บทที่ 2

ภาคทฤษฎีของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

2.1 บทนำ

ดังได้กล่าวแล้วว่ามัลติเปิลช็อบปิ้งแกปเป็นอุปกรณ์ช่วยในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด ทำให้แก้ปัญหาความยุ่งยากที่เกิดขึ้นเมื่อใช้สปาร์กแกปชนิดแท่งกลมปลายมนได้โดยสิ้นเชิง ในบทนี้ได้อธิบายถึงทฤษฎีเกี่ยวกับส่วนประกอบ หลักการทำงาน ลักษณะสมบัติ และการใช้งานของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปโดยละเอียด

2.2 ส่วนประกอบของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญดังต่อไปนี้

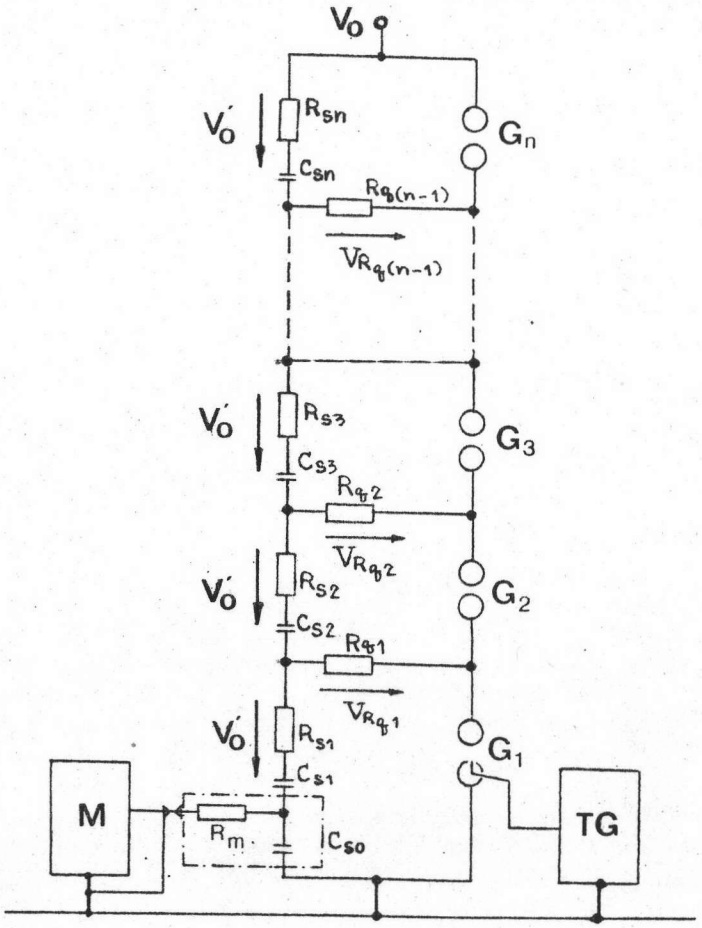
ก) สปาร์กแกป (spark gaps) ประกอบด้วยแกปหลายๆ อันต่อกันอย่างอนุกรมในแนวตั้ง ซึ่งสามารถปรับระยะแกปให้เหมาะสมกับแรงดันใช้งาน แกปบนสุดเป็นที่ป้อนแรงดันสูง แกปล่างสุดต่อลงดินและเป็นแกปที่มีตัวกระตุ้นเพื่อให้เกิดสปาร์กขึ้นที่แกปล่างก่อน

ข) คอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดัน (voltage distribution control column) ลักษณะโครงสร้างของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปดังกล่าว ทำให้เกิดการกระจายแรงดันไม่สม่ำเสมอกันได้ เพื่อให้การกระจายแรงดันตกคร่อมแต่ละแกปมีค่าเท่ากัน จึงใช้คะแปซิเตอร์ต่อคร่อมสปาร์กแกป คะแปซิเตอร์นี้จะต่ออนุกรมกันเป็นคอลัมน์ดังวงจรในรูป 2.1

ค) ความต้านทานขนาน (shunt resistor) ความต้านทานขนาน R_{q1} ถึง $R_{q(n-1)}$ ที่ต่อระหว่างคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดันกับสปาร์กแกปในแต่ละชุด จะทำหน้าที่ช่วยให้เกิดการสปาร์กของชุดสปาร์กแกปอย่างเป็นลำดับต่อเนื่อง

