



บทที่ 4

การทดสอบและประเมินผล

เพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่า เครื่องตรวจจับตีสสารข้างส่วนที่ออกแบบสร้าง ขึ้นนี้มีความถูกต้องและมีความเชื่อถือได้ จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบลักษณะคุณสมบัติต่างๆ โดยอาศัยเกณฑ์ข้อกำหนดที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป [12, 13] ดังต่อไปนี้ (ผลการทดสอบที่ไม่มี ความสำคัญมากมักจะรวบรวมไว้ในภาคผนวก ฉ, ช และ ซ)

4.1 การทดสอบคุณสมบัติของเครื่องตรวจจับตีสสารข้างส่วน

คุณสมบัติของเครื่องตรวจจับตีสสารข้างส่วนที่ต้องทดสอบคือ

- 1) แบนด์วิดท์ของวงจรสัญญาณตีสสารข้างส่วน
- 2) ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตและเวลาแยกขีด (Resolution time)
- 3) ความไว (Sensitivity)

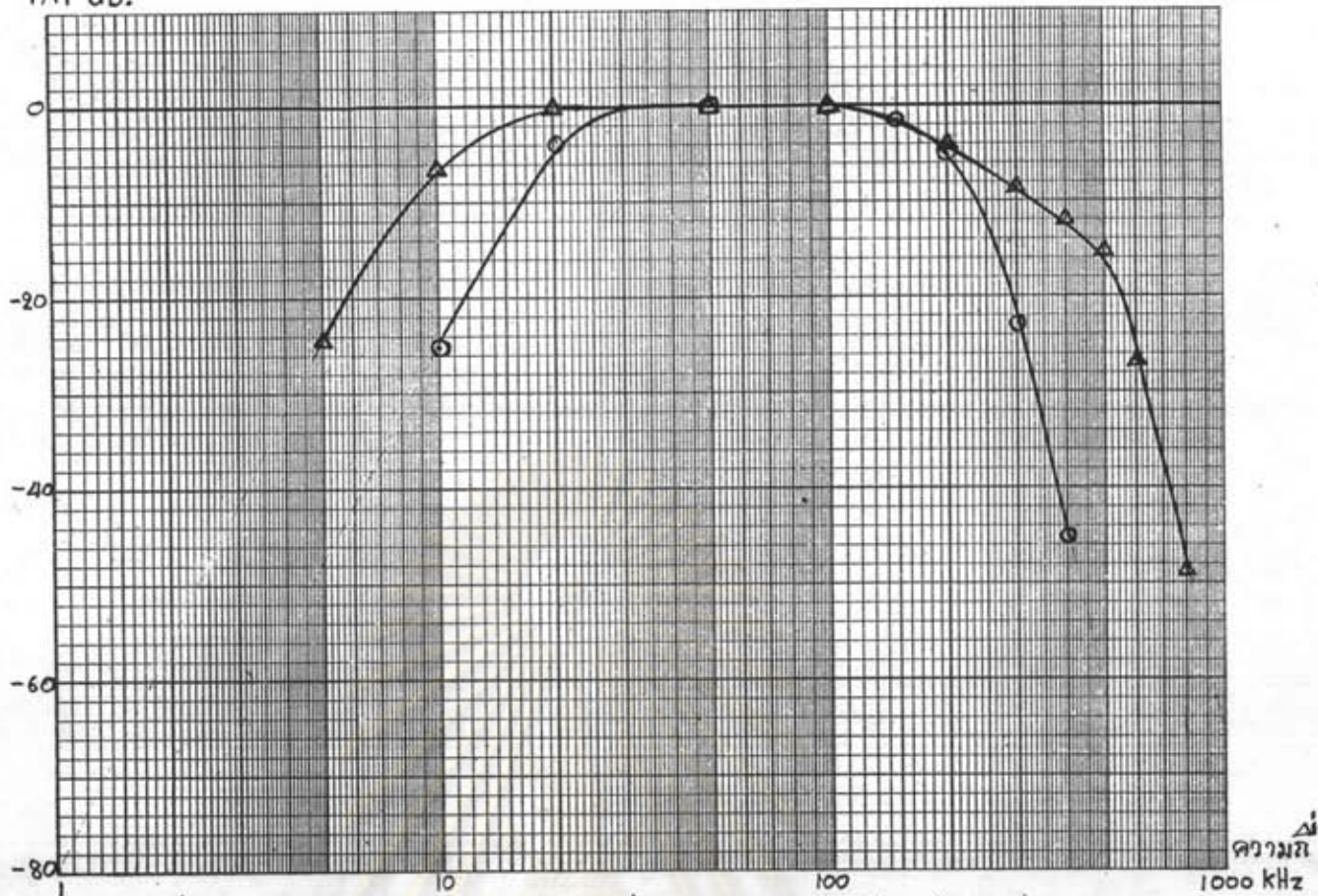
4.1.1 แบนด์วิดท์ของวงจรรับสัญญาณตีสสารข้างส่วน

จากการวัด V_o/V_i ที่ความถี่ต่างๆ และเขียนกราฟ

แบบ "นอร์มัลไลซ์" แสดงดังรูปที่ 4.1 จะพบว่าแบนด์วิดท์ (-3 ดีบี) อยู่ในช่วงความถี่ 19 ถึง 210 กิโลเฮิรตซ์ ของวงจรรับสัญญาณตีสสารข้างส่วนสำหรับวัตถุประสงค์ทดสอบทั่วไป และ 11 ถึง 230 กิโลเฮิรตซ์ ของวงจรรับสัญญาณตีสสารข้างส่วนสำหรับเคเบิลยาวตามลำดับ ผล ที่ได้ผิดพลาดจากที่ออกแบบไว้เล็กน้อย เนื่องจากค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์และการไม่คิด ผลกระทบของหม้อแปลงแบบแถบกว้าง

4.1.2 การตรวจสอบลักษณะสัญญาณเอาต์พุตและเวลาแยกขีด

การตรวจสอบลักษณะสัญญาณเอาต์พุต ใช้เครื่องปรับเทียบตีสสารมาตรฐาน ในการป้อนกระแสพัลส์สั้นๆ ขนาด 5 พิโคคูลอมป์ ที่อินพุตของวงจรรับสัญญาณ PD ลักษณะ สัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD ทางจอภาพ (ออสซิลโลสโคป) แสดงดังรูป 4.2 ก) และรูปที่ 4.2 ข) ตามลำดับ จากการทดสอบจะพบว่ายอดแรกของ PD สูงกว่ายอดที่สอง หรือลักษณะสัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบ "s-response" แสดงว่าเครื่องตรวจจับ PD นี้เป็น เครื่องตรวจจับ PD แบบแถบกว้าง (Wide-band PD detector)



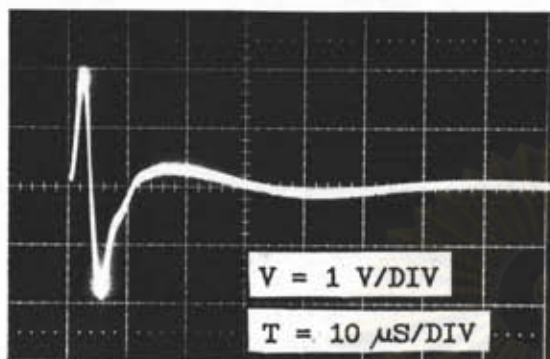
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลตอบสนองความถี่ของวงจรรับสัญญาณดีส์ชาร์จบางส่วน

- สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป
- △ สำหรับเคเบิลยาว

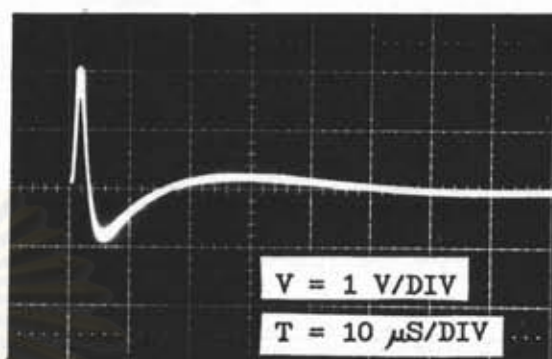
อย่างไรก็ตามเครื่องตรวจจับ PD ที่ใช้ในการทดสอบ PD ภายในเคเบิลจะต้องมีการตรวจสอบลักษณะคุณสมบัติการเกิดชุปเปอร์โพสิชัน เนื่องจากการสะท้อนของ PD ที่ปลายด้านไกลของเคเบิล โดยใช้เครื่องกำเนิดพัลส์คู่ดังรูปที่ 2.23 โดยการแทนพัลส์ที่ตรวจจับได้โดยตรงที่ปลายด้านใกล้ของเคเบิลด้วยพัลส์ลูกแรก และแทนพัลส์ของ PD เนื่องจากการสะท้อนที่ปลายด้านไกลของเคเบิลด้วยพัลส์ลูกที่สอง และทำการเขียน "ไดอะแกรมพัลส์คู่" เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของ PD (A_k) กับช่วงเวลาระหว่างพัลส์ทั้ง 2 ลูก (Δt) ของวงจรรับสัญญาณ PD สำหรับเคเบิลยาว [8]

