บทที่ 4

การทดสอบและการประเมินผล

4.1 บทนำ

เพื่อให้ทราบว่ามัลติเปิลช็อบปิ้งแกปขนาด 400 กิโลโวลต์ ที่ออกแบบสร้างนี้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ต้องการหรือไม่และใช้งานได้ผลมากน้อยเพียงใด จึงต้องทำการทดสอบหาคุณลักษณะที่สำคัญดังต่อไปนี้

ก) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันตามข้อกำหนดของการฉนวน

ข) การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการเบรคดาวน์ของอิเลคโตรดที่ใช้กับอิเลคโตรดแบบทรงกลม

ค) การทดสอบหาพิสัยการกระตุ้นของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

ง) การทดสอบการใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดลักษณะต่างๆ กัน

จ) การทดสอบการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

ฉ) การทดสอบการใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดลักษณะต่างๆ กัน พร้อมกับทำหน้าที่วัด

ช) การทดสอบการใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปเป็นโหลดคะแปซิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

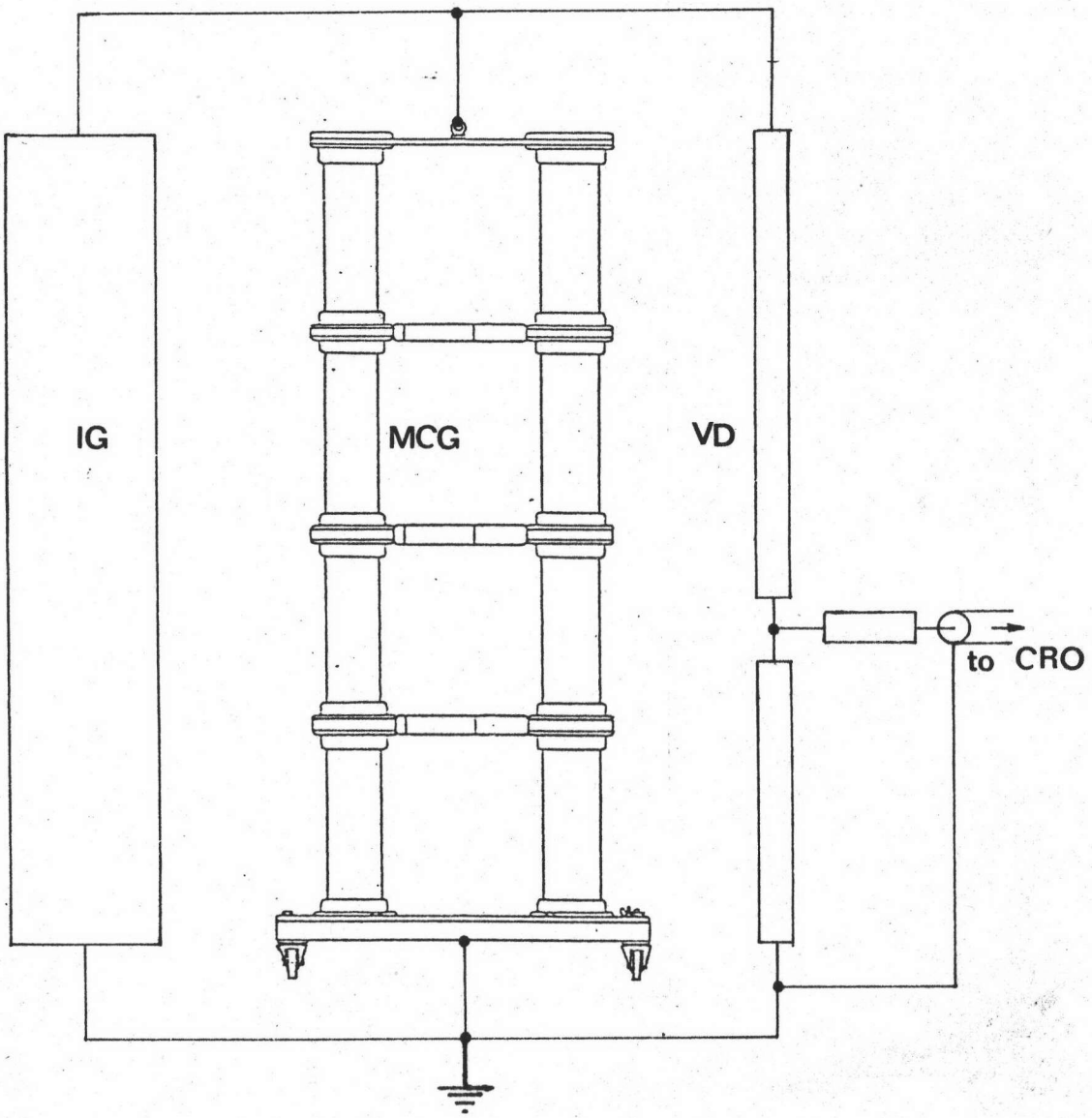
ซ) การทดสอบความคงทนต่อแรงดันที่กำหนด

4.2 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันตามข้อกำหนดของการฉนวน

เพื่อต้องการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเฉพาะการฉนวนของคอลัมน์ทั้งสองที่ทำด้วยท่อฉนวนพีวีซี จึงถอดสปาร์กแกปและองค์ประกอบภายในคอลัมน์ คือ คะแปซิเตอร์และความต้านทานออก ในคอลัมน์ควบคุมแรงดันกระจายยังคงมีน้ำมันหม้อแปลงบรรจุอยู่ ลักษณะการทดสอบดังแสดงในรูป 4.1

การทดสอบทำได้โดยต่อฐานโครงสร้างของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปลงศักย์ดิน แล้วต่อสายนำไฟแรงสูงเข้าที่ห่วงต่อสายนำไฟแรงสูงส่วนบนสุดของโครงสร้างนี้ จากนั้นป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานตามข้อกำหนดขนาด 500 กิโลโวลต์ จำนวน 15 ครั้ง โดยคอยสังเกตุดูการเกิดวาบไฟตามผิวของ

คอลัมน์ การเกิดโคโรน่าหรือการเกิดดีสชาร์จทำลายภายในคอลัมน์ จากการสังเกตไม่พบลักษณะการเกิดดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าท่อพีวีซีที่ใช้ทำคอลัมน์สามารถทนแรงดันตามข้อกำหนดได้ จึงสรุปได้ว่าโครงสร้างนี้เหมาะสมที่จะนำไปใช้กับแรงดันอิมพัลส์ขนาด 400 กิโลโวลต์ ได้อย่างดี



รูป 4.1 แสดงการทดสอบความคงทนต่อแรงดันตามข้อกำหนดของการฉนวน

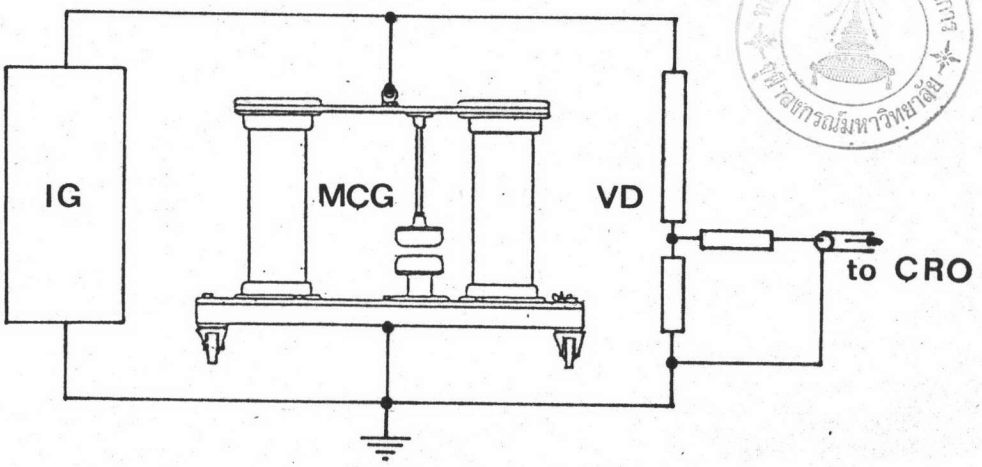
IG - เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

MCG - มัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

VD - โวลเตจดิไวเดอร์

4.3 การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการเบรคดาวน์ของอิเลคโตรดที่ใช้กับอิเลคโตรดแบบทรงกลม

โดยเหตุที่การออกแบบแกปของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ได้ใช้ซันน้ำสะแตนเลสขนาดประมาณ 12.5 เซ็นติเมตร แทนการใช้อิเลคโตรดแบบทรงกลมหรืออิเลคโตรดแบบครึ่งทรงกลมดังที่มีใช้กันอยู่นั้น จึงสมควรทดสอบคุณลักษณะของซันน้ำที่ทำเป็นแกป เพื่อพิจารณาดูความเหมาะสมต่อการนำมาใช้หรือไม่ ในการทดสอบนี้ได้อาศัยโครงสร้างของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปชุดล่างเป็นส่วนช่วยในการจับยึดซันน้ำดังกล่าว ซึ่งภายในคอลัมน์ทั้งสองของโครงสร้างนี้ไม่ได้บรรจุอะไร เพียงแต่ให้ทำหน้าที่ช่วยจับยึดเท่านั้น ลักษณะการติดตั้งทดสอบดังแสดงในรูป 4.2



รูป 4.2 แสดงการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างการเบรคดาวน์ของอิเลคโตรดที่ใช้กับอิเลคโตรดแบบทรงกลม

IG - เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

MCG - มัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

VD - โวลเตจดิไวเดอร์

การทดสอบเพื่อหาค่าแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยป้อนแรงดันเข้าที่ส่วนบนของโครงสร้างจับยึดแกปลูกบน แกปส่วนล่างต่อลงศักย์ดิน การทดลองได้ทดลองที่ระยะแกปต่างๆ กันตั้งแต่ 1 เซ็นติเมตร ถึง 6 เซ็นติเมตร ผลที่ได้จากการทดลองนำไปเทียบกับค่าแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ 50 เปอร์เซ็นต์ ค่ามาตรฐานที่ได้จากแกปแบบทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12.5 เซ็นติเมตร