ง) เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์กระตุ้น (trigger pulse generator) เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์กระตุ้นเป็นเครื่องจ่ายสัญญาณพัลส์กระตุ้นที่สามารถควบคุมได้ เพื่อส่งสัญญาณพัลส์กระตุ้นไปยังแกปชุดล่าง ทำให้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำงานได้ตามความต้องการ

จ) คะแปซิเตอร์ภาคแรงต่ำ (secondary capacitor) และค่าความต้านทานแมทชิ่ง (matching resistor) ในกรณีที่ใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปเป็นโวลเตจดิไวเดอร์ จะมีคะแปซิเตอร์ C_{s0} ต่อไว้ที่ส่วนล่างของคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดัน เพื่อทำหน้าที่เป็นอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์ ส่วนความต้านทานแมทชิ่ง R_m ใส่ไว้เพื่อแบ่งครึ่งแรงดันคร่อม C_{so} และสะท้อนกลับที่ M จะได้ค่าแรงดันที่ต้องการวัดถูกต้อง โดยต่อออกจากจุดต่อระหว่างภาคแรงสูง กับแรงต่ำของโวลเตจดิไวเดอร์เข้าหัวเคเบิลวัดแรงดัน เพื่อนำสัญญาณไปเข้าเครื่องวัด เครื่องวัดอาจเป็นโวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด หรือออสซิลโลสโคป หรืออาจใช้ทั้งสองอย่างพร้อมกัน



R_{sn} = ความต้านทานหน่วง

$R_{q(n-1)}$ = ความต้านทานขนาน

C_{sn} = คะแปซิเตอร์ควบคุมการกระจายแรงดัน

C_{s0} = คะแปซิเตอร์ภาคแรงต่ำ

R_m = ความต้านทานแมทชิ่ง

M = เครื่องวัดแรงดันอิมพัลส์

TG = เครื่องกำเนิดสัญญาณกระตุ้น

รูป 2.1 วงจรมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

007315

2.3 หลักการทำงานของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

การทำงานของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปจะมีลักษณะคล้ายกับสปาร์กแกปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์แบบมัลติสเตจ กล่าวคือจะเกิดสปาร์กที่แกปชุดล่างก่อนโดยการกระตุ้น แล้วจึงเกิดสปาร์กที่แกปถัดไปตามลำดับ ในวงจรมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปรูป 2.1 เมื่อป้อนแรงดันเข้าไประหว่างแกปบนสุดกับดินมีค่าเท่ากับ V_0 ฉะนั้นแต่ละสปาร์กแกปจะได้รับแรงดันเท่ากับ V_0' นั่นคือ C_{s1} ถึง C_{sn} จะได้รับแรงดันอัดประจุแต่ละตัวมีค่าเท่ากับ V_0' เมื่อส่งสัญญาณกระตุ้นเข้าไปที่แกปล่างสุดจะทำให้เกิดสปาร์กที่แกป G_1 ฉะนั้น C_{s1} จะคายประจุผ่านความต้านทาน R_{s1} และ R_{q1} ครบวงจรในลักษณะทรานเซียนต์ (transient) แรงดันทรานเซียนต์ที่ตกคร่อม R_{q1} ทำให้เกิดแรงดันคร่อมสปาร์กแกป G_2 เป็น

$$V_{G2} = V_0' + V_{R_{q1}}(t) \qquad .....(2.1)$$

$V_{R_{q1}}(t)$ = แรงดันทรานเซียนต์ที่ตกคร่อม R_{q1}

V_{G2} นี้จะทำให้เกิดการสปาร์กในแกป G_2 เมื่อ G_2 เกิดสปาร์กขึ้นด้วยผลของ $V_{R_{q1}}(t)$ การดิสชาร์จของ C_{s1} บวกกับ C_{s2} จะทำให้เกิดแรงดันเกิน $V_{R_{q2}}(t)$ ขึ้นใน R_{q2} ทำให้เกิดการสปาร์กของแกป G_3 ต่อไป และ $V_{R_{q3}}(t)$ ก็จะเกิดขึ้นทำให้เกิดการสปาร์กของแกป G_4 ต่อไปเรื่อยๆ ถ้าสมมุติว่าวงจรไม่มีสเตรย์คะแปซิแตนซ์ และไม่มีประจุอื่นใดไหลเพิ่มเติมเข้ามาในคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดันระหว่างเกิดการสปาร์ก $V_{R_{q1}}(t)$ จะเป็นดังนี้ { 5 }