รูปที่ 4.3 แสดงไดอะแกรมพัลส์คู่ที่ $C_k = 4$ และ 10 นาโนฟารัด ตามลำดับ จะได้เวลาแยกชัดประมาณ 1.0 ไมโครวินาทีทั้งสองกรณี (จุดที่เกิดชุปเปอร์โพสิชันไม่เกิน 10% ของค่าปกติ) การหาค่าความยาววิกฤตของเคเบิลจะกำหนดโดยความยาว l_k ในกรณีที่ความยาวของเคเบิลมากกว่า l_k เราจะถือว่าเคเบิลนั้นเป็นเคเบิลยาว โดยที่ $l_k = 0.5vt_k$ เมื่อ v คือ ความเร็วคลื่นจรของ PD ที่เคลื่อนที่ภายในเคเบิล สำหรับเคเบิลเอ็กซ์ทรูดจะมีความเร็วประมาณ 150 ถึง 170 เมตรต่อไมโครวินาที เช่น เคเบิล

ที่มีฉนวนชนิด XLPE จะมี $v=150$ เมตรต่อไมโครวินาที จากรูปที่ 4.3 ก) และ 4.3 ข) พบว่า $t_k = 0.7$ ไมโครวินาที (t_k คือเวลาที่ $A_k/A_{100} = 1.4$) ดังนั้นเราจะถือว่า เคเบิลชนิด XLPE เป็นเคเบิลยาวก็ต่อเมื่อ $l_k > 0.5(150)(0.7) = 52.5$ เมตร



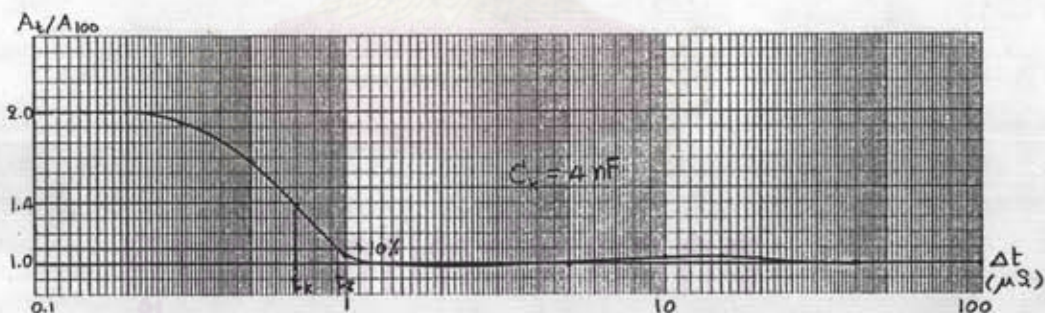
ก)



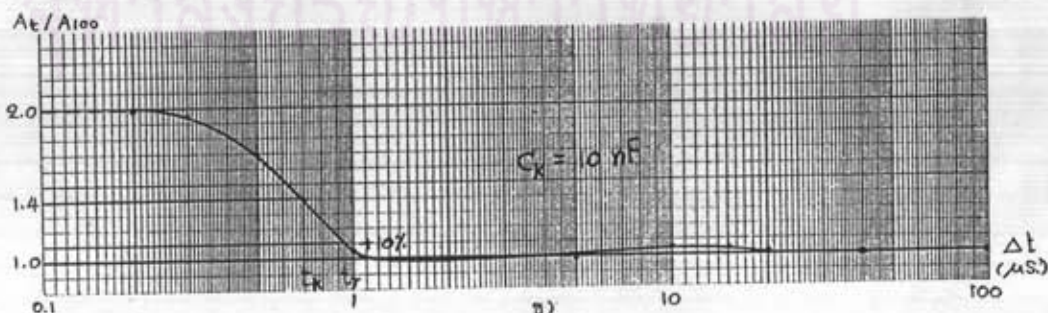
ข)

รูปที่ 4.2 ลักษณะสัญญาณเอาต์พุตของเครื่องตรวจจับ PD

- ก) เอาต์พุตตรวจรับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป
- ข) เอาต์พุตตรวจรับสัญญาณดีสชาร์จบางส่วนสำหรับเคเบิลยาว



ก)



ข)

รูปที่ 4.3 ไดอะแกรมพัลส์คู่

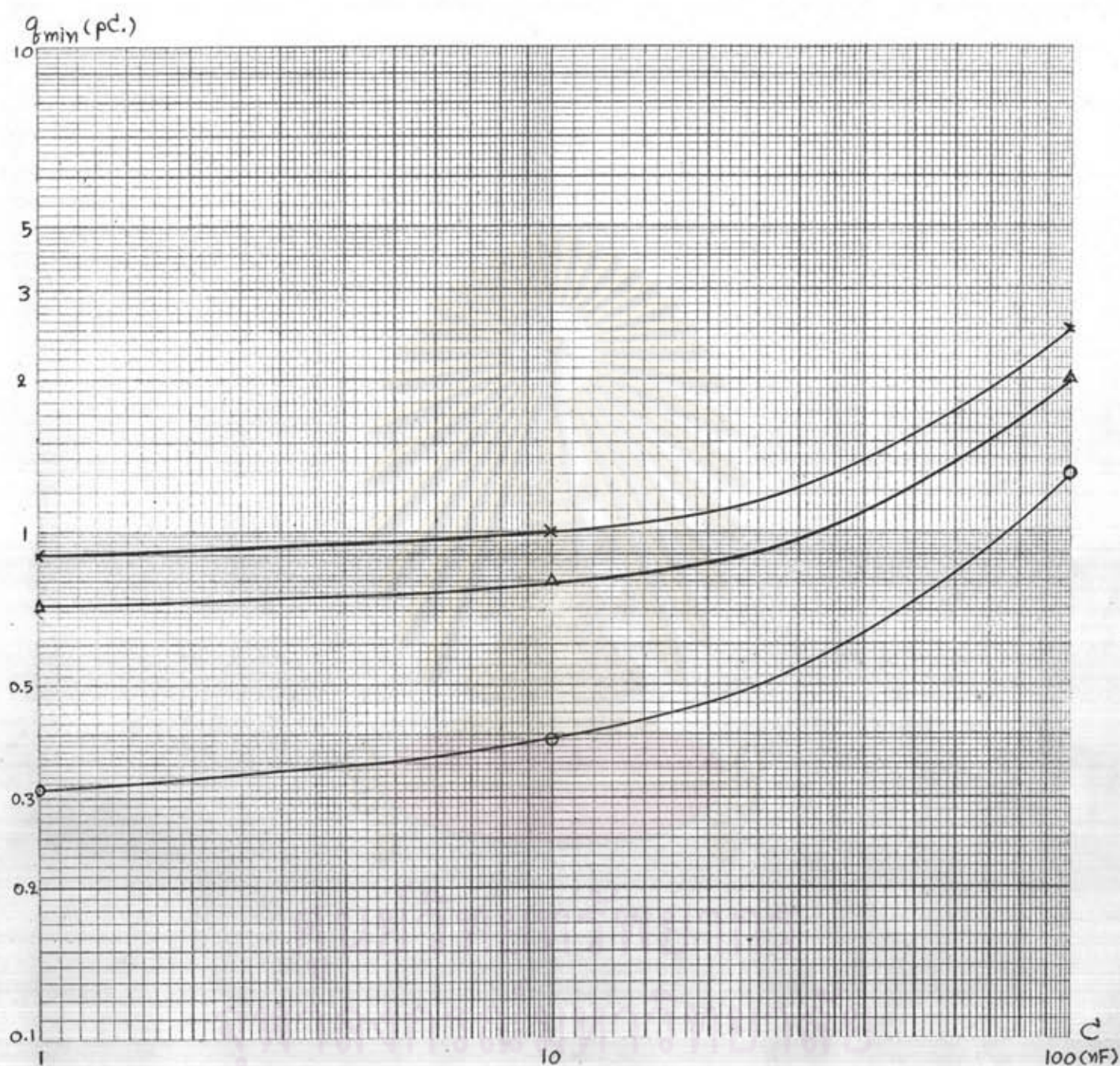
- ก) เมื่อใช้ $C_k = 4$ นาโนฟารัด
- ข) เมื่อใช้ $C_k = 10$ นาโนฟารัด