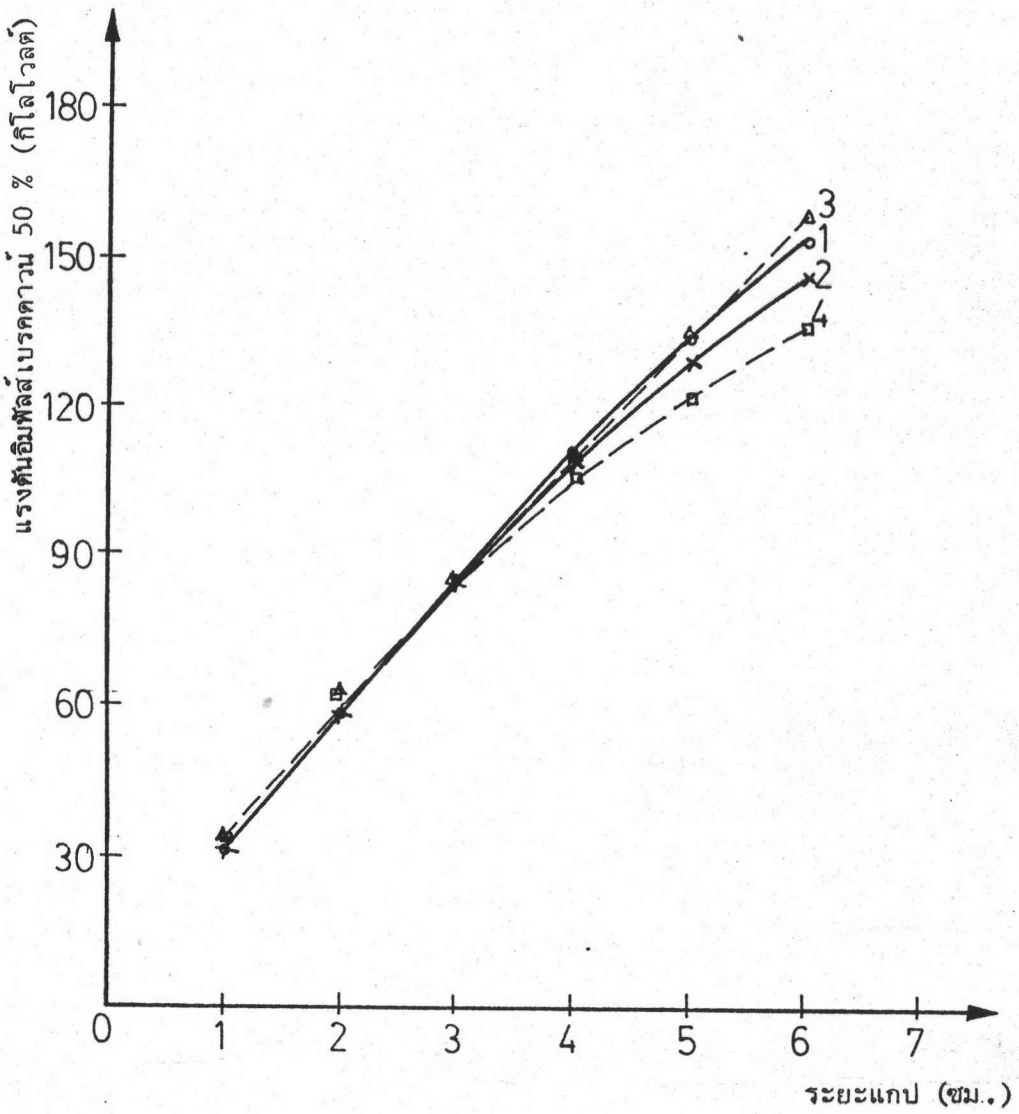
ดังแสดงในตารางที่ 4.1 และนำไปเขียนกราฟดังรูป 4.3

ตารางที่ 4.1

เปรียบเทียบแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ 50 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างอิเลคโตรดที่ใช้กับอิเลคโตรดแบบทรงกลม*

ระยะแกป	แรงดันขั้วบวก (กิโลโวลต์)		แรงดันขั้วลบ (กิโลโวลต์)	
(ซม.)	อิเลคโตรดทรงกลม	อิเลคโตรดที่ใช้	อิเลคโตรดทรงกลม	อิเลคโตรดที่ใช้
1	31.6	33.1	31.5	32.7
2	59.2	60.4	59.2	60.2
3	85.7	85.4	85.2	84.1
4	111.0	110.6	109.0	105.4
5	134.0	134.4	129.0	122.0
6	154.0	158.0	146.0	137.0

* ค่าในตาราง 4.1 เป็นค่าที่สภาวะมาตรฐาน



รูป 4.3 แสดงกราฟค่าแรงดันอิมพัลส์เบรคดาวน์ 50 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างอิเลคโตรดที่ใช้กับอิเลคโตรดแบบทรงกลม

1 หมายถึง อิเลคโตรดแบบทรงกลมขั้ว +

2 หมายถึง อิเลคโตรดแบบทรงกลมขั้ว -

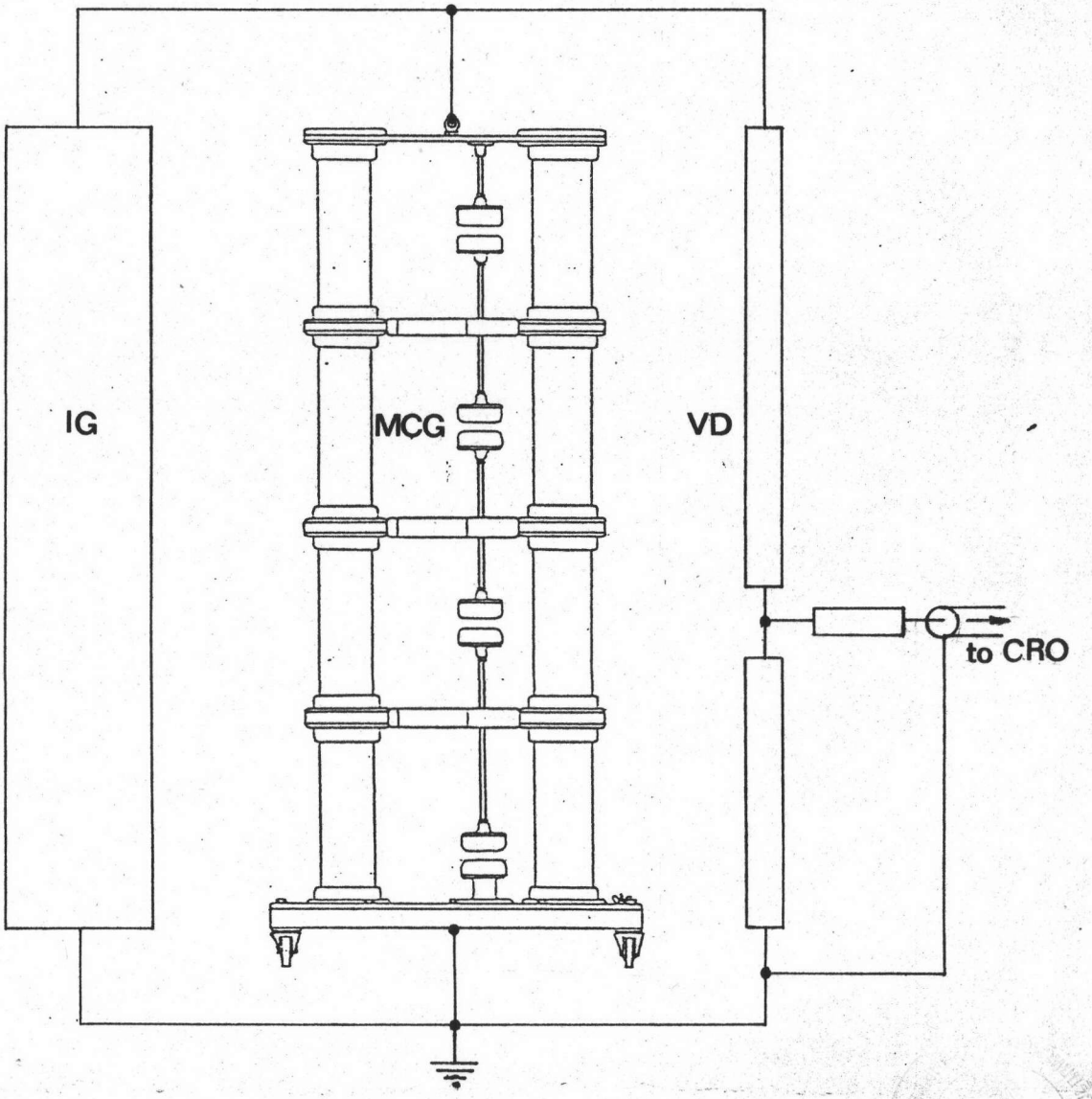
3 หมายถึง อิเลคโตรดแบบที่ใช้ขั้ว +

4 หมายถึง อิเลคโตรดแบบที่ใช้ขั้ว -

จากการเปรียบเทียบค่าที่ได้ในตารางที่ 4.1 และกราฟที่ได้ในรูป 4.3 ระหว่างอีเลคโตรดทั้งสองชนิด จะพบว่าระยะแกปมีค่าอยู่ในช่วงประมาณไม่เกิน 4 เซ็นติเมตร ค่าที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก นั่นหมายความว่าสามารถนำซันน้ำมาใช้ทำหน้าที่แทนอิเลคโตรดทรงกลมได้ โดยเฉพาะในช่วงแรงดันประมาณ 100 กิโลโวลต์ จะให้ค่าแตกต่างกันไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่นำอิเลคโตรดมาใช้ทำมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปนั้น มีวัตถุประสงค์เพียงให้เกิดการเบรคดาวน์ตามเวลาและแรงดันที่กำหนดโดยไม่เกิดพรีดีสชาร์จเช่นเดียวกับอิเลคโตรดทรงกลมที่ใช้วัดแรงดันได้ถึงประมาณ 150 กิโลโวลต์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นเด่นชัดว่าสามารถใช้ซันน้ำทำเป็นสปาร์กแกปในมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปที่ใช้กับแรงดันไม่เกินชั้นละ 100 กิโลโวลต์ ข้อดีของการใช้ซันน้ำเป็นอิเลคโตรดก็คือ มีน้ำหนักเบากว่าทำให้การออกแบบโครงสร้างการจับยึดทำได้ง่ายขึ้น ราคาถูกกว่ามากและหาซื้อได้ง่าย

4.4 การทดสอบหาพิสัยการกระตุ้นของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

การทดสอบหาพิสัยการกระตุ้นของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปนี้ มีจุดประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเบรคดาวน์ของแกปของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป ขณะใช้สัญญาณกระตุ้นช่วยและไม่ใช้สัญญาณกระตุ้นช่วย ทั้งแรงดันอิมพัลส์ชนิดขั้วบวกและขั้วลบ การทดสอบนี้ได้ทดสอบโดยประกอบชุดมัลติเปิล-ช็อบปิ้งแกปมีลักษณะใช้งานจริงดังรูป 4.4 ภายในคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดันจะประกอบบรรจุด้วยคะแปซิเตอร์และความต้านทาน และที่แกปล่างสุดจะมีหัวกระตุ้นประกอบอยู่ด้วย เพื่อทำหน้าที่รับสัญญาณกระตุ้นจากภายนอกเมื่อต้องการให้มีการกระตุ้น



รูป 4.4 แสดงการทดสอบหาพิสัยการกระตุ้นของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