$$V_{R_{q1}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{เมื่อ } t \leq 0 \\ V_0' \, \text{Exp.}\left[\dfrac{-t}{(R_{s1} + R_{q1})C_{s1}}\right] & \text{เมื่อ } t > 0 \end{cases} \qquad ..(2.2)$$

ฉะนั้นจากสมการ (2.1) แรงดันคร่อมสปาร์กแกป G_2 จะเป็น

$$V_{G2} = V_0'\left\{1 + \text{Exp.}\left[\frac{-t}{(R_{s1} + R_{q1})C_{s1}}\right]\right\} \text{ เมื่อ } t > 0 \quad ..(2.3)$$

ที่เวลา t สั้นๆ จะได้แรงดันคร่อม G_2 จะมีค่าประมาณ $2V_0'$

2.4 ลักษณะสมบัติที่สำคัญของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

ลักษณะสมบัติของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติ 2 ประการ คือ พิสัยการกระตุ้น (triggering range) และการกระจัดกระจายเวลาช่วงคลื่นตัด (dispersion of chopping time)

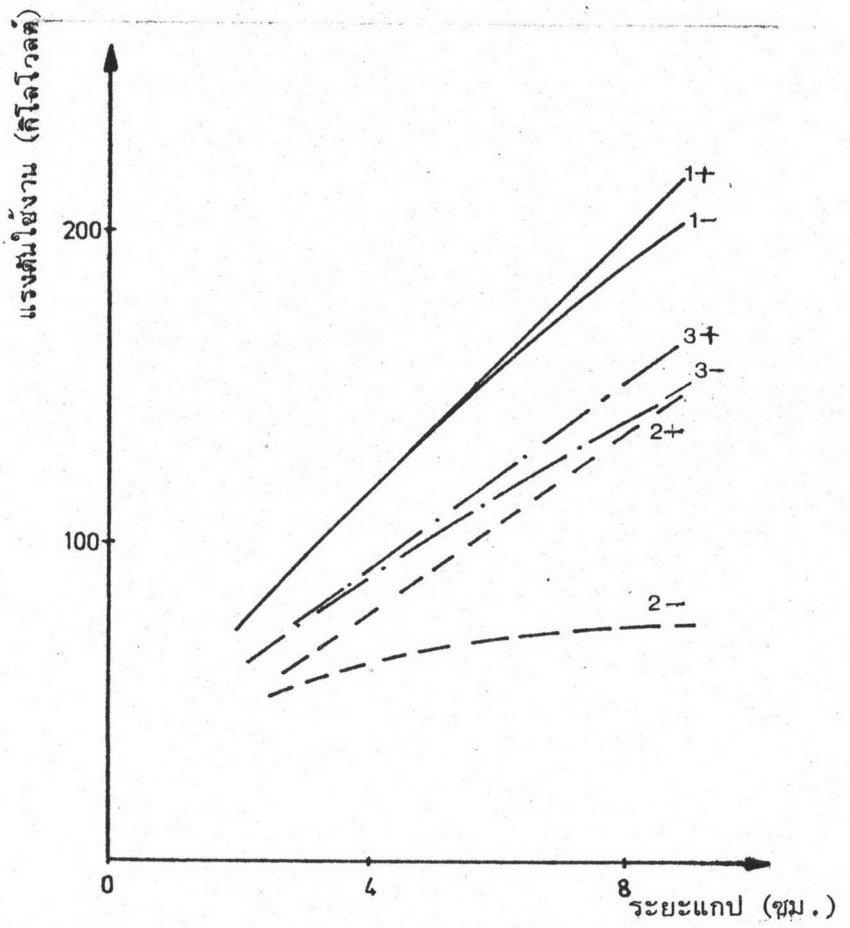
2.4.1 พิสัยการกระตุ้น (triggering range)

