวส์98 ที่เกี่ยวข้อง 66
3.4.2 การสร้าง Device Controller 67
3.4.3 การออกแบบดีไวซ์ไดรเวอร์ 68
3.4.4 Device I/O Control Interface ของดีไวซ์ไดรเวอร์ 69
3.5 ซอฟต์แวร์สำหรับเครื่องวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน 70
3.5.1 ภาคตรวจจับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน 70
3.5.2 ภาคแสดงรูปคลื่นสัญญาณดีสชาร์จบางส่วน 74
3.5.3 ภาควิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน 76
บทที่ 4 การทดสอบและประเมินผล 81
4.1 การทดสอบคุณสมบัติของภาคตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน 81
4.1.1 การทดสอบตามขั้นตอนของ IEC 81
4.1.2 ความไวของระบบวัดดีสชาร์จบางส่วน 83
4.2 การทดสอบจริง 84
4.3 การประเมินผล 90

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 92
5.1 สรุป 92
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 93
รายการอ้างอิง 95
ภาคผนวก 100
ก การคำนวณสัญญาณรบกวน 101
ข ไดอะแกรมของวงจรแอนะลอกภาคตรวจจับ PD 102
ค การตั้งค่าดิปสวิตช์สำหรับแผงวงจรที่ออกแบบสร้าง 103
ง โครงสร้างข้อมูลที่ใช้ในการติดต่อกับดีไวซ์ไดรเวอร์ PD.VxD 106
ประวัติผู้เขียน 109

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 พารามิเตอร์ทางสถิติของการกระจาย 31

2.2 ผลการจำแนกโดยใช้ Centour score 39

3.1 ความผิดพลาดสูงสุดของค่ายอดที่อัตราชักตัวอย่างต่างๆ 50

3.2 หน้าที่ของพอร์ตเขียนและพอร์ตอ่าน 57

3.3 แฟกเตอร์ตัวคูณและแรงดันทดสอบสูงสุดที่อัตราขยายต่างๆ 74

4.1 ความเป็นเชิงเส้นของ k สำหรับเครื่องที่ออกแบบ 81

4.2 การตอบสนองของระบบวัดที่ออกแบบ 82

ค.1 การตั้งค่าดิปสวิตช์ 103

ง.1 โครงสร้างของ HWCON ซึ่งเป็นพารามิเตอร์โดยปริยายของฮาร์ดแวร์ 106

ง.2 โครงสร้างของ PDRealtimeParam ส่วนที่ป้อนเข้าสู่ DeviceIOControl 107

ง.3 โครงสร้างของ PDRealtimeParam ส่วนที่รับมาจาก DeviceIOControl 107

ง.4 โครงสร้างของ PDOfflineParam ส่วนที่ป้อนเข้าสู่ DeviceIOControl 107

ง.5 โครงสร้างของ PDOfflineParam ส่วนที่รับมาจาก DeviceIOControl 108

ง.6 โครงสร้างของ PDOfflineParam ส่วนที่ป้อนเข้าสู่ DeviceIOControl 108

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

1.1 ดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ 1

2.1 วงจรสมมูล PD แบบทั่วไป 6

2.2 ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรที่เกิด PD 7

2.3 แรงดันตกคร่อมโพรงกาซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD 8

2.4 ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแกปเล็กๆ 9

2.5 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD 10

2.6 การแทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่างๆ 12

2.7 ลักษณะสเปกตรัมและการตอบสนองความถี่ต่างๆของเครื่องตรวจจับ PD 14

2.8 ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ 16

2.9 ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD ที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย .. 17

2.10 วงจรที่ใช้คำนวณความไวของเครื่องตรวจจับ PD สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป 17

2.11 วงจรสำหรับการปรับเทียบ 19

2.12 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ 20

2.13 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ 21

2.14 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน 22

2.15 การลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี "หน้าต่างเวลา" 23