4.1.3 การตรวจสอบความไว

การตรวจสอบความไวสำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป ทำได้โดยใช้วงจรถดสอบในรูปที่ 2.19 แล้วใช้เครื่องกำเนิดพัลส์มาตรฐานทำการป้อนประจุ $q_0 = 50$ พิโคคูลอมบ์ คร่อมขั้วทั้งสองของวัสดุทดสอบ ปรับอัตราขยายจนวนมิเตอร์ของเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่าได้ 50 พิโคคูลอมบ์ เอาเครื่องกำเนิดพัลส์มาตรฐานออกแล้วอ่านค่าจากมิเตอร์ที่ลดลง ซึ่งค่าที่ได้นี้เป็นค่าสูงสุดของสัญญาณรบกวน (Background noise) จากนิยามกำหนดว่าความไวเท่ากับค่าสองเท่าของสัญญาณรบกวน ความไวที่คำนวณและวัดได้แสดงดังตารางที่ 4.1 จะพบว่าค่าความไวที่วัดได้ต่ำกว่าที่คำนวณประมาณ 50-125% เนื่องจากในทางปฏิบัติจะพบว่าสัญญาณรบกวนไม่ได้เกิดจากวงจรถดสอบแรกเพียงอย่างเดียว แต่เกิดจากวงจรถดสอบอื่นๆ ด้วย เพื่อแสดงให้เห็นว่าเครื่องตรวจจับ PD ที่ออกแบบมีประสิทธิภาพดี จึงได้ทำการเปรียบเทียบความไวกับเครื่องของต่างประเทศแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 จากรูปที่ 4.4 พบว่าความไวของเครื่องที่ออกแบบสูงกว่าเครื่องตรวจจับ PD ของบริษัท Bonar Robinson (Discharge detector series 800 type 803) [27] และรูปที่ 4.5 พบว่าความไวของเครื่องที่ออกแบบใกล้เคียงกับเครื่องตรวจจับ PD ของบริษัท Haefely (Partial Discharge Detector Type 561) [28] โดยทำการทดสอบที่ $C_k = 1$ นาโนฟารัด ส่วนในรูปที่ 4.6 แสดงความไววงจรรับสัญญาณ PD สำหรับเคเบิลยาว เมื่อไม่คิดการสูญเสียภายในเคเบิลที่ $C_k = 4$ นาโนฟารัด และ $C_k = 10$ นาโนฟารัด ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความไวที่ได้จากการคำนวณและจากการวัด

วงจรรับสัญญาณ PD	เงื่อนไข	q_{min} (pC)		ผิดพลาด (%)
		คำนวณ	วัด	
สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป	$C_k = C_c = 1$ nF	0.32	0.72	125
สำหรับเคเบิลยาว	$C_k = C_c = 1$ nF	0.17	0.32	88
สำหรับเคเบิลยาว	$C_k = 4$ nF, $Z_o = 10$	2.00	3.60	80
สำหรับเคเบิลยาว	$C_k = 10$ nF, $Z_o = 10$	1.20	1.80	50



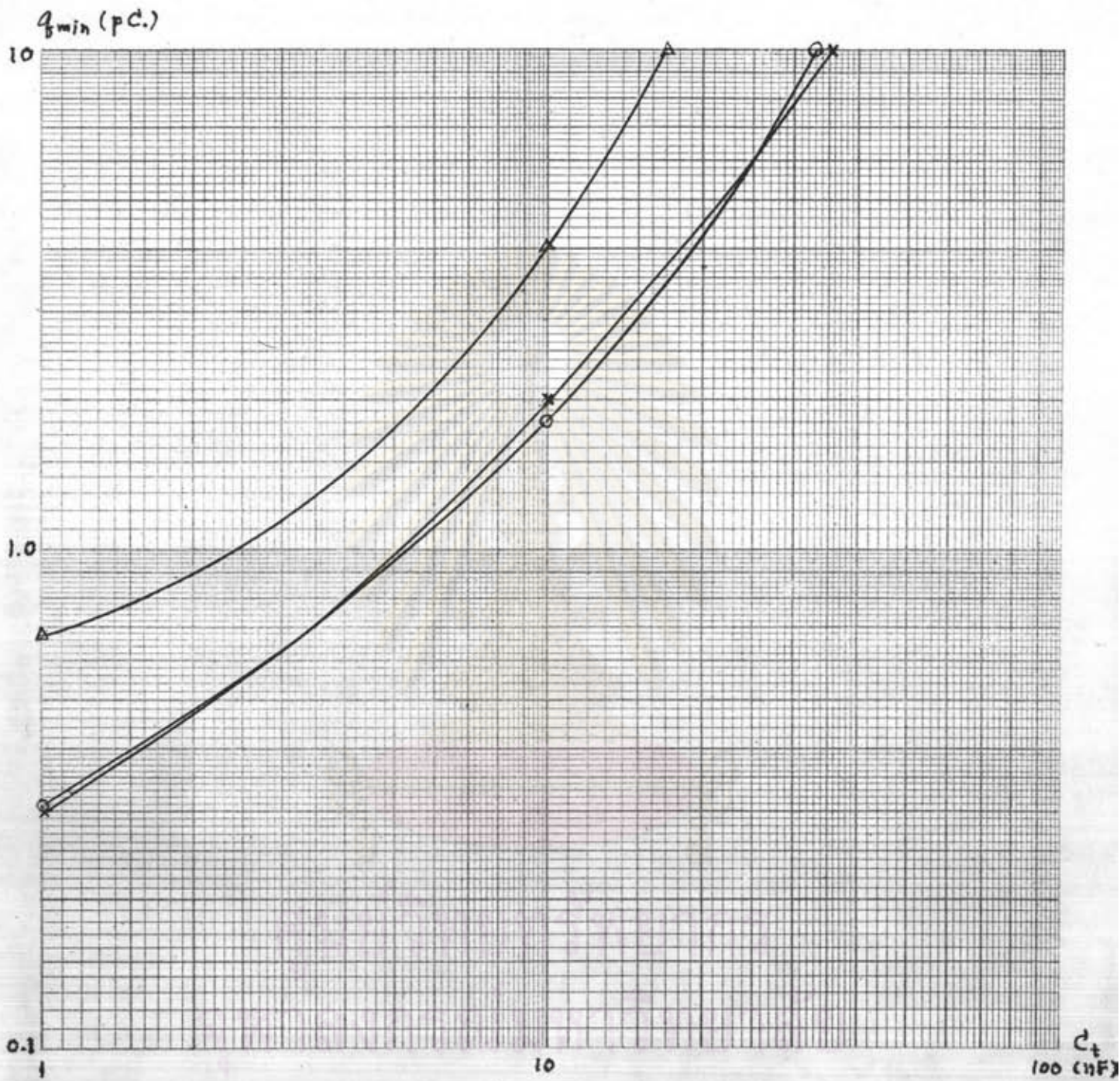
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความไวของเครื่องที่ออกแบบกับเครื่องบริษัท