IG - เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

MCG - มัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

VD - โวลเตจดิไวเดอร์

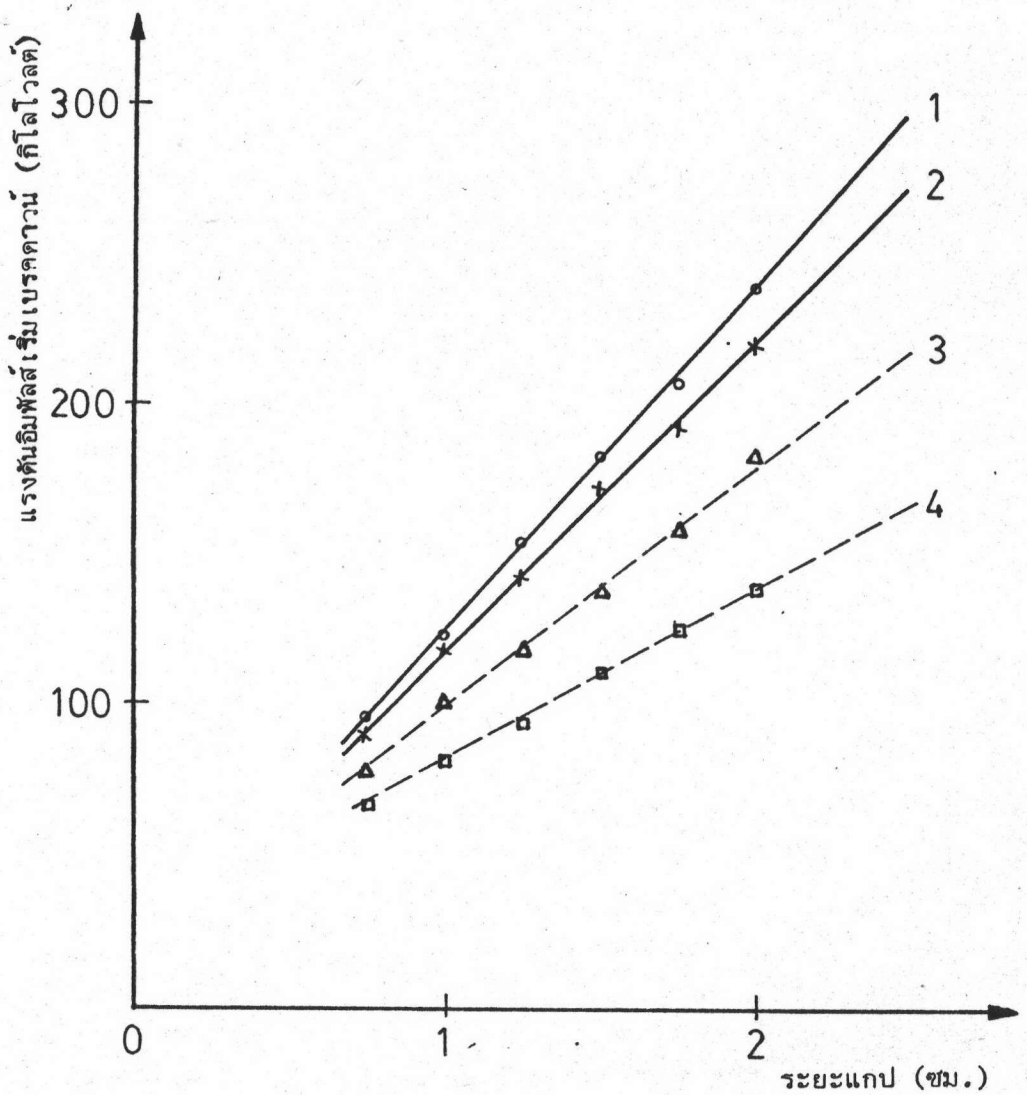
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานเข้าที่ห่วงต่อสายนำแรงสูงและต่อฐานลงศักย์ดิน หาค่าแรงดันเริ่มเบรคดาวน์ที่ระยะแกปตั้งแต่ 0.75 เซ็นติเมตร ถึง 2 เซ็นติเมตร โดยไม่ใช้สัญญาณกระตุ้นช่วยที่แกปลูกล่าง ได้ทดลองทั้งแรงดันอิมพัลส์ชนิดขั้วบวกและแรงดันอิมพัลส์ชนิดขั้วลบ ในทำนองเดียวกันได้ทดลองใช้สัญญาณกระตุ้นช่วยที่แกปลูกล่าง ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 4.2 แล้วนำไปเขียนกราฟดังรูป 4.5 เพื่อหาขีดจำกัดบนและขีดจำกัดล่างของพิสัยการกระตุ้นของการเบรคดาวน์ของแกป

ตารางที่ 4.2

ค่าแรงดันอิมพัลส์เริ่มเบรคดาวน์ของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

ระยะแกป (ซม.)	แรงดันเริ่มเบรคดาวน์ (กิโลโวลต์)			
	ขั้วบวก		ขั้วลบ	
	ไม่ใช้สัญญาณกระตุ้น	ใช้สัญญาณกระตุ้น	ไม่ใช้สัญญาณกระตุ้น	ใช้สัญญาณกระตุ้น
0.75	95.2	76.6	90.0	67.1
1.00	125.0	100.1	117.6	82.6
1.25	153.3	119.4	146.1	94.2
1.50	187.8	137.6	172.3	115.0
1.75	207.5	158.5	195.2	127.6
2.00	238.2	180.3	226.4	138.7



รูป 4.5 แสดงพิสัยการกระตุ้นของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

1 ขีดจำกัดบนของแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกไม่ใช้สัญญาณกระตุ้นช่วยแกปล่าง

2 ขีดจำกัดบนของแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบไม่ใช้สัญญาณกระตุ้นช่วยแกปล่าง

3 ขีดจำกัดล่างของแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกใช้สัญญาณกระตุ้นช่วยแกปล่าง

4 ขีดจำกัดล่างของแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบใช้สัญญาณกระตุ้นช่วยแกปล่าง

จากผลการทดลองที่แสดงในรูป 4.5 จะเห็นได้ว่าพิสัยการกระตุ้นของแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ ซึ่งมีขีดจำกัดบนตามเส้นหมายเลข 2 และขีดจำกัดล่างตามเส้นหมายเลข 4 จะกว้างกว่าพิสัยการกระตุ้นของแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก ซึ่งมีขีดจำกัดบนตามเส้นหมายเลข 1 และขีดจำกัดล่างตามเส้นหมายเลข 3 หมายความว่าเราสามารถควบคุมการเบรคดาวน์ของแกปที่แรงดันขั้วลบ ได้พิสัยการควบคุมที่กว้างกว่าขั้วบวกในขณะที่ระยะแกปเท่ากัน เช่น ที่ระยะแกป 1 เซ็นติเมตร ดังในรูป 4.5 จะเห็นว่าเราสามารถทำให้แกปเกิดการเบรคดาวน์ได้ โดยแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบมีค่าระหว่าง 80 กิโลโวลต์ ถึง 120 กิโลโวลต์ ส่วนการเบรคดาวน์ของแกปโดยแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกจะมีค่าระหว่าง 96 กิโลโวลต์ ถึง 125 กิโลโวลต์ ทั้งหมดนี้จะสำเร็จได้ตามความต้องการเมื่อใช้แกปกระตุ้น ซึ่งสามารถบังคับให้เกิดการเบรคดาวน์ได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ สามารถควบคุมการทำให้เกิดรูปคลื่นตัดของแรงดันอิมพัลส์ได้ ภายในพิสัยการกระตุ้นของแรงดันแต่ละขั้ว

4.5 การทดสอบการใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดลักษณะต่างๆ กัน

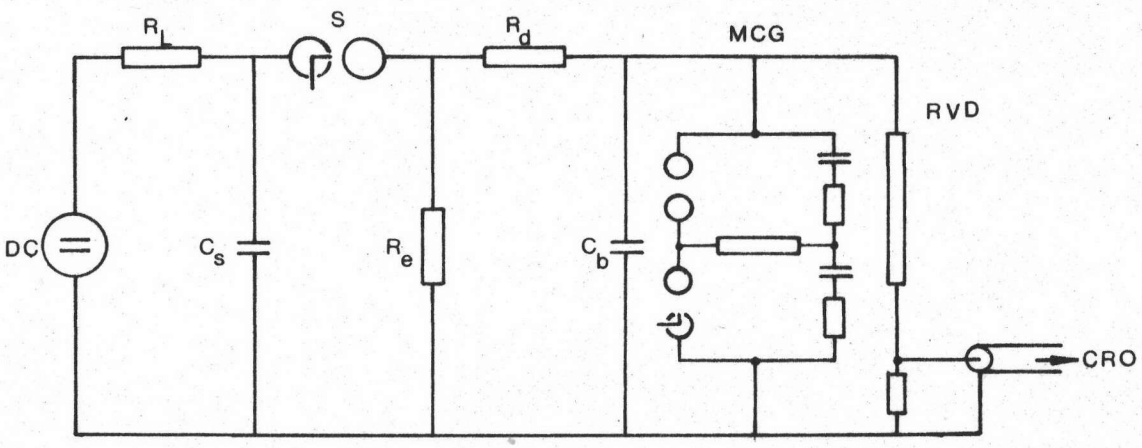
การทดสอบนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่ามัลติเปิลช็อบปิ้งแกป สามารถตัดคลื่นของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มที่กำเนิดมาจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้เป็นอย่างดี โดยมีการทดสอบดังนี้

ก) การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่เวลาช่วงคลื่นตัดต่างๆ กัน แต่ระดับแรงดันค่าเดียวกัน

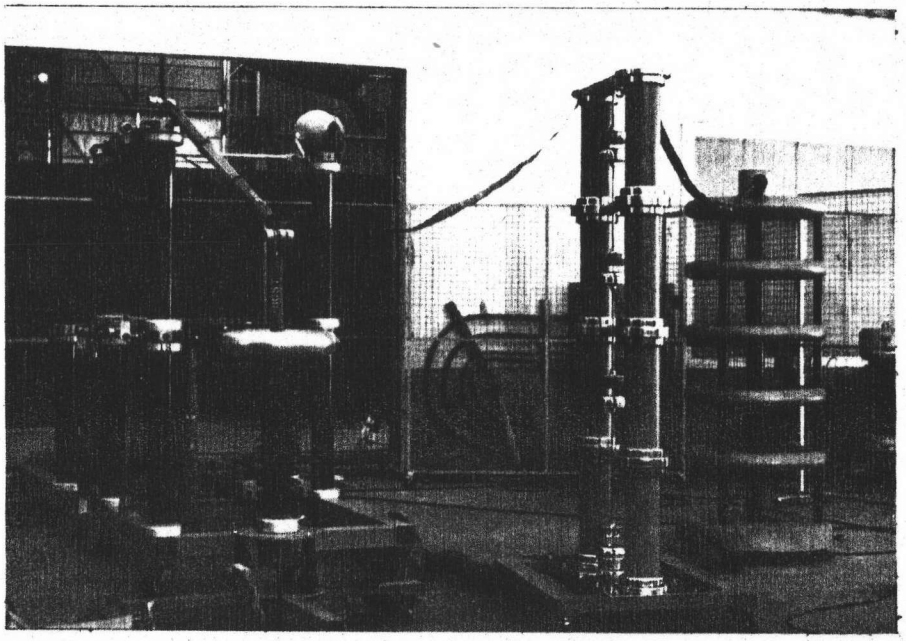
ข) การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่เวลาช่วงคลื่นตัดและแรงดันมีค่าคงที่

ค) การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่เวลาช่วงคลื่นตัดคงที่แต่ระดับแรงดันมีค่าเปลี่ยนไป

การทดสอบนี้กำหนดให้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำหน้าที่ทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดเท่านั้น การดูรูปร่างและขนาดของแรงดันที่เกิดขึ้นใช้โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานขนาด 600 กิโลโวลต์ ของ Haefely ประกอบกับออสซิลโลสโคปของ Tektronix รุ่น 464 และกล้องบันทึกภาพแบบฟิล์มโพลารอยด์ วงจรที่ใช้ทดสอบดังแสดงในรูป 4.6



ก



ข

รูป 4.6 แสดงการทดสอบการใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำให้เกิดรูปคลื่นตัดของแรงดันอิมพัลส์ลักษณะต่างๆ กัน