2.16 กระบวนการรู้จำโดยทั่วไป 27

2.17 การกระจายแบบ $H_n(\phi,q)$ 29

2.18 การกระจายอื่นๆ ที่คำนวณได้จาก $H_n(\phi,q)$ 29

2.19 สัญญาณ PD ที่ตรวจจับโดยเครื่องมือที่มีแบนด์วิดต์ 500 เมกะเฮิรตซ์ 29

2.20 วิธีการแมปแบบ Principal component analysis 32

2.21 ขั้นตอนการคำนวณคุณลักษณะแฟรกตัล 33

2.22 การหา p(m, L) โดยการนับจำนวนจุดที่อยู่ในกล่อง 34

2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างlog(L) กับ log(N(L)) 34

2.24 กราฟระหว่างความยาวด้านของกล่อง L กับลาคิวนาริตี Λ 35

2.25 การกระจายของ PDในรูปแบบต่างๆกัน 36

2.26 ค่าของคุณลักษณะแฟรกตัลที่คำนวณได้จากการกระจายในรูปที่ 2.25 36

2.27 โครงสร้างฐานข้อมูล 37
2.28 การจำแนกแบบทั่วไปที่ใช้ Centour score 38
2.29 โครงสร้างของตัวจำแนกแบบโครงข่ายเชิงประสาท 38
2.30 การกระจายแบบปกติใน 2 มิติ และเส้นความน่าจะเป็นเท่าสำหรับ c=1.00 41
3.1 ส่วนประกอบของเครื่องวิเคราะห์ PD 42
3.2 PD และมุมเฟสที่เกิด PD 43
3.3 การวิเคราะห์หาขนาดค่ายอดของ PD และมุมเฟสที่เกิด PD 44
3.4 ลักษณะเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD 46
3.5 ความไวเมื่อตรวจจับวัสดุทดสอบทั่วไปเมื่อใช้ตัวเก็บประจุคับปลิง 1 นาโนฟารัด 47
3.6 ลักษณะสัญญาณ PD เมื่อวัสดุทดสอบเป็นเคเบิลแรงสูง 49
3.7 วิธีการออกแบบด้วยภาษา VHDL 51
3.8 โครงสร้างของวงจรภาคดิจิตอล 53
3.9 ส่วนประกอบของวงจรภาคดิจิตอล 55
3.10 บล็อกไดอะแกรมของวงจรที่ออกแบบสมบูรณ์ 56
3.11 ไดอะแกรมเวลาวงจรถอดรหัสแอดเดรสอินพุตเอาต์พุต 58
3.12 ไดอะแกรมเวลาสัญญาณอ่านข้อมูลตรวจจับ PD 60
3.13 ไดอะแกรมเวลาสัญญาณควบคุมการขออินเตอร์รัพต์ 61
3.14 ไดอะแกรมเวลาของสัญญาณควบคุมการ DMA 62
3.15 เวลารับข้อมูลตรวจจับ PD เข้าหน่วยความจำ 64
3.16 เวลาเริ่มส่งข้อมูลตรวจจับ PD เข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ 64
3.17 ไดอะแกรมเวลาวงจรตรวจจับค่ายอด PD 65
3.18 โมเดลของ VxD ที่พัฒนาขึ้น 67
3.19 พื้นที่ของ memory ส่วนที่ใช้งานสำหรับ buffer 69
3.20 ส่วนแสดงผลของภาคตรวจจับสัญญาณ PD 70
3.21 ลักษณะของส่วนแสดงผลหลักของฟังก์ชันการปรับเทียบ 71
3.22 ลักษณะของส่วนแสดงผลหลักของการแสดงผลบนฐานเวลาแบบเชิงเส้น 72
3.23 ลักษณะของส่วนแสดงผลหลักของการแสดงผลบนฐานเวลารูปวงรี 72
3.24 ลักษณะของส่วนแสดงผลหลักของการแสดงผล q-V curve 73
3.25 ส่วนแสดงผลของภาคแสดงรูปสัญญาณ PD 75
3.26 การแสดงรูปสัญญาณ PD ที่บันทึกได้ 75
3.27 การขยายภาพในแกนเวลา 76

3.28 การอินเตอร์โพเลต 76
3.29 ลำดับของการเรียกใช้ฟอร์มต่างๆในการวิเคราะห์ PD 77
3.30 ส่วนแสดงผลของฟอร์มตั้งค่าการบันทึกสัญญาณ PD 77
3.31 ฟอร์มแสดงผลข้อมูลที่บันทึกได้บนฐานเวลารูปวงรี 78
3.32 ส่วนแสดงผลของฟอร์มแสดงการกระจายของข้อมูล PD 78
3.33 ส่วนแสดงผลของฟอร์มแสดงคุณลักษณะแฟรกตัล 79
3.34 ส่วนแสดงผลของฟอร์มการจำแนกประเภทของ PD 80
4.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของระบบวัด PD 81
4.2 รูปสัญญาณเอาต์พุตของภาคตรวจจับ PD 82
4.3 แผนภาพพัลส์คู่ (Double-pulse diagram) 82
4.4 รูปสัญญาณกรณีที่ C_a และ C_k มีค่า 1 นาโนฟารัดเท่ากัน 83
4.5 ความไวของเครื่องวัด PD สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป 84
4.6 อุปกรณ์และการต่อวงจรทดสอบ PD ของตัวเก็บประจุแรงสูง 84
4.7 การจำลองจุดบกพร่องของวัสดุทดสอบ 85
4.8 PD แบบโคโรนาที่เกิดที่ปลายลวดแหลมยึดบนตัวเก็บประจุแรงสูง 86
4.9 รูปสัญญาณ PD แบบโคโรนา 86
4.10 ลักษณะการกระจายของข้อมูล PD ที่เกิดจากสาเหตุต่างๆ 87
4.11 ผลการคำนวณค่าคุณลักษณะจากสาเหตุต่างๆ 89
ข.1 ไดอะแกรมวงจรแอนะลอกภาคตรวจจับ PD 102