หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

หลักการตรวจจับและวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน

หลักการตรวจจับและวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วนภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ในที่นี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของ PD หลักการตรวจจับ PD การแสดงผลการตรวจจับ PD การลดสัญญาณรบกวน เพื่อใช้ออกแบบเครื่องวิเคราะห์ PD ตลอดจนถึงการศึกษาวิธีการตรวจจับและขั้นตอนต่างๆในการวิเคราะห์ PD จากผลงานวิจัยในอดีต เพื่อใช้ในการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้วิเคราะห์ PD

2.1 พฤติกรรมของดีสชาร์จบางส่วน

การเกิดดีสชาร์จบางส่วนมีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เมื่อเกิดดีสชาร์จขึ้น[12] พลังงานการกระทบจากอิเล็กตรอนหรืออิออนพลังงานสูงจะทำให้ฉนวนเกิดความร้อนและการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เป็นเหตุให้ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็ว อายุการใช้งานของอุปกรณ์สั้นลง นำไปสู่การเบรกดาวน์ได้ในที่สุด ซึ่งก่อให้เกิดความเสียหายต่อระบบฉนวนและอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนั้นแล้วดีสชาร์จบางส่วนยังก่อให้เกิดคลื่นรบกวนวิทยุ (Radio Interference) ซึ่งจะส่งผลรบกวนต่อระบบสื่อสาร มาตรฐานจึงกำหนดให้มีการทดสอบตรวจวัดค่า PD

โครงการวิจัยนี้จะเน้นถึง PD ที่เกิดภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงหรือดีสชาร์จภายใน ซึ่งมีผลต่ออายุการใช้งานอุปกรณ์โดยตรง การวิเคราะห์ PD จะพิจารณาผลกระทบ รูปแบบการเกิดและวงจรสมมูล PD

2.1.1 ผลจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วน

เมื่อเกิดดีสชาร์จบางส่วนจะเกิดผลสืบเนื่องต่างๆได้แก่[9] สัญญาณพัลส์ทางไฟฟ้า เสียง การสูญเสียของไดอิเล็กตริก แสง การเพิ่มขึ้นของความดันกาซ และปฏิกิริยาเคมี เราสามารถสังเกตและตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนได้หลายทางโดยการตรวจวัดสัญญาณที่กล่าวมา ซึ่งมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันดังต่อไปนี้

1) การฟังเสียง hissing ที่เกิดจาก PD เป็นวิธีที่ง่ายและเก่าแก่ที่สุด แต่วิธีนี้มีความไวต่ำและถูกรบกวนโดยเสียงอื่นๆจากภายนอกได้ง่าย

2) การวัดพลังงานสูญเสียไดอิเล็กตริกโดยการวัดค่าตัวประกอบพลังงานสูญเสีย (Dissipation factor) tgδ สามารถสังเกตการเกิด PD ได้จากค่า tgδ ที่เพิ่มขึ้นและมีความสัมพันธ์กับแรงดันทดสอบ เนื่องจากพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาขณะเกิด PD จะทำให้ตัวประกอบ tgδ

มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการสังเกตดังกล่าวไม่ชัดเจนแม้ว่าจะเกิด PD ปริมาณมาก เนื่องจากพลังงานสูญเสียจากการเกิด PD ซึ่งเกิดเฉพาะบางบริเวณของเนื้อฉนวนอาจมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับการสูญเสียของ ไดอิเล็กตริกซึ่งเกิดขึ้นในปริมาตรทั้งหมดของฉนวน

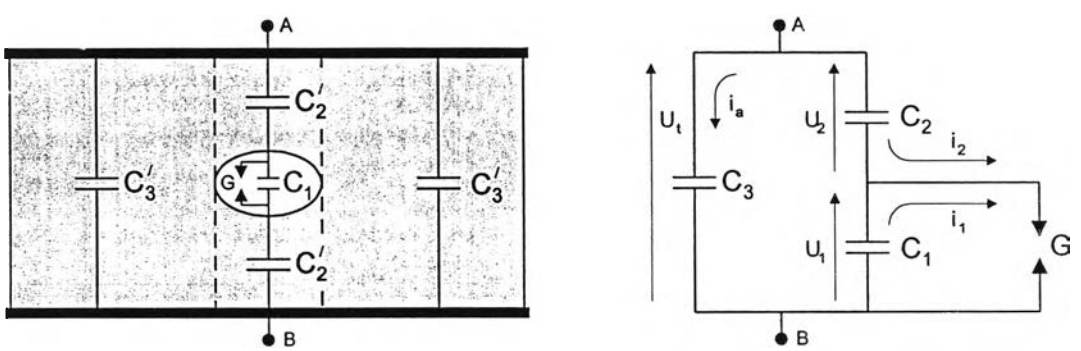
3) การตรวจวัด PD ทางแสง มีข้อจำกัดในเรื่องตำแหน่งที่เกิด PD ในวัสดุทดสอบต้องโปร่งแสง จึงไม่สามารถกระทำได้ในหลายกรณี

4) การตรวจวัดการเพิ่มขึ้นของความดันกาซและปฏิกิริยาเคมี มีข้อจำกัดที่การเปลี่ยนแปลงต้องใช้ระยะเวลานาน จึงไม่เหมาะที่จะใช้ติดตามการเกิด PD

5) การวัดทางไฟฟ้า เป็นวิธีการวัดที่นิยมใช้กันมากที่สุดและมาตรฐานสากลแนะนำให้ใช้ เนื่องจากมีความไวสูง สามารถติดตามการเกิด PD ได้อย่างรวดเร็ว สามารถจำแนกสัญญาณที่เกิดจาก PD ออกจากสัญญาณอื่นๆได้ และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณ PD ที่เกิดขึ้น การวัดปริมาณของดีสชาร์จบางส่วนตามมาตรฐานสากลนั้นจะวัดในเทอมของ "ประจุที่ปรากฏ" (Apparent Charge) [6] การตรวจจับ PD ในโครงการวิจัยนี้จะใช้วิธีวัดทางไฟฟ้า

2.1.2 วงจรสมมูลของดีสชาร์จภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงทั่วไป

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



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูล PD แบบทั่วไป

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วสายของอุปกรณ์ (ขั้ว A-B) ในรูปที่ 2.1 ก) จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมส่วนต่างๆของฉนวนแสดงดังรูปที่ 2.1 ข) ถ้าเกิดแรงดันตกคร่อมโพรงกาซสูงเกินกว่าค่าแรงดันที่โพรงกาซสามารถทนได้ ทำให้เกิดเบรกดาวน์หรือดีสชาร์จเฉพาะบริเวณโพรงกาซนี้ จึงเรียกว่าเกิด "ดีสชาร์จบางส่วน" หรือ "PD" ภายในอุปกรณ์นั้น จากรูปที่ 2.1 ข) จะได้

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

$$C_2 = \frac{C_2^{'} C_2^{''}}{C_2^{'} + C_2^{''}} \tag{2.2}$$

$$C_3 >> C_1 >> C_2 \tag{2.3}$$

จากเหตุผลในสมการ(2.3) โดยที่ C_a คือค่าความจุไฟฟ้ารวมของวัสดุทดสอบ จะได้ว่า

$$C_a = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_3 \approx C_3 \tag{2.4}$$

จากรูปที่ 2.1 ข.)แรงดันตกที่ขั้วสาย ΔU_t เนื่องจากการเกิด PDสามารถคำนวณได้โดยเปรียบเทียบประจุที่สะสมก่อนและหลังการเกิด PD ได้ดังนี้

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

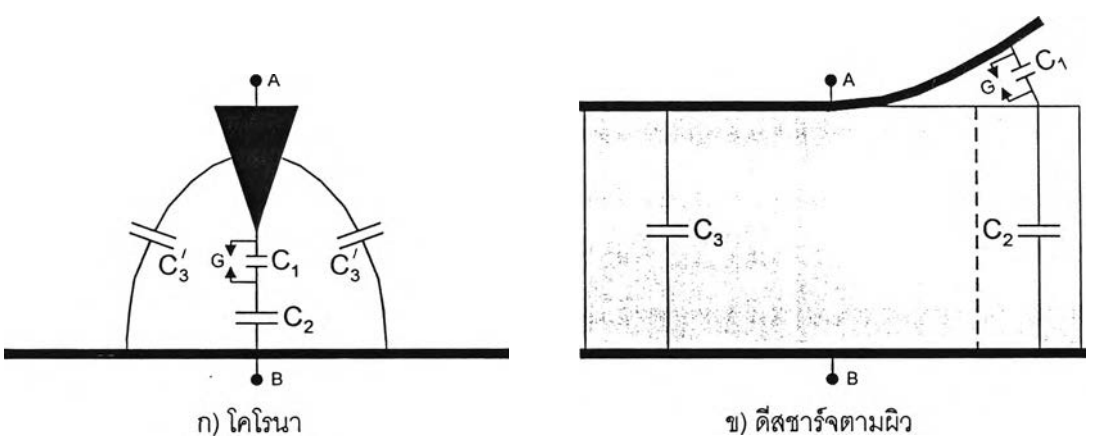
จะได้

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

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]

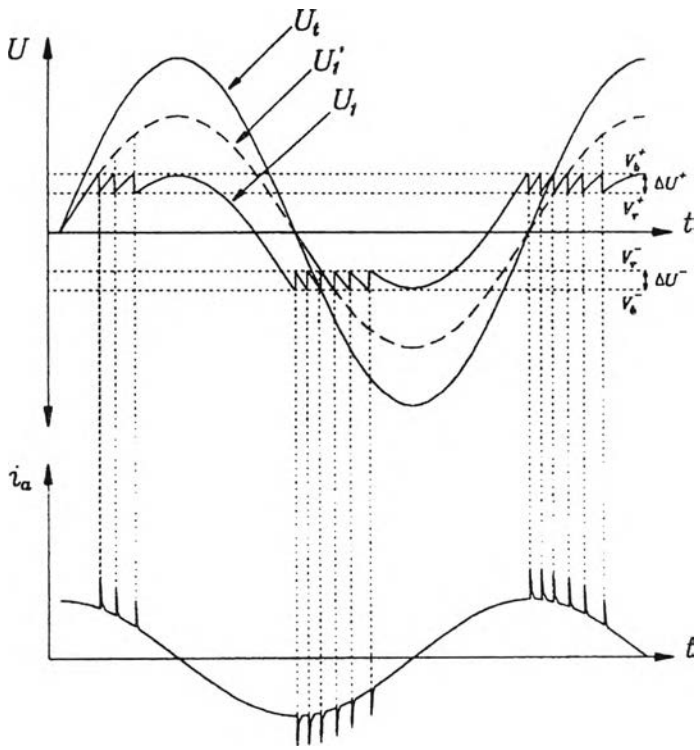


ก) โคโรนา ข) ดีสชาร์จตามผิว

รูปที่ 2.2 ค่าความจุไฟฟ้าของวงจรที่เกิด PD

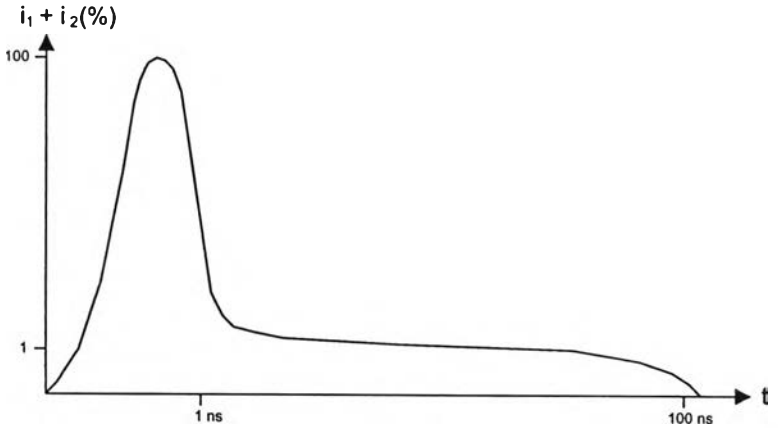
2.1.3 รูปแบบพัลส์ของดีสชาร์จบางส่วน

ในทางปฏิบัติ PD อาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังรูปที่ 2.3 โดยที่ U_t คือ แรงดันตกคร่อมขั้วสายของอุปกรณ์ V_b คือแรงดันเบรกดาวน์ของโพรงกาซ V_r คือแรงดันหลังเบรกดาวน์ของโพรงกาซ U_1 คือแรงดันคร่อมโพรงกาซ U_1' คือแรงดันคร่อมโพรงกาซถ้าไม่มีการเกิด PD และ i_a คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ตามลำดับ[1]



รูปที่ 2.3 แรงดันตกคร่อมโพรงกาซและกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในแกปหรือโพรงกาซเล็ก ในทางทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 2.4 ขณะเกิด PD กระแสที่ไหลผ่านแกปจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านแกปสั้นๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านแกปหมดกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว และกระแสที่ลดลงนี้จะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก[13] แต่อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ จะพบว่าความกว้างของกระแสพัลส์ที่เกิดจาก PD ในฉนวนจะอยู่ในช่วงเวลา 1.5 นาโนวินาทีถึงช่วงเวลาเป็นหลัก 100 นาโนวินาที ดังนั้นกระแสพัลส์ดังกล่าวจึงมีสเปกตรัมของความถี่ที่มีแบนด์วิดต์กว้าง 10 เมกะเฮิรตซ์ขึ้นไป และอาจจะมีความกว้างถึง 200 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งการเกิด PD จากลักษณะการเกิดทรีในเนื้อฉนวนจะมีช่วงเวลาของกระแสพัลส์กว้างที่สุด[14]



รูปที่ 2.4 ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับแกปเล็กๆ

2.2 หลักการตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

การตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธี โดยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่างๆ ของ PD ดังที่กล่าวมาแล้ว การวัดผลของ PD ในเชิงปริมาณที่ได้ผลดีที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าโดยวิธีตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์ในวงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน[1]

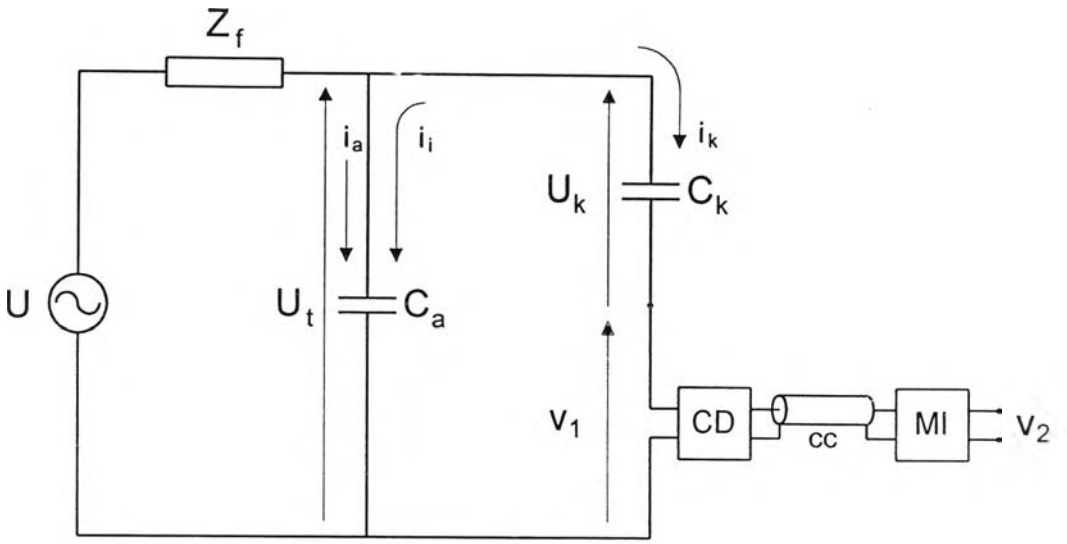
2.2.1 วงจรพื้นฐานและการวิเคราะห์วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ตามข้อกำหนดในมาตรฐานสากล IEC 60270 จะประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงหรือแรงดันทดสอบ U ตัวกรองสัญญาณจากแหล่งจ่ายหรืออิมพีแดนซ์ Z_f วัสดุทดสอบ C_a ตัวเก็บประจุคับปลิง C_k อุปกรณ์รับสัญญาณ CD สายเคเบิลนำสัญญาณ CC และเครื่องมือวัด MI ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.5[5]