ก) วงจรการทดสอบ

DC - แหล่งจ่ายไฟตรง

R_L - ความต้านทานจำกัดกระแส

C_s - คะแปซิเตอร์อัดประจุ

S - สปาร์กแกป

R_e - ความต้านทานดีสชาร์จ

ข) ภาพการทดสอบ

R_d - ความต้านทานหน่วง

C_b - โหลดคะแปซิเตอร์

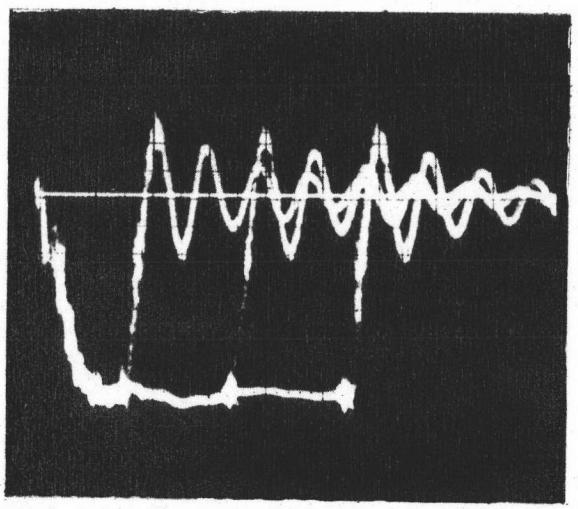
MCG - มัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

RVD - โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

CRO - ออสซิลโลสโคป

4.5.1 การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่เวลาช่วงคลื่นตัดต่างๆ กันแต่ระดับแรงดันค่าเดียวกัน

การทดลองนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่ามัลติเปิลช็อบปิ้งแกปสามารถทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่ช่วงเวลาการตัดต่างๆ กันแต่ระดับแรงดันค่าเดียวกันได้ โดยใช้วงจรดังรูป 4.6 การทดลองทำโดยทดลองกับแรงดันอิมพัลส์ชนิดขั้วลบก่อน การตั้งเวลาช่วงคลื่นตัดใช้ตั้งเวลาที่ตู้ควบคุม โดยกำหนดให้ตู้ควบคุมส่งสัญญาณไปกระตุ้นแกปล่างของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปที่เวลา 2 ไมโครวินาที เวลานี้เทียบกับสัญญาณที่ส่งไปกระตุ้นแกปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ จากนั้นชาร์จแรงดันไฟตรงขั้วลบให้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ แล้วกดปุ่มทริกเกอร์ (trigger) สัญญาณพัลส์กระตุ้นจะถูกส่งออกไปยังแกปกระตุ้นของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ ทำให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ทำงานสร้างแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบส่งไปยังมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปและโวลเตจดิไวเดอร์ เมื่อถึงเวลา 2 ไมโครวินาที ตามที่ตั้งเอาไว้ตู้ควบคุมจะส่งสัญญาณพัลส์กระตุ้นไปกระตุ้นให้แกปล่างของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำงาน จะทำให้เกิดรูปคลื่นตัดของแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาช่วงคลื่นตัด 2 ไมโครวินาที ในทำนองเดียวกันด้วยชาร์จเท่าเดิมที่ป้อนให้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ แต่ตั้งเวลาช่วงคลื่นตัดที่ตู้ควบคุมเป็น 4 และ 6 ไมโครวินาที ตามลำดับ แล้วกดปุ่มทริกเกอร์จะเกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่มีเวลาช่วงคลื่นตัด 4 และ 6 ไมโครวินาที ตามลำดับ เมื่อบันทึกภาพที่เกิดขึ้นด้วยกล้องบันทึกภาพจะได้ภาพแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดชนิดขั้วลบที่มีเวลาช่วงคลื่นตัด 2, 4 และ 6 ไมโครวินาที ตามลำดับ โดยที่มีขนาดแรงดันคงที่ค่าเดียวกันดังแสดงในรูป 4.7



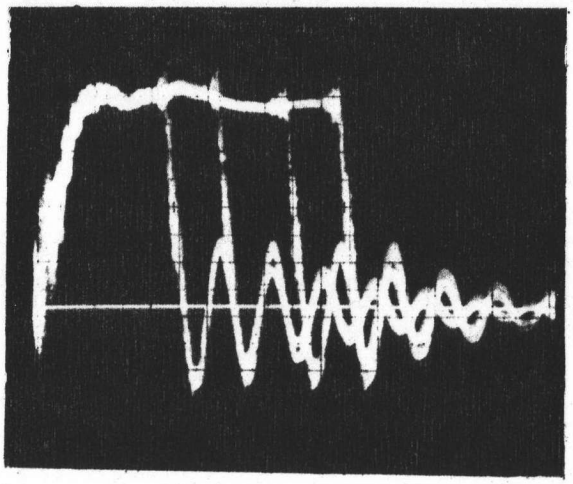
สเกลแกนเวลา 1 μs/div.

T_c = 2, 4 และ 6 μs

ขนาดแรงดัน 202.5 kV

รูป 4.7 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดชนิดขั้วลบที่แรงดันคงที่แต่เวลาช่วงคลื่นตัดต่างกัน

การทดลองสำหรับแรงดันอิมพัลส์ชนิดขั้วบวก ได้ทดลองเช่นเดียวกับชนิดขั้วลบ แต่ได้ทดลองเปลี่ยนเวลาช่วงคลื่นตัดไปเป็น 2, 3, 4 และ 5 ไมโครวินาที ดังแสดงในรูป 4.8



สเกลแกนเวลา 1 μs/div.

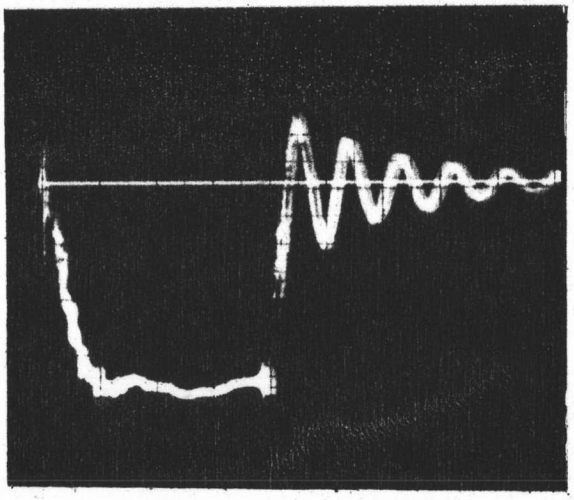
T_c = 2, 3, 4 และ 5 μs ขนาดแรงดัน 210 kV

รูป 4.8 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดชนิดขั้วบวกที่แรงดันคงที่แต่เวลาช่วงคลื่นตัดต่างกัน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การทำให้เกิดรูปคลื่นตัดของแรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลาช่วงคลื่นตัดต่างๆ กัน ที่แรงดันค่าเดียวกันโดยใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกป ทำได้ทั้งชนิดขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ทดสอบวัสดุที่มาตรฐานได้กำหนดเวลาช่วงคลื่นตัดค่าต่างๆ ไว้

4.5.2 การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่เวลาช่วงคลื่นตัดและค่าของแรงดันคงที่

การทดสอบนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่ามัลติเปิลช็อบปิ้งแกปสามารถทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่เวลาช่วงคลื่นตัดเท่าเดิมและค่าแรงดันเท่าเดิมได้ การทดลองทำโดยใช้วงจรดังรูป 4.6 โดยการตั้งเวลาช่วงคลื่นตัดที่ 4 ไมโครวินาที กระตุ้นให้เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์และมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำงาน แล้วบันทึกภาพเอาไว้ ทำการทดลองเช่นนี้ซ้ำกันจำนวน 5 ครั้ง จะได้แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดมีเวลาช่วงคลื่นตัด 4 ไมโครวินาที ทั้ง 5 ครั้ง ดังแสดงในรูป 4.9

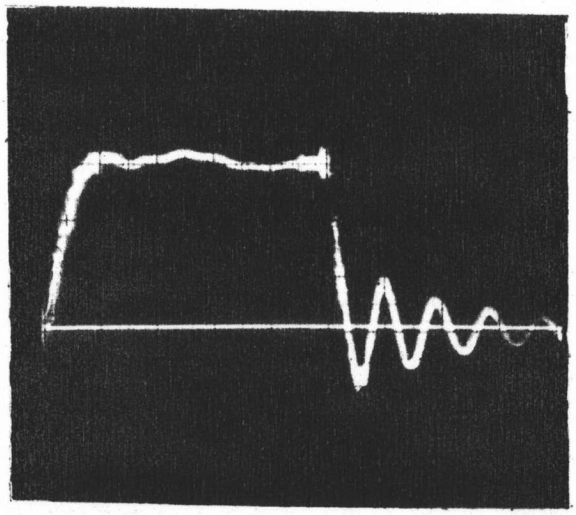


สเกลแกนเวลา 1 μs/div.

T_c = 4 μs ขนาดแรงดัน 202.5 kV

รูป 4.9 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดขั้วลบที่เวลาช่วงคลื่นตัดและแรงดันคงที่

การทดลองสำหรับแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกก็เช่นเดียวกับขั้วลบ แต่ได้ทดลองเปลี่ยนเวลาช่วงคลื่นตัดไปเป็น 5 ไมโครวินาที ดังแสดงในรูป 4.10



สเกลแกนเวลา 1 μs/div.

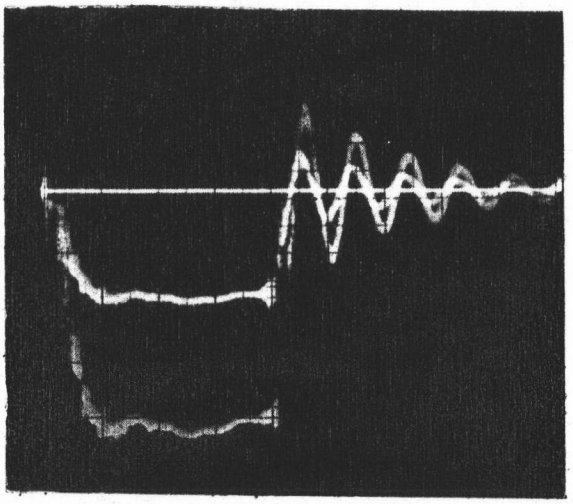
T_c = 5 μs ขนาดแรงดัน 165 kV

รูป 4.10 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดขั้วบวกที่เวลาช่วงคลื่นตัดและแรงดันคงที่

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการควบคุมให้เกิดคลื่นตัดแรงดันอิมพัลส์มีเวลาช่วงคลื่นตัดเท่ากันที่แรงดันเท่ากันนั้น ทำได้โดยใช้มัลติเปิลซ็อบปิ้งแกป ดังในรูป 4.9 และรูป 4.10 เป็นการทดลองทำให้เกิดคลื่นตัดที่เวลาช่วงคลื่นตัดเท่าเดิมที่ตั้งไว้ ป้อนแรงดัน 5 ครั้ง ได้ภาพซ้อนออกมาซ้ำที่เดิมทั้ง 5 ครั้ง การควบคุมให้เกิดคลื่นตัดที่เวลาช่วงคลื่นตัดได้ตามที่ต้องการนี้ เหมาะสำหรับนำไปใช้ทดสอบกับวัสดุทดสอบที่มาตรฐานกำหนดให้มีการทดสอบด้วยรูปคลื่นตัดเท่ากันมากกว่าหนึ่งครั้ง