Bonar Robinson ที่ $C_k = C_v = 1$ ถึง 100 นาโนฟารัด

x Bonar Robinson

A วงจรรับสัญญาณ PD สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

o วงจรรับสัญญาณ PD สำหรับเคเบิลยาว



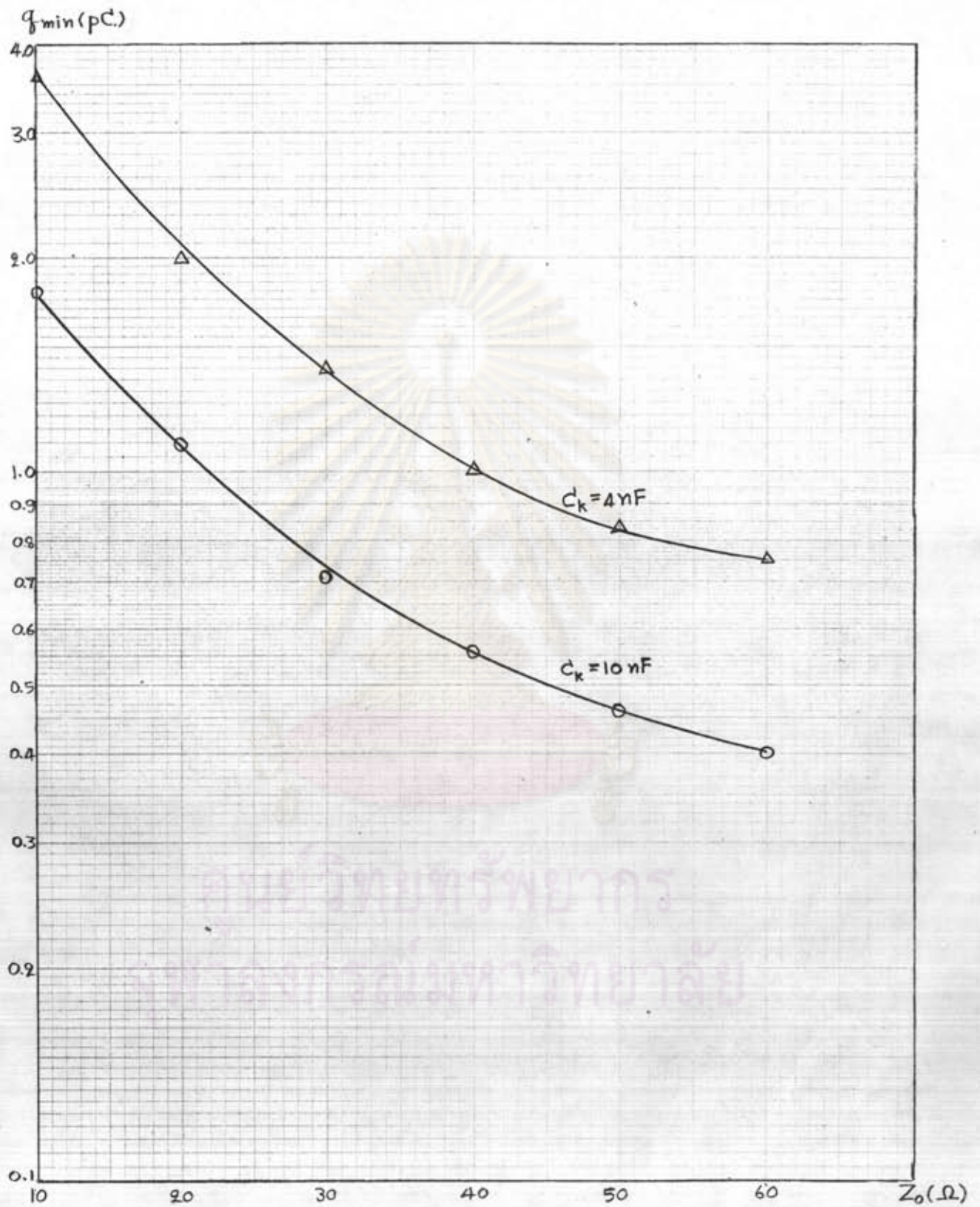
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบความไวของเครื่องที่ออกแบบกับเครื่องบริษัท Haefely

ที่ $C_k = 1$ นาโนฟารัด และ $C_c = 1$ ถึง 100 นาโนฟารัด

× Haefely

A วงจรรับสัญญาณ PD สำหรับวัสดุทดสอบทั่วไป

o วงจรรับสัญญาณ PD สำหรับเคเบิลยาว

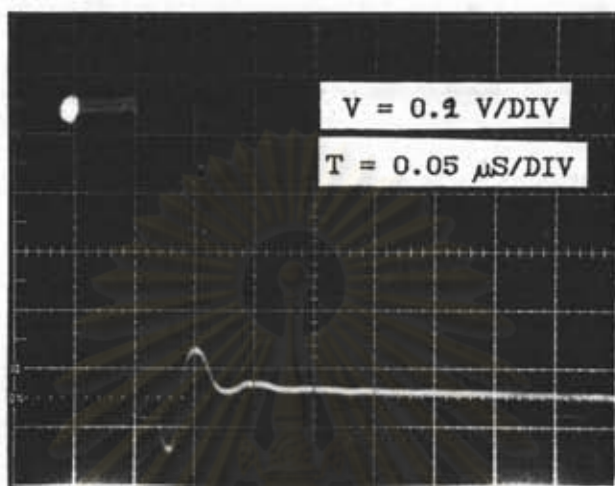


รูปที่ 4.6 ความไวของวงจรรับสัญญาณ PD สำหรับเคเบิลยาว

$Z_0 = 10$ ถึง 60 โอห์ม ที่ $C_k = 4$ และ 10 นาโนฟารัด

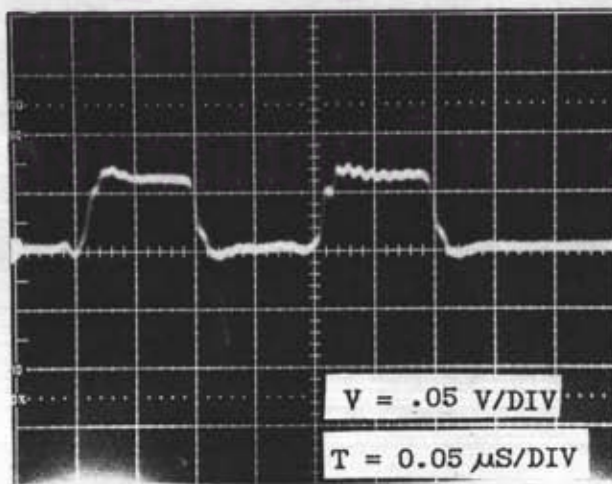
4.2 การทดสอบคุณสมบัติของเครื่องกำเนิดพัลส์มาตรฐาน

ช่วงเวลานับของวงจรปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน ในมาตรฐาน IEC [6] กำหนดให้ช่วงเวลานับไม่เกิน 100 นาโนวินาที รูปที่ 4.7 แสดงช่วงเวลานับของเครื่องที่ออกแบบจะพบว่าช่วงเวลานับ < 20 นาโนวินาที



รูปที่ 4.7 ช่วงเวลานับของวงจรปรับเทียบดีสชาร์จมาตรฐาน

ช่วงเวลานับและความกว้างของเครื่องกำเนิดพัลส์คู่ แสดงดังรูปที่ 4.8 มาตรฐาน IEC [8] กำหนดช่วงเวลานับ < 20 นาโนวินาที ความกว้าง (10% ของหน้าคลื่นถึงทางคลื่น) < 150 นาโนวินาที ระยะระหว่างพัลส์สามารถปรับได้อย่างน้อย 0.2 ถึง 100 ไมโครวินาที จากการวัดจะพบช่วงเวลานับ < 20 นาโนวินาที และความกว้าง 110 นาโนวินาที และสามารถปรับระยะห่างระหว่างพัลส์ได้ 0.2 ถึง 140 ไมโครวินาที