หน้าที่การทำงานและคุณสมบัติสำคัญของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรทดสอบเป็นดังนี้

1) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง U ใช้ในการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบและมีพิกัดกำลังไฟฟ้าเพียงพอที่จะจ่ายโหลดได้ เช่น หม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น

2) ตัวกรองสัญญาณหรืออิมพีแดนซ์ Z_f ใช้ในการกรองสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่าย เช่น ฮาร์มอนิกส์ และ PD ที่เกิดภายในหม้อแปลงทดสอบเองที่ใช้เป็นแหล่งจ่ายเป็นต้น และหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ป้องกัน PD จากวงจรทดสอบไหลย้อนลงกราวด์ผ่านทางแหล่งจ่าย ตัวกรองดังกล่าวต้องทนแรงดันทดสอบได้และปราศจาก PD ที่แรงดันทดสอบ ตัวอย่างตัวกรอง เช่น ตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวกรองชนิดผ่านแถบความถี่ต่ำ เป็นต้น ดังนั้นในกรณีที่ใช้หม้อแปลงทดสอบปราศจาก PDเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงอาจจะไม่จำเป็นต้องใช้ตัวกรองอีก เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงทดสอบมีคุณสมบัติเป็นตัวเหนี่ยวนำอยู่แล้ว โดยเฉพาะหม้อแปลงปลอด PD



รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

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

4) อุปกรณ์รับสัญญาณ CD และเครื่องมือวัด MI อุปกรณ์ทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกัน คือทำหน้าที่อินทิเกรตกระแสพัลส์ i_i ที่ไหลในวงจรทดสอบเนื่องจากการเกิด PD โดยมีสายนำสัญญาณ CC เป็นสายที่เชื่อมต่อระหว่าง CD และ MI อุปกรณ์รับสัญญาณ จะทำหน้าที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ เป็นตัวกรองกระแสความถี่ต่ำ (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) และฮาร์มอนิกส์ต่าง ๆ จากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบมิให้เข้าไปที่เครื่องมือวัดได้ ส่วนเครื่องมือวัด MI จะทำหน้าที่สำคัญอีก 3 ประการคือ เป็นวงจรขยายสัญญาณ(Amplifier) เป็นวงจรกรองสัญญาณชนิดผ่านแถบ เพื่อลดสัญญาณรบกวนความถี่ต่ำที่มาจากแหล่งจ่ายแรงดันทดสอบกับสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่มาจากคลื่นวิทยุ และเป็นอุปกรณ์แสดงผล PD

เมื่อป้อนแรงดันทดสอบจากแหล่งจ่าย 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 ไหลวนครบวงจรระหว่าง C_k ,C_a และ CD ดังนั้น CD และ MI วัดประจุไฟฟ้าที่ถ่ายเทระหว่าง C_a และ C_k โดยการอินทิเกรตกระแสพัลส์ i_i เพื่อนำไปแสดงผลต่อไป

2.2.1.1 **วงจรสมมูลของดีสชาร์จบางส่วน**

วงจรพื้นฐานในรูปที่ 2.5 จะแทนวัสดุทดสอบ C_a ด้วยวงจรสมมูลซึ่งประกอบด้วย C_1 , C_2 ,C_3 และสปาร์กแกป G ดังรูปที่ 2.6 ก) เนื่องจากเบรกดาวน์ในโพรงกาซจะใช้เวลาในการเกิดน้อยกว่า 100 นาโนวินาที[1] ซึ่งถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับคาบเวลาของแหล่งจ่าย (50 ถึง 400 เฮิรตซ์) ดังนั้นจึงอาจแทนแรงดันคร่อมโพรงกาซด้วยแหล่งจ่ายแรงดันรูปขั้น[1] ดังรูปที่ 2.7 ข) คือ

$$U_1 \approx \Delta U_1 U(t) \tag{2.7}$$

เมื่อ ΔU_1 คือ แรงดันตกคร่อมโพรงกาซและสปาร์กแกป G

$U(t)$ คือ ฟังก์ชันรูปขั้น (Unit step function)

ซึ่งวงจรในรูปที่ 2.6 ข) ก็คือ "วงจรพื้นฐานสำหรับปรับเทียบ (Calibration)" นั่นเอง เนื่องจาก $C_3 >> C_2$ ดังนั้นเมื่อมองอิมพีแดนซ์จากต้นกำเนิดแรงดัน U_1 จะมองเห็นอิมพีแดนซ์รวม C_2 ต่ออนุกรมกับ C_3 ประมาณเท่ากับของ C_2 เพียงตัวเดียว จึงสามารถประมาณได้ว่า

$$i_2 \approx C_2 \frac{dU_1}{dt} \approx C_2 \Delta U_1 \delta(t) \tag{2.8}$$

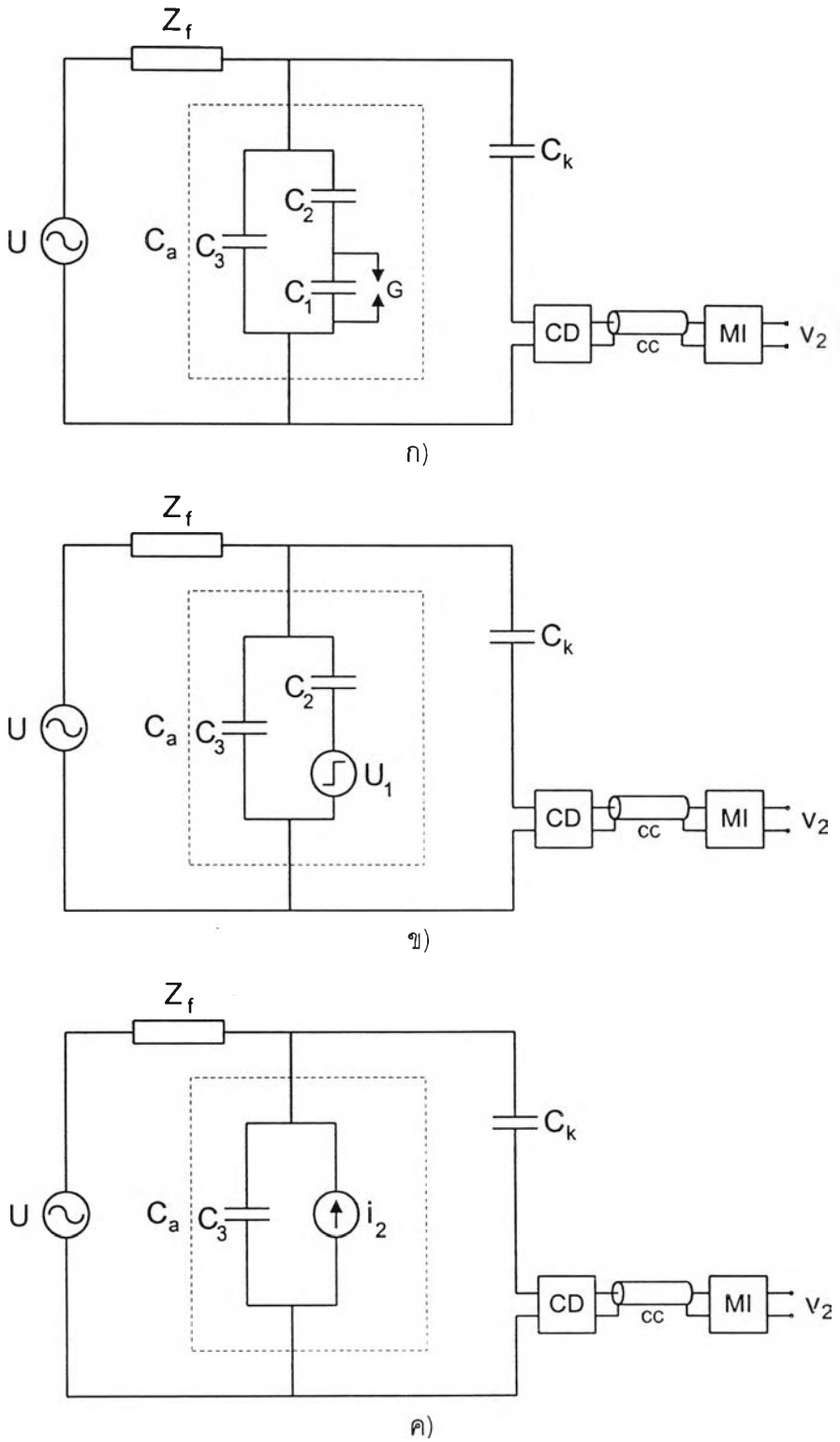
เมื่อ $\delta(t)$ คือ ฟังก์ชันอิมพัลส์ (Impulse function)

ถ้านิยามให้ $q = C_2 \Delta U_1 = \int_0^\infty i_2 dt$ คือ "ประจุที่ปรากฏ" ของ PD

แทนค่า $q = C_2 \Delta U_1$ ในสมการ (2.8) จะได้

$$i_2 \approx q\delta(t) \tag{2.9}$$

จากสมการ (2.9) จึงสามารถแทนการเกิดดีสชาร์จบางส่วนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ ดังรูปที่ 2.6 ค) โดย v_2 คือแรงดันเอาต์พุตจาก MI ในทางปฏิบัติจะพบว่ากระแสพัลส์ i_2 มีช่วงเวลาการเกิด $\leq$ 5 นาโนวินาที สำหรับฉนวนแข็งและฉนวนเหลว[6]



รูปที่ 2.6 การแทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่างๆ

ก) แทนวัสดุทดสอบ C_a ด้วยวงจรสมมูลที่ประกอบด้วยC_1 ,C_2 ,C_3 และสปาร์กแกป G

ข) แทน C_1 และ G ด้วยแรงดันรูปขั้น คือ $U_1 \approx \Delta U_i U(t)$

ค) แทน C_2 และ U_1, ด้วยแหล่งจ่ายกระแสพัลส์ $i_2 \approx q\delta(t)$

2.2.1.2 **การวิเคราะห์วงจรตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน**

การวิเคราะห์วงจรตรวจจับ PD โดยวิธีการอินทิเกรตกระแสพัลส์ด้วยตัวกรองผ่านแถบ [15] ซึ่งเป็นการวิเคราะห์วงจรในโดเมนความถี่

$$I_2(j\omega) = F[i_2] \approx q \tag{2.10}$$

โดยที่ ω คือ ความถี่ที่เชิงมุมแบบแอนะลอก $\omega=2\pi f$

f คือ ความถี่แบบแอนะลอก

F [.] คือ การแปลงฟูริเยร์

เนื่องจากเราแทนการเกิดดีสชาร์จบางส่วนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ ดังนั้นถือว่า $|I_2(j\omega)|$ ซึ่งเป็นผลตอบเชิงความถี่ของฟังก์ชันอิมพัลส์ มีค่าคงที่เสมอในช่วงความถี่ที่เราพิจารณา การตอบสนองความถี่ของเครื่องตรวจจับ PD (ประกอบด้วยอุปกรณ์รับสัญญาณ และเครื่องมือวัด) จะมีคุณสมบัติเป็นตัวกรองผ่านแถบ คือ $Z'_m(j\omega) = V_2(j\omega)/I_{eq}(j\omega)$ โดย $Z'_m(j\omega)$ คืออิมพีแดนซ์ของวงจรเมื่อมองจากแหล่งจ่ายกระแสพัลส์โดยคิดผลกระทบของ C_a และ C_k เข้าไปด้วย และ $I_{eq}(j\omega)$ คือกระแสสมมูลที่ขั้วสายของวัสดุทดสอบ ในกรณีที่ไม่คิดผลกระทบของ C_a และ C_k จะได้ $Z_m(j\omega) = V_2(j\omega)/I_2(j\omega)$ การเลือกความถี่ที่เหมาะสมนั้นจะต้องเลือกความถี่ในช่วงที่ปลอดสัญญาณรบกวนจากภายนอกให้มากที่สุด ซึ่งลักษณะของสัญญาณรบกวนในช่วงโดเมนความถี่แสดงในรูปที่ 2.7 ดังนั้นการวิเคราะห์เอาต์พุต v_2 ทำได้ดังนี้

$$I_{eq}(j\omega) = \frac{C_k}{(C_k + C_3)} I_2(j\omega) \tag{2.11ก}$$

จากสมการ(2.10) แทนค่าในสมการ(2.11ก)จะได้

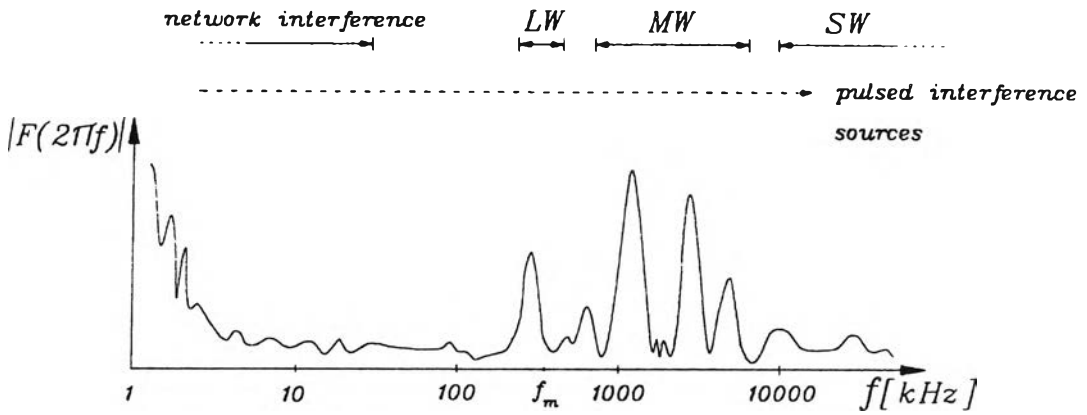
$$I_{eq}(j\omega) = \frac{C_k}{(C_k + C_a)} q \tag{2.11ข}$$

เนื่องจาก $$Z'_m(j\omega) = \frac{V_2(j\omega)}{I_{eq}(j\omega)} \tag{2.12}$$

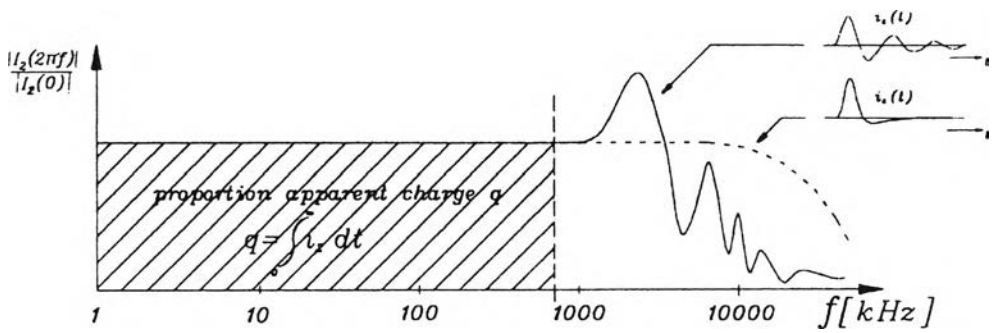
หรือ $$V_2(j\omega) = I_{eq}(j\omega) Z'_m(j\omega) \tag{2.13}$$