4.5.3 การทำให้เกิดรูปคลื่นตัดของแรงดันอิมพัลส์ที่เวลาช่วงคลื่นตัดเท่ากันที่ค่าแรงดันต่างๆ

การทดสอบนี้เพื่อแสดงให้เห็นว่ามัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปสามารถทำให้เกิดรูปคลื่นตัดของแรงดันอิมพัลส์ที่ช่วงเวลาคลื่นตัดเท่ากันแต่ค่าแรงดันอิมพัลส์ไม่เท่ากัน การทดสอบยังคงใช้วงจรดังรูป 4.6 วิธีการทดสอบคล้ายกับการทดสอบในข้อ 4.5.1 เพียงแต่ทดลองที่ระดับค่าแรงดันแตกต่างกัน โดยกำหนดให้เวลาช่วงคลื่นตัดเท่ากัน ดังแสดงในรูป 4.11 ซึ่งเป็นแรงดันอิมพัลส์ชนิดขั้วลบ โดยทดลองที่ระดับแรงดันอิมพัลส์ต่างกันสองค่า กำหนดให้เวลาช่วงคลื่นตัดเท่ากับ 4 ไมโครวินาที

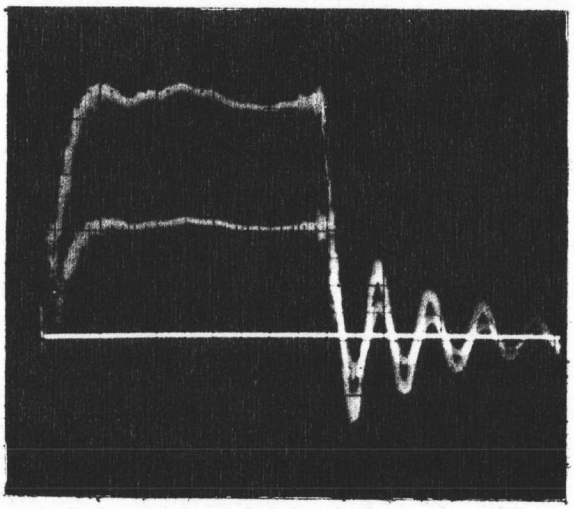


สเกลแกนเวลา 1 μs/div.

T_c = 4 μs ขนาดแรงดัน 236.2 kV และ 105 kV

รูป 4.11 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดขั้วลบที่เวลาช่วงคลื่นตัดเท่ากันที่ค่าแรงดันต่างๆ

การทดลองสำหรับขั้วบวกก็เช่นเดียวกันกับขั้วลบเพียงแต่ทดลองเปลี่ยนเวลาช่วงคลื่นตัดไปเป็น 5 ไมโครวินาที ดังแสดงในรูป 4.12



สเกลแกนเวลา 1 μs/div.

T_c = 5 μs ขนาดแรงดัน 240 kV และ 112.5 kV

รูป 4.12 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดขั้วบวกที่เวลาช่วงคลื่นตัดเท่ากันที่ค่าแรงดันต่างๆ

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า แม้ขนาดแรงดันจะเพิ่มขึ้นถึงสองเท่าก็ยังสามารถใช้มัลติเปิล-ช็อบปิ้งแกปควบคุมให้เกิดคลื่นตัดที่เวลาช่วงคลื่นตัดเท่ากันตามที่กำหนดได้ ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปใช้งานในกรณีที่ต้องทดสอบด้วยแรงดันขนาดต่างกันมาก และกำหนดค่าเวลาช่วงคลื่นตัดที่แน่นอน

4.6 การทดสอบการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดันของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

ดังที่กล่าวไว้แล้วว่าได้ออกแบบให้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปมีคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดันเป็นคะแปซิเตอร์ ซึ่งสามารถใช้เป็นโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำได้ จึงต้องทดสอบลักษณะสมบัติคอลัมน์คะแปซิเตอร์ที่ใช้เป็นโวลเตจดิไวเดอร์ดังกล่าว โดยมีการทดสอบตามลำดับขั้นดังนี้

ก) ทดสอบผลตอบสนองรูปขั้นและเวลาตอบสนอง

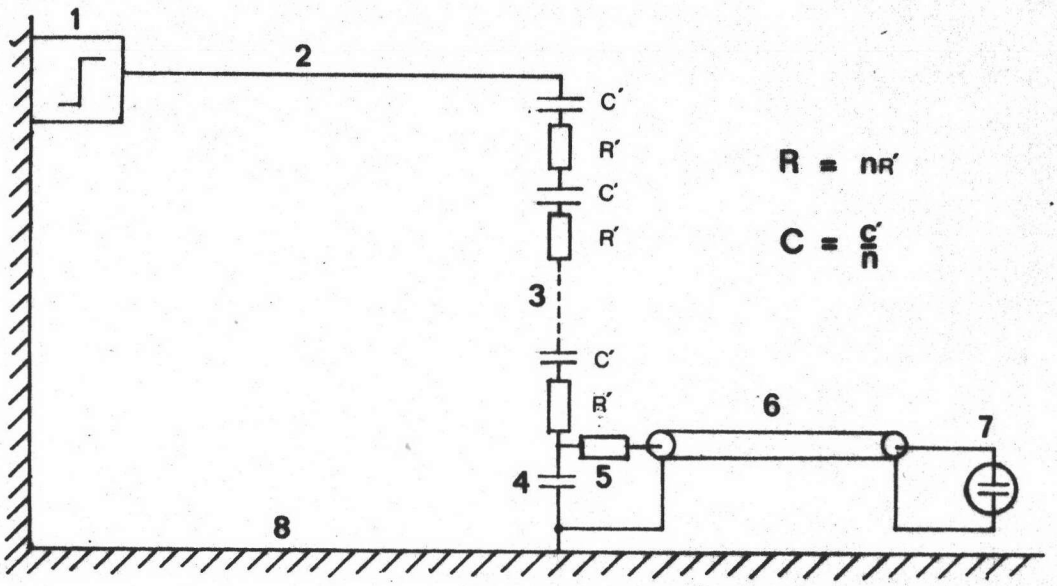
ข) ทดสอบหาอัตราส่วนแรงดัน

ค) ทดสอบการวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

4.6.1 การทดสอบผลตอบสนองรูปขั้นและเวลาตอบสนองของคอลัมน์โวลเตจดิไวเดอร์

การทดสอบผลตอบสนองรูปขั้นและหาเวลาตอบสนองของคอลัมน์โวลเตจดิไวเดอร์ นี้ได้ใช้

วงจรการทดสอบตามแบบวงจรการหาผลตอบสนองรูปขั้นของโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำ {15} ลักษณะวงจรประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น ติดตั้งอยู่สูงเท่ากับความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ ต่อด้วยสายนำในแนวนอนจากเครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้นไปยังส่วนบนของโวลเตจดิไวเดอร์ โดยมีขนาดความยาวประมาณเท่ากับความสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ {13} ภาคแรงดันต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์จะต่ออยู่กับสายเคเบิลวัดตรงไปยังออสซิลโลสโคป ดังแสดงในรูป 4.13



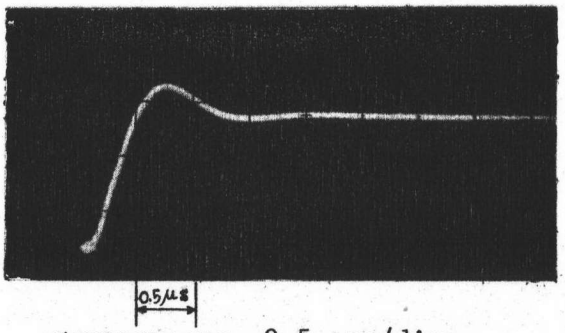
รูป 4.13 วงจรการทดสอบผลตอบสนองรูปขั้น

1. เครื่องกำเนิดแรงดันรูปขั้น
2. สายนำในแนวนอน
3. ภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์
4. ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์
5. ความต้านทานแมทชิ่ง
6. สายเคเบิลวัด
7. ออสซิลโลสโคป
8. สายดิน

จากวงจรการทดสอบดังในรูป 4.13 นำไปหาผลตอบสนองรูปขั้นและเวลาตอบสนองดังต่อไปนี้

ก) การหาผลตอบสนองรูปขั้น การหาผลตอบสนองรูปขั้นได้จากการป้อนแรงดันรูปขั้นให้กับคอลัมน์โวลเตจดิไวเดอร์ ตามลักษณะวงจรในรูป 4.13 แล้วบันทึกผลตอบสนองทางขาออกด้วย

ออสซิลโลสโคป ดังภาพถ่ายผลตอบสนองรูปขั้นในรูป 4.14



สเกลแกนเวลา 0.5 μs/div.

รูป 4.14 ผลตอบสนองรูปขั้นของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

ข) การหาเวลาตอบสนอง T ดังที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ว่าเวลาตอบสนอง T คือ ผลรวมทางพีชคณิตของพื้นที่ระหว่างเส้นอัมปลิจูดหนึ่งหน่วย กับผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย ฉะนั้นเวลาตอบสนองของคอลัมน์โวลเตจดิไวเดอร์นี้หาได้จากภาพถ่ายของผลตอบสนองรูปขั้นในรูป 4.14 จะได้เวลาตอบสนอง 120 นาโนวินาที ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสากลไออีซี {8} กำหนดไว้ ดังนั้นคอลัมน์คะแปซิเตอร์ควบคุมการกระจายแรงดันของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปที่ออกแบบไว้ ใช้เป็นโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ได้ด้วย

4.6.2 การทดสอบหาอัตราส่วนแรงดันของคอลัมน์คะแปซิเตอร์โวลเตจดิไวเดอร์

การหาอัตราส่วนแรงดันของคอลัมน์คะแปซิเตอร์ควบคุมแรงดันกระจายที่ใช้ทำเป็นโวลเตจดิไวเดอร์หาได้

ก) โดยวิธีคำนวณจากอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำหาได้จากอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ทำนองเดียวกับโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์ {13} นั่นคือ

$$a = \frac{c_1 + c_2 + c_c}{c_1}$$

เมื่อ a = อัตราส่วนแรงดัน

c_1 = คะแปซิแตนซ์ภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ได้จากการวัด (nF)

c_2 = คะแปซิแตนซ์ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์ที่ได้จากการวัด (nF)

c_c = คะแปซิแตนซ์ของสายเคเบิลวัดมีค่าประมาณ 67 pF/m (nF) {14}

คะแปซิแตนซ์ภาคแรงสูงของคอลัมน์โวลเตจดิไวเดอร์วัดด้วยเชียริ่งบริดจ์ได้ 0.365นาโนฟารัด คะแปซิแตนซ์ภาคแรงต่ำชุดที่ใช้กับอิมพัลส์ออสซิลโลสโคปได้ 184.4นาโนฟารัด และชุดที่ใช้กับออสซิล-โลสโคปธรรมดาได้ 2020.1 นาโนฟารัด ความยาวสายเคเบิลวัดที่ใช้กันภายในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงประมาณ 20 เมตร จะมีค่าคะแปซิแตนซ์ประมาณ 1.34 นาโนฟารัด เมื่อแทนค่าที่วัดได้ในสมการที่ (4.1) จะได้อัตราส่วนอิมพีแดนซ์สำหรับชุดที่ต้องการแรงดันขาออกสูง และชุดที่ต้องการแรงดันขาออกต่ำตามลำดับได้นำมาคำนวณหาอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ข) โดยวิธีวัดค่าเทียบกับระบบการวัดที่ทราบอัตราส่วนแรงดันแล้ว วิธีนี้ทำโดยวัดค่าแรงดันอิมพัลส์เทียบกับคะแปซิเตอร์โวลเตจดิไวเดอร์มาตรฐานขนาดแรงดันอิมพัลส์ 400 กิโลโวลต์ ของ Heafely ที่มีอยู่ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง โดยประกอบเข้ากับโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดชนิดดิจิตอลของ Heafely เช่นกัน การทดลองทำได้โดยป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้กับคอลัมน์โวลเตจดิไวเดอร์ของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปและโวลเตจดิไวเดอร์มาตรฐานพร้อมกัน แล้วอ่านค่าแรงดันจากดิจิตอลโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดที่ได้จากดิไวเดอร์มาตรฐาน ทดลองปรับอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ของคอลัมน์โวลเตจดิไวเดอร์ของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป จนกระทั่งค่าแรงดันอิมพัลส์ที่อ่านจากดิจิตอลโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดมีค่าเท่ากับค่าแรงดันอิมพัลส์ที่อ่านจากดิจิตอลโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอดของโวลเตจดิไวเดอร์มาตรฐาน ค่าที่ได้นี้ก็คืออัตราส่วนแรงดันของคอลัมน์โวลเตจดิไวเดอร์ของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป เมื่อได้อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นแล้ว ทดลองใช้วัดเปรียบเทียบที่ระดับแรงดันค่าต่างๆ กัน เพื่อตรวจสอบความคงที่ของอัตราส่วนแรงดัน จากผลการทดลองจะได้ค่าอัตราส่วนแรงดันของคอลัมน์โวลเตจดิไวเดอร์ที่ให้แรงดันขาออกสูง และชุดที่ให้แรงดันขาออกต่ำดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3

อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้น

จากคอลัมน์คะแปซิเตอร์ควบคุมการกระจายแรงดันของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

แรงดันขาออก ภาคแรงต่ำ	อัตราส่วนแรงดัน		ความคลาดเคลื่อน $E = \frac{a_c - a_m}{a_m} \times 100\ \%$
	คำนวณ a_c	วัดเปรียบเทียบ a_m	
สูง	510	512.6	0.51
ต่ำ	6025	6100.0	0.79

นอกจากนี้ได้ทดลองวัดเปรียบเทียบค่าของแรงดันดังตารางที่ 4.4

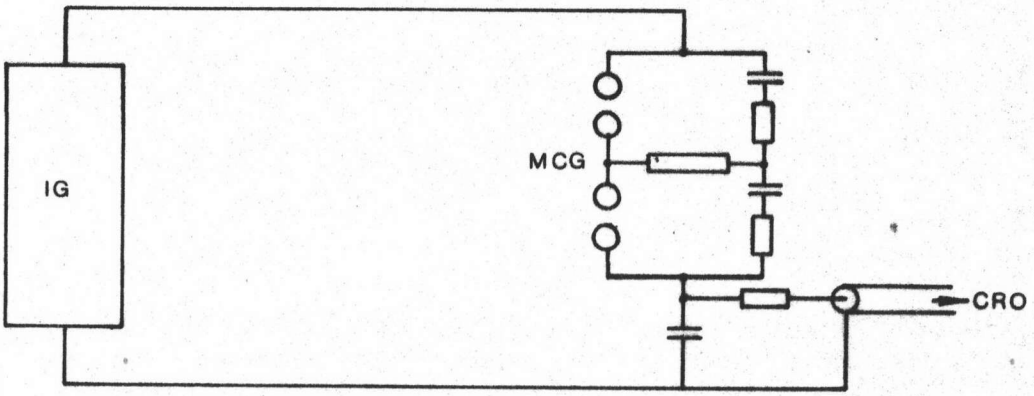
ตารางที่ 4.4

เปรียบเทียบผลทดสอบการวัดค่าแรงดัน

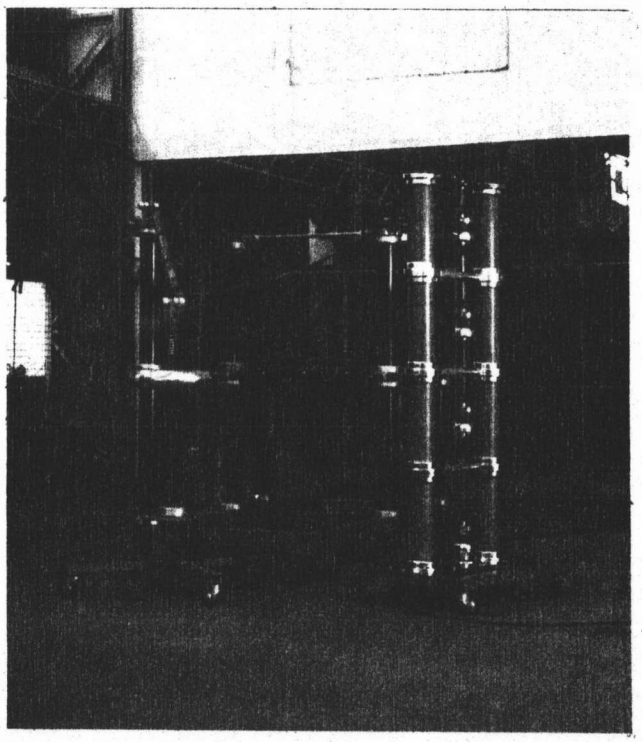
V (กิโลโวลต์)	$V_{ref.}$ (กิโลโวลต์)	ความคลาดเคลื่อน $E = \frac{V - V_{ref.}}{V_{ref.}} \times 100\ \%$
138.5	140.0	1.07
158.0	160.0	1.25
178.5	180.5	1.11
217.0	219.5	1.14

4.6.3 ใช้คอลัมน์คะแปซิเตอร์โวลเตจดิไวเดอร์ของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

จากผลการทดสอบผลตอบสนองรูปขั้นและเวลาตอบสนองในหัวข้อ 4.6.1 แสดงให้เห็นว่าคอลัมน์คะแปซิเตอร์ของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปสามารถใช้เป็นโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ได้ จึงได้ทดลองวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มทั้งชนิดขั้วบวกและขั้วลบดังวงจรในรูป 4.15 ผลการทดลองวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มขั้วลบและขั้วบวกดังในรูป 4.16 ก. และ 4.16 ข. ตามลำดับ



ก



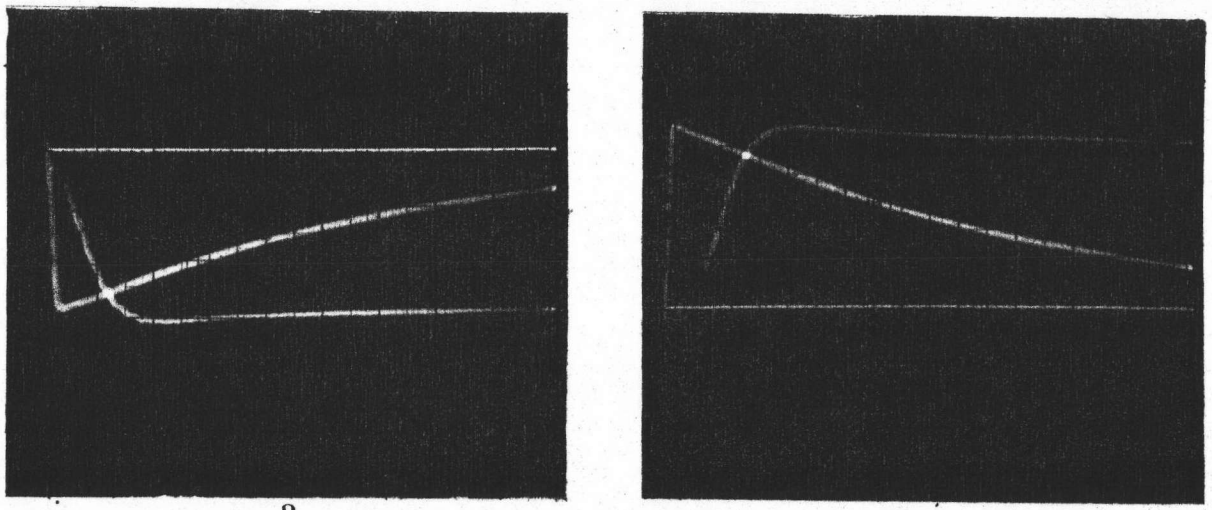
ข

ทอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูป 4.15 แสดงการทดสอบการใช้คอลัมน์คะแปซิเตอร์โวลเตจดิไวเดอร์ของมัลติเบิลช็อบบิ้งแกปวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

ก. วงจรการทดสอบ ข. ภาพการทดสอบ

IG - เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ MCG - มัลติเบิลช็อบบิ้งแกป



ก ข

สเกลแกนเวลาช่วงหน้าคลื่น 1 μs/div. และ สเกลแกนเวลาช่วงหางคลื่น 10 μs/div.

รูป 4.16 ผลการทดลองใช้คอลัมน์คะแปซิเตอร์โวลเตจดิไวเดอร์ของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปวัดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็ม

ก. รูปคลื่นลบ ขนาดแรงดัน 172.5 kV

ข. รูปคลื่นบวก ขนาดแรงดัน 180 kV

4.7 การทดสอบการใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดพร้อมกับวัดแรงดัน

การทดสอบนี้กำหนดให้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำหน้าที่ ทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดลักษณะต่างๆ และใช้คอลัมน์โวลเตจดิไวเดอร์วัดแรงดัน โดยมีการทดสอบดังต่อไปนี้

ก) การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดพร้อมกับวัดแรงดัน

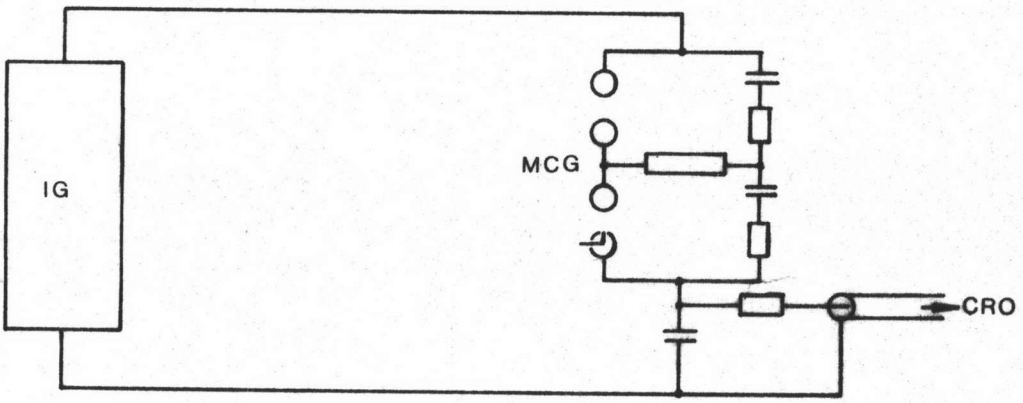
ข) การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดและวัดแรงดันที่เวลาช่วงคลื่นตัดต่างๆ ที่ระดับแรงดันค่าเดียว