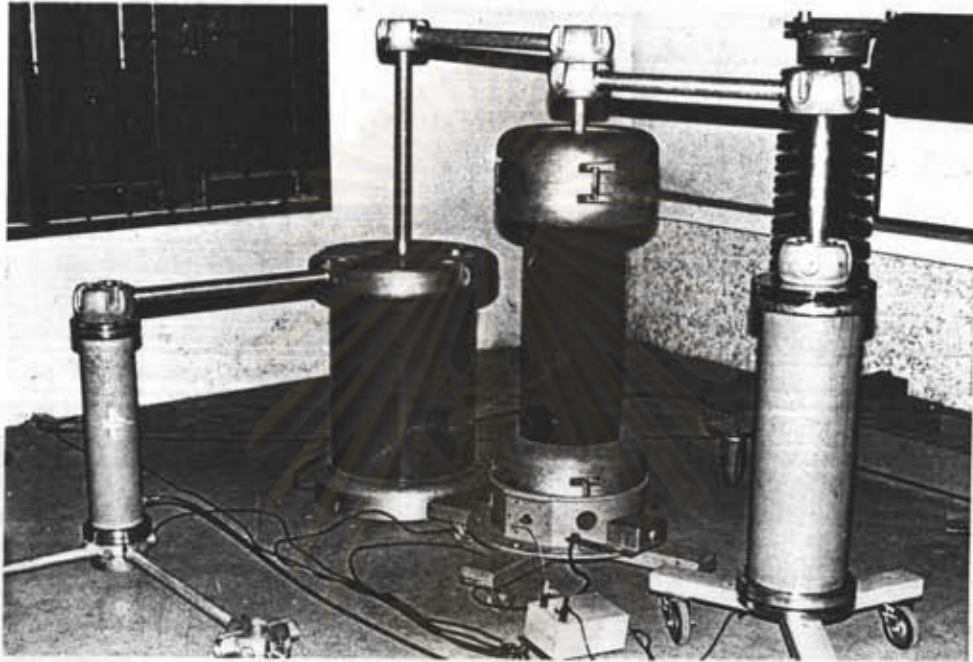


รูปที่ 4.8 ช่วงเวลานับและความกว้างพัลส์ของเครื่องกำเนิดพัลส์คู่

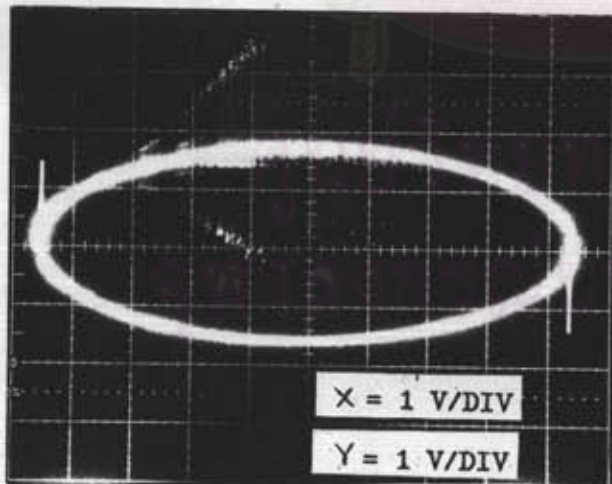
4.3 การตรวจจับ PD ภายในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

4.3.1 การตรวจจับ PD ภายในตัวเก็บประจุแรงสูง

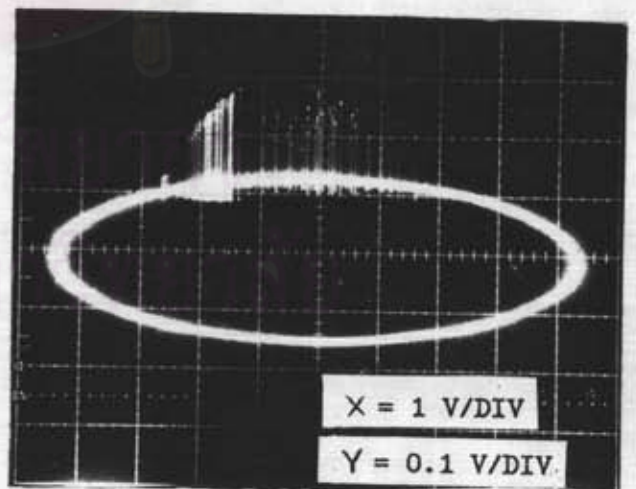
วงจรถ่ายใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.9 ซึ่งทำการทดสอบตัวเก็บประจุแรงสูงขนาด 1 นาโนฟารัด 100 กิโลโวลต์ ผลการทดสอบที่ได้ เมื่อเทียบกับเครื่องตรวจจับ PD ของบริษัท James G. Biddle แสดงในรูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.1 ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 วงจรทดสอบตัวเก็บประจุแรงสูง



ก.)



ข.)

รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบตัวเก็บประจุแรงสูง เมื่อแสดงผลทางจอภาพ

ก) ผลการตรวจจับของเครื่องที่ออกแบบ

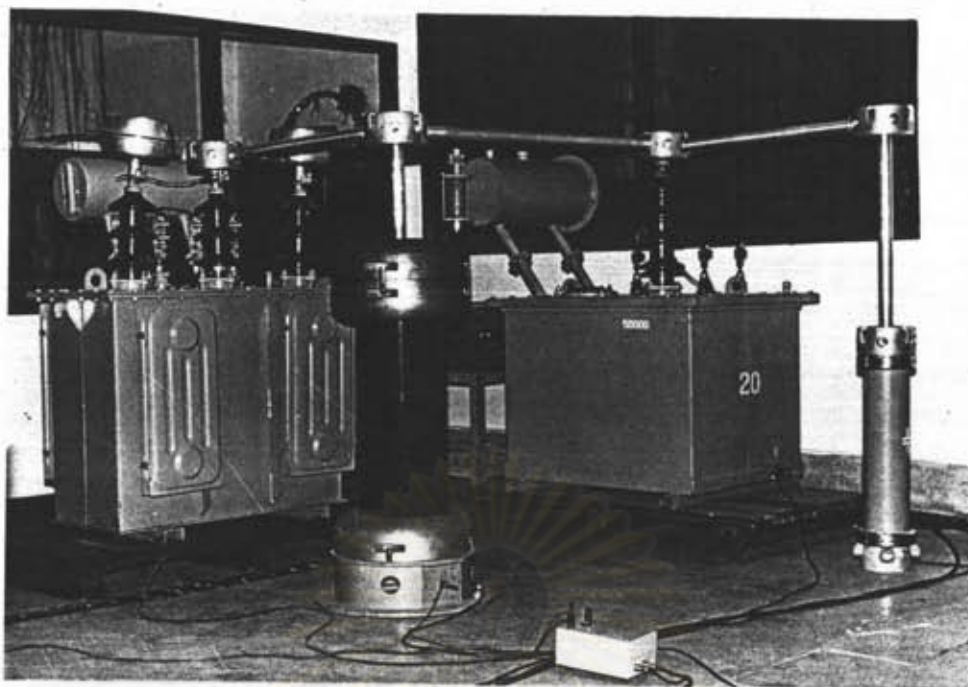
ข) ผลการตรวจจับของเครื่องบริษัท James G. Biddle

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า PD ที่อ่านได้จากมิเตอร์ที่แรงดันทดสอบ 60 กิโลโวลต์

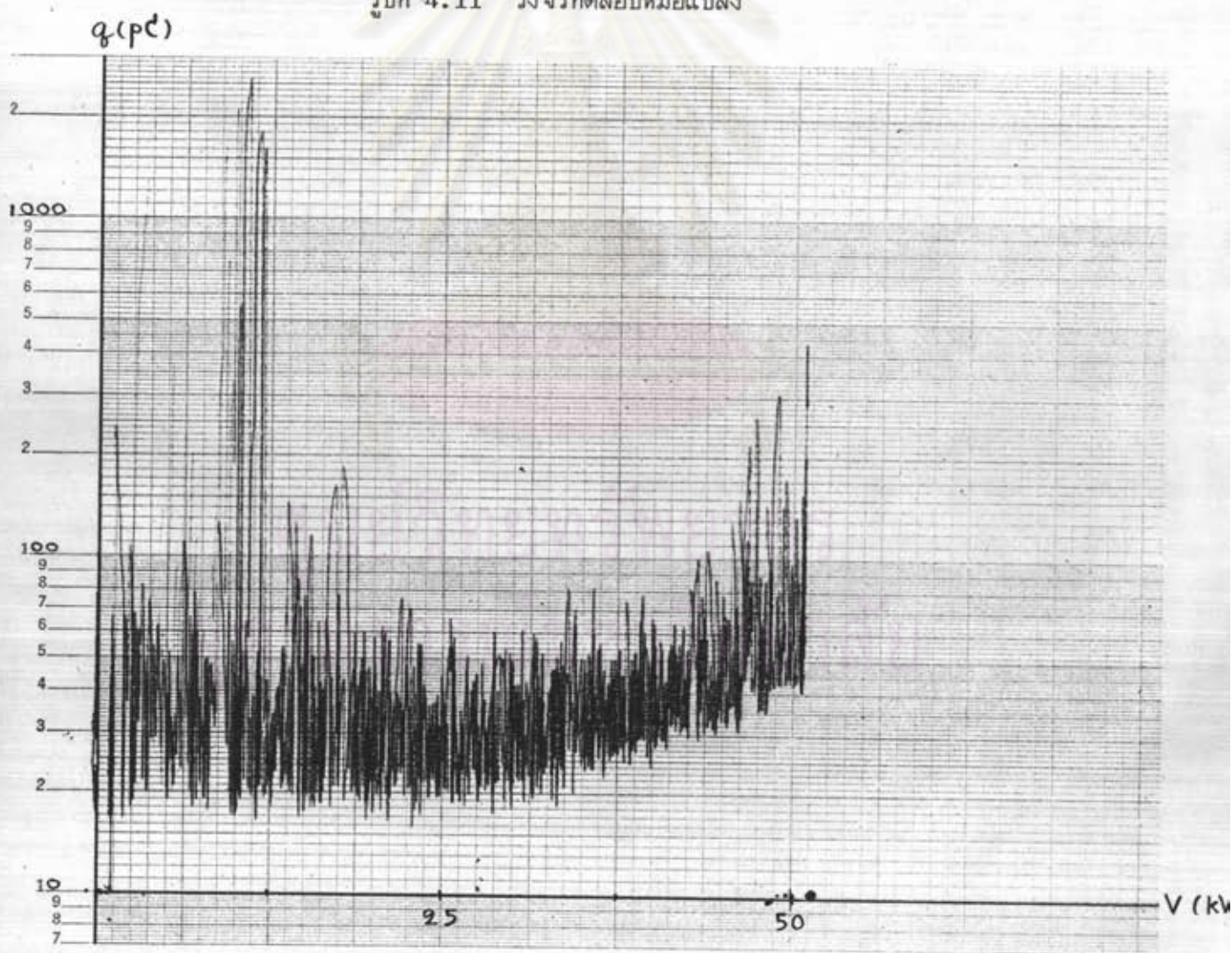
เทอม	ค่าที่วัดได้ (ฟิโคคูลอมป์)	
	เครื่องที่ออกแบบ	James G. Biddle
q_{min}	1.2	1.0
q	350~420	320~400