แทนค่า $I_{eq}(j\omega)$ จากสมการ (2.11ข) ลงในสมการ (2.13) จะได้

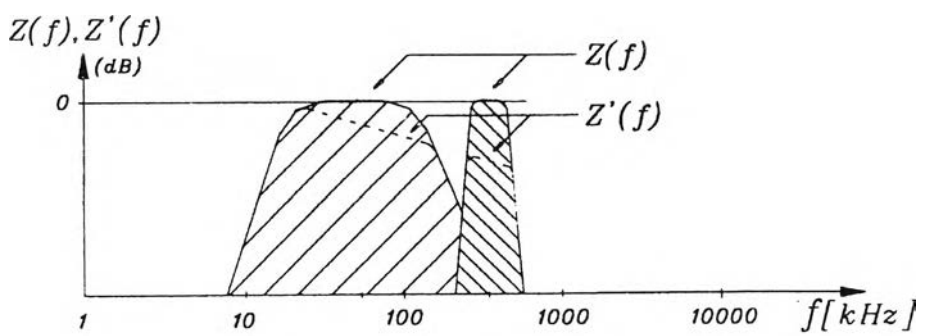
$$V_2(j\omega) = \frac{C_k}{(C_k + C_a)} q \cdot Z'_m(j\omega) \tag{2.14}$$



ก)



ข)



ค)

รูปที่ 2.7 ลักษณะสเปกตรัมและการตอบสนองความถี่ต่างๆของเครื่องตรวจจับ PD

ก) ลักษณะสเปกตรัมของสัญญาณรบกวน

ข) ลักษณะสเปกตรัมของกระแสพัลส์ PD

ค) Transfer impedance ของเครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้างและแบบแถบแคบ

โดยที่ $|Z_m(j\omega)| = Z(f)$ และ $|Z_m'(j\omega)| = Z'(f)$

เมื่อวิเคราะห์ในเชิงเวลาจะได้ $v_2 = F^{-1}[V_2(j\omega)]$ (2.15)

$$v_2 = \frac{C_k}{(C_k + C_a)} q \cdot z'_m(t) \quad (2.16ก)$$

เมื่อไม่คิดผลของ C_a และ C_k จะได้

$$v_2 \approx \frac{C_k}{(C_k + C_a)} q \cdot z_m(t) \quad (2.16ข)$$

เมื่อ $z'_m(t)$ คือ การตอบสนองแบบอิมพัลส์ของเครื่องตรวจจับ PDเมื่อคิดผลกระทบของ C_a และ C_k

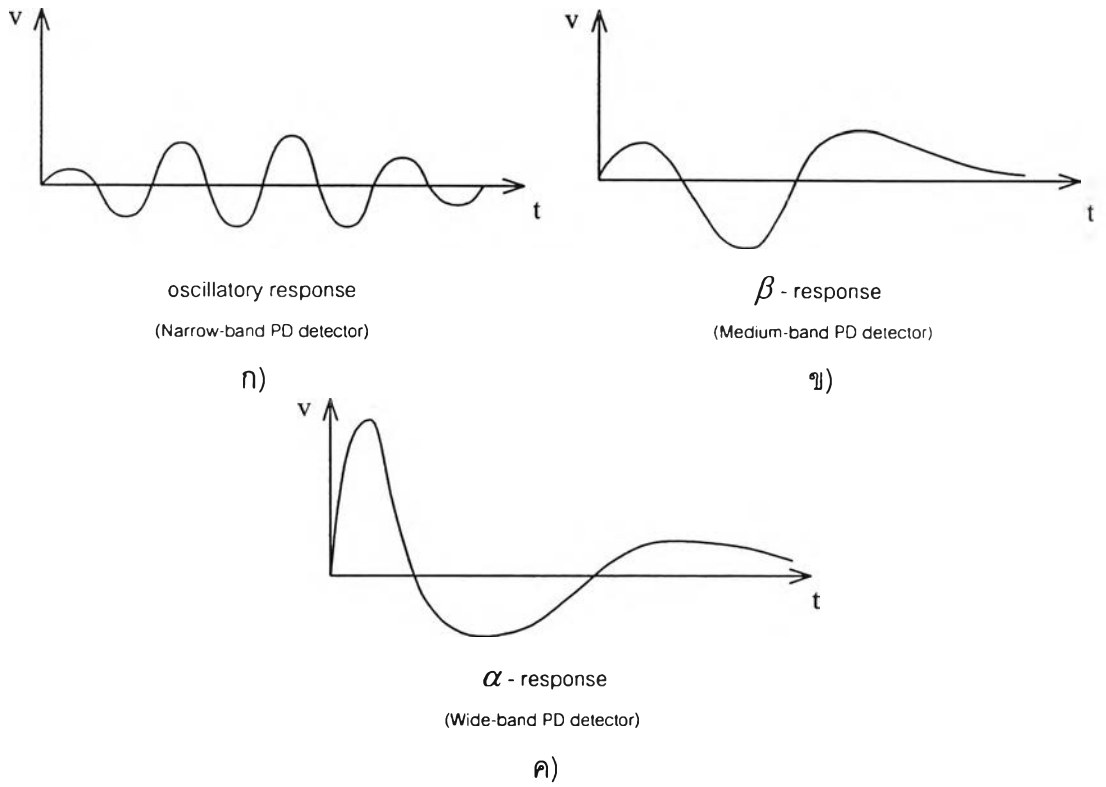
$z_m(t)$ คือ การตอบสนองแบบอิมพัลส์ของเครื่องตรวจจับ PDเมื่อไม่คิดผลกระทบของ C_a และ C_k

$F^{-1}[.]$ คือ อินเวอร์สฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม

ตามเงื่อนไขสมการ(2.16ก)และ(2.16ข) เอาต์พุต v_2 อาจแบ่งออกเป็นได้ 3 ลักษณะ[16] คือ ในกรณีที่ $|Z'_m(j\omega)|$ มีแบนด์วิดต์แคบมาก จะให้สัญญาณเอาต์พุตแบบ "Oscillatory response" จึงเรียกเครื่องตรวจจับ PD นี้ว่า"เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบแคบ" (Narrow–band PD detector) ดังรูปที่ 2.8 ก) กรณี $|Z'_m(j\omega)|$ มีแบนวิดต์กว้างไม่มาก จะให้สัญญาณเอาต์พุตแบบ β-response จึงเรียกเครื่องตรวจจับ PDนี้ว่า "เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกลาง" (Medium–band PD detector) ดังรูปที่ 2.8 ข) และกรณีสุดท้ายคือ $|Z'_m(j\omega)|$ มีแบนด์วิดต์กว้างจะให้สัญญาณเอาต์พุตแบบ α-response จึงเรียกเครื่องตรวจจับ PD นี้ว่า"เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้าง" (Wide–band PD detector) ดังรูปที่ 2.8 ค)

จากสมการ (2.16ก) และ (2.16ข) จะพบว่า ไม่ว่าแบนด์วิดต์ของเครื่องตรวจจับ PD จะเป็นอย่างไร ถ้าแบนด์วิดต์ที่พิจารณาอยู่ อยู่ในช่วงความถี่ที่ $|I_2(j\omega)|$ มีค่าคงที่แล้ว ผลคือ เครื่องตรวจจับPDจะทำหน้าที่อินทิเกรตกระแสพัลส์เสมอคือ $q = \int_0^\infty i_2 dt$ ดังนั้นเราจึงเรียกเครื่องตรวจจับ PDทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมาแล้วว่าเครื่องตรวจจับ PD แบบนิยม (conventional PD detector) แต่อย่างไรก็ตาม มาตรฐาน IEC[5] ได้แนะนำเครื่องตรวจจับ PD ให้ใช้เพียง 2 แบบคือ เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบแคบและแบบแถบกว้างเท่านั้น โดยการกำหนดช่วงความถี่จำกัดและแบนด์วิดต์ของ $|Z_m(j\omega)|$ มาตรฐาน IEC เรียก $|Z_m(j\omega)|$ หรือ $Z(f)$ ว่า "Transfer impedance" และถือ

เป็นคุณลักษณะของระบบวัด (Measuring system characteristics) ที่สำคัญรายการหนึ่งของเครื่องตรวจจับ PD

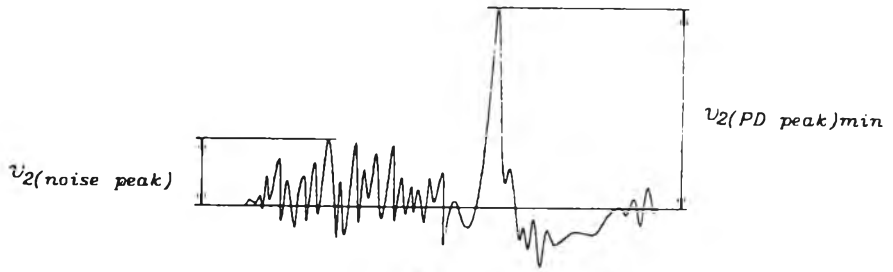


รูปที่ 2.8 ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD แบบต่างๆ

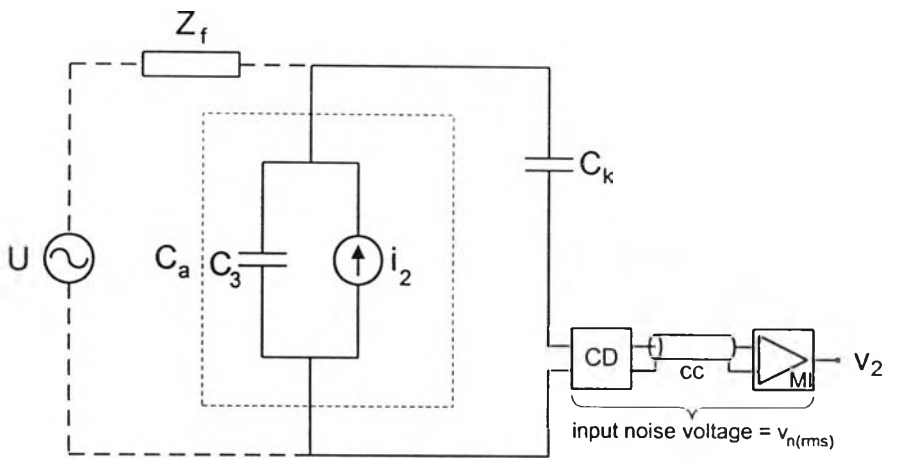
2.2.1.3 **การวิเคราะห์ความไว**

ตามข้อกำหนดของ IEC 885–2 [17] กล่าวว่า ความไว (Sensitivity) ของเครื่องตรวจจับ PD คือขนาดของสัญญาณ PD ที่เล็กที่สุดเท่าที่เครื่องจะสามารถตรวจวัดค่าได้ โดยมีความถูกต้อง (accuracy) เพียงพอ โดยใช้ค่า**สองเท่าของขนาดสัญญาณรบกวนที่อ่านได้**เป็นเกณฑ์

เนื่องจากสัญญาณรบกวนทำให้ความไวของเครื่องตรวจจับ PD ลดลง ในการคำนวณความไวจะพิจารณาเฉพาะสัญญาณรบกวนภายในเครื่องวัดเท่านั้นคือ "Thermal noise" ของอุปกรณ์รับสัญญาณ (CD) และ "Input noise" ของเครื่องตรวจวัด (MI) รวมกันคือ $v_{n(rms)}$ ลักษณะสัญญาณรบกวนและ PDแสดงดังรูปที่ 2.9 และวงจรที่ใช้คำนวณความไวแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD ที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย



รูปที่ 2.10 วงจรที่ใช้คำนวณความไวของเครื่องตรวจจับ PD สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

กรณีวัสดุทดสอบทั่วไปเช่น ตัวเก็บประจุ บุชชิ่ง เป็นต้น การคำนวณความไวทำได้ดังนี้ [5]

$$v_{2(PD\ peak)\min} = 2v_{2(noise\ peak)} \tag{2.17}$$

กำหนดให้ค่ายอดของ $z_m'(t)$ หรือ $z_m(t)$ คือ $\xi \cdot A$ จะได้

$$v_{2(PD\ peak)\min} = \frac{C_k}{(C_k + C_a)} q_{\min} \cdot \xi \cdot A \tag{2.18}$$

และกำหนดให้สัญญาณรบกวนมีค่ายอดเท่ากับ 2.5 เท่าของค่ารากของกำลังสองเฉลี่ย (rms)[1]

$$v_{2(noise\ peak)} = 2.5Av_{n(rms)} \tag{2.19}$$

จากสมการ (2.18) และ (2.19)แทนค่าใน (2.17) จะได้

$$q_{\min} = 5\left(\frac{C_k + C_a}{\xi C_k}\right) v_{n(rms)} \tag{2.20}$$

ในกรณีที่สัญญาณรบกวนภายในเครื่องตรวจจับ PDเกิดจาก Thermal noise ของ CD เพียงอย่างเดียวจะได้

$$q_{\min} = 10\left(\frac{C_k + C_a}{\xi C_k}\right)\sqrt{kTBR_{mi}} \qquad (2.21)$$

เมื่อ A คือ อัตราขยาย

ξ คือ แฟกเตอร์สำหรับการตอบสนองแบบอิมพัลส์ มีค่าเท่ากับค่ายอดของ $z_m'(t)$ หรือ $z_m(t)$ หารด้วยอัตราขยาย A

k คือ ค่าคงตัวโบลต์ซมันน์ = 1.38×10^{-23} Joules/K

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

R_{mi} คือ ความต้านทานอินพุตของอุปกรณ์รับสัญญาณในช่วงความถี่แถบผ่าน

$V_{n(rms)}$ คือ สัญญาณรบกวนรวมที่อินพุตของวงจรขยายหรือตัวกรองและอุปกรณ์รับสัญญาณ

B คือ แบนด์วิดต์สมมูล

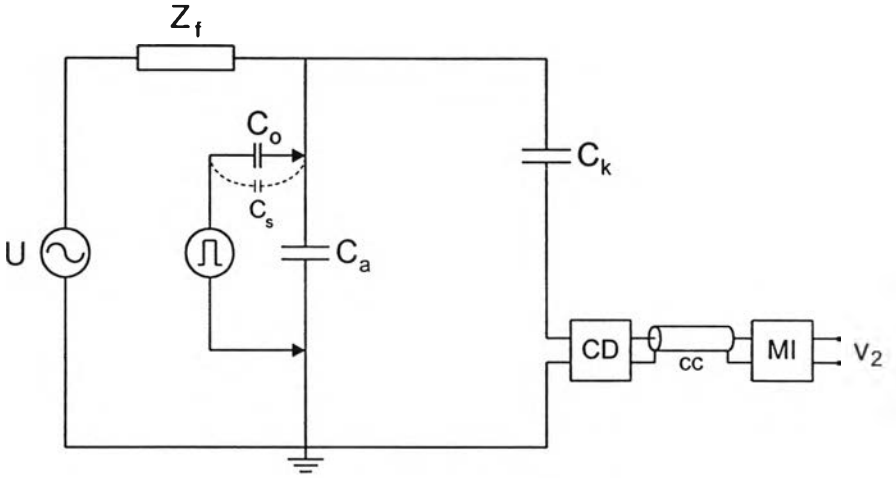
2.2.2 การแสดงผลดีสชาร์จบางส่วน

การแสดงหรือวัดผลของดีสชาร์จบางส่วนสามารถทำได้ทั้งทางมิเตอร์ ทางจอภาพของออสซิลโลสโคป และทางเครื่องบันทึก[5] ค่าของดีสชาร์จบางส่วนที่มาตรฐานกำหนด โดยปกติจะแสดงในเทอมของ "ประจุที่ปรากฏ" ของ PD หรือ "ขนาดของดีสชาร์จ" (Discharge magnitude) "q" มีหน่วยเป็นพิโคคูลอมป์(pC) จากสมการ(2.26ก)และ(2.26ข) สัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD คือ v_2 จะปฏิภาคโดยตรงกับ q ดังนั้นค่ายอดของ v_2 คือ $v_{2(peak)}$ จะปฏิภาคโดยตรงกับ q ด้วย จากเหตุผลดังกล่าวการอ่านค่า q จึงนิยมอ่านจากค่ายอดของ v_2 ซึ่งอ่านได้จากจอภาพของออสซิลโลสโคป หรือมิเตอร์อ่านค่ายอดก็ได้

2.2.3 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน

จากสมการ(2.16ก) จะพบว่า สัญญาณเอาต์พุต v_2 แปรผันตามขนาดของตัวเก็บประจุคับปลิงและวัสดุทดสอบ จึงต้องมีการปรับเทียบด้วยค่า PD มาตรฐานก่อนทำการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบโดยใช้เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน (Discharge calibrator) เพื่อใช้ในการจำลองการเกิด PD ด้วยการส่งผ่านกระแสพัลส์ที่มีขนาดของประจุมาตรฐาน q_0 ที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ดังรูปที่ 2.11 เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันรูปขั้นหรือแรงดันแบบสี่เหลี่ยม U_0 ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุขนาดเล็ก C_0 ตามมาตรฐาน IEC กำหนดให้ $C_0 \leq 0.1C_a$ ถ้า C_0 เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ และกำหนดช่วงเวลาขึ้น t_r ของ U_0 ดังนี้

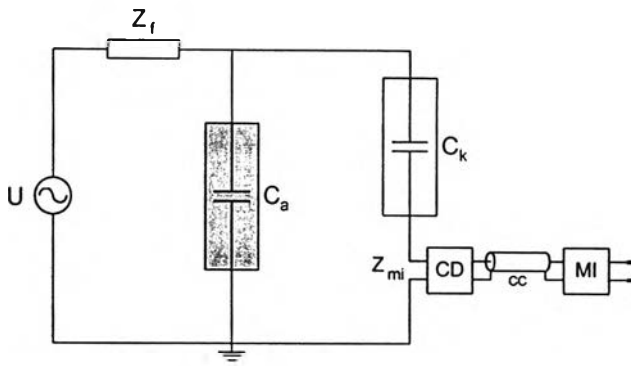
$t_r \leq 60$ns [3] ในการปรับเทียบต้องพิจารณาผลของค่าความจุไฟฟ้าสเตรย์ C_s ด้วย คือต้องทำให้ $C_0 >> C_s$



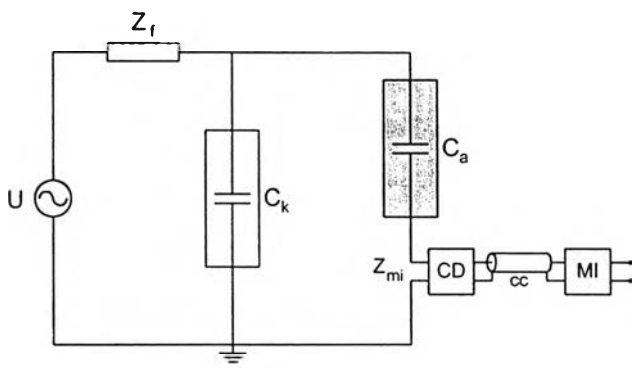
รูปที่ 2.11 วงจรสำหรับการปรับเทียบ

2.3 เทคนิคการวัดดีสชาร์จบางส่วน

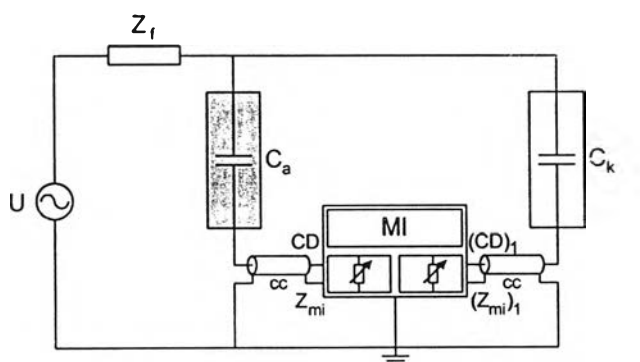
โดยปกติวัสดุทดสอบทั่วไป อาจแทนได้ด้วยตัวเก็บประจุชนิดองค์ประกอบแบบลัมป์หรือตัวเก็บประจุธรรมดา วงจรทดสอบ PD ตามมาตรฐานต่างๆ จะมีลักษณะเช่นเดียวกัน ในที่นี้ใช้วงจรทดสอบตามมาตรฐาน IEC [3,18] โดยรูปที่ 2.12 ก) และรูปที่ 2.12 ข) เป็นวงจรทดสอบแบบวิธีตรง ข้อดีของวงจรรูปที่ 2.12 ก) คือขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบต่อลงกราวด์โดยตรง ในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดการเบรกดาวน์อุปกรณ์รับสัญญาณจะไม่ได้รับความเสียหาย และเหมาะสำหรับทดสอบวัสดุทดสอบที่มีขั้วแรงดันต่ำหรือซีลด์หรือ Screen ขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ซีลด์ของเคเบิลจะต่อลงกราวด์โดยตรง ในรูปที่ 2.12 ค) เป็นวงจรทดสอบแบบสมดุล วงจรแบบนี้จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องการลดสัญญาณรบกวนที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายหรือสัญญาณแบบคอมมอนโมด (Common mode) ในรูปที่2.12 ง) เป็นวงจรทดสอบแบบแยกขั้วสัญญาณได้(Polarity Discrimination) มีข้อดีเช่นเดียวกับวงจรทดสอบแบบสมดุล แต่มีความสามารถเพิ่มเติมในการแยกขั้วสัญญาณรบกวนจากภายนอกออกจาก PD ภายในวงจรทดสอบได้ แต่ข้อเสียของวงจรในรูปที่ 2.12ข), 2.12 ค) และ 2.12 ง) คือ อาจทำให้เครื่องวัดได้รับความเสียหายในกรณีที่วัสดุทดสอบเกิดเบรกดาวน์ และไม่เหมาะในการทดสอบวัสดุทดสอบที่มีซีลด์ขนาดใหญ่ เนื่องจากซีลด์ไม่ได้ต่อลงกราวด์โดยตรง ดังนั้นถ้ามีสัญญาณรบกวนที่ซีลด์จะทำให้ความไวในการวัด PD ลดลง



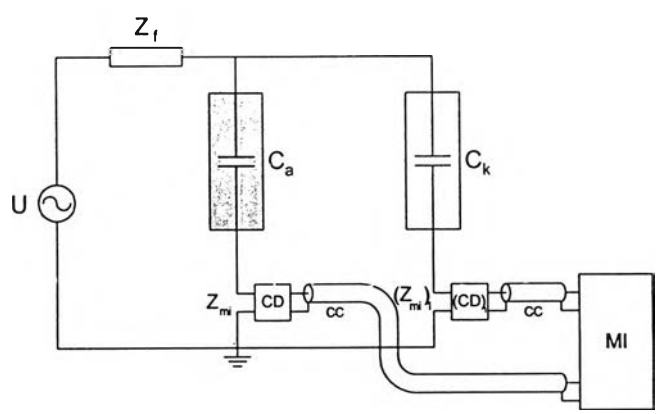
ก)



ข)



ค)



ง)

รูปที่ 2.12 วงจรทดสอบดีสชาร์จบางส่วนแบบต่างๆ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

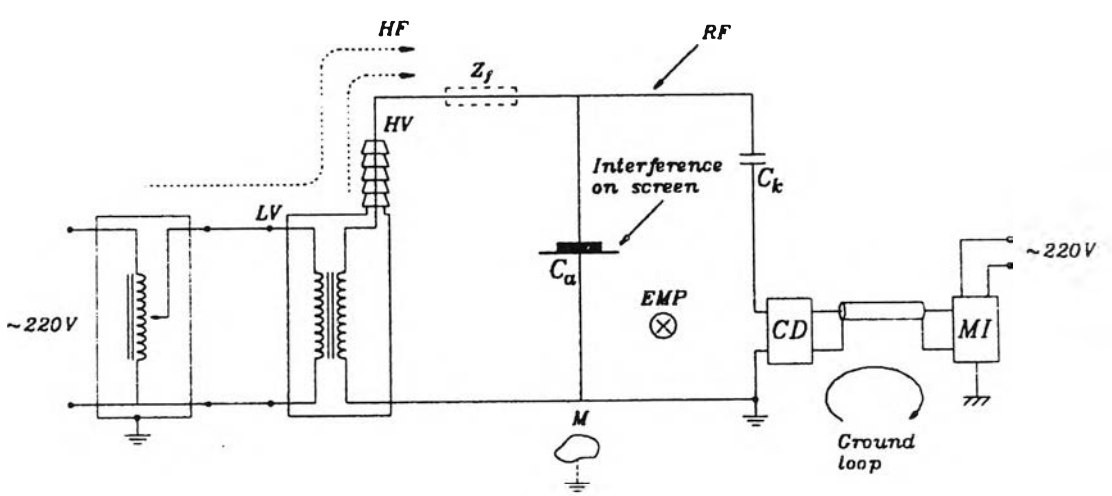
การปรับเทียบวงจรทดสอบโดยปกติจะทำก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ โดยใช้เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ที่มีประจุ (Pulse Area) q_{cal} ซึ่งทราบค่าที่แน่นอนที่ขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ถ้าเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่า PD ได้ a_1 ดังนั้น Scale Facter $K_1 = q_{cal}/a_1$ หลังจากทำการปรับเทียบเสร็จแล้วต้องเอาเครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานออกก่อนการป้อนแรงดันเข้าวงจรทดสอบ (ในกรณีที่ C_o เป็นตัวเก็บประจุแรงดันต่ำ) ขณะทำการทดสอบที่แรงดันตามมาตรฐานกำหนด ถ้าในขณะนั้นเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่าได้ A_1 ดังนั้นประจุที่ปรากฏของ PD คือ $q = K_1A_1$ และความไวของวงจรทดสอบ $q_{min} = 2K_1h_n$ เมื่อ h_n คือค่าสูงสุดของระดับสัญญาณรบกวนสภาพแวดล้อม (Background noise) ที่อ่านจากเครื่องตรวจจับ PD หลังการปรับเทียบก่อนการจ่ายแรงดันให้วงจรทดสอบ[19]

2.4 เทคนิคการลดสัญญาณรบกวน

เนื่องจากสัญญาณ PD มีขนาดเล็ก ดังนั้นในการทดสอบ PD สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นย่อมมีผลต่อค่าที่วัดได้ แต่เราสามารถลดสัญญาณรบกวนให้เหลือน้อยลงเพื่อให้วงจรทดสอบมีความไวสูงขึ้นได้

2.4.1 สัญญาณรบกวนที่มีผลกระทบในการวัดดีสชาร์จบางส่วน

สัญญาณรบกวนประกอบด้วย สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางอากาศ และทางแหล่งจ่าย นอกจากนี้ยังมีสัญญาณรบกวนเนื่องจากการดีสชาร์จของอุปกรณ์ที่เป็นโลหะและวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ หรือกราวด์ไม่ดี การเกิดกราวด์ลูปและเกิดสัญญาณออสซิลเลตเนื่องจากการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ไม่ดีหรือหลวม เป็นต้น รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างสัญญาณรบกวนที่ตำแหน่งต่างๆ

โดยที่ HF คือ สัญญาณรบกวนความถี่สูงที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายได้แก่ ฮาร์มอนิกสูงๆ จากเมนโดยตรง จากอุปกรณ์พวกไธริสเตอร์ และ PD จากหม้อแปลงทดสอบ เป็นต้น

RF คือ คลื่นรบกวนวิทยุซึ่งอาจจะเป็นคลื่นวิทยุโดยตรง คลื่นรบกวนจากอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงดันสูง หรือหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่อยู่ใกล้เคียง

EMP คือ สัญญาณรบกวนจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก มีลักษณะเป็นพัลส์ เนื่องจากการทำงานของไธริสเตอร์ หรือการดีสชาร์จประจุ

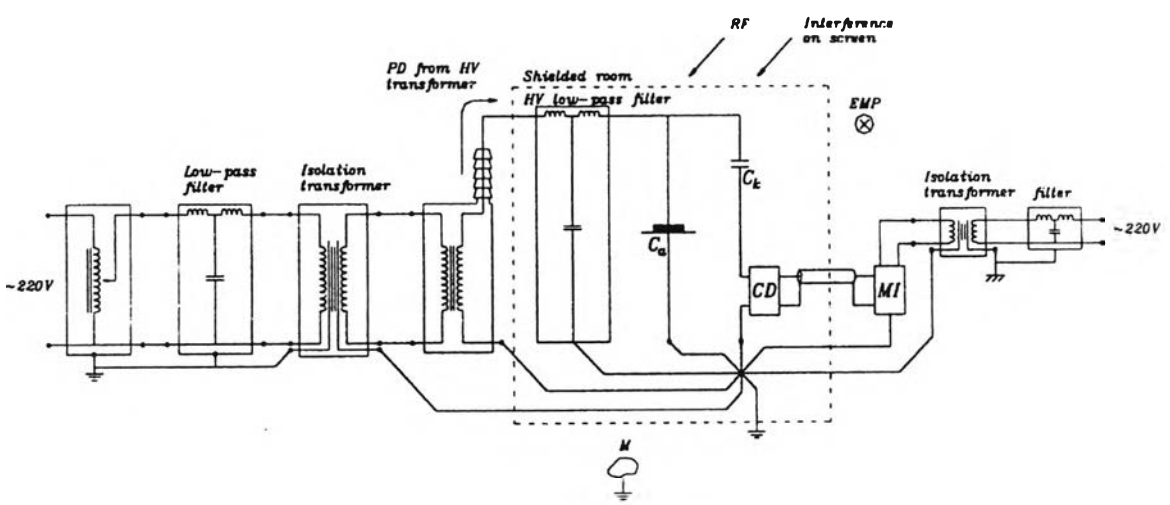
interference on screen คือ สัญญาณรบกวนที่ซีลด์ หรือสกรีน หรือที่ขั้วแรงดันต่ำของวัสดุทดสอบที่มีซีลด์ขนาดใหญ่ เช่น เคเบิล เป็นต้น

ground loop คือ การเกิดครบวงรอบของสายดิน

ungrounded metal (M) คือ เกิดดีสชาร์จของโลหะที่ไม่ได้ต่อลงดินวางอยู่ใกล้วงจรทดสอบ

2.4.2 การลดสัญญาณรบกวน

การลดสัญญาณความถี่สูง เช่น พวกฮาร์มอนิกสูงๆ จะใช้ตัวกรองแรงดันต่ำ และอาจจะเพิ่มหม้อแปลงขดลวดแยก(Isolation Transformer)ช่วยก็ได้ โดยต่อไว้ทางด้านขดลวดแรงดันต่ำของหม้อแปลงทดสอบ ในกรณีที่เกิด PD ในหม้อแปลงทดสอบจะต้องใช้ตัวกรองแรงดันสูงต่อทางด้านขดลวดแรงดันสูงของหม้อแปลงทดสอบ การลดสัญญาณรบกวน RF และ EMP ซึ่งเข้ามาทางอากาศ ทำได้โดยการทดสอบในห้องซีลด์ การแก้ปัญหาเรื่องกราวด์ลูปทำได้โดยการต่อกราวด์รวมกันเพียงจุดเดียว ตัวอย่างการแก้ปัญหาสัญญาณรบกวนในข้อ 2.4.1 แสดงในรูปที่ 2.14