ค) การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดและวัดแรงดันที่เวลาช่วงคลื่นตัดและแรงดันคงที่

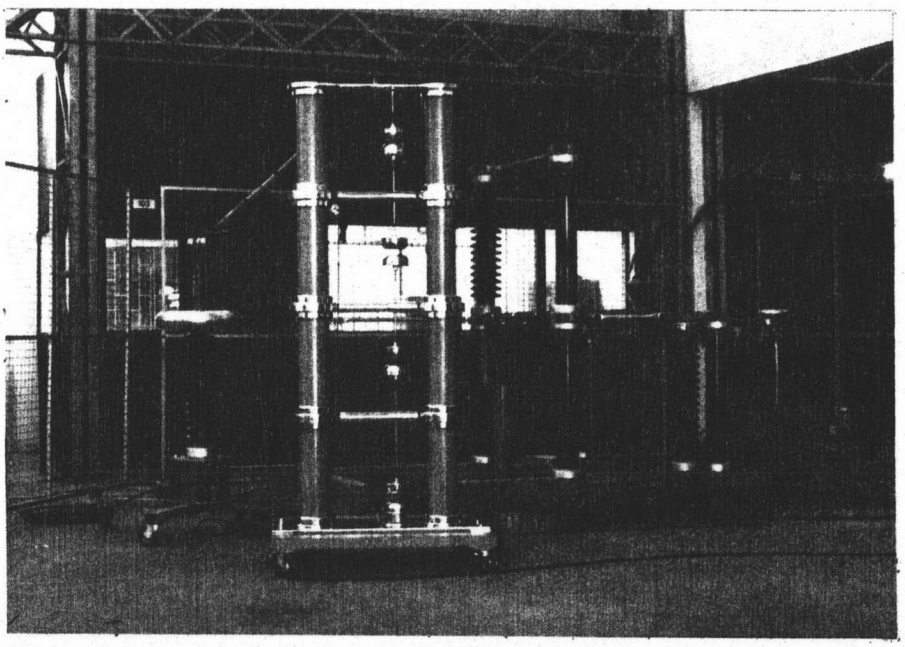
ง) การทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดและวัดแรงดันที่เวลาช่วงคลื่นตัดคงที่ แต่ระดับแรงดันมีค่าเปลี่ยนไป

วงจรที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์โหลดคะแปซิเตอร์ และมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปซึ่งทำหน้าที่ให้เกิดคลื่นตัดด้วยสปาร์กแกปและคอลัมน์คะแปซิเตอร์ใช้เป็นโวลเตจดิ-

ไวเดอร์วัดแรงดัน นั่นคือ ให้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำงานทั้งสองหน้าที่ไปพร้อมๆ กัน วงจรและภาพถ่ายส่วนประกอบดังรูป 4.17



ก



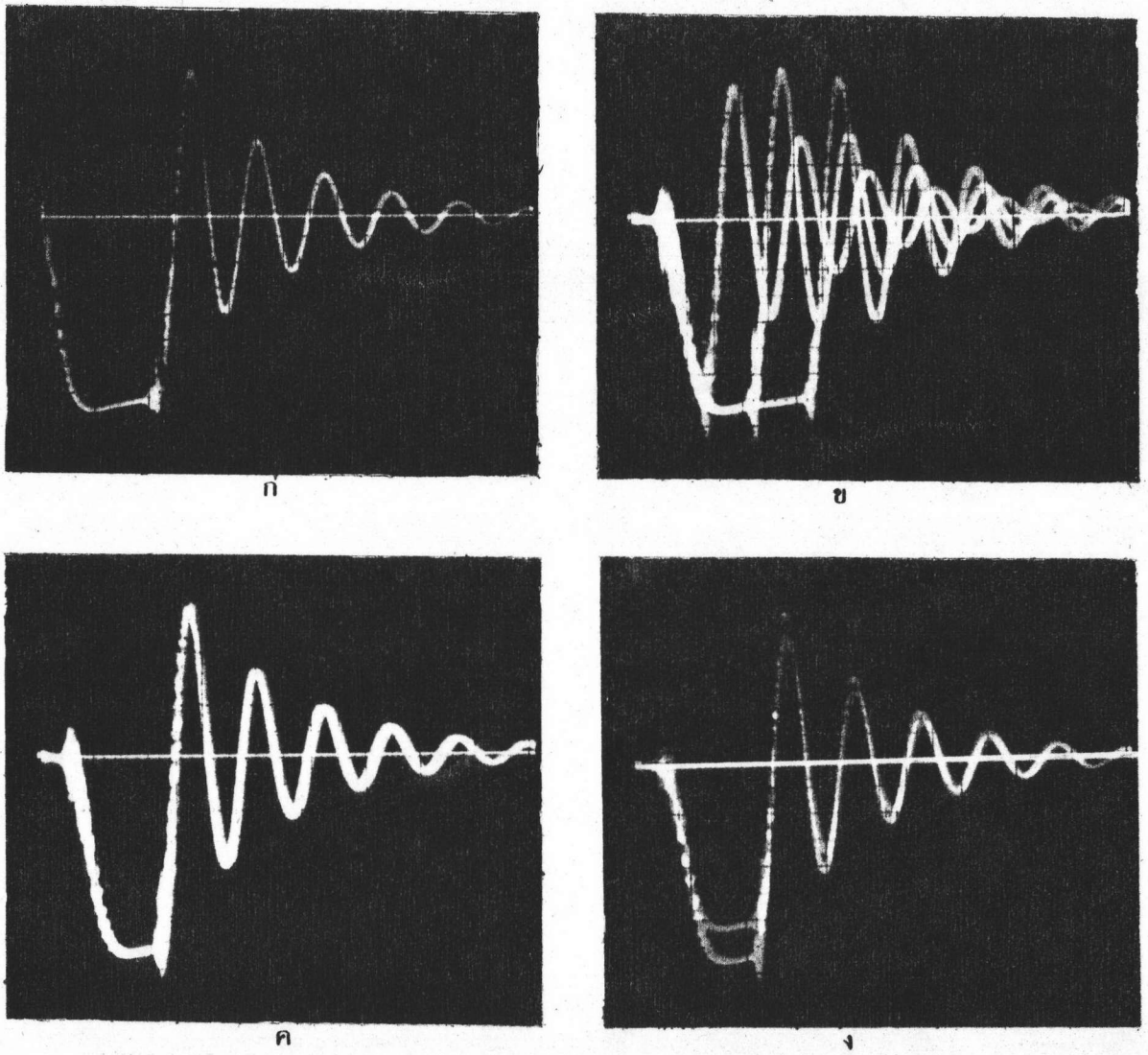
ข

รูป 4.17 แสดงการทดสอบการใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดพ้องกับการวัด

ก. วงจรทดสอบ ข. ภาพการทดสอบ

IG - เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ MCG - มัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

การทดลองนี้ได้ทดลองกับแรงดันอิมพัลส์ทั้งชนิดขั้วบวกและขั้วลบ ดังผลการทดลองขั้วลบใน รูป 4.18 และขั้วบวกในรูป 4.19



สเกลแกนเวลา 1 μs/div. ขนาดแรงดัน 202.5 kV และ 165 kV

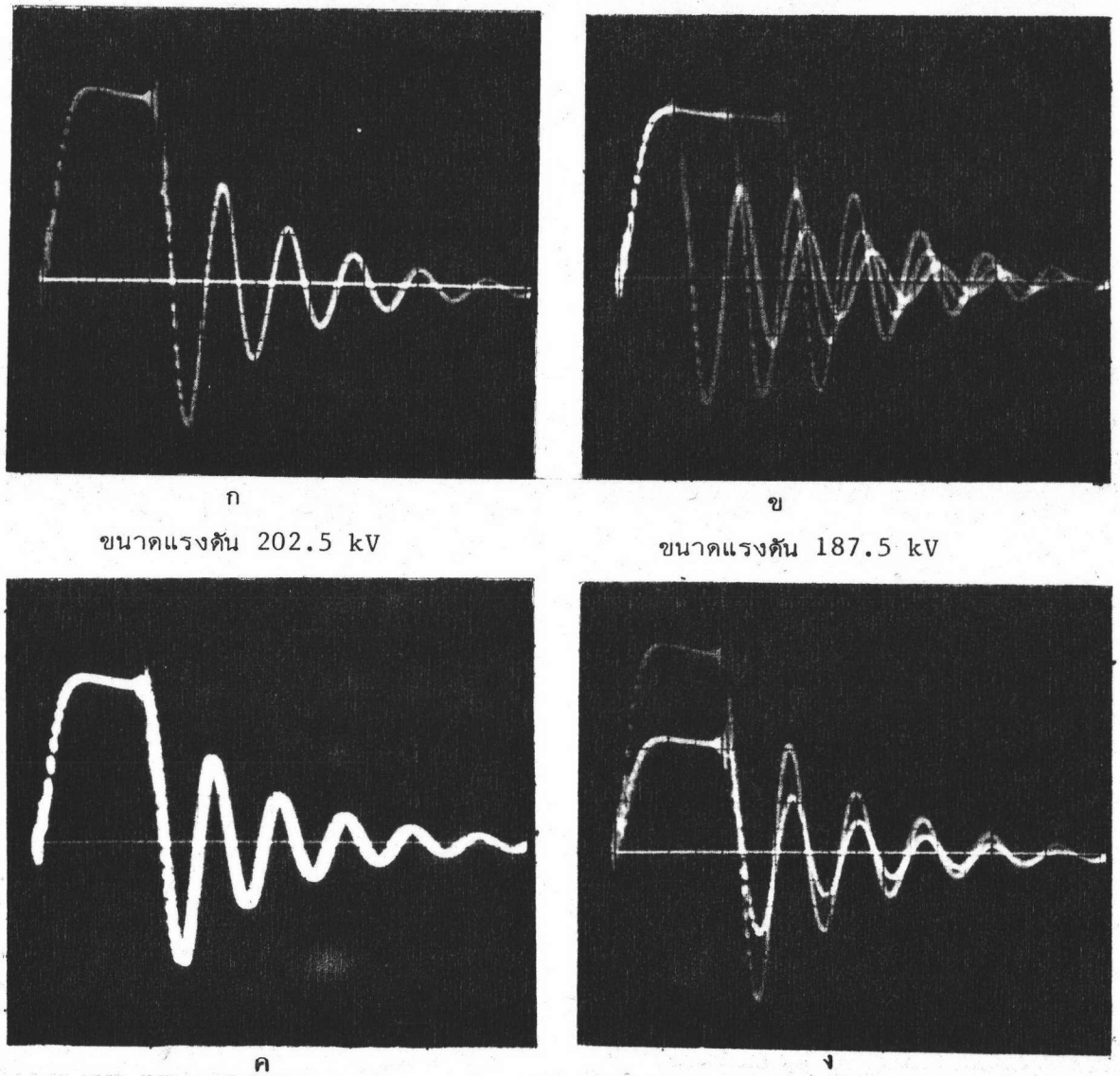
รูป 4.18 ผลการทดลองใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดขั้วลบพร้อมกับวัดแรงดัน

ก. รูปคลื่นตัดที่ T_c = 2 μs

ข. รูปคลื่นตัดที่ T_c = 1, 2, และ 3 μs โดยแรงดันเท่ากัน

ค. รูปคลื่นตัดแรงดันเท่ากัน 10 ครั้ง โดยที่เวลา T_c เท่ากัน คือ 2 μs

ง. รูปคลื่นตัดที่แรงดันต่างกันแต่ให้มีเวลาช่วงคลื่นตัด T_c เท่ากัน คือ 2 μs



ก

ขนาดแรงดัน 202.5 kV

ข

ขนาดแรงดัน 187.5 kV

ค

ขนาดแรงดัน 172.5 kV

ง

ขนาดแรงดัน 217.5 kV และ 120 kV

สเกลแกนเวลา 1 μs/div.