4.3.2 การตรวจจับ PD ภายในหม้อแปลง

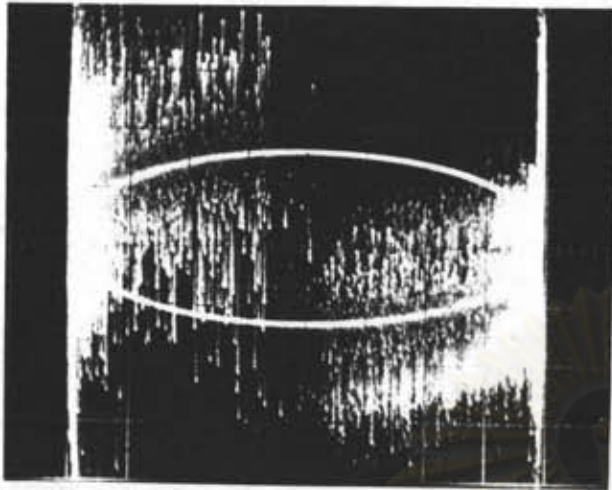
วงจรถ่ายใช้ในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งทำการทดสอบหม้อแปลงขนาด 45 กิโลโวลต์แอมแปร์ 24,000/416A/240 Y โวลต์ (ซึ่งหม้อแปลงนี้ไม่ผ่านการทดสอบแรงดันแบบอิมพัลส์) ก่อนการทดสอบนี้ได้มีการตรวจจับ PD ที่เกิดจากวงจรถ่าย (โดยไม่ต่อหม้อแปลงที่ใช้เป็นวัสดุทดสอบ) ด้วยการป้อนแรงดันจาก 0 ถึง 50 กิโลโวลต์ พบว่า PD ที่เกิดจากวงจรถ่ายเอง < 50 ฟิโคคูลอมป์ (อ่านจากมิเตอร์) และกราฟที่ได้จากกรณีนี้แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าค่าที่อ่านได้มากกว่าค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์ เนื่องจากวงจรถ่ายนี้ไม่มีตัวกรองแรงดันต่ำที่แหล่งจ่าย ทำให้สัญญาณรบกวนที่เกิดจากการสปาร์กที่หน้าสัมผัสของเรกกูเลเตอร์ขณะเพิ่มหรือลดแรงดันเข้ามาในวงจรถ่ายได้ หลังจากนั้นจึงทำการทดสอบหม้อแปลง ผลการทดสอบเมื่อแสดงผลทางจอภาพแสดงดังรูปที่ 4.13 และทางเครื่องบันทึก ดังรูปที่ 4.14 จะพบว่าเครื่องที่ออกแบบอ่านค่า PD ได้ >30,000 ฟิโคคูลอมป์ ในขณะที่เครื่องของบริษัท James G. Biddle อ่านค่าได้ > 13,000 ฟิโคคูลอมป์ (สัญญาณถูกคลิบเนื่องจากสัญญาณ PD มีขนาดมากกว่าแรงดันไฟเลี้ยงของแหล่งจ่าย)



รูปที่ 4.11 วงจรทดสอบหม้อแปลง



รูปที่ 4.12 กราฟแสดง PD ที่มาจากวงจรทดสอบเอง



ก.) $X = 1 \text{ V/DIV}$
 $Y = 1 \text{ V/DIV}$



ข.) $X = 1 \text{ V/DIV}$
 $Y = 0.1 \text{ V/DIV}$

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบหม้อแปลงเมื่อแสดงผลทางจอภาพ