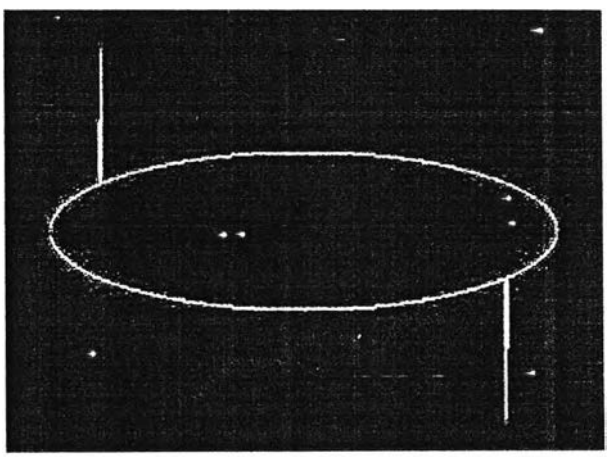


รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการลดสัญญาณรบกวน

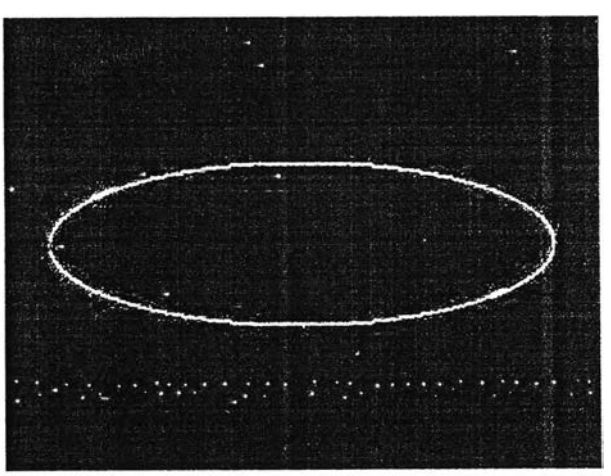
นอกจากการลดสัญญาณรบกวนโดยตรงแล้ว ยังมีวิธีการลดสัญญาณรบกวนทางอ้อมอีกหลายวิธีด้วยกัน ที่นิยมใช้กันมากคือ[15]

1) วงจรทดสอบแบบสมดุล ใช้ลดสัญญาณรบกวนแบบคอมมอนโมด เช่น สัญญาณรบกวนที่เข้ามาทางแหล่งจ่าย เป็นต้น

2) การลดสัญญาณรบกวนโดยวิธี "หน้าต่างเวลา" (Time window method) วิธีนี้เป็นที่นิยมกันมากในปัจจุบัน โดยจะลดสัญญาณรบกวนที่ซิงโครไนซ์กับความถี่ของแหล่งจ่ายเท่านั้น เช่น สัญญาณรบกวนเนื่องจากการทำงานของไธริสเตอร์ เป็นต้น ด้วยการใช้สวิตช์ตัดหรือเปิดวงจรตรงตำแหน่งที่มีสัญญาณรบกวน เพื่อไม่ให้ไปปรากฏที่เอาต์พุตของเครื่องจับ PD ดังรูปที่ 2.15 ก) และ 2.15 ข)



ก)



ข)

รูปที่ 2.15 การลดสัญญาณรบกวนด้วยวิธี "หน้าต่างเวลา"

3) การลดสัญญาณรบกวนโดยใช้การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล[20] (Digital signal processing, DSP) วิธีนี้นิยมใช้ในการลดสัญญาณรบกวนแบบแถบความถี่แคบ (narrow-band noise) เช่นสัญญาณวิทยุ AM (แบนด์วิดต์ของแต่ละสถานีประมาณ 9 กิโลเฮิรตซ์) ออกจากสัญญาณ PD ซึ่งมีแถบความถี่กว้างหลายร้อยกิโลเฮิรตซ์

2.5 คุณสมบัติตามมาตรฐานของเครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วน

ข้อกำหนดของเครื่องตรวจจับ PD ตามมาตรฐาน IEC โครงการนี้จะกล่าวถึงข้อกำหนดตาม IEC 270(1981) ซึ่งยังคงใช้อยู่ถึงปัจจุบันนี้ และ IEC 60270(1998 ฉบับร่าง)ที่มีการแก้ไขข้อบกพร่องและเพิ่มเติมรายละเอียดเกี่ยวกับข้อกำหนด วิธีการทดสอบ และวิธีการปฏิบัติ เพื่อให้การตรวจจับหรือการวัด PD มีความถูกต้องและเหมาะสมยิ่งขึ้น ซึ่งจะมาแทน IEC 270(1981) ในอนาคตอันใกล้นี้ ซึ่งข้อกำหนดตาม IEC 60270 จะครอบคลุมข้อกำหนดทุกข้อตาม IEC 270 ส่วนกรณีที่ใช้เครื่องตรวจจับ PD ในการวัด PD ในสายเคเบิลนั้น เครื่องตรวจจับ PD จะต้องมีคุณสมบัติเพิ่มเติมตามมาตรฐาน IEC 885-3

2.5.1 ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC 270

ข้อกำหนดเกี่ยวกับคุณสมบัติของเครื่องตรวจจับ PD ที่สำคัญมีดังนี้

1) เวลาแยกชัดของพัลส์ (Pulse resolution time) ต้องไม่เกิน 100 ไมโครวินาที ในกรณีที่ไม่เกิดความผิดพลาดเนื่องจากเกิดการทับซ้อน (Superposition) ของพัลส์ PD

2) เครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน ที่ใช้ในการปรับเทียบวงจรทดสอบ ได้กำหนดให้แรงดันรูปขั้นของเครื่องปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐานมีช่วงเวลาขึ้น (rise time) ไม่เกิน 0.1 ไมโครวินาที และแรงดันค่อยๆลดลงด้วยเวลาลดถอย (decay time) อยู่ในช่วง 100 ไมโครวินาที ถึงหลักพันของไมโคร วินาที และ $C_0 \leq 0.1\,(C_a + C_k)$

2.5.2 ข้อกำหนดตามมาตรฐาน IEC60270

มาตรฐาน IEC60270 มีการแก้ไขและเพิ่มเติมรายละเอียดเกี่ยวกับข้อกำหนด วิธีการทดสอบ และวิธีการปฏิบัติหลายประการ

2.5.2.1 นิยามเพิ่มเติมและนิยามที่กำหนดใหม่ ในส่วนที่เกี่ยวข้องโดยตรง

นิยามเพิ่มเติมและนิยามที่กำหนดใหม่ ในส่วนที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการออกแบบเครื่องตรวจจับดีสชาร์จบางส่วนได้แก่

1) Pulse Repetition Frequency, N คือจำนวนพัลส์ที่มีระยะห่างระหว่างพัลส์ทุกลูกเท่ากันที่นับได้ต่อวินาที

2) Phase Angle, ϕ_i และ Time, t_i ของพัลส์ PD ที่เกิดขึ้น กำหนดดังนี้

$$\phi_i = 360(t_i / T)$$

โดยที่ t_i คือ เวลาที่เริ่มมุมเฟสของแรงดันทดสอบ เริ่มที่มุมศูนย์องศาจนถึงเวลาที่เกิดพัลส์ PD

T คือ คาบเวลาของความถี่ของแรงดันทดสอบ

3) Transfer impedance, $Z(f)$ (ในที่นี้ใช้ $Z_m(f)$ แทน $Z(f)$)ของระบบวัด PD คือ อัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตต่อกระแสอินพุตของระบบวัด PD โดยการป้อนกระแสที่มีขนาดคงที่รูปไซน์ที่อินพุตและปรับเปลี่ยนความถี่เพื่อหาอัตราส่วนดังกล่าวที่ความถี่ต่างๆ

4) ความถี่จำกัดล่างและบน (lower and upper freqencies , f_1 and f_2)คือความถี่ที่ขนาด transfer impedance, $Z(f)$ มีค่าลดลง 6 dB จากค่ายอดสูงสุดที่อยู่ในช่วงแถบผ่าน

5) แบนด์วิดต์ , $\Delta f = f_2 - f_1$ และ midband frequency, $f_m = \frac{f_1 + f_2}{2}$

2.5.2.2 ระบบวัด PD สำหรับวัดประจุที่ปรากฏ

คุณสมบัติที่สำคัญของระบบวัด PD สำหรับวัดประจุที่ปรากฏมีดังนี้

1) ระบบวัดประจุที่ปรากฏ(q)นี้จะวัดเฉพาะค่ายอดพัลส์ของ PD ที่มีค่าสูงสุดและเกิดซ้ำๆ ทุกคาบเวลาของความถี่ของแรงดันทดสอบ การอ่านค่าของอุปกรณ์วัดจะใช้หลักการเดียวกันกับวงจรตรวจจับค่ายอดแบบแอนะลอกที่มีค่าคงตัวทางเวลาของการอัดประจุ (electric charging time constant) สั้นมาก และมีค่าคงตัวทางเวลาของการคายประจุ (electric discharging time constant) ≤ 0.44 วินาที การตอบสนองของระบบวัดที่มีต่อพัลส์ของ PD ที่มีระยะห่างระหว่างพัลส์เท่ากันที่ถูกป้อนด้วย Pulse repetition frequency, N จะทำให้ค่าที่ระบบวัดอ่านได้ R เป็นตามตารางต่อไปนี้ โดยสมมติว่าพิสัย (range) และอัตราขยาย (gain) ถูกปรับให้อ่านเต็มสเกลหรือ 100% เมื่อ N = 100

N(1/s)	1	2	5	10	50	≥100
R_{min}(%)	35	55	76	85	94	95
R_{max}(%)	45	65	86	95	104	105

2) ระบบวัด PD แบบแถบกว้าง จะกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ต่างๆของ Transfer impedance, $Z(f)$ ดังนี้

$$30kHz \le f_1 \le 100kHz$$
$$f_2 \le 500kHz$$
$$100kHz \le \Delta f \le 400kHz$$

3) ระบบวัด PD แบบแถบแคบ จะกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ต่างๆของ Transfer impedance, $Z(f)$ ดังนี้

$$9kHz \le \Delta f \le 30kHz$$
$$50kHz \le f_m \le 1MHz$$

ซึ่ง f_m สามารถปรับค่าได้ และกำหนดให้ขนาดของ $Z(f)$ ที่ความถี่ $f_m \pm \Delta f$ มีค่าลดลงต่ำกว่าค่ายอดสูงสุดที่อยู่ในช่วงแถบผ่าน 20 dB

4) ความเป็นเชิงเส้นของระบบวัด มาตรฐานยอมให้สเกลแฟกเตอร์ k ผิดพลาดได้น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

2.5.2.3 **ระบบวัด PD แบบดิจิตอล สำหรับวัดประจุที่ปรากฏ**

ข้อกำหนดของระบบวัด PD แบบดิจิตอล สำหรับวัดประจุที่ปรากฏ มีดังนี้

1) ระบบวัดนี้จะต้องใช้หลักการระบบวัดแบบแอนะลอกที่กล่าวมาแล้วในข้อ 2.5.2.2 ส่วนภาคดิจิตอลนั้นจะวัดประจุที่ปรากฏโดยใช้การรับข้อมูลแบบดิจิตอลในการอ่านข้อมูลสัญญาณเพื่อนำไปแสดงผลและวิเคราะห์ต่อไป

2) ข้อกำหนดต่ำสุดของระบบวัด PD แบบดิจิตอล คือ ต้องสามารถแสดงผลค่าประจุที่ปรากฏได้ โดยค่าที่อ่านได้ต้องเป็นไปตามข้อกำหนดในข้อ 2.5.2.2 เวลาแสดงผลใหม่แต่ละครั้งของการแสดงผลแบบดิจิตอลต้องไม่เกิน 1 วินาที และในกรณีที่มีการใช้ Bipolar sensitivity threshold นั้น จะต้องมีการบันทึกระดับ threshold ด้วย

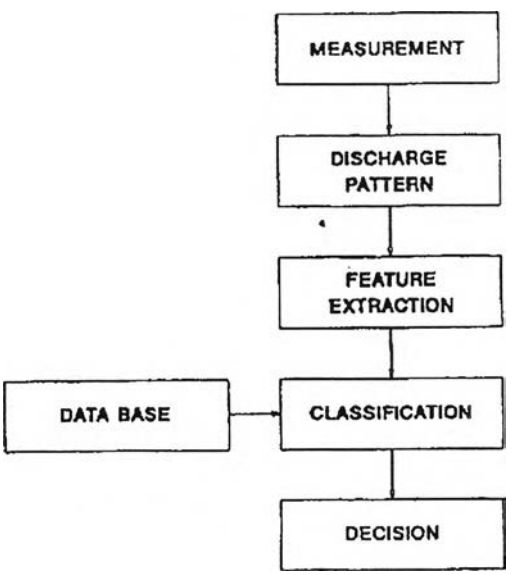
3) ข้อกำหนดในการวัดขนาดแรงดันและมุมเฟสของแรงดันทดสอบ ถ้าระบบวัดนี้สามารถวัดระดับแรงดันของแรงดันทดสอบได้ ค่าที่อ่านได้จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดใน IEC 60060-2(1994) ถ้าต้องการออกแบบให้ระบบวัดนี้สามารถวัดมุมเฟสของแรงดันทดสอบได้ มุมเฟสจะผิดพลาดได้ไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ และถ้าหากระบบวัดนี้มีความสามารถในการวัดค่าขณะหนึ่ง (instantaneous value) ของแรงดันทดสอบ ค่าที่อ่านได้จะต้องผิดพลาดได้น้อยกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ของค่ายอดของแรงดันทดสอบ การควอนไทซ์ (quantization) ของแรงดันทดสอบ

จะต้องมีความละเอียดอย่างน้อย 8 บิต และต้องมีอัตราชักตัวอย่าง (sampling rate) ไม่น้อยกว่า 100 ตัวอย่างในหนึ่งคาบเวลาของความถี่ของแรงดันทดสอบ

2.6 การวิเคราะห์ดีสชาร์จบางส่วน

เมื่อตรวจพบ PD ในระบบการฉนวน ก็จะต้องทำการหาสาเหตุโดยสังเกตจากลักษณะของสัญญาณที่ตรวจวัดได้ การหาสาเหตุนี้มีความสำคัญสำหรับผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และผู้ใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง เป็นเวลาหลายสิบปีที่การวิเคราะห์และการรู้จำ (recognition) รูปแบบของการเกิด PD กระทำโดยการใช้สายตาสังเกตสัญญาณที่แสดงแบบวงรีบนจอของออสซิลโลสโคป[1,21]ซึ่งการแปลความหมายจะขึ้นกับความรู้และประสบการณ์ของผู้ทดสอบ การนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการตรวจวัด PD เป็นการเปิดโอกาสให้สามารถทำการรู้จำรูปแบบของการเกิด PD โดยอัตโนมัติได้ [22-23]

กระบวนการรู้จำรูปแบบของการเกิด PD โดยอัตโนมัติแสดงไว้ในรูปที่ 2.16 ประกอบด้วย Measurement คือการตรวจวัด ซึ่งจะได้รูปแบบของการเกิด PD (discharge pattern) Feature extraction คือการคำนวณหาคุณลักษณะจากรูปแบบที่ได้ Classification คือการจำแนกประเภทโดยอ้างอิงจาก Database คือฐานข้อมูล ซึ่งจะนำมาสู่ Decision คือการตัดสินใจในที่สุด



รูปที่ 2.16 กระบวนการรู้จำโดยทั่วไป

2.6.1 สัญญาณที่ใช้ในการรู้จำรูปแบบดีสชาร์จบางส่วน

การตรวจวัดสัญญาณ PD เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุที่เกิดดีสชาร์จบางส่วนนั้น สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การตรวจวัดทางไฟฟ้า โดยตรวจวัดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าใน

สายตัวนำ การตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การตรวจวัดคลื่นเสียง และการตรวจวัดทางแสง เป็นต้น[1] ซึ่งแต่ละวิธีก็จะให้รูปแบบของสัญญาณแตกต่างกันไป

2.6.1.1 การตรวจวัดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า

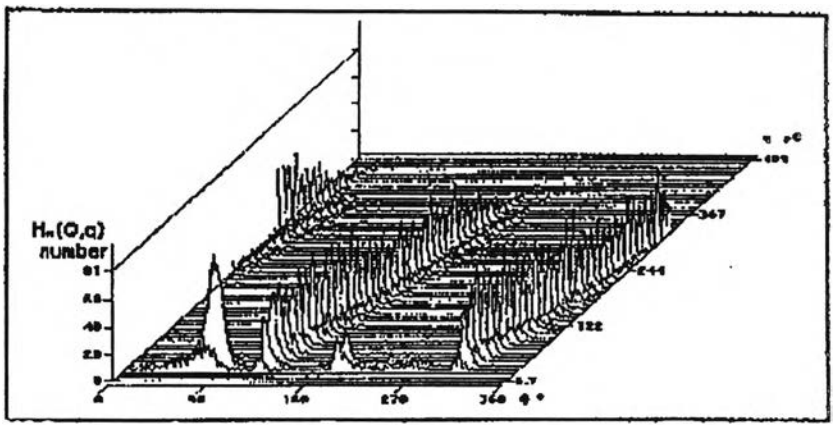
โดยการตรวจวัดสัญญาณจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในสายตัวนำ จะสามารถสังเกตรูปแบบการกระจายของสัญญาณต่างๆได้ดังนี้

1) การกระจาย $H_n(\phi,q)$ และการกระจายที่เกี่ยวข้อง $H_n(\phi,q)$ คือความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของประจุที่ปรากฏ กับมุมเฟสของแรงดันทดสอบ และจำนวนครั้งที่เกิด PD ซ้ำ มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.17 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 $H(p)$[24] ดังแสดงในรูปที่ 2.18 โดยที่การกระจายเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงได้ในระหว่างกระบวนการเสื่อมสภาพ (aging) ของฉนวน ซึ่งจะบอกถึงสภาพของการฉนวนในขณะนั้นสามารถใช้จำแนกสาเหตุในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้หลายชนิด และนิยมใช้กันโดยทั่วไป [25]

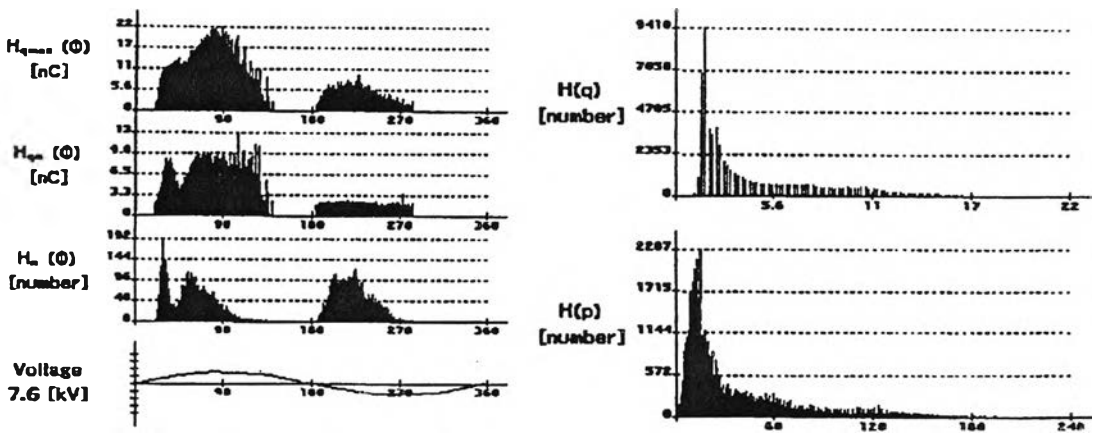
2) ลักษณะของสัญญาณพัลส์ PD จะทำการตรวจวัดสัญญาณโดยใช้เทคนิคการแยกชัดทางเวลา (Time-resolved techniques) ซึ่งเครื่องมือที่ใช้มีแบนด์วิดต์ประมาณ 500 เมกะเฮิรตซ์ ลักษณะสัญญาณพัลส์ที่ตรวจจับได้แสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามสาเหตุของ PD เช่น วัตถุแปลกปลอมที่ปะปนอยู่ภายในเนื้อฉนวนเกิดการนำไฟฟ้า โลหะที่อยู่ในบริเวณทดสอบไม่ได้ต่อลงกราวด์ และเกิดทรี (Treeing) ใน GIS (Gas insulated system) เป็นต้น[26] รูปร่างของสัญญาณพัลส์ PD ที่ตรวจวัดได้โดยวิธีนี้ยังแตกต่างจากรูปร่างของพัลส์ที่เกิดจากสัญญาณรบกวน ทำให้สามารถแยกสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณ PD ได้อย่างมีประสิทธิภาพ[27]

3) การกระจายของสัญญาณพัลส์ PD แบบมีเงื่อนไข (Conditional PD distribution) $p_i(\phi_i^-,Q^+)d\phi_i^-$ คือความน่าจะเป็นที่สัญญาณพัลส์ลูกที่ i จะเกิดขึ้นในช่วงครึ่งลบของแรงดันทดสอบระหว่างมุมเฟส ϕ_i^- กับ $\phi_i^- + d\phi_i^-$ เมื่อผลรวมของประจุทั้งหมดที่เกิดจาก PD ในช่วงครึ่งบวกของแรงดันทดสอบมีค่าเท่ากับ Q^+ [28]

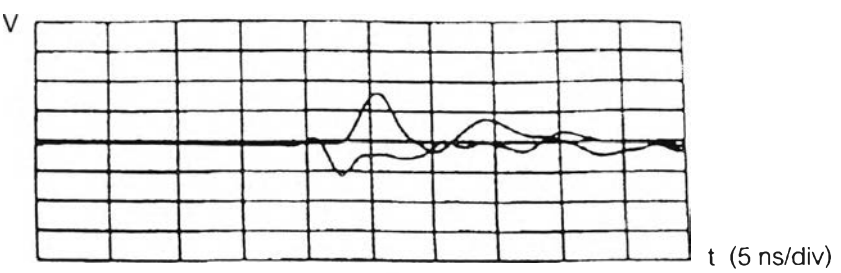
4) การกระจายของความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์ (Interpulse distribution) คำนวณได้จากค่าสหสัมพันธ์ของค่าความแตกต่างของแรงดันทดสอบ และ เวลาระหว่างพัลส์ที่เกิดขึ้นติดกัน[29] การกระจายนี้จะเปลี่ยนไปตามระยะต่างๆของการขยายตัวของ treeing ในฉนวน[30] สำหรับการแจกแจงแบบ $H_n(q,\Delta t)$ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนครั้งที่เกิด PD ซ้ำกับขนาดของ PD และเวลาระหว่างพัลส์ที่เกิดขึ้นติดกันนั้น จะใช้ในการรู้จำรูปแบบเมื่อทดสอบแบบกระแสตรง[31]



รูปที่ 2.17 การกระจายแบบ $H_n(\phi,q)$



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



รูปที่ 2.19 สัญญาณ PD ที่ตรวจจับโดยเครื่องมือที่มีแบนด์วิดต์ 500 เมกะเฮิรตซ์

2.6.1.2 **การตรวจวัดที่มิใช่วิธีทางไฟฟ้า**

ตัวอย่างวิธีการตรวจวัดด้วยวิธีอื่นๆนอกเหนือจากวิธีทางไฟฟ้า ที่สามารถใช้ในการจำแนกสาเหตุของการเกิด PD ได้ มีตัวอย่างดังต่อไปนี้

1) สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการบันทึกสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงตั้งแต่ 10 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 จิกะเฮิรตซ์ ซึ่งพบว่าสเปกตรัมที่บันทึกได้จากสาเหตุต่างๆของการ

เกิด PD ใน GIS จะให้สเปกตรัมที่ต่างกันออกไป[32] และพบว่าสเปกตรัมในช่วงความถี่คลื่นวิทยุของ PD ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ตรวจวัดโดยการแคลมป์ (clamp) กระแสในสายนิวทรอล สามารถนำมาใช้จำแนกการเกิด PD ในฉนวนของขดลวดสเตเตอร์ และการเกิดอาร์กระหว่างปลายขดลวดสองชุดที่อยู่ติดกันได้[33]

2) การกระจายความสัมพันธ์ระหว่างพัลส์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงถึงเวลาระหว่างพัลส์ที่เกิดขึ้นติดกัน การกระจายนี้ใช้ในการพิจารณาความเป็นไปได้ที่วัตถุอิสระซึ่งนำไฟฟ้าได้ใน GIS จะสามารถเคลื่อนไปสัมผัสบัสบาร์ อันจะเป็นจุดเริ่มต้นที่จะนำไปสู่การเกิดเบรกดาวน์[34]

3) รูปคลื่นของคลื่นเสียง ส่วนใหญ่ใช้ในการรู้จำความผิดพร่องใน GIS[35]

4) สเปกตรัมความถี่ของคลื่นเสียง มักตรวจวัดในย่านความถี่ไม่เกิน 2 เมกะเฮิรตซ์ ซึ่งพบว่าสเปกตรัมที่ตรวจวัดได้จากการเกิด PD จากสาเหตุต่างๆในน้ำมัน เช่น โคโรนา วัตถุอิสระที่นำไฟฟ้า และฟองอากาศ มีความแตกต่างกัน และพบว่าลักษณะของสเปกตรัมกับขนาดของโพรงในเนื้อฉนวนมีความสัมพันธ์กัน[36]

5) การกระจายของขนาดของพัลส์แสงตามมุมเฟส ใช้ในการสังเกตการเกิดเบรกดาวน์ในระยะแรกซึ่งการเกิด การเปล่งแสงด้วยไฟฟ้า (Electroluminescence) จะมีความสัมพันธ์กับการฉีดประจุ (charge injection) การเกิด Microchannel และการขยายตัวของทรี[37]

6) สัญญาณพัลส์ที่ตรวจวัดได้ในย่านรังสีอินฟราเรดร่วมกับค่าแรงดันทดสอบ ใช้ในการตรวจจับการก่อตัวของสีดเดอร์ของดีสชาร์จใน GIS[32]

จากวิธีการตรวจวัดสัญญาณ PD ที่ได้กล่าวมานี้ จะพบว่าสัญญาณที่สามารถใช้ในการจำแนกแหล่งกำเนิดของ PD มีหลายแบบ แต่ละแบบมีความสามารถในการจำแนกสาเหตุในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงที่ต่างๆกันไป โดยในการออกแบบสร้างเครื่องวิเคราะห์ PD ให้ได้ตามวัตถุประสงค์และขอบข่ายของงานวิจัยที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 1.4 จะต้องเลือกวิธีการตรวจวัดที่สามารถใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงได้หลายประเภท และต้องมีความสามารถในการจำแนก PD ที่เกิดจากสาเหตุต่างๆได้ดี จากการพิจารณาถึงข้อได้เปรียบและขีดจำกัดของแต่ละวิธีประกอบกับการพิจารณาหัวข้อ *ผลจากการเกิดดีสชาร์จบางส่วน* ที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.1.1 จึงเลือกออกแบบเครื่องวิเคราะห์ PD โดยวิธีทางไฟฟ้าซึ่งเป็นการตรวจวัดการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า นอกจากนั้นแล้วในการตรวจวัดทางไฟฟ้ายังสามารถแบ่งรูปแบบสัญญาณที่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้สองประเภทคือ รูปแบบการกระจาย และลักษณะรูปร่างของสัญญาณพัลส์ PD ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกออกแบบให้วิเคราะห์สาเหตุจากรูปแบบการกระจาย เนื่องจากสามารถจำแนกสาเหตุได้ดี และไม่จำเป็นต้องใช้อัตราการชักตัวอย่างสูงมาก ทำให้สะดวกในการออกแบบฮาร์ดแวร์ รวมทั้งมีความเหมาะสมกับระยะเวลาและงบประมาณในการวิจัย

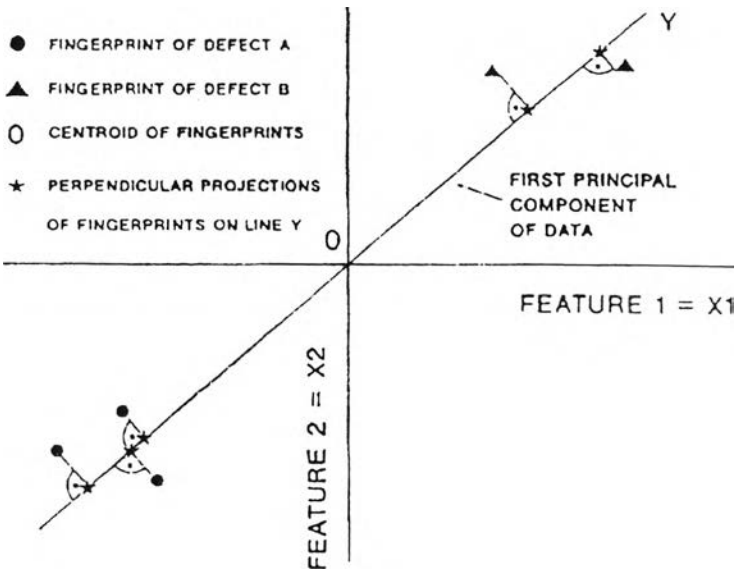
2.6.2 การคำนวณค่าคุณลักษณะจากรูปแบบที่ได้

การคำนวณค่าคุณลักษณะจากรูปแบบที่ได้ เป็นเทคนิคสำหรับการรู้จำรูปแบบ PD มีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อลดมิติของข้อมูลลง โดยการคำนวณหาเฉพาะคุณลักษณะหรือคุณสมบัติที่สำคัญของรูปแบบ[38] ซึ่งคุณลักษณะที่ได้นี้จะยังคงความสามารถในการจำแนกไว้ เช่นเดียวกับที่รูปแบบเดิมมีคุณลักษณะที่หาได้นี้ควรมีมิติน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อให้สามารถจำแนกประเภทได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น[39] ตัวอย่างเช่น การคำนวณพารามิเตอร์ทางสถิติ $H_{q\max}(\phi)$, $H_{qn}(\phi)$, $H_{n}(\phi)$, $H(q)$ และ $H(p)$ ซึ่งมีทั้งหมด 29 ค่า ดังแสดงในตารางที่ 2.1 สามารถลดมิติของการกระจาย $H_{n}(\phi,q)$ ซึ่งมีลักษณะเป็นอาร์เรย์ 2 มิติขนาดใหญ่ลงได้มาก ในกรณีที่สัญญาณมีลักษณะเป็นรูปร่างของสัญญาณพัลส์ PD ในเชิงเวลา การลดมิติอาจทำได้โดยการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของรูปคลื่น ได้แก่ ความสูงของพัลส์ พื้นที่ของพัลส์ เวลาขึ้น (Rise time) เวลาลง (Fall time) และความกว้างของพัลส์[40] ซึ่งจะสามารถลดมิติจากการเก็บค่าที่สุ่มตัวอย่างทุกจุดของสัญญาณลงเหลือพารามิเตอร์ของรูปคลื่น 5 ค่าดังกล่าว

จำนวนพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากทั้งสองวิธีข้างต้นยังถือว่ามากอยู่ ทำให้ยากแก่การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มข้อมูล โดยเฉพาะเมื่อกลุ่มข้อมูลบางกลุ่มมีสหสัมพันธ์ระหว่างกัน (mutually correlated)[4] จึงต้องมีการแมป (mapping) พารามิเตอร์ที่ได้โดยการฉาย (project) ลงบนแกนใหม่เพื่อลดพารามิเตอร์ลงให้เหลือเพียง 2 หรือ 3 มิติเท่านั้น[4] ทำให้สะดวกในการจัดกลุ่มข้อมูล ตัวอย่างวิธีการแมปที่นิยมใช้ เช่น Discriminant analysis และ Principal component analysis ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.20 เป็นต้น

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			

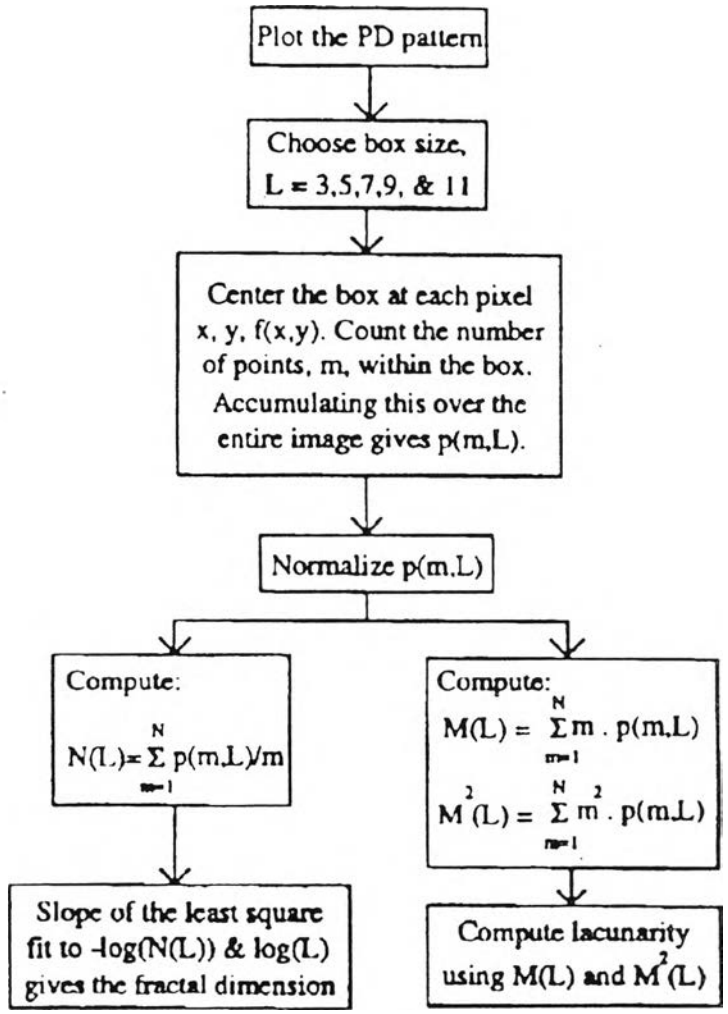


รูปที่ 2.20 วิธีการแมปแบบ Principal component analysis

การคำนวณค่าคุณลักษณะจากรูปแบบอาจหาได้อีกวิธีหนึ่ง นั่นคือวิธีแฟรกตัล (Fractal) ซึ่งเป็นการบรรยายคุณสมบัติของรูปทรงที่ส่วนย่อยของรูปทรงนั้นมีความคล้ายคลึง (ในเชิงรูปร่างหรือ ในเชิงพารามิเตอร์ทางสถิติ) กับรูปทรงทั้งหมด กล่าวคือมีคุณสมบัติ self similarity มาใช้ในการอธิบายรูปแบบการกระจายของการเบรกดาวน์ในเนื้อฉนวน วิธีนี้ทำให้พารามิเตอร์ที่จำเป็นต่อการจำแนกกลุ่มข้อมูลลดลงเหลือเพียง 2 มิติเท่านั้น คือ มิติแฟรกตัล (Fractal dimension) ซึ่งแสดงถึงความขรุขระ (roughness) และ ลาคิวนาริตี (Lacunarity) ซึ่งแสดงถึงความแน่น (denseness) ของพื้นผิวการกระจายที่พิจารณา แฟรกตัลเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงวิธีหนึ่งในการคำนวณค่าคุณลักษณะของการกระจายโดยยังคงความสามารถในการจำแนกรูปแบบไว้[4] โดยไม่จำเป็นต้องทำการลดมิติลงอีก

จากการพิจารณาถึงข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละวิธีการ พบว่า การคำนวณคุณลักษณะโดยวิธีแฟรกตัล เป็นวิธีที่เหมาะสมในการวิจัยนี้ เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณมีความสัมพันธ์โดยตรงกับลักษณะทางกายภาพ คือ ความขรุขระ และ ความแน่น ของพื้นผิวการกระจาย ต่างจากการคำนวณคุณลักษณะที่ต้องอาศัยการแมป ซึ่งค่าที่ได้จะไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพารามิเตอร์เดิม และไม่สามารถอธิบายค่าเป็นความหมายทางกายภาพได้ ทำให้ยากต่อการตรวจสอบความถูกต้องในการคำนวณ นอกจากนั้นแล้ว ในปัจจุบันมีผลงานวิจัยจำนวนมากใช้วิธีแฟรกตัลในการวิเคราะห์ PD และได้ผลเป็นที่น่าพอใจ[4]

การคำนวณคุณลักษณะด้วยวิธีแฟรกตัลนั้นมีอยู่หลายวิธี ในที่นี้จะใช้วิธี Box counting ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้กันโดยทั่วไปดังรูปที่ 2.21[41] มีขั้นตอนดังต่อไปนี้



Procedure for computing fractal dimension and lacunarity.

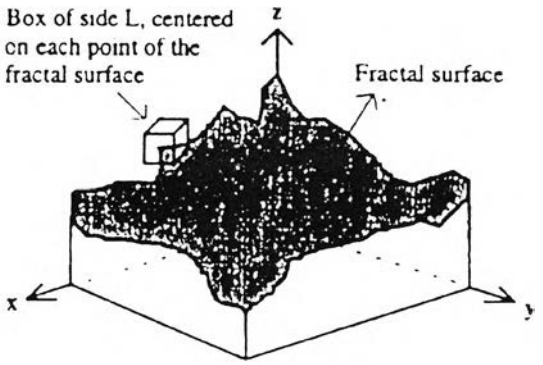
รูปที่ 2.21 ขั้นตอนการคำนวณคุณลักษณะแฟรกตัล

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

2) จัดวางตำแหน่งกล่อง ให้จุดศูนย์กลางของกล่องอยู่ที่จุดข้อมูลต่างๆ แล้วนับจำนวนของจุดข้อมูลที่อยู่ภายในกล่องดังรูปที่ 2.22 ทำซ้ำจนทั่วทุกจุดบนพื้นผิว จะได้การกระจายของจำนวนจุดข้อมูล m ที่อยู่ในกล่องซึ่งมีความยาวด้าน L ต่างๆกัน เมื่อนอร์มัลไลซ์การกระจายนี้จะได้ p(m, L) คือ

$$\sum_{m=1}^{N} p(m,L) = 1 \qquad (2.22)$$

เมื่อ N คือจำนวนจุดมากที่สุดในกล่องที่เป็นไปได้



รูปที่ 2.22 การหา p(m, L) โดยการนับจำนวนจุดที่อยู่ในกล่อง

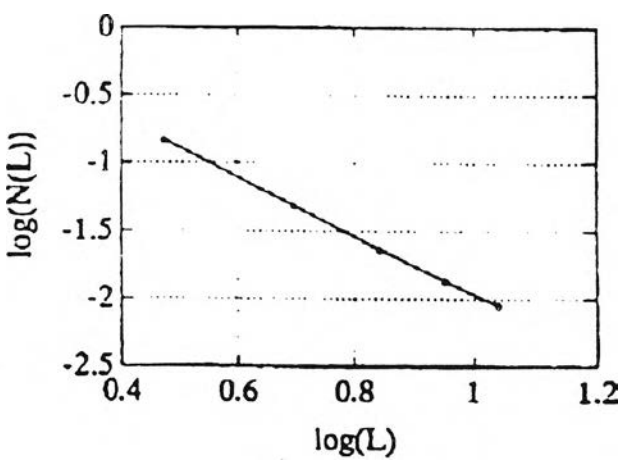
3) คำนวณ N(L) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนกล่องต่อจุดข้อมูลหนึ่งจุด หาได้จาก

$$N(L) = \sum_{m=1}^{N} \frac{1}{m} p(m, L) \tag{2.23}$$

4) เนื่องจากคุณสมบัติที่สำคัญของพื้นผิวที่มีคุณสมบัติแฟรกตัลคือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนกล่องต่อจุดข้อมูลหนึ่งจุดจะแปรผันกับความยาวด้านของกล่องแบบเอกซ์โพเนนเชียล กล่าวคือ

$$N(L) = K \cdot L^{-D} \tag{2.24}$$

โดยคำอธิบายและการพิสูจน์มีในเอกสารอ้างอิง[42] จากสมการ(2.23) และ(2.24) จะสามารถคำนวณมิติแฟรกตัลได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนนอน คือ log(L) กับแกนตั้ง คือ log(N(L)) ดังรูปที่ 2.23



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

5) คำนวณ M(L) และ $M^2(L)$ ซึ่งเป็นโมเมนต์อันดับที่ 1 และ 2 ของมวลแฟรกตัล[41] ค่าดังกล่าวเป็นฟังก์ชันของ L ซึ่งหาได้จาก

$$M(L) = \sum_{m=1}^{N} m \cdot p(m, L) \tag{2.25}$$

$$M^2(L) = \sum_{m=1}^{N} m^2 \cdot p(m, L) \tag{2.26}$$

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

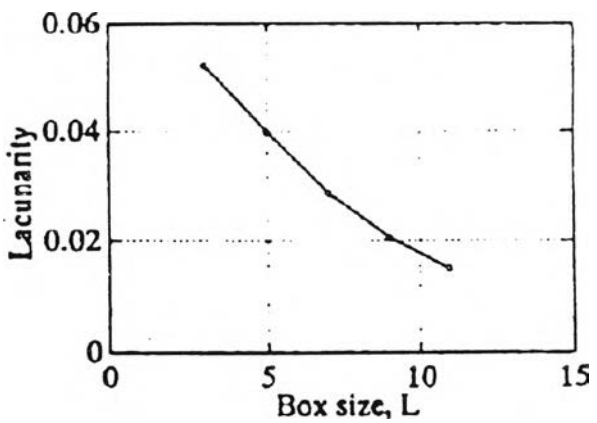
$$\Lambda = E\left[\left(\frac{M}{E(M)} - 1\right)^2\right] \tag{2.27}$$

หรือ

$$\Lambda = \frac{M^2(L) - [M(L)^2]}{[M(L)^2]} \tag{2.28}$$

โดยที่ E[.] คือ ค่าคาดหวัง (Expectation) ของข้อมูล

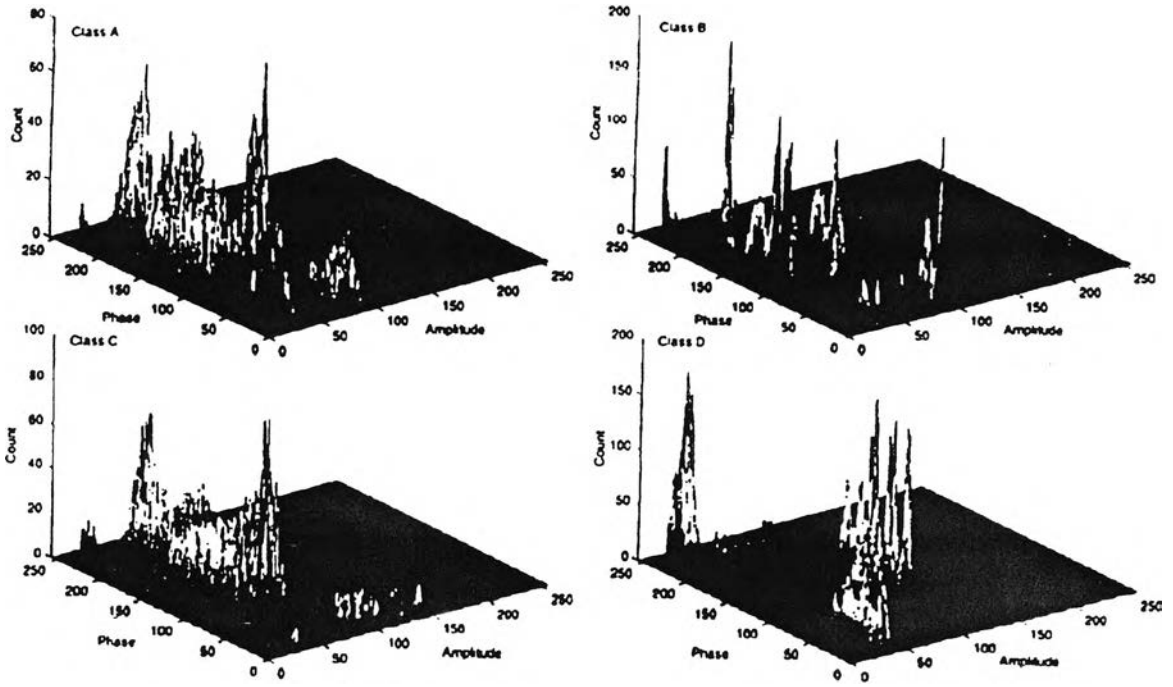
ลาคิวนาริตีที่คำนวณได้จะเป็นฟังก์ชันของ L ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 กราฟระหว่างความยาวด้านของกล่อง L กับลาคิวนาริตี Λ

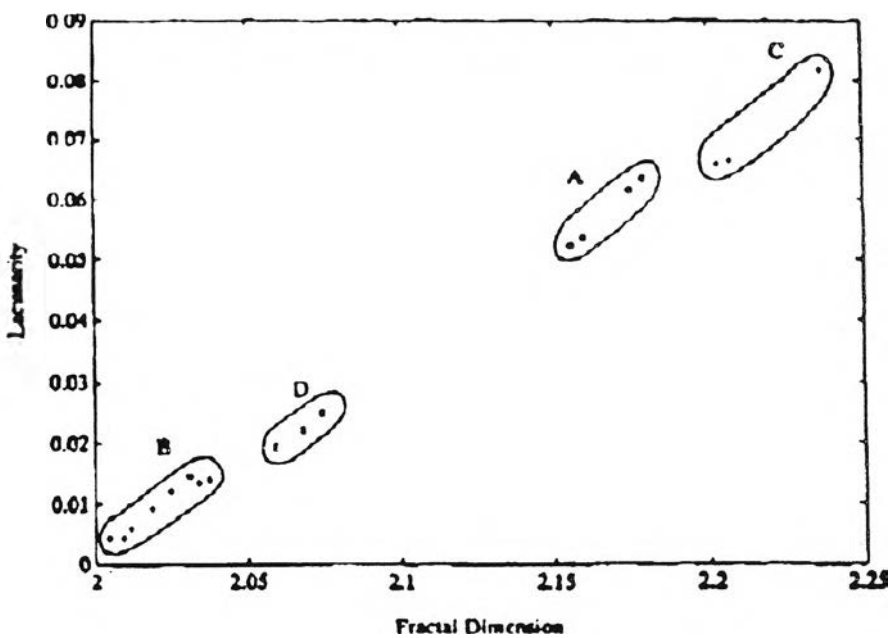
ในการคำนวณมิติแฟรกตัล และลาคิวนาริตีนั้น สัญญาณ PD ที่นำมาคำนวณจะบันทึกไว้ในเมตริกซ์ขนาด 2 มิติที่วางตัวในแนวราบ โดยจัดเรียงข้อมูลตามมุมเฟสและขนาด ตามแนวแถว (row) และ หลัก(column) ตามลำดับ ส่วนแกนตั้งคือจำนวนครั้งของการเกิด PD ที่ขนาดและมุมเฟสนั้นๆ ซึ่งจะแสดงตัวอย่างรูปแบบการกระจายของ PD ในรูปที่ 2.25

I19196692



รูปที่ 2.25 การกระจายของ PDในรูปแบบต่างๆกัน

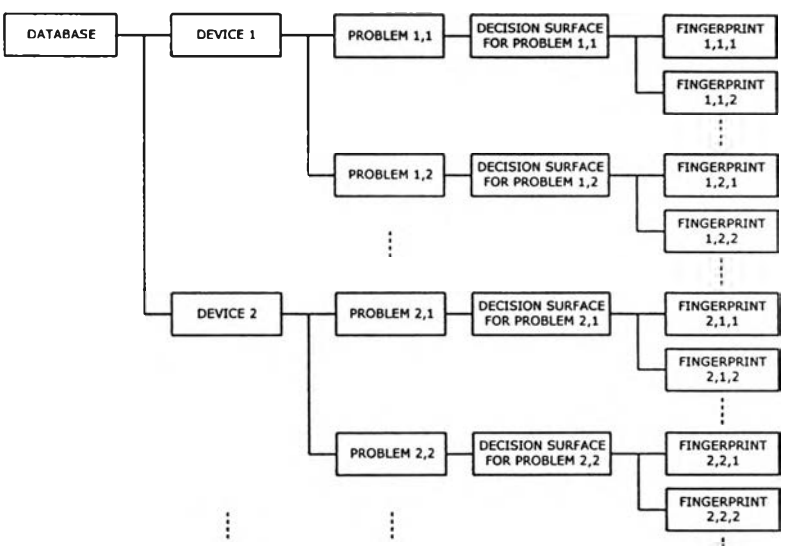
เราสามารถคำนวณคุณลักษณะแฟรกตัลจากรูปแบบการกระจายของ PD ที่ได้จากทั้ง 6 ขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งรูปแบบการกระจายที่แตกต่างกันจะให้ค่าคุณลักษณะแฟรกตัลที่แตกต่างกัน และรูปแบบการกระจายที่คล้ายกันจะเกาะกลุ่มกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ค่าของคุณลักษณะแฟรกตัลที่คำนวณได้จากการกระจายในรูปที่ 2.25

2.6.3 **ฐานข้อมูลสำหรับการจำแนกรูปแบบ**

ฐานข้อมูลที่นิยมใช้กันในการจำแนกรูปแบบ PD มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.27[4] โดยจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ระดับ ระดับล่างสุดประกอบด้วย รูปแบบเฉพาะ (Fingerprint) ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการรู้จำรูปแบบ PD ตัวอย่างเช่น ค่าคุณลักษณะแฟรกตัลทั้งสองค่าที่ได้กล่าวมาแล้ว ระดับต่อมาประกอบด้วยกลุ่มของรูปแบบเฉพาะของแต่ละสาเหตุ พร้อมด้วยขอบเขตหรือกฎเกณฑ์ เพื่อการจำแนกปัญหาต่างๆที่เป็นไปได้สำหรับแต่ละสาเหตุของอุปกรณ์แต่ละชนิด และระดับบนสุดประกอบด้วยอุปกรณ์ชนิดต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง หรือ GIS เป็นต้น การจัดเก็บข้อมูลในลักษณะดังกล่าวเนื่องจากอุปกรณ์แต่ละชนิดจะเกิดปัญหาที่แตกต่างกัน ปัญหาที่เกิดกับอุปกรณ์ชนิดหนึ่งอาจไม่เกิดกับอุปกรณ์อื่นๆ ดังนั้น การจำแนกจะถูกต้องและรวดเร็วถ้าทำการคำนวณเพื่อจำแนกปัญหาเท่าที่เป็นไปได้เท่านั้น

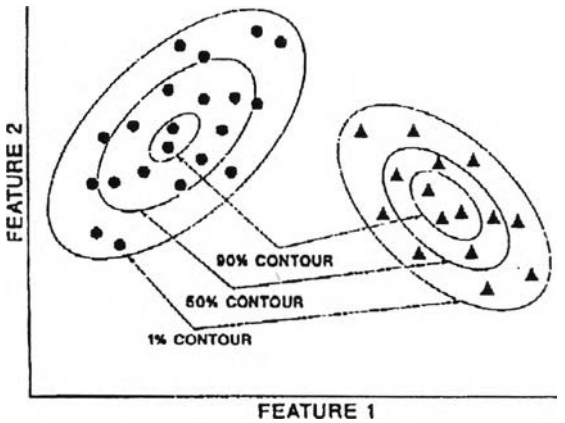


รูปที่ 2.27 โครงสร้างฐานข้อมูล

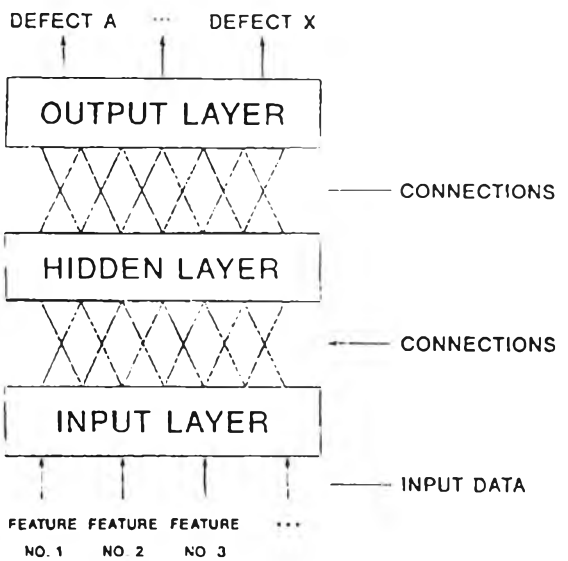
2.6.4 **การจำแนกประเภท**

วัตถุประสงค์ของการจำแนกประเภทคือ เพื่อระบุสาเหตุที่ทำให้เกิด PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยการพิจารณาเปรียบเทียบคุณลักษณะที่คำนวณได้กับฐานข้อมูล PD

ได้มีการนำวิธีการต่างๆมาใช้สร้างขอบเขตในการจำแนกประเภทหลายวิธี ตัวอย่างวิธีที่นิยมใช้ในการจำแนกสาเหตุของ PD ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเช่น ตัวจำแนกแบบนิยม (Conventional classifier) ตัวจำแนกแบบโครงข่ายเชิงประสาท (Neural network) เป็นต้น[4] ตัวอย่างของการจำแนกแบบนิยมที่ใช้ Centour score และตัวจำแนกที่ใช้โครงข่ายเชิงประสาทแสดงในรูปที่ 2.28 และรูปที่ 2.29 ตามลำดับ



รูปที่ 2.28 การจำแนกแบบนิยมที่ใช้ Centour score



รูปที่ 2.29 โครงสร้างของตัวจำแนกแบบโครงข่ายเชิงประสาท

ตัวจำแนกแบบนิยมมีหลายแบบเช่น Bayes classifier, Parzen classifier, Nearest neighbor classifier, Discriminant function classifier และ Centour score เป็นต้น มีหลักการร่วมกันดังนี้คือ[4] หลังจากที่มีการจัดกลุ่มให้กับข้อมูลคุณลักษณะที่ได้ จะทำการคำนวณค่าทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของกลุ่มข้อมูล จากนั้นจะคำนวณระยะห่างระหว่างพิกัดของข้อมูลที่ต้องการจำแนกสาเหตุ กับพิกัดซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มข้อมูลแต่ละกลุ่ม เนื่องจากวิธีนี้ต้องมีการกำหนดกลุ่มที่เหมาะสมให้กับแต่ละข้อมูลทุกตัว จึงไม่เกิดความผิดพลาดในการแบ่งกลุ่ม จากตัวอย่างการจำแนกสาเหตุของ PD โดยใช้ Centour score ในตารางที่ 2.2[4] จะพบว่าได้ผลถูกต้องทุกกรณี แม้ว่าวิธีนี้จะมีปัญหาบ้างกับข้อมูลที่มีการกระจายแบบเกาะกลุ่มเป็นกลุ่มย่อยหลายกลุ่ม แต่ก็สามารถแก้ปัญหาได้โดยการแบ่งกลุ่มข้อมูลออกเป็นกลุ่มย่อยๆที่มีการ

กระจายของข้อมูลแต่ละกลุ่มเป็นแบบปกติ จากการทดสอบ[4] พบว่าตัวจำแนกแบบนิยมให้ผลดีในการจำแนกทั้งปัญหาที่สร้างขึ้นเพื่อการทดสอบ และปัญหาที่เกิดจริงในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

ตารางที่ 2.2 ผลการจำแนกโดยใช้ Centour score

	HVelb virgin	HVelb conditioned	HVelb aged
virgin	92%	0%	0%
conditioned	0%	65%	0%
aged	0%	0%	83%

ตัวจำแนกแบบโครงข่ายเชิงประสาทมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดก็มีวิธีการทำงานแตกต่างกันไป เช่น ชนิด Back-propagation ซึ่งประกอบด้วยระดับชั้นต่างๆ (Layer) และกิ่งเชื่อมโยง (Connection) ระหว่างชั้น การจัดกลุ่มข้อมูลจะใช้ระนาบหลายมิติ (Hyperplane) เป็นตัวแบ่ง โดยตำแหน่งและมุมเอียงของระนาบหลายมิติ รวมทั้งตรรกะที่กำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับกลุ่มข้อมูลจะขึ้นอยู่กับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight) ของกิ่งเชื่อมโยงแต่ละกิ่ง สำหรับรายละเอียดของโครงข่ายเชิงประสาทชนิดอื่นๆมีในเอกสารอ้างอิง[4] วิธีนี้ไม่จำเป็นต้องจัดกลุ่มให้กับข้อมูล เนื่องจากโครงข่ายเชิงประสาทมีการเรียนรู้โดยการปรับค่าถ่วงน้ำหนักที่กิ่งเชื่อมโยงต่างๆ ได้เอง แต่ก็มีข้อจำกัดคือ จำนวนของปม (Neuron) ในแต่ละชั้นที่น้อยเกินไป จะทำให้เงื่อนไขของการจัดกลุ่มข้อมูลไม่เพียงพอ ส่วนจำนวนปมที่เหมาะสมไม่สามารถหาได้ง่ายนัก เนื่องจากขึ้นกับลักษณะการกระจายของกลุ่มข้อมูล และพบว่าแม้จำนวนของปมจะเพียงพอ โอกาสที่ตำแหน่งของระนาบหลายมิติที่สร้างขึ้นจะอยู่ไกลจากกลุ่มข้อมูลจริงก็ยังมีอยู่ นอกจากนั้นแล้ววิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณนานมากเมื่อเทียบกับการจำแนกแบบอื่นๆ[4]

จากการพิจารณาถึงข้อได้เปรียบและขีดจำกัดของวิธีต่างๆที่ได้กล่าวมา จึงเลือกใช้ตัวจำแนกแบบทั่วไปในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีความน่าเชื่อถือในแง่ความถูกต้องในการจำแนกมากกว่าโดยพิจารณาจากหลักการและรายงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ยังสามารถแสดงภาพ (Visualize) กลุ่มข้อมูลและผลการจำแนกให้เห็นได้อย่างชัดเจน

ในการจำแนกสาเหตุของ PD โดยใช้ตัวจำแนกทั่วไปแบบ Centour Score จะถือว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ (Normal distribution) ทั้งในแนวแกน X และแกน Y ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1) คำนวณค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) จากกลุ่มพิกัดข้อมูลในฐานข้อมูลที่มีการกระจายใน 2 มิติ คือ มิติแฟรกตัล และ ลาคิวนาริตี ดังสมการต่อไปนี้[43]

$$\mu_x = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \text{ และ } \mu_y = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \quad (2.29)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \mu_x)^2}{n}} \text{ และ } \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \mu_y)^2}{n}} \quad (2.30)$$

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - n\mu_x\mu_y}{n\sigma_x\sigma_y} \quad (2.31)$$

โดยที่ x_i และ y_i คือ พิกัดข้อมูลในฐานข้อมูลตามแนวแกน X และแกน y ตามลำดับ

n คือ จำนวนของข้อมูลในกลุ่ม

μ_x และ μ_y คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ

σ_x และ σ_y คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลในแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ

ρ คือ ค่าสหสัมพันธ์ของพิกัดข้อมูลระหว่างแกน X และแกน y

2) ข้อมูลที่มีการกระจายแบบปกติ จะมีฟังก์ชันความหนาแน่นของการกระจาย (Probability density function, PDF) $\phi(x,y)$ ดังนี้[44]

$$\phi(x,y) = \frac{1}{2\pi\rho\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2}g(x,y)} \quad (2.32)$$

เมื่อ $$g(x,y) = \frac{1}{1-\rho^2}\left[\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - 2\rho\cdot\frac{(x-\mu_x)(y-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2}\right] \quad (2.33)$$

โดยที่ x และ y คือ พิกัดของข้อมูลที่จะนำมาจำแนกสาเหตุ

จากสมการ (2.33) เมื่อให้ g(x,y) มีค่าคงที่เท่ากับ c จะได้สมการของเส้นความน่าจะเป็นเท่า (Isoprobability line) ดังนี้

$$\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - 2\rho\cdot\frac{(x-\mu_x)(y-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2} = c(1-\rho^2) \quad (2.34)$$

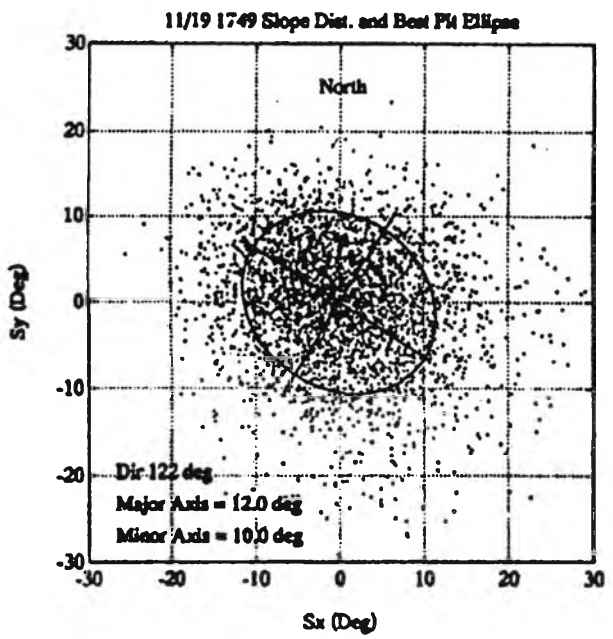
ซึ่งเป็นสมการของวงรีที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ (μ_x, μ_y) เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการ(2.34) แล้ว จะได้ค่า c หรืออีกนัยหนึ่งคือค่า g(x, y)

3) เราสามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ของข้อมูลที่นำมาจำแนกสาเหตุได้โดยการอินทิเกรตสมการ (2.32) เพื่อหาความน่าจะเป็นของข้อมูลที่จะอยู่ภายในวงรีที่ล้อมรอบด้วยเส้นความน่าจะเป็นเท่า ซึ่งความน่าจะเป็น $\Phi(x, y)$ ที่ได้คือ

$$\Phi(x,y) = \iint_S \phi(x,y)\,dA = 1 - e^{-c/2} \qquad (2.35)$$

โดยที่ $\iint_S (.)\,dA$ คือ การอินทิเกรตฟังก์ชันการกระจายบนพื้นผิว S

ตัวอย่างเช่น เมื่อ c มีค่า 1.00 จะได้ $\Phi(x, y)$ เท่ากับ 0.4 แสดงว่าความน่าจะเป็นที่ข้อมูลอื่นๆในกลุ่มจะอยู่ไกลจากจุดศูนย์กลางวงรีมากกว่าข้อมูลที่นำมาจำแนกสาเหตุมีค่า 1 - 0.4 = 0.6 นั่นคือข้อมูลดังกล่าวอยู่ที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 60 รูปที่ 2.30 แสดงกลุ่มข้อมูลที่มีการกระจายแบบปกติใน 2 มิติ และเส้นความน่าจะเป็นเท่าเมื่อ c = 1.00[44]



รูปที่ 2.30 การกระจายแบบปกติใน 2 มิติ และเส้นความน่าจะเป็นเท่าสำหรับ c=1.00

ในการพิจารณาว่าคุณลักษณะ PD ที่นำมาจำแนกสาเหตุควรจะอยู่ในกลุ่มสาเหตุใดในฐานข้อมูล จะใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่คำนวณได้เป็นเกณฑ์ เมื่อสามารถระบุสาเหตุที่ทำให้เกิด PD ได้แล้วก็จะสามารถประเมินระดับความรุนแรงของ PD และผลสืบเนื่องที่จะเกิดขึ้นแก่อุปกรณ์นั้นได้ ทั้งนี้ขึ้นกับความรู้และประสบการณ์ของผู้ประเมิน สำหรับการตัดสินใจว่าจะใช้งานอุปกรณ์ดังกล่าวต่อไปหรือไม่มักกระทำโดยคน แม้ว่าสามารถให้เครื่องตัดสินใจแบบอัตโนมัติได้ก็ตาม[45]