รูป 4.19 ผลการทดลองใช้มัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดขั้วบวกพร้อมกับวัดแรงดัน

ก. รูปคลื่นตัดที่ T_c = 2 μs

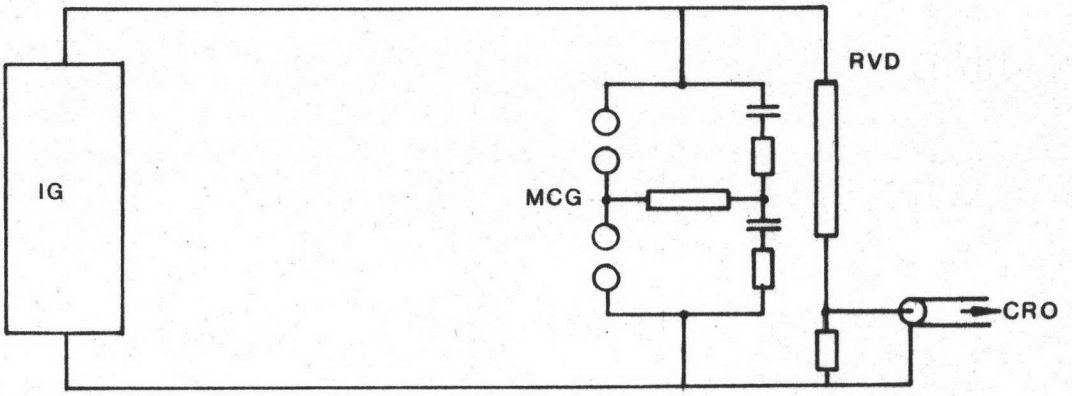
ข. รูปคลื่นตัดที่ T_c = 1, 2 และ 3 μs โดยแรงดันเท่ากัน

ค. รูปคลื่นตัดแรงดันเท่ากัน 10 ครั้ง โดยมีเวลา T_c เท่ากัน คือ 2 μs

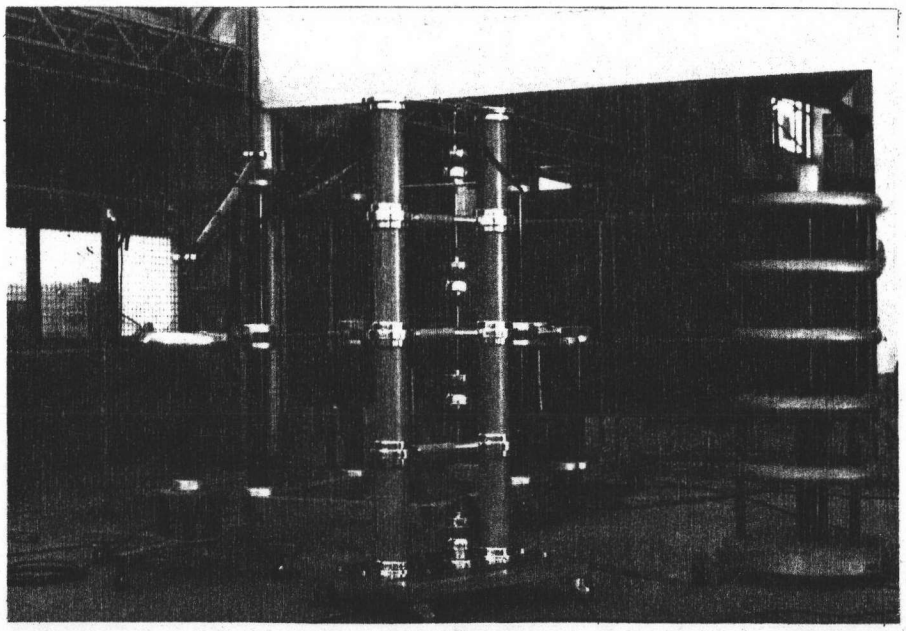
ง. รูปคลื่นตัดที่แรงดันต่างกันแต่ให้มีเวลาช่วงตัด T_c เท่ากัน คือ 2 μs

4.8 การทดสอบการใช้มัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปเป็นโหลดคะแปซิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

เนื่องจากมัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปมีคอลัมน์คะแปซิเตอร์ควบคุมการกระจายแรงดัน จึงใช้คะแปซิเตอร์เป็นโหลดให้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ได้ ฉะนั้นเมื่อต่อคอลัมน์คะแปซิเตอร์เข้ากับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ในวงจรรูป 4.19 ย่อมจะทำให้ช่วงหน้าคลื่นยาวมากขึ้นดังผลการทดลองในรูป 4.20 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่อธิบายได้ด้วยสมการ (2.4)



ก



ข

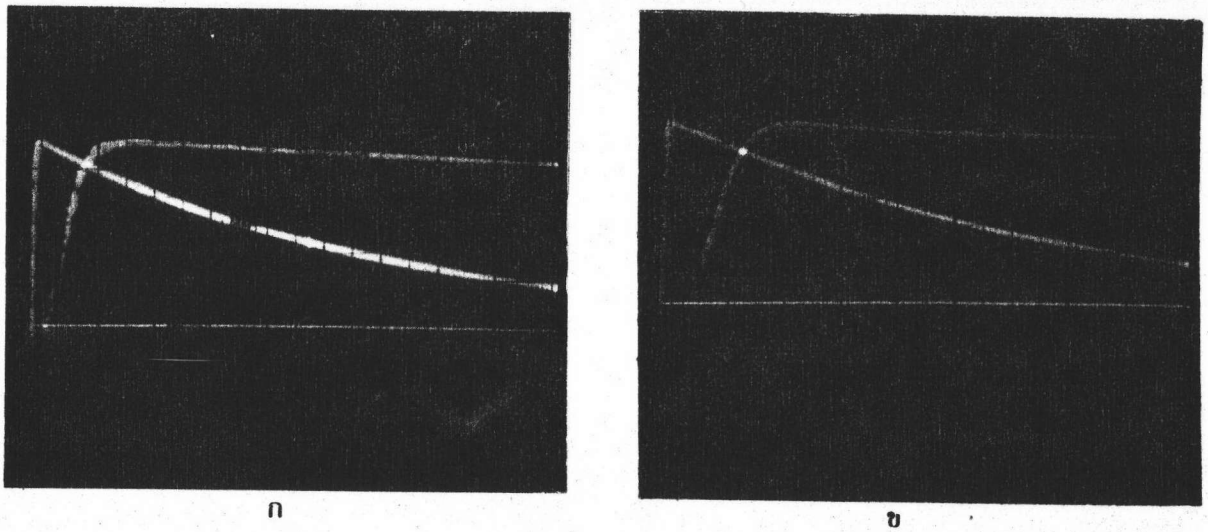
รูป 4.20 แสดงการทดสอบการใช้มัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปเป็นโหลดคะแปซิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ก. วงจรทดลอง

ข. ภาพการทดสอบ

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองของวงจรในรูป 4.20 พบว่าขณะไม่ได้ต่อมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปเข้าไปในวงจรจะได้ผลแตกต่างไปจากขณะเมื่อใส่มัลติเปิลช็อบปิ้งแกป คือ เมื่อใส่มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปเข้าไปในวงจรจะทำให้ส่วนหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มมีเวลาช่วงหน้าคลื่นยาวขึ้น และเวลาช่วงหางคลื่นก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ถ้าหากนำมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปออกจากวงจรแล้วทำการวัดจะทำให้เวลาช่วงหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มที่วัดได้มีเวลาช่วงหน้าคลื่นสั้นลง และเวลาช่วงหางคลื่นจะสั้นลงเล็กน้อย แสดงว่ามัลติเปิลช็อบปิ้งแกปมีผลต่อวงจรในลักษณะการเป็นโหลดคะแปซิเตอร์ ดังผลที่ได้แสดงในรูป 4.21



ก ข

สเกลแกนเวลาช่วงหน้าคลื่น 1 μs/div. และ สเกลแกนเวลาช่วงหางคลื่น 10 μs/div.

รูป 4.21 ผลการทดลองใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำหน้าที่เป็นโหลดคะแปซิเตอร์ให้กับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

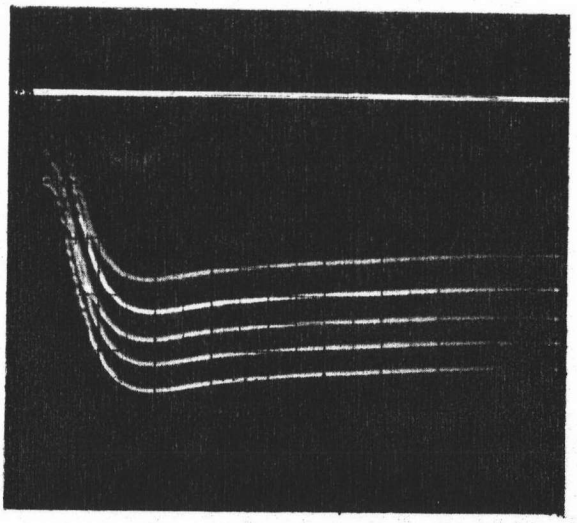
ก. เมื่อไม่มีมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปในวงจร

ข. เมื่อมีมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปในวงจร ซึ่งมี C = 365 pF

ทดลองที่แรงดัน 187.5 kV

4.9 การทดสอบความคงทนต่อแรงดันที่กำหนด

เพื่อเป็นการทดสอบว่ามัลติเปิลช็อบปิ้งแกปที่ออกแบบสร้างมีความคงทนต่อแรงดันตามกำหนด 400 กิโลโวลต์ ได้ดีหรือไม่ เพียงใดจึงทดลองโดยป้อนแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐานขนาด 400 กิโลโวลต์ ต่อเนื่องกัน 5 ครั้ง ช่วงเวลาระหว่างการป้อนแรงดันห่างกัน 1 นาที บันทึกภาพออสซิลโลแกรมของแรงดันขาออกของโวลเตจดิไวเดอร์ไว้ทุกครั้ง ผลที่ได้ดังแสดงในรูป 4.22 ผลการตรวจสอบภาพออสซิลโลแกรม ปรากฏว่ามัลติเปิลช็อบปิ้งแกปซึ่งใช้เป็นโวลเตจดิไวเดอร์ ให้ผลแรงดันขาออกเหมือนกันทุกประการ สรุปได้ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ เกิดขึ้นภายใน สภาพภายนอกก็เป็นปกติไม่มีการวาบไฟตามผิวเกิดขึ้นที่จุดใด และจากการสังเกตด้วยตาเปล่าไม่เห็นส่วนหนึ่งส่วนใดเกิดโคโรน่าเลย จึงสรุปได้ว่ามัลติเปิลช็อบปิ้งแกปขนาด 400 กิโลโวลต์ที่สร้างขึ้นมีความคงทนต่อแรงดันที่กำหนดตามต้องการ



สเกลแกนเวลา 1 μS/div.

รูป 4.22 ผลการทดสอบความคงทนต่อแรงดันตามกำหนด