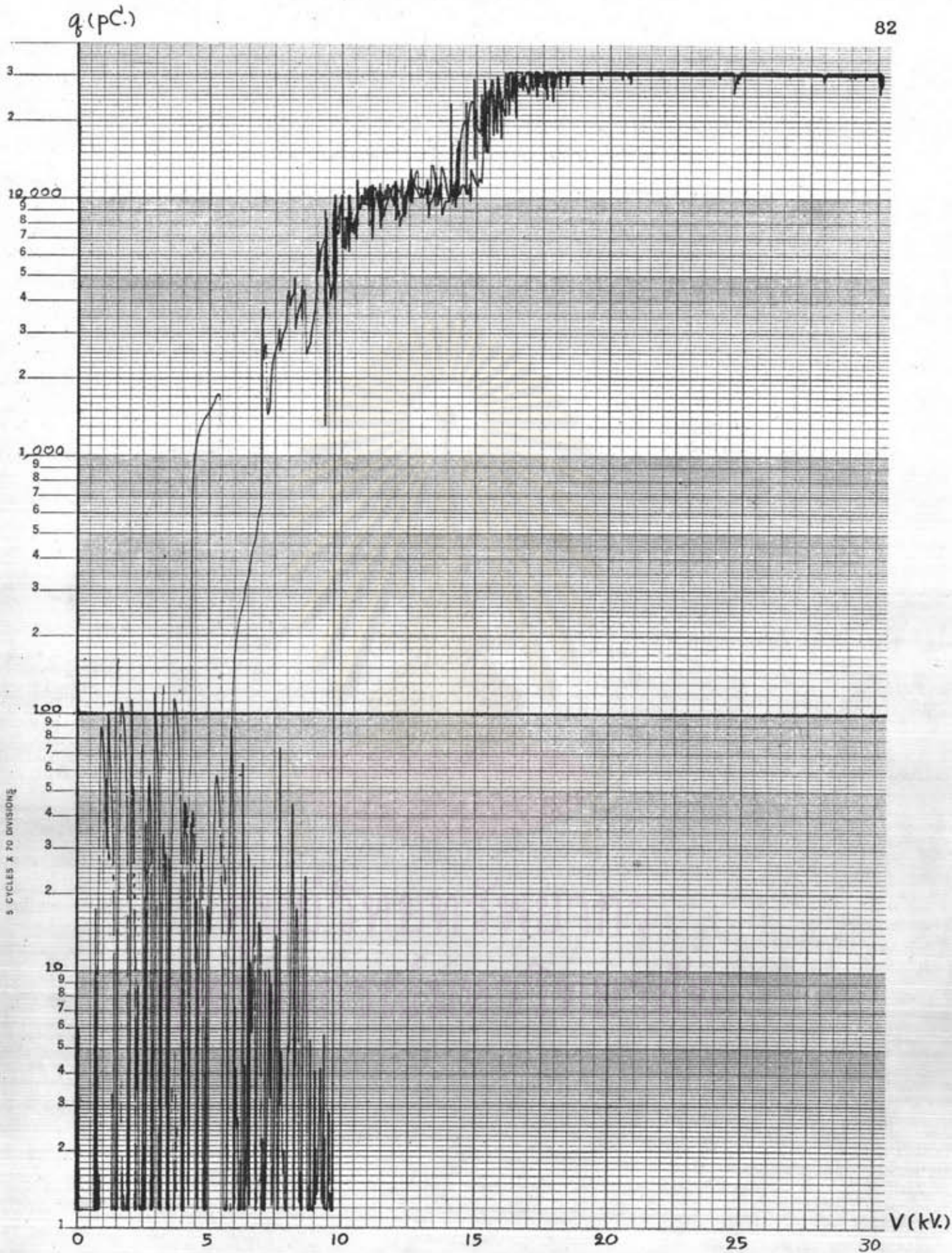
ก) ผลการตรวจจับ PD ของเครื่องที่ออกแบบ

ข) ผลการตรวจจับ PD ของเครื่องบริษัท James G. Biddle

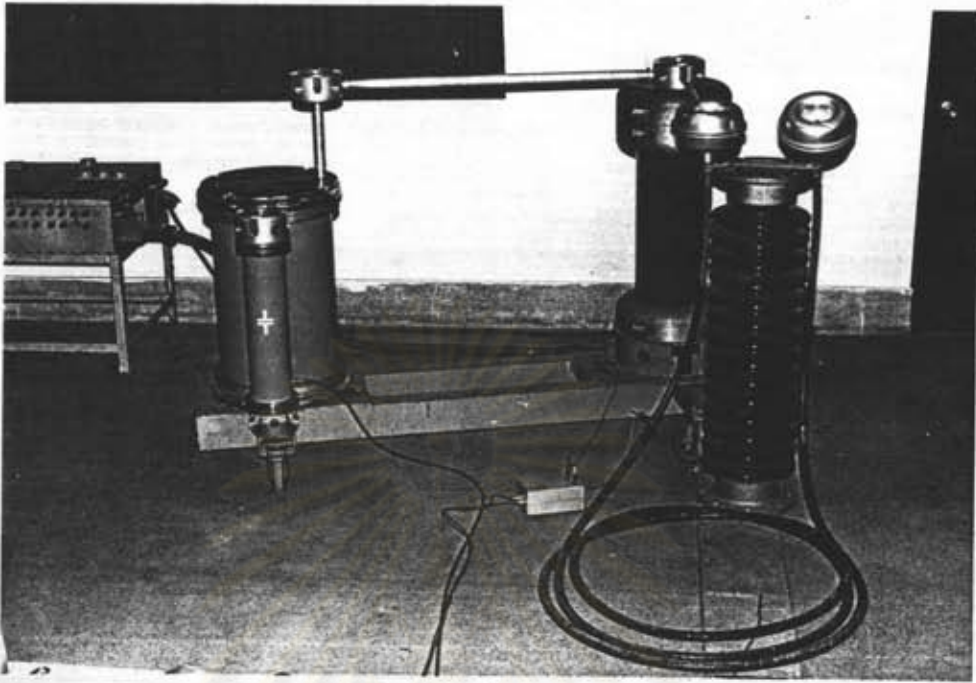
4.3.3 การตรวจจับ PD ภายในเคเบิลแรงสูง

4.3.3.1 การทดสอบเฉพาะแบบ (เคเบิลสั้น $l_k \leq 52.5$ เมตร)

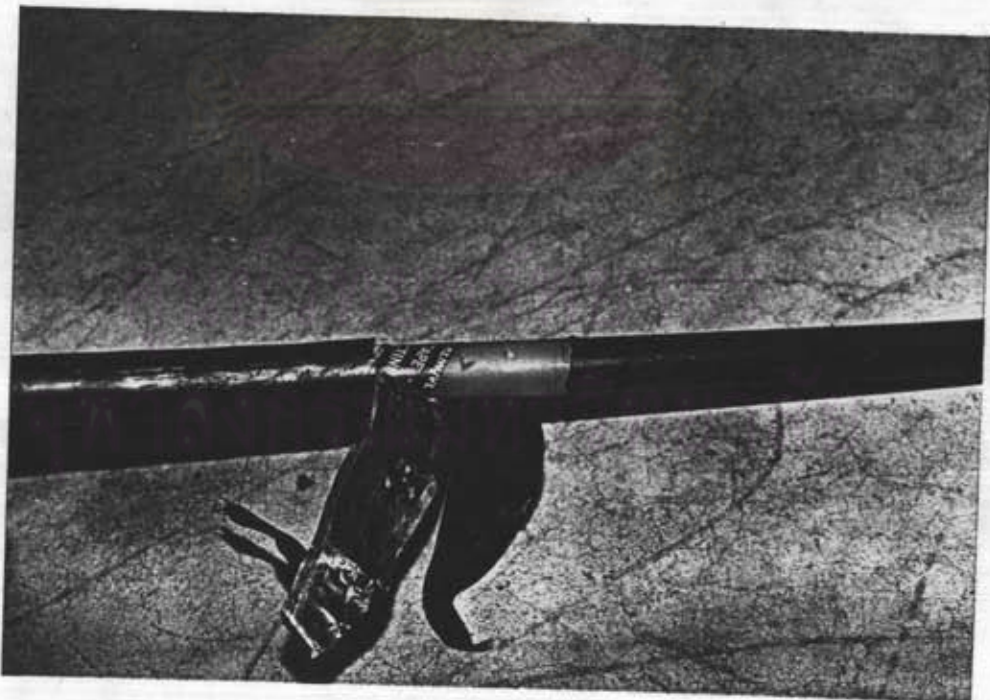
ในการทดสอบนี้ใช้เคเบิลขนาด 25 กิโลโวลต์ 75 ตารางมิลลิเมตร และยาวประมาณ 10 เมตร วงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.15 วงจรอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.17 เมื่อทำการทดสอบที่แรงดัน $1.5U_0 = 21.6$ กิโลโวลต์ พบว่าไม่มี PD เกิดขึ้น จึงได้จำลองการเกิด PD ภายในเคเบิลโดยลอกเทปกึ่งตัวนำและเทปทองแดงออกเพื่อแกะเอาเนื้อฉนวนออกบางส่วน ดังรูปที่ 4.16 แล้วจึงใช้เทปกึ่งตัวนำและเทปทองแดงพันทับดังเดิม จะพบว่าขณะทำการทดสอบที่แรงดัน 14 กิโลโวลต์ จะได้ PD = 168 นิโคโคลอมป์ (เมื่อใช้วงจร "หน้าต่างเวลา" ในการกำจัดสัญญาณรบกวนเนื่องจากการทำงานของโรริสเตอร์ที่อยู่ตรงตำแหน่งเดียวกับ "zero-marker") โดยในรูปที่ 4.17 ก) แสดง PD ในขณะที่มีสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย รูปที่ 4.17 ข) แสดง PD ขณะที่ใช้วงจร "หน้าต่างเวลา" ในการกำจัดสัญญาณรบกวน และรูปที่ 4.17 ค) แสดง PD ซึ่งวัดโดยใช้เครื่องของบริษัท James G. Biddle ค่าที่อ่านได้จากรูปที่ 4.17 ก) และรูปที่ 4.17 ค) จะอ่านค่า PD ได้ประมาณ 320 นิโคโคลอมป์ ซึ่งเป็นค่าที่อ่านผิดพลาดเนื่องจากเครื่องตรวจจับ PD อ่านค่าสัญญาณรบกวนเนื่องจากการทำงานของโรริสเตอร์



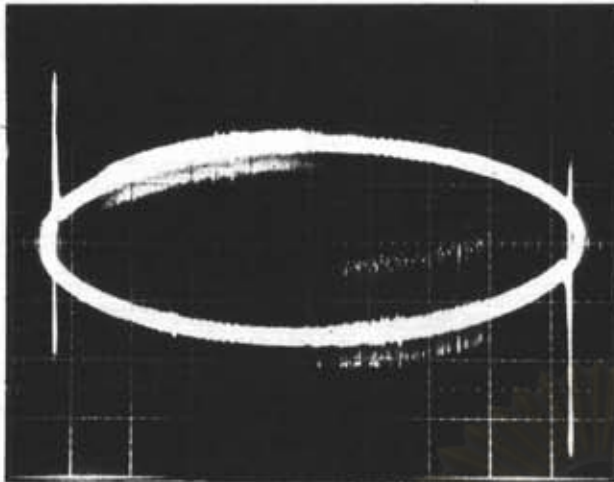
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบห้้อแปลงเมื่อแสดงผลทางเครื่องบันทึก



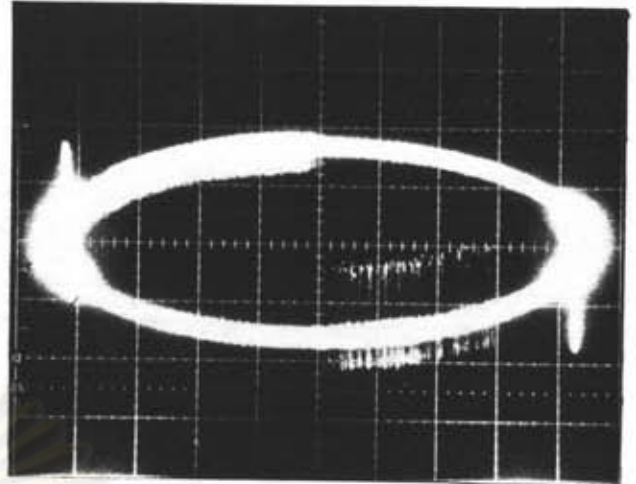
รูปที่ 4.15 วงจรทดสอบเคเบิลเฉพาะแบบ



รูปที่ 4.16 แสดงจุดบกพร่องของเนื้องานที่จำลองขึ้น



ก.) $X = 1 \text{ V/DIV}$
 $Y = 1 \text{ V/DIV}$



ข.) $X = 1 \text{ V/DIV}$
 $Y = 1 \text{ V/DIV}$



$X = 1 \text{ V/DIV}$
 $Y = 0.1 \text{ V/DIV}$

ค.)

รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบเคเบิลเฉพาะแบบเมื่อแสดงผลทางจอภาพ

ก) ผลการตรวจจับ PD โดยใช้เครื่องที่ออกแบบ

ข) ผลการตรวจจับ PD โดยใช้เครื่องที่ออกแบบ

และใช้วิธี "หน้าต่างเวลา"

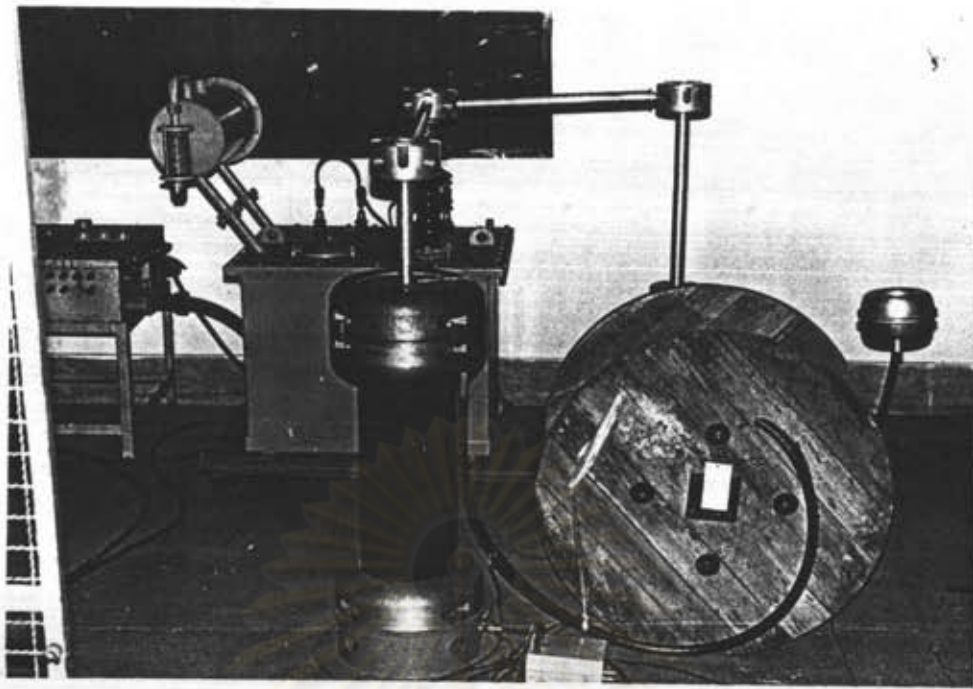
ค) ผลการตรวจจับ PD โดยใช้เครื่องของบริษัท

James G. Biddle

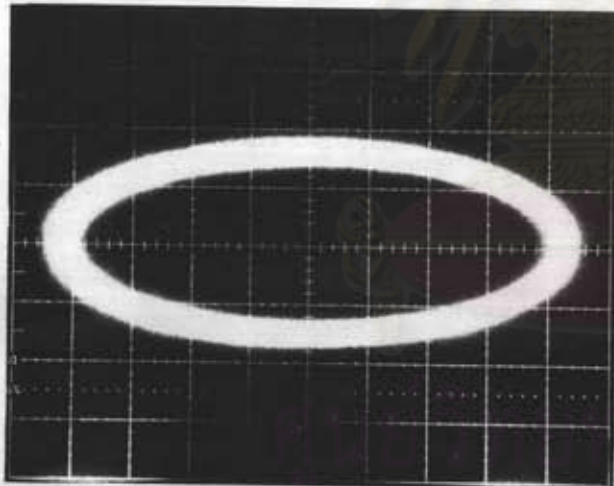
4.3.3.2 การทดสอบประจำ (เคเบิลยาว $l_k > 52.5$ เมตร)

ในการทดสอบนี้ใช้เคเบิลขนาด 24 กิโลโวลต์ 50 ตารางมิลลิเมตร ยาว 75 เมตร วงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.18 โดยทดสอบที่

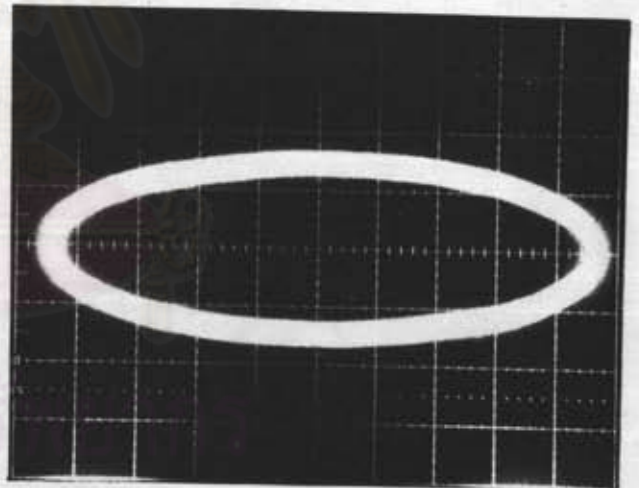
แรงดัน 20.8 กิโลโวลต์ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.19 จะได้ $q_{min} = 13.2$ พิโคคูลอมป์



รูปที่ 4.18 วงจรทดสอบเคเบิลประจำ



ก.) $X = 1 \text{ V/DIV}$
 $Y = 1 \text{ V/DIV}$



ข.) $X = 1 \text{ V/DIV}$
 $Y = 0.1 \text{ V/DIV}$

รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบเคเบิลยาวเมื่อแสดงผลทางจอภาพ

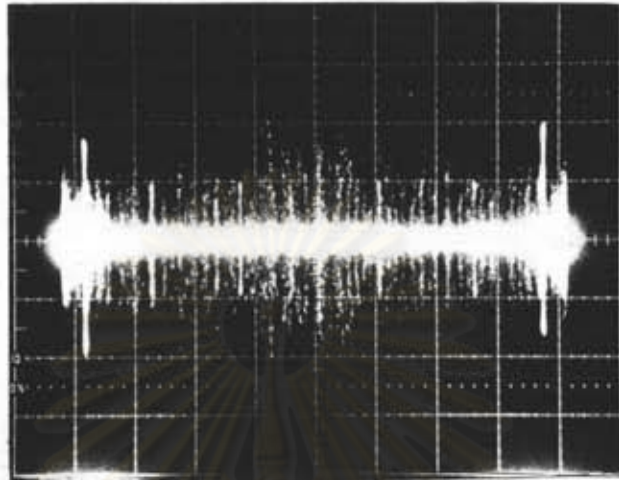
ก) ผลการตรวจจับของเครื่องที่ออกแบบ

ข) ผลการตรวจจับของเครื่องบริษัท James G. Biddle

4.4 เทคนิคการวัด PD ขณะที่มีความเร็วรอบ

การวัดหรือตรวจจับ PD ในทางปฏิบัติจะพบว่ามีสัญญาณรบกวนปะปนเข้ามาด้วยเสมอ ทำให้ค่าที่อ่านได้ผิดพลาด การกำจัดสัญญาณรบกวนที่ซึ่ง โครโนสโคปกับความถี่ของ

แหล่งจ่ายสามารถกำจัดได้โดยใช้วิธี "หน้าต่างเวลา" ซึ่งอธิบายไปแล้วในข้อ 4.3.3.1
 ในกรณีที่สัญญาณรบกวนมากจนไม่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนได้ อาจใช้การแสดงผล PD
 บนฐานเวลาแบบวงรีในแนวราบแล้วจึงทำการอ่านค่า PD โดยตรงจากจอภาพดังรูปที่ 4.20



X = 1 V/DIV

Y = 1 V/DIV

รูปที่ 4.20 การแสดงผล PD บนฐานเวลาแบบวงรีในแนวราบ

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย