

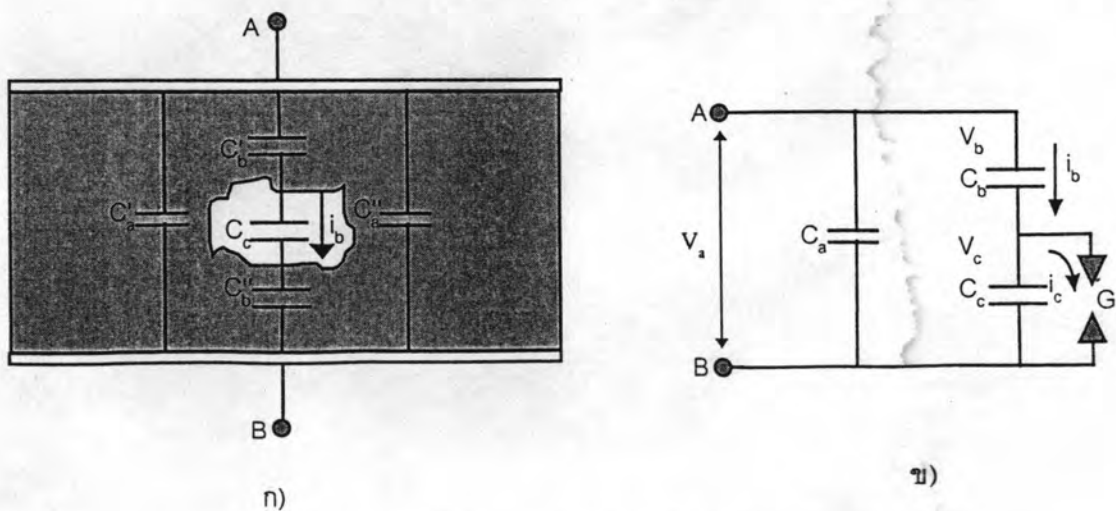
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการตรวจจับหาตำแหน่งดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

มาตรฐานยอมให้มีดีสชาร์จบางส่วนเกิดขึ้นได้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง แต่ขนาดที่ยอมรับนั้นแตกต่างกันไปตามชนิดของอุปกรณ์ งานวิจัยนี้จะเน้นเฉพาะดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดในสายเคเบิลแรงสูงเท่านั้น การวัดปริมาณของดีสชาร์จบางส่วนในสายเคเบิล จะวัดในเทอมของประจุที่ปรากฏ (Apparent Charge) โดยปกติจะมีค่าระหว่าง 5 - 20 พิโคคูลอมป์ ขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดแรงดันที่ใช้ของสายเคเบิล (ตามมาตรฐาน IEC 885-2 (1987) [8], IEC Publ. No. 270 (1981)[7])

2.1 วงจรสมมูลดีสชาร์จภายใน

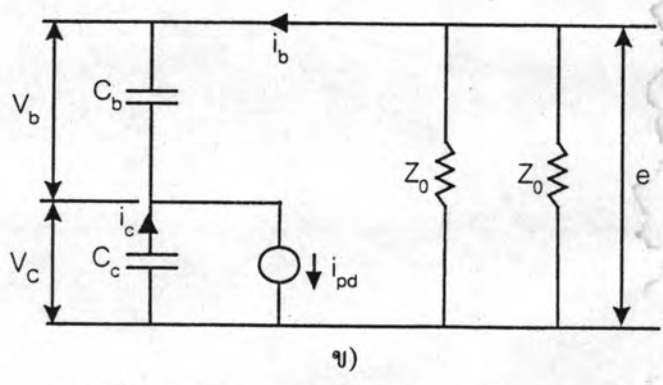
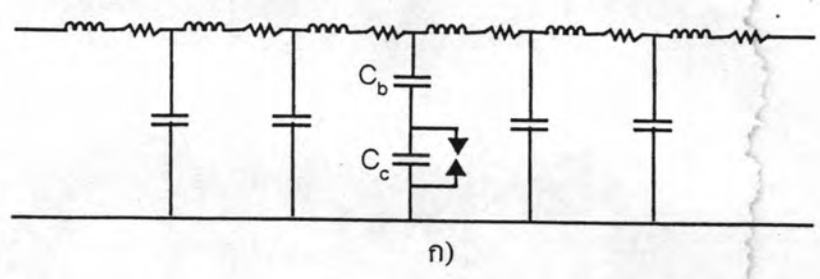
โดยปกติวงจรสมมูลของดีสชาร์จบางส่วนภายในนั้นจะหมายถึง วงจรสมมูลที่ใช้กับไฟฟ้ากระแสสลับ และหากกล่าวถึงดีสชาร์จบางส่วนอย่างลอยๆ ก็มักจะหมายถึงดีสชาร์จภายใน วงจรสมมูลสำหรับลนนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง อาจแทนด้วยตัวเก็บประจุ C_a , C_b และ โพรงอากาศ (C_c) ตามลำดับ [1,2] โดยที่แก๊ป G จะแทนการลัดวงจรในโพรงอากาศขณะเกิด PD, จากรูป 2.1 ข $C_a = C_a + C''_a$ และ $C_b = C'_b C''_b / (C'_b + C''_b)$ และในทางปฏิบัติจะพบว่า $C_a \gg C_c \gg C_b$



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูล PD ทั่วไป

2.2 วงจรสมมูลของคิซาร์จบางส่วนในสายเคเบิล

แบบจำลองของ PD ในสายเคเบิลสามารถแทนด้วยองค์ประกอบ R, L, C และจุดที่เกิดคิซาร์จบางส่วน ดังรูปที่ 2.2 ก) โดยที่แบบจำลองดังกล่าวสามารถแทนด้วยวงจรสมมูลที่แสดงในรูปที่ 2.2 ข)



รูปที่ 2.2 ก) แบบจำลองการเกิด PD ในเคเบิลยาว
ข) วงจรสมมูลการเกิด PD

- โดยที่ C_b แทนส่วนที่เป็นเนื้อฉนวนในแนวโพรงอากาศ
- C_c แทนส่วนที่เป็นโพรงอากาศในสายเคเบิล
- Z_0 แทนคาแรกเตอร์อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล

ผลของการเกิด PD จะทำให้เกิดคลื่นจรเคลื่อนที่ไปยังปลายทั้งสองของเคเบิล โดยคลื่นจร $e(t)$ ณ จุดเริ่มต้นที่เกิด PD สามารถคำนวณได้จากวงจรสมมูลในรูป 2.2 ข)

$$e(t) = \frac{Z_0}{2} i_b(t) \tag{2.1}$$

- เมื่อ $e(t)$ คือ คลื่นจรของกระแสพัลส์ที่ไหลผ่านคาแรกเตอร์อิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล
- $i_b(t)$ คือ กระแสพัลส์ เนื่องจาก PD ไหลผ่าน C_b

กระแส $i_b(t)$ นี้มีใช้กระแสของ PD ทั้งหมด เนื่องจากกระแส PD ทั้งหมดคือ

$$i_{pd}(t) = i_b(t) + i_c(t) \quad (2.2)$$

ในทางปฏิบัติเราไม่ทราบค่าอัตราส่วนระหว่าง $C_b(t)$ กับ $C_c(t)$ ดังนั้นจึงไม่อาจหากระแส $i_{pd}(t)$ ได้ กล่าวโดยสรุปคือไม่สามารถหาประจุที่เกิดขึ้นจริงเนื่องจาก PD ได้

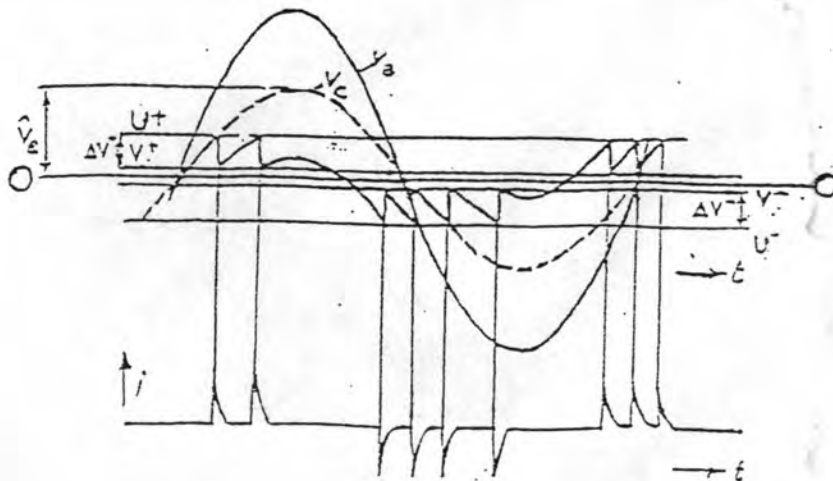
2.3 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเมื่อเกิดดิสชาร์จบางส่วน

2.3.1 การเกิดดิสชาร์จซ้ำ

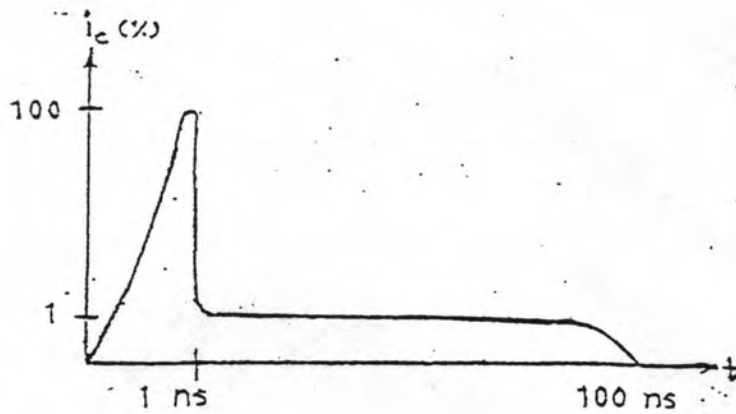
ในทางปฏิบัติ PD อาจเกิดซ้ำๆ ได้หลายครั้งในแต่ละคาบเวลา ดังรูปที่ 2.3 โดยที่ V_u คือแรงดันคร่อมขั้วของอุปกรณ์ U คือแรงดันเบรกคาว์นของโพรงอากาศ V_c คือแรงดันหลังการเบรกคาว์นของโพรงอากาศหรือโพรงอากาศ V_c คือแรงดันคร่อมโพรงอากาศ ถ้าไม่มีการเกิด PD และ i คือกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์

2.3.2 ลักษณะรูปร่างของกระแสที่เกิดจากดิสชาร์จบางส่วน

ลักษณะรูปร่างของกระแส PD ในโพรงอากาศเล็กๆ ในทางทฤษฎีได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 ขณะเกิด PD การไหลของกระแสผ่านโพรงอากาศ จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าไอออนบวกผ่านโพรงอากาศแคบๆ เมื่ออิเล็กตรอนไหลผ่านโพรงอากาศหมดกระแสจะลดลงอย่างรวดเร็ว และกระแสที่ลดลงนี้จะยังคงไหลต่อไปอีกเนื่องจากการเคลื่อนที่ของไอออนบวก



รูปที่ 2.3 แรงดันคร่อมโพรงอากาศ และกระแสที่ขั้วสายของอุปกรณ์ขณะเกิด PD



รูปที่ 2.4 ลักษณะของกระแส PD ในทางทฤษฎีสำหรับ โพรงอากาศเล็กๆ

2.4 หลักการหาตำแหน่งของ PD

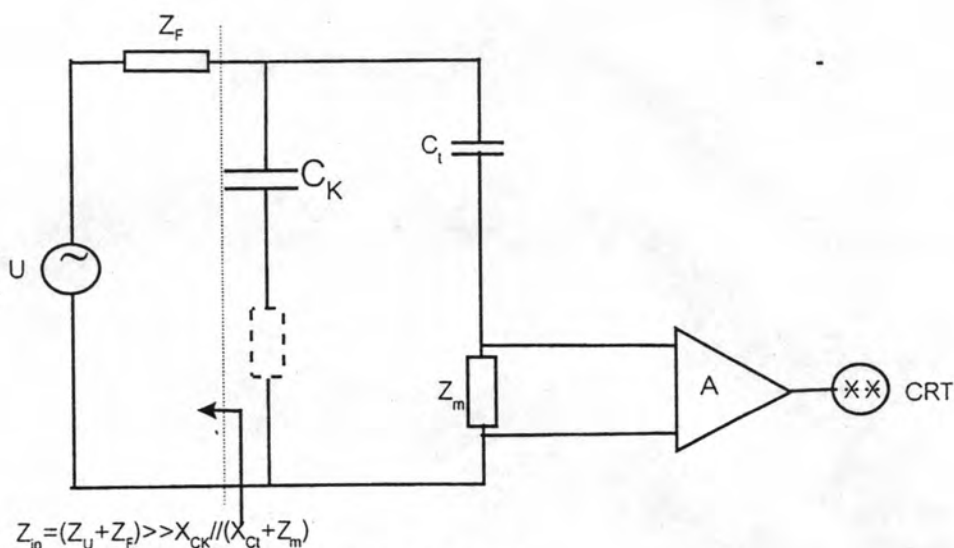
2.4.1 หลักการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนทั่วไป

การตรวจจับ PD สามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน ด้วยการสังเกตหรือวัดผลที่เป็นปรากฏการณ์ต่างๆ ของ PD การวัดผลของ PD ในเชิงวิศวกรรมที่ได้ผลที่สุดคือ การวัดผลทางไฟฟ้าด้วยวิธีการตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์ ที่ต่ออยู่ในวงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน [6]

2.4.1.1 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับดิสชาร์จบางส่วนทั่วไป

วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD ด้วยวิธีตรวจจับกระแสพัลส์ที่ขั้วสายของอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 2.5 โดยที่

U	คือ แหล่งจ่ายแรงดันสูง	Z_m	คือ อิมพีแดนซ์วัด
C_t	คือ วัสดุทดสอบ	A	คือ วงจรขยายสัญญาณ
C_x	คือ ตัวเก็บประจุคัปปลิง	CRT	คือ ภาคนแสดงผล
Z_U	คือ อิมพีแดนซ์หุ้มแปลง	Z_F	คือ ตัวกรองต้านแรงสูง



$$Z_{in} = (Z_U + Z_F) \gg X_{C_K} // (X_{C_i} + Z_m)$$

@ Frequency band (Pass-band of PD detector)

รูปที่ 2.5 วงจรพื้นฐานสำหรับการตรวจจับ PD

เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีค่าสูงมากขณะเกิด PD ดังนั้นจึงต้องมีตัวเก็บประจุคัปปลิงเป็นทางผ่านของกระแสพัลส์ หรือเป็นทางผ่านของสัญญาณนั่นเอง

2.4.2 การวิเคราะห์วงจรตรวจจับดิสชาร์จบางส่วน

2.4.2.1 วงจรสมมูล

จากวงจรพื้นฐานในรูปที่ 2.5 เราสามารถแทนวัสดุทดสอบ C_c ด้วยวงจรสมมูลซึ่งประกอบด้วย C_s , C_p , C_c และแกป G ดังรูปที่ 2.6 ก) เนื่องจากเบรกดาวนในโพรงอากาศจะใช้เวลาในการเกิดน้อยกว่า 100 นาโนวินาทีซึ่งถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับคาบเวลาของแหล่งจ่าย ดังนั้นจึงอาจแทนแรงดันคร่อมโพรงอากาศ V_c ด้วยแหล่งจ่ายแรงดันรูปขั้น [2] ดังรูปที่ 2.6 ข) คือ

$$V_c \approx \Delta V U(t) \quad (2.3)$$

เมื่อ V_c คือ แรงดันตกคร่อม C_c

ΔV คือ ขนาดการเปลี่ยนแปลงแรงดันคร่อมแกป G

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

ซึ่งวงจรในรูปที่ 2.6 ข) ก็คือ “วงจรพื้นฐานสำหรับการเปรียบเทียบ” นั่นเอง เนื่องจากโดยปกติแล้ว $C_u \gg C_b$ ดังนั้นเมื่อมองอิมพีแดนซ์จากแหล่งจ่ายแรงดัน V_c จะมองเห็นอิมพีแดนซ์รวมประมาณของ C_b จึงสามารถประมาณได้ว่า

$$i_b = C_b \frac{dV_c}{dt} \approx C_b \Delta V \delta(t) \tag{2.4}$$

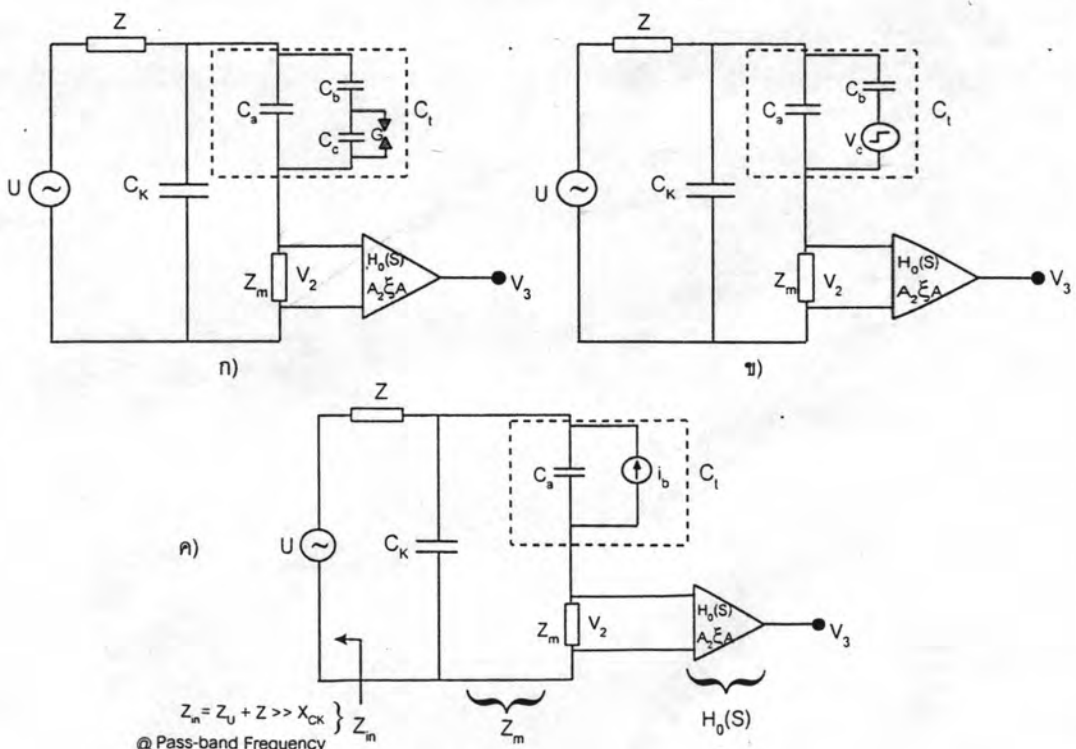
เมื่อ $\delta(t)$ คือ “Unit impulse function” หรือ “Dirac delta function”

ถ้านิยามให้ $q = C_b \Delta V = \int_0^{\infty} i_b dt$ คือ “ประจุที่ปรากฏ” ของ PD

แทนค่า $q = C_b \Delta V$ ในสมการ 2.4 จะได้

$$i_b \approx q \delta(t) \tag{2.5}$$

ดังนั้นรูปที่ 2.6 ค) แทนการเกิดคิสซาร์จบางส่วนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ ในทางปฏิบัติจะพบว่ากระแสพัลส์ i_b มีช่วงเวลาเกิดน้อยกว่า 5 นาโนวินาที สำหรับจนวนแข็งและเหลว [1]



รูปที่ 2.6 แทน PD ด้วยวงจรสมมูลแบบต่างๆ

- ก) แทนวัสดุทดสอบ C_t ด้วยวงจรสมมูลที่ประกอบด้วย C_a , C_b , C_c และแกป G
- ข) แทน C_c และ G ด้วยแรงดันรูปขั้น คือ $V_c \approx \Delta V U(t)$
- ค) แทน C_b และ V_c ด้วยแหล่งจ่ายกระแสพัลส์ $i_b \approx q \delta(t)$

2.4.3 การวิเคราะห์วงจรตรวจจับดีสซาร์จบางส่วนโดยการอินทิเกรตด้วยตัวกรองความถี่
กลาง

การวิเคราะห์วงจรตรวจจับ PD โดยการอินทิเกรตด้วยตัวกรองความถี่กลาง [5] จะเป็น
การวิเคราะห์วงจรในโดเมนความถี่ โดยใช้วงจรรูปที่ 2.6 ก) เป็นหลักคือ

$$I_b(j\omega) = \mathcal{F}[i_b(t)] \approx \mathcal{F}[q\delta(t)] = q \quad (2.6)$$

โดยที่เราจะถือว่า $|I_b(j\omega)|$ มีค่าคงที่เสมอในช่วงความถี่ที่เราพิจารณาลักษณะของ $|I_b(j\omega)|$
ในทางปฏิบัติจะเป็นดังรูปที่ 2.7 ก) การตอบสนองความถี่ของอิมพีแดนซ์ตัว $Z_m(j\omega) =$
 $V_2(j\omega)/I_{cc}(j\omega)$ เมื่อ $I_{cc}(j\omega)$ คือค่ากระแสสมมูลที่ไหลผ่านอิมพีแดนซ์ตัว (Z_m) โดยคิดผลกระทบ
ของ C_f และ C_k เข้าไปด้วย เมื่อพิจารณาวงจรกรองขยายสัญญาณ $H_o(j\omega) = V_3(j\omega)/V_2(j\omega)$ ดังรูปที่
2.7 ข) ในบางกรณีของการออกแบบอาจรวมอิมพีแดนซ์ตัว และตัวกรองหรือวงจรขยายเข้าด้วย
กันเป็น “อิมพีแดนซ์แบบแอคทีฟ” การเลือกความถี่ที่เหมาะสมนั้น จะต้องเลือกความถี่ในช่วงที่
ปลอดภัยจากรบกวนจากภายนอกให้มากที่สุด ซึ่งลักษณะทั่วไปของสัญญาณรบกวนในโดเมน
ความถี่ แสดงในรูปที่ 2.7 ค) ดังนั้นการวิเคราะห์สัญญาณเอาต์พุต $V_3(t)$ ทำได้ดังนี้คือ

จากวงจรรูปที่ 2.6 ก) สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$I_{cc}(j\omega) = [C_k/(C_k+C_s)]I_b(j\omega) = [C_k/(C_k+C_s)]q \quad (2.7)$$

$$\text{กำหนดให้} \quad H(j\omega) = H_o(j\omega)Z_m(j\omega) \quad \text{และ} \quad V_3(j\omega) = H(j\omega)I_{cc}(j\omega) \quad (2.8)$$

$$V_3(j\omega) = H(j\omega)[C_k/(C_k+C_s)]q \quad (2.9)$$

$$V_3(t) = \mathcal{F}^{-1}[V_3(j\omega)] \quad (2.10)$$

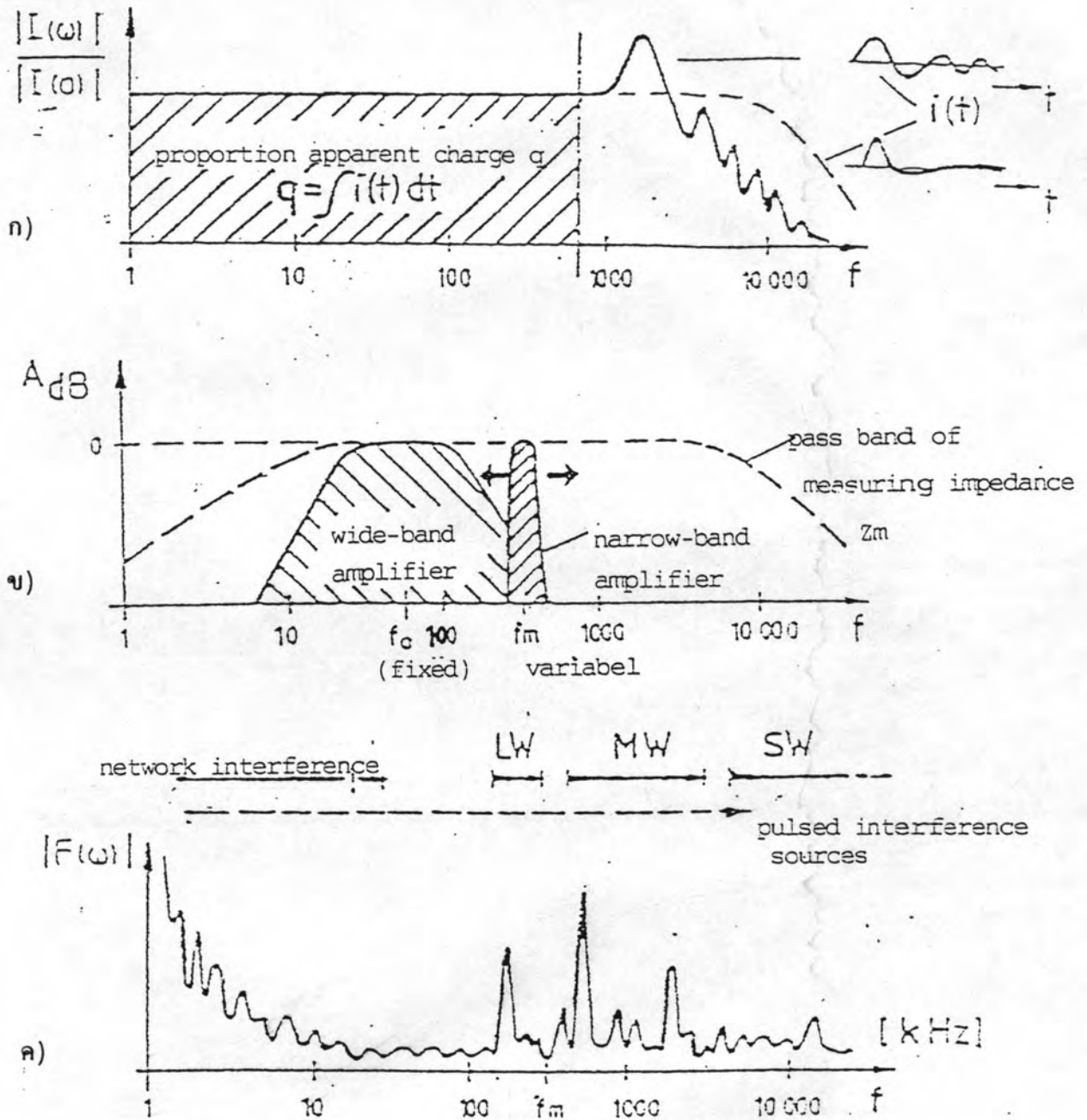
$$= q[C_k/(C_k+C_s)]h(t) \quad (2.11)$$

เนื่องจาก $C_s \gg C_c \gg C_b$

ดังนั้น $C_s \approx C_f$ จึงได้ว่า

$$V_3(t) = q[C_k/(C_k+C_f)]h(t) \quad (2.12)$$

เมื่อ $h(t)$ คือ การตอบสนองแบบอิมพัลส์ของตัวกรอง และอิมพีแดนซ์ตัวรวมกันในโดเมนเวลา

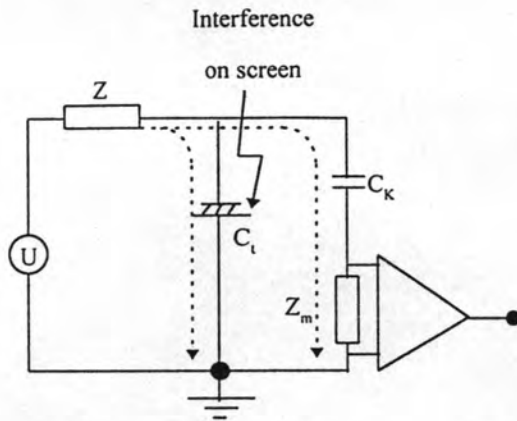


รูปที่ 2.7 ลักษณะสเปกตรัม และการตอบสนองความถี่ต่างๆ ของเครื่องตรวจจับ PD

- เมื่อ $|F(\omega)|$ คือ ขนาดของสัญญาณรบกวนที่ความถี่ ω
- $|I(\omega)|$ คือ ขนาดของกระแสที่ความถี่ ω
- $|I(0)|$ คือ ขนาดของกระแสที่ความถี่ 0
- A_{dB} คือ ขนาดของสัญญาณหลังผ่านตัวกรอง
- $i(t)$ คือ กระแสดีสชาร์จ

2.5 วงจรทดสอบ PD

วงจรทดสอบโดยวิธีตรงแบบไม่ทำลายที่มีใช้อยู่ 2 แบบ แตกต่างที่ตำแหน่งการต่ออิมพีแดนซ์วัดดังนี้

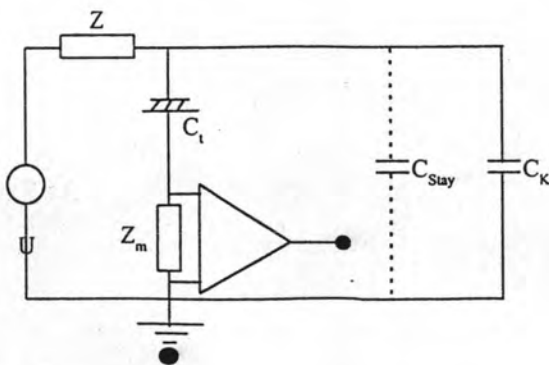


รูปที่ 2.8 วงจรทดสอบที่ต่ออิมพีแดนซ์วัด
ได้ตัวเก็บประจุคัปปลิง

วงจรทดสอบที่ต่ออิมพีแดนซ์วัดได้ตัวเก็บ ประจุคัปปลิง

เป็นวงจรที่นิยมใช้มากที่สุด

- ข้อดี: - เหมาะสำหรับการทดสอบที่มี C_t ขนาดใหญ่ เช่นเคเบิ้ล เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่ซีลด์ของฉนวน (Insulation shield, Screen) ต่อลงกราวด์โดยตรง
- สัญญาณรบกวน "Common Mode" เช่น ฮาร์โมนิกจากแหล่งจ่ายถูก By-pass ลงกราวด์ผ่าน C_t มากกว่า C_k (เพราะว่า $X_{C_t} < X_{C_k}$)
 - Z_m หรือตัววัด (Detector) ไม่ได้ได้รับความเสียหาย เมื่อ C_t เกิดเบรกดาวน์



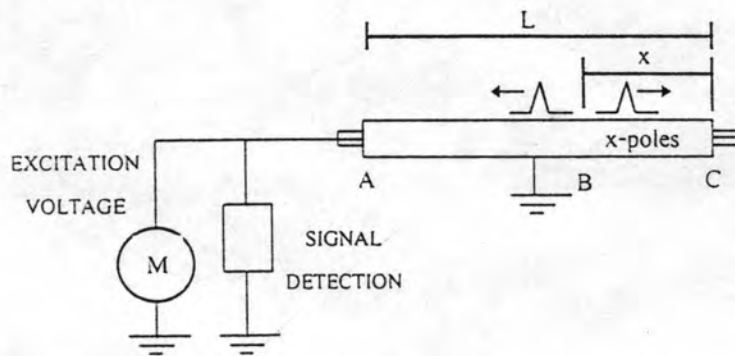
รูปที่ 2.9 วงจรทดสอบที่ต่ออิมพีแดนซ์วัด
ได้วัสดุทดสอบ

วงจรทดสอบที่ต่ออิมพีแดนซ์วัดได้วัสดุทดสอบ

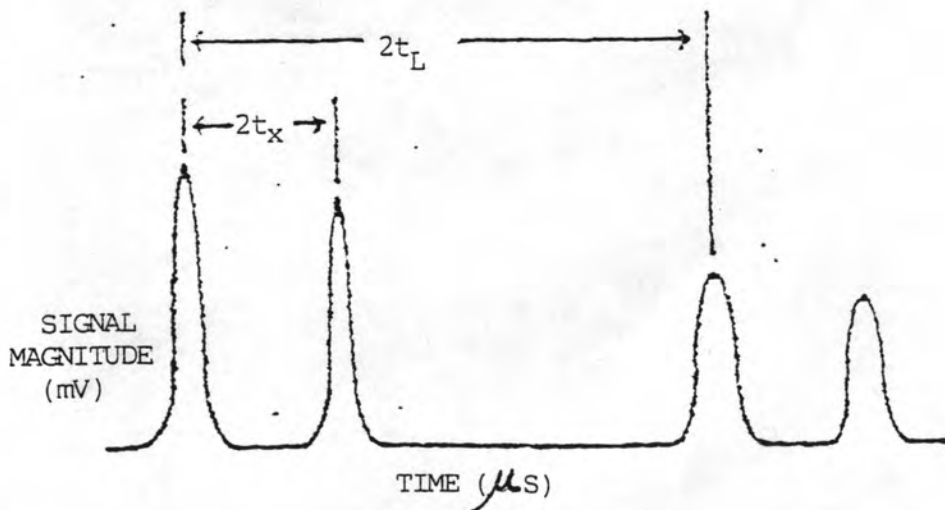
- ข้อดี: - เหมาะสำหรับการทดสอบวัสดุที่มี $C_t < C_k$ ผลของ C_{Stay} ทำให้ความไวดีขึ้นเล็กน้อย
- ข้อเสีย: - Z_m อาจได้รับความเสียหาย เนื่องจาก C_t เกิดเบรกดาวน์

2.6 หลักการหาตำแหน่ง PD ในสายเคเบิล

หลักการหาตำแหน่ง PD ในสายเคเบิล อาศัยการคำนวณจากเวลาของการเคลื่อนที่ของคลื่นจร โดยใช้วงจร ดังรูป 2.10 ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน และใช้วงจรทดสอบแบบเดียวกับวงจรวัดขนาด PD เมื่อมีการป้อนแรงดันให้กับสายเคเบิลทดสอบซึ่งมี PD ลักษณะของ PD จะเป็นคลื่นจรเคลื่อนที่ไปยังปลายทั้งสองของสายเคเบิล คลื่นลูกแรกจะผ่านเข้าเครื่องตรวจจับ PD และเกิดการสะท้อนกลับบางส่วน เนื่องจากอิมพีแดนซ์สายกับอิมพีแดนซ์วัดมีขนาดไม่เท่ากัน คลื่นลูกที่เคลื่อนที่ตรงข้ามกับลูกแรกจะสะท้อนที่ปลายเปิดของสาย แล้วเคลื่อนที่เข้าหาเครื่องตรวจจับ มีบางส่วนสะท้อนกลับเนื่องจากเหตุผลข้างต้น คลื่นที่สะท้อนจากลูกแรกจะสะท้อนที่ปลายสาย และคลื่นที่เข้าหาเครื่องตรวจจับ PD เป็นลูกที่ 3 และเช่นเดียวกับคลื่นลูกที่ 4 ก็ได้จากการสะท้อนกลับของคลื่นลูกที่ 2 ดังรูป 2.11



รูปที่ 2.10 แสดงการเกิด PD ในเคเบิล

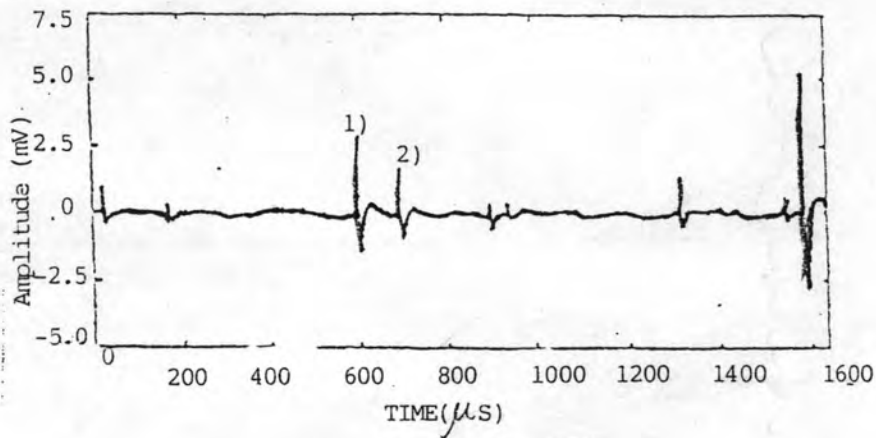


รูปที่ 2.11 แสดงคลื่นจรที่มีการสะท้อนไปกลับ

- เมื่อ L คือ ความยาวรวมของสายเคเบิล
 X คือ ตำแหน่งที่เกิด PD บนสายเคเบิลวัดจากปลายด้านไกล
 $2t_x$ คือ ระยะเวลาระหว่างพัลส์ลูกที่ 1 กับลูกที่ 2
 $2t_L$ คือ ระยะเวลาระหว่างพัลส์ลูกที่ 1 กับลูกที่ 3

โดยทั่วไป หลักการวัดหาตำแหน่งของ PD ในสายเคเบิล จะทำได้ด้วยการออกแบบให้อิมพีแดนซ์วัด (Z_m) มีค่าความต้านทานมากกว่าค่าแอดมิทแตนซ์ (Z_0) ของสายเคเบิล เพื่อให้ได้ลักษณะของคลื่นจรมีขั้ว (polarity) เหมือนกันทุกพัลส์ (pulse)

ดังนั้นการคำนวณหาตำแหน่งของคลื่นจรมสามารถคำนวณจากไดอะแกรมเวลา ดังรูป 2.11



รูปที่ 2.12 ลักษณะ PD ที่เกิดจากโพรงอากาศขนาด 0.5 มม. [6]

คลื่นจรมลูกที่ 1 เกิดจากการเคลื่อนที่ ณ จุดที่เกิด PD มายังอิมพีแดนซ์วัดโดยตรง คลื่นจรมลูกที่ 2 เกิดจากคลื่นจรมที่เคลื่อนที่ไปที่ด้านตรงข้าม (ด้านไกล) และสะท้อนกลับ (เนื่องจากเป็นวงจรเปิดที่ด้านไกล) มาที่อิมพีแดนซ์วัด อย่างไรก็ตามเนื่องจากการออกแบบให้อิมพีแดนซ์วัดมีค่า $Z_m \gg Z_0$ ดังนั้น ทำให้คลื่นทั้งสองลูกดังกล่าวจะเกิดการสะท้อนกลับไปยังด้านไกลอีกครั้ง (เนื่องจาก Z_m ไม่สอดคล้อง (matching) กับ Z_0) และสะท้อนกลับไปมาอย่างนี้เรื่อยไป ดังนั้นเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของคลื่นจรม จึงสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลาได้ดังนี้ [5, 6]

$$\frac{X}{L} = \frac{2t_x}{2t_L} = \frac{t_x}{t_L} \quad (2.13)$$

โดยปกติแล้วความเร็วของคลื่นจรม (v) และ Z_0 ของสายเคเบิล มีความสัมพันธ์กันดังนี้ [7]

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.14)$$

โดยที่

$$L = 2 \left(\ln \frac{R}{r} + \frac{1}{2} + \frac{r^2}{3R^2} - \frac{r^4}{12R^4} + \frac{r^6}{30R^6} - \dots \right) 10^{-9} \text{ H/cm} \quad (2.15)$$

$$C = \epsilon_r 10^{-11} / 18 \ln \frac{R}{r} \quad \text{F/cm} \quad (2.16)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วของคลื่นจรในสายเคเบิล
 R คือ รัศมีรอบนอกของเนื้องนวน
 r คือ รัศมีของลวดตัวนำ
 ϵ_r คือ relative permittivity ของเนื้องนวน

กรณีไม่คิด Internal Flux linkages [7] จะได้

$$v = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{R}{r} \quad (2.17)$$

ปกติความเร็วของคลื่นจรในสายเคเบิล มีค่าประมาณ 150-170 เมตรต่อไมโครวินาที (m/ μ s) และ Z_0 มีค่าระหว่าง 10 ถึง 60 โอห์ม

ขนาดของพัลส์แต่ละลูกสามารถคำนวณได้ดังนี้

จากสมการ 2.1 เมื่อคิดผลของค่าสูญเสียในสายเคเบิล และในกรณีที่สัมประสิทธิ์การส่งผ่านสัญญาณ (Transmission Coefficient, $\frac{2Z_m}{Z_m + Z_0}$) มีค่าเท่ากับ 1 หรือ $Z_m = Z_0$ จะได้

$$e_1(t) = \frac{Z_0}{2} i_b(t) e^{-\gamma(\omega)(L-x)} \quad (2.18)$$

$$e_2(t) = \frac{Z_0}{2} i_b(t) e^{-\gamma(\omega)(L+x)} \quad (2.19)$$

โดยที่ $\gamma = \alpha + j\beta$

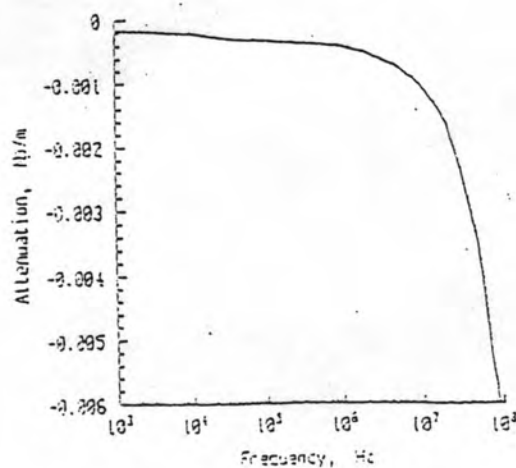
- เมื่อ γ คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียในสายเคเบิล
 α คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนสัญญาณ
 β คือ สัมประสิทธิ์การเลื่อนเฟส
 X คือ ระยะใดๆ ของเคเบิลเมื่อวัดจากปลายด้านไกล
 L คือ ความยาวของสายเคเบิล
 Z_0 คือ คาแรคเตอร์ิสติกอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิล
 $e(t)$ คือ ขนาดคลื่นจรแต่ละลูกที่เกิดขึ้นที่มายังอิมพีแดนซ์วัด

การคำนวณ โวลเตจที่อิมพีแดนซ์วัด เมื่อสมมติให้ตัวเก็บประจุคัปปลิง (C_c) มีค่าอิมพีแดนซ์น้อยมากจนเหมือนว่าเป็นวงจรตัด เราจะพบว่า

$$V_{Z_m} = \frac{2Z_m}{Z_m + Z_0} e(t) \quad (2.20)$$

เนื่องจากสเปกตรัมของ PD และสัญญาณรบกวนบางครั้งอาจจะอยู่ในย่านเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ดังนั้นขณะวัด PD ของสายเคเบิล จึงมีสัญญาณรบกวนปะปนเข้ามาในวงจรวัดด้วยเสมอ

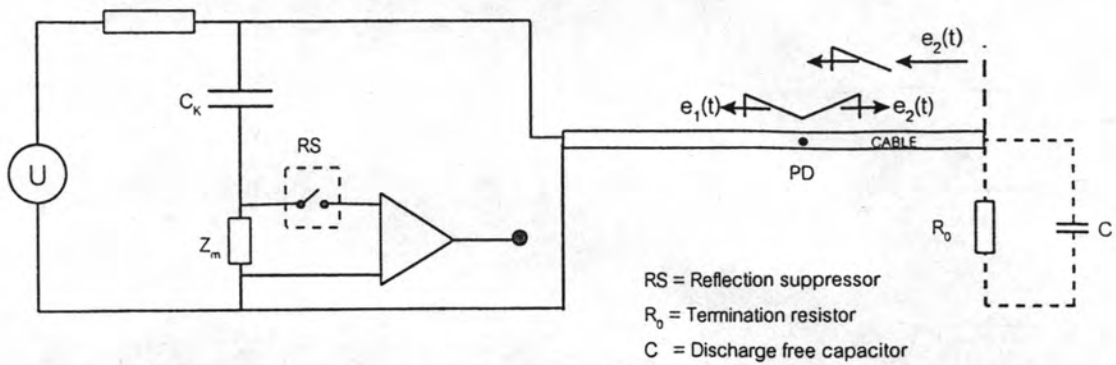
จากรูปที่ 2.13 จะพบว่าขนาดของคลื่นจรจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่ของกระแสพัลส์เกินค่า 10 เมกกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้น เพื่อปรับปรุงค่าอัตราส่วนของสัญญาณวัดต่อสัญญาณรบกวน (S/N) ให้ดีขึ้น จึงออกแบบให้วงจรขยายสัญญาณของเครื่องตรวจจับหาตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จมีแบนด์วิดท์ 5-10 เมกกะเฮิร์ตซ์ [6, 12]



รูปที่ 2.13 แสดงถึงสัญญาณจะลดทอนมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น

2.7 การวัด PD ในสายเคเบิล

เครื่องวัด PD ในสายเคเบิลมีการออกแบบวงจรวัดสัญญาณหลายลักษณะ ซึ่งมีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกันไป โดยมีวงจรวัด PD ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรวัด PD ในสายเคเบิล

1) การวัด PD ในสายเคเบิล โดยใช้เครื่องตรวจจับหาตำแหน่งที่เกิดดีสชาร์จบางส่วนแบบแถบกว้าง

- ข้อดี:
- ให้ความไวสูงสุด (เนื่องจากแบนด์วิดท์กว้าง)
 - ไม่เกิดความผิดพลาดในการวัดอันเนื่องมาเกิดซูเปอร์โพสิชันแบบลบ (Negative superposition)

ข้อเสีย: - สัญญาณจากภายนอกครอบคลุมได้ง่าย (เนื่องจากแบนด์วิดท์กว้าง)

2) การวัด PD ในสายเคเบิล โดยใช้เครื่องตรวจจับหาตำแหน่งที่เกิดดีสชาร์จบางส่วนแบบแถบแคบ

- ข้อดี: - สัญญาณจากภายนอกครอบคลุมได้น้อยกว่าการใช้เครื่องตรวจจับหาตำแหน่งที่เกิดดีสชาร์จบางส่วนแบบแถบกว้างมาก

- ข้อเสีย - ความไวต่ำกว่าการวัดโดยใช้เครื่องตรวจจับหาตำแหน่งที่เกิดดิสชาร์จบางส่วน
แบบแถบกว้างมาก
- เกิดความผิดพลาดในการวัดอันเนื่องมาจากการเกิดชุปเปอร์โพสิชันแบบลบ

3) วิธีแก้ปัญหาชุปเปอร์โพสิชันแบบลบในเครื่องวัดแบบเครื่องตรวจจับความถี่แบบแถบแคบ

- 3.1) ใช้ตัวต้านทานแบบเทอร์มินเนชัน (Termination resistor) และตัวเก็บประจุ (ขนาดใหญ่ และมีราคาแพงมาก) เพื่อป้องกัน PD สะท้อนที่ปลายด้านไกลของเคเบิล โดยเลือก R_0 ให้พอดีกับ Z_0 ของเคเบิล
- 3.2) ใช้ RS (Reflection suppression) ทำการสวิตช์เปิดวงจรเพื่อป้องกันไม่ให้ PD สะท้อนที่ปลายด้านไกลของเคเบิลเข้ามาที่เครื่องวัดในช่วงเวลาที่เกิดชุปเปอร์โพสิชันแบบลบ

2.8 ความไวของเครื่องตรวจจับหาตำแหน่งของ PD

การหาความไวของเครื่องตรวจหา PD ในสายเคเบิลจะใช้หลักการเดียวกับการคำนวณหาความไวของเครื่องตรวจจับ PD ในเคเบิล โดยตั้งข้อสมมติฐานว่าสเปกตรัมของกระแส $i_b(t)$ มีค่าคงที่ตลอดช่วงความถี่ของแบนด์วิดท์วงจรขยายของวงจรตรวจหาตำแหน่ง PD (ดูรูปที่ 2.7 ข)

จากสมการ
$$V_{Zm3} = \frac{2Z_m}{Z_m + Z_0} e_3(t) \quad (2.21)$$

โดยที่ V_{Zm3} คือ แรงดันของพัลส์ลูกที่ 3 ที่ตรวจจับได้ที่อิมพีแดนซ์วัด $e_3(t)$ คือ พัลส์ลูกที่ 3

$$V_{Zm3}(t) = \frac{2Z_m}{Z_m + Z_0} \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} e(t) e^{-\gamma(\omega)(3L-x)} \quad (2.22)$$

เมื่อ $e(t) = \frac{Z_0}{2} i_b(t)$ เพราะเป็นลูกคลื่นที่เคลื่อนที่ไปแต่ละด้านของสาย

ดังนั้น

$$V_{Zm3}(t) = \frac{Z_m}{Z_m + Z_0} \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} i_b(t) Z_0 e^{-\gamma(\omega)(3L-x)} \quad (2.23)$$

$$= \frac{Z_m Z_0}{Z_m + Z_0} i_b(t) \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} e^{-\gamma(\omega)(3L-x)} \quad (2.24)$$

$$\frac{V_{Z_m}(t)}{Z_m} = i_{Z_m}(t) = \frac{Z_0}{Z_m + Z_0} i_b(t) \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} e^{-\gamma(\omega)(3L-x)} \quad (2.25)$$

เนื่องจากวงจรกรองที่ออกแบบมี Transfer function (H) เป็น

$$\frac{V_{03}(S)}{I_{Z_m}(S)} = H(S) \text{ ซึ่งมีลักษณะเป็น Band Pass Amplifier} \quad (2.26)$$

เมื่อ $V_{03}(S)$ คือ แรงดันขาออกของพัลส์ลูกที่ 3

ดังนั้น $V_{03}(S) = H(S) I_{Z_m}(S)$ จะได้

$$V_{03}(t) = h(t) * i_{Z_m}(t) \quad (2.27)$$

$$V_{03}(t) = h(t) * \frac{Z_0}{Z_m + Z_0} i_b(t) \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} e^{-\gamma(\omega)(3L-x)} \quad (2.28)$$

เนื่องจากสเปกตรัมของ $i_b(t)$ มีค่าคงที่ตลอดช่วงแบนด์วิดท์ของ Band Pass Filter Amplifier ที่ออกแบบ ดังนั้นจึงประมาณ $i_b(t) = q \delta(t)$ [1] และเมื่อแทนค่าในสมการ 2.28 จะได้

$$V_{03}(t) = h(t) * \frac{Z_0}{Z_m + Z_0} q \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} e^{-\gamma(\omega)(3L-x)} \quad (2.29)$$

นอกจากนั้น ยังกำหนดให้ S/N มีค่ามากกว่า 2.5 [1]

$$V_{03}(t) \geq 2.5 e_n$$

เมื่อ e_n คือขนาดแรงดันค่ายอดของสัญญาณรบกวน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 เท่าของแรงดันสัญญาณรบกวนอาร์เอ็มเอส (rms)

ดังนั้น

$$q_{\min} = 2.5 \frac{e_n}{h(t)Z_0} \frac{(Z_m + Z_0)^2}{Z_m - Z_0} e^{+\gamma(\omega)(3L-x)} \quad (2.30)$$

สมการที่ 2.30 จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อตัวเก็บประจุคัปปลิงมีขนาดใหญ่ เพราะจะสามารถ คีตซาร์จประจุได้มาก และเพียงพอต่อการเกิดคีตซาร์จที่เกิดในสายเคเบิล

แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถหาตัวเก็บประจุคัปปลิง (C_K) ที่มีขนาดใหญ่ได้ จึงต้องมีแฟกเตอร์ลดทอนสำหรับตัวเก็บประจุ C_K ขนาดเล็กซึ่งมีความสัมพันธ์กับคาแรคเตอร์สติก อิมพีแดนซ์ $f(C_K, Z_0)$ ดังนี้

$$V_{03}(t) = h(t) * \frac{Z_0}{Z_m + Z_0} q f(C_K, Z_0) \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} e^{-\gamma(\omega)(3L-x)} \quad (2.31)$$

แทนค่าสูงสุดของ $h(t)$ ด้วย ξA ในสมการ 2.31 จะได้

$$V_{03}(t) = \xi A \frac{Z_0}{Z_m + Z_0} q f(C_K, Z_0) \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} e^{-\gamma(\omega)(3L-x)} \quad (2.32)$$

เมื่อ ξ คือ แฟกเตอร์สำหรับการตอบสนองแบบอิมพัลส์

A คือ อัตราขยายของออปแอมป์

$f(C_K, Z_0)$ คือ แฟกเตอร์ลดทอนเนื่องจากตัวเก็บประจุคัปปลิงมีขนาดเล็ก

$V_{0(3)}$ คือ ขนาดแรงดันของคลื่นสะท้อนลูกที่ 3

q คือ ประจุปรากฏ

$$V_{03 \text{ pd min}} = \xi A q_{\min} f(C_K, Z_0) \frac{Z_0}{Z_m + Z_0} \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} e^{-\gamma(\omega)(3L-x)} \quad (2.33)$$

$$V_{03 \text{ (noise peak)}} = 2.5 A V_{n(\text{rms})} \quad (2.34)$$

เมื่อ $V_{n(\text{rms})}$ คือ ขนาดของสัญญาณรบกวนเป็นค่าอาร์ เอ็ม เอส (rms)

เนื่องจากมาตรฐาน IEC Publ. No. 885-2 (1987) กำหนดให้ความไวมีค่าเป็น 2 เท่าของ
ขนาดรบกวนสูงสุด ดังนั้นจากสมการ 2.33 และ 2.34 แทนค่า

$$V_{03 \text{ pd min}} = 2V_{03(\text{noise peak})}$$

$$q_{\min} = \frac{5V_{n(\text{rms})}}{\xi f(C_x, Z_0)} \frac{(Z_m + Z_0)^2}{(Z_m - Z_0)Z_0} e^{+\gamma(\omega)(3L-x)} \quad (2.35)$$