พิสัยการกระตุ้นเป็นช่วงของการกระตุ้นที่อยู่ระหว่างขีดจำกัดของการกระตุ้นต่ำสุดของแกปตัวล่างที่สามารถทำให้แกปทั้งหมดสปาร์กได้เรียกว่าขีดจำกัดล่าง กับค่าของแรงดันใช้งานที่ทำให้แกปทั้งหมดเริ่มสปาร์กได้เองโดยไม่ต้องใช้ตัวกระตุ้นซึ่งเป็นขีดจำกัดบน พิสัยการกระตุ้นของแกปทั้งหมดของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปจะขึ้นอยู่กับแกปล่างเป็นสำคัญ { 6 } ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าแรงดันเกินจะเกิดขึ้นกับแกปถัดไปหลังจากเกิดการสปาร์กของแกปล่าง การสปาร์กของแกปล่างจะเกิดจากผลของการกระตุ้นที่แกปล่างซึ่งพอจะกล่าวได้เป็นสองลักษณะ คือ

ก) การกระตุ้นที่เมนแกป (main gap) เป็นการกระตุ้นที่เกิดจากการสปาร์กระหว่างอิเลคโตรดคู่ล่างของแกป การกระตุ้นลักษณะนี้จะมีข้อดี คือ มีช่วงเวลาการสปาร์กของแกปสั้น และมีการกระจายเวลาสปาร์กน้อย แต่มีข้อเสียในการที่จะใช้การกระตุ้นแบบนี้เพราะต้องใช้แรงดันกระตุ้นสูง (ประมาณ 200 กิโลโวลต์) เมื่อจะใช้แรงดันกระตุ้นให้น้อยกว่านี้ต้องเปลี่ยนแกปล่างใหม่ให้เหมาะสมกับขนาดของแรงดัน ซึ่งจะมีความยุ่งยากในการจัดระยะแกปและขนาดของแกป

ข) การกระตุ้นด้วยแกปช่วย (auxiliary gap) เป็นการกระตุ้นที่เกิดจากการใส่ขั้วกระตุ้นที่แกปล่าง แล้วทำให้เกิดการสปาร์กระหว่างปลายของขั้วกระตุ้น (trigger pin) กับอิเลคโตรดที่เมนแกปล่าง การกระตุ้นลักษณะนี้มีข้อดีที่ว่าช่วงเวลาการสปาร์กของแกปและการกระจายเวลาการสปาร์กไม่ขึ้นกับพลังงานที่ใช้กระตุ้น นอกจากนี้แรงดันกระตุ้นมีค่าต่ำกว่าวิธีแรก คือ จะใช้ประมาณ 8-10 กิโลโวลต์ ฉะนั้นจึงไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของแกป แกปทุกๆ อันจึงมีขนาดเท่ากันหมด

การกระตุ้นด้วยแกปช่วยจะได้ผลเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับขั้วของแรงดันกระตุ้น ถ้าหากจัดให้ขั้วของแรงดันกระตุ้นตรงกันข้าม กับแรงดันใช้งานจะทำให้มีพิสัยการกระตุ้นกว้าง {9} นอกจากนี้ขั้วของแรงดันใช้งานก็มีผลต่อพิสัยการกระตุ้น เพราะว่าถ้าแรงดันใช้งานเป็นขั้วลบจะทำให้มีพิสัยการกระตุ้นมากกว่าแรงดันใช้งานที่เป็นขั้วบวกดังตัวอย่างแสดงในรูป 2.2 {6}



รูป 2.2 พิสัยการกระตุ้นเฉพาะแกปล่างของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

1+, 1– แรงดันเริ่มสปาร์กเมื่อไม่ใช้การกระตุ้นของแรงดันขั้วบวกและขั้วลบตามลำดับ

2+, 2– ขีดจำกัดล่างของการกระตุ้นสำหรับแรงดันใช้งานขั้วบวกและขั้วลบตามลำดับ

3+, 3– ขีดจำกัดล่างของการกระตุ้นสำหรับแรงดันใช้งานขั้วบวกและขั้วลบ เมื่อมีการกระจัดกระจายเวลาน้อยกว่า ±50 นาโนวินาที

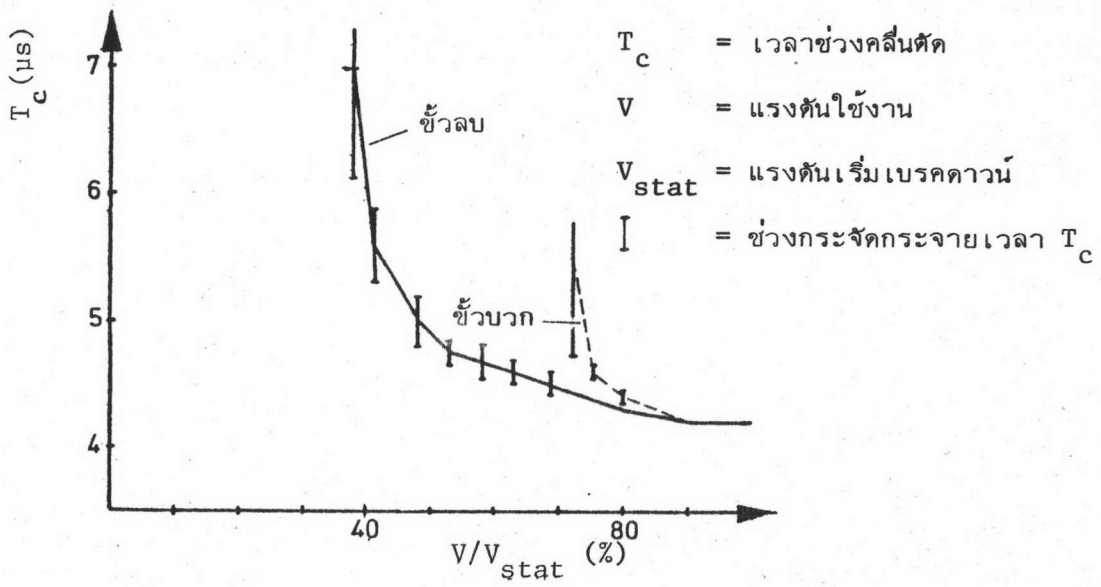
ลักษณะการกระตุ้นของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทั้งหมดสามารถหาได้จากการทดลองกับแกปชั้นล่างเพียงชั้นเดียว เพราะว่ามีลักษณะการกระตุ้นเหมือนกันกับการทำงานของแกปทั้งหมด ในรูป 2.2 เป็นรูปที่แสดงพิสัยการกระตุ้นของแกปชั้นล่างเพียงชั้นเดียว ทดลองกับแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าขั้วบวกและขั้วลบ และให้เกิดคลื่นตัดที่ค่ายอด ในแนวนอนเป็นระยะแกปหน่วยเป็นเซ็นติเมตร ในแนวตั้งเป็นแรงดันใช้งานหน่วยเป็นกิโลโวลต์ มีค่าแรงดันสูงสุดประมาณ 240 กิโลโวลต์ กราฟเส้น

หมายเลข 1+ แสดงแรงดันใช้งานชนิดขั้วบวกที่ป้อนให้แกปแล้วทำให้เริ่มต้นเกิดการสปาร์กของแกปเอง โดยไม่ต้องกระตุ้นแกป จะพบว่าที่ระยะแกปมีค่าต่ำๆ การสปาร์กของแกปจะเริ่มเกิดขึ้นโดยที่แรงดันใช้งานไม่สูงมากนัก ถ้าหากว่าระยะแกปเพิ่มมากขึ้น แรงดันใช้งานจะเพิ่มสูงมากขึ้นจึงทำให้เกิดการสปาร์กของแกป นั่นคือ กราฟเส้นหมายเลข 1+ จะแสดงให้เห็นว่าถ้าหากป้อนแรงดันใช้งานให้กับแกปเป็นขั้วบวกและไม่มีการกระตุ้นแกป โดยที่แรงดันใช้งานและระยะแกปอยู่ภายใต้กราฟเส้นหมายเลข 1+ จะไม่ทำให้แกปเกิดการสปาร์ก หากแรงดันใช้งานและระยะแกปอยู่เหนือกราฟเส้นหมายเลข 1+ จะทำให้แกปเกิดการสปาร์กได้ตลอด สำหรับกราฟเส้นหมายเลข 1- ก็เช่นเดียวกับกราฟเส้นหมายเลข 1+ แต่จะสังเกตเห็นว่าการเกิดสปาร์กของแรงดันใช้งานขั้วลบมีมากกว่าขั้วบวก ดังพื้นที่ที่อยู่ระหว่างเส้นหมายเลข 1- และเส้นหมายเลข 1+ หมายความว่าในพื้นที่ระหว่างนี้แกปจะเกิดการสปาร์กด้วยแรงดันใช้งานขั้วลบได้ แต่จะไม่เกิดการสปาร์กเมื่อแรงดันใช้งานเป็นขั้วบวก กราฟเส้นหมายเลข 2+ แสดงถึงขีดจำกัดการกระตุ้นล่างสุดขณะแรงดันใช้งานเป็นขั้วบวก หมายความว่าถ้าหากมีการกระตุ้นแกปในบริเวณพื้นที่ใต้เส้นหมายเลข 2+ นี้ไม่ว่าจะอยู่ในระยะแกปและแรงดันใช้งานเท่าใดก็ตามแกปจะไม่สามารถเกิดการสปาร์กได้ ในทางตรงกันข้ามหากมีการกระตุ้นแกปในบริเวณพื้นที่เหนือกราฟเส้นหมายเลข 2+ แต่อยู่ใต้กราฟเส้นหมายเลข 1+ ไม่ว่าจะอยู่ในระยะแกปและแรงดันใช้งานเป็นขั้วบวกเท่าใดก็ตามสามารถทำให้เกิดการสปาร์กของแกปได้ แต่ถ้าอยู่เหนือกราฟเส้นหมายเลข 1+ ขึ้นไปแล้วไม่มีความจำเป็นที่จะต้องกระตุ้นแกปเพราะแกปสามารถสปาร์กได้เองดังที่กล่าวมาแล้ว ในกรณีของกราฟเส้นหมายเลข 2- ก็เช่นเดียวกับกราฟเส้นหมายเลข 2+ คือ ถ้าระยะแกปและแรงดันใช้งานเป็นขั้วลบแล้วกระตุ้นแกปภายใต้กราฟเส้นหมายเลข 2- นี้จะไม่ทำให้เกิดการสปาร์กของแกป แต่เมื่อกระตุ้นแกปขณะที่ระยะแกปและแรงดันใช้งานเป็นขั้วลบอยู่เหนือกราฟเส้นหมายเลข 2- ไปจนถึงกราฟเส้นหมายเลข 1- จะทำให้เกิดการสปาร์กของแกป และถ้าเลยกราฟเส้นหมายเลข 1- สปาร์กแกปจะเกิดขึ้นเองโดยไม่ต้องกระตุ้น ฉะนั้นจะเห็นได้ว่าพื้นที่ระหว่างกราฟเส้นหมายเลข 2- ไปจนถึงกราฟเส้นหมายเลข 1- มีมากกว่าพื้นที่ระหว่างกราฟเส้นหมายเลข 2+ ไปจนถึงกราฟเส้นหมายเลข 1+ ซึ่งหมายความว่าพิสัยการกระตุ้นขณะแรงดันใช้งานเป็นขั้วลบมีมากกว่าขณะแรงดันใช้งานเป็นขั้วบวก ในกรณีของกราฟเส้นหมายเลข 3+ และกราฟเส้นหมายเลข 3- จะมีความหมายเหมือนกับกราฟเส้นหมายเลข 2+ และกราฟเส้นหมายเลข 2- แต่มีข้อแตกต่างในเรื่องการจำกัดการกระจัดกระจายเวลาการตัด ซึ่งมีค่าน้อยกว่า ±50 นาโนวินาที จะทำให้พิสัยการกระตุ้นของกราฟทั้งสองเส้นนี้น้อยกว่ากราฟเส้นหมายเลข 2+ และกราฟเส้นหมายเลข 2-

เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะในการทดสอบหม้อแปลงด้วยรูปคลื่นตัด ควรมีการกระจัดกระจายเวลาการตัดน้อยกว่า ±100 นาโนวินาที จึงจะทำให้ช่วงเวลาการตัดของรูปคลื่นตัดในครั้งที่หนึ่งกับครั้งที่สองมีค่าใกล้เคียงกัน

2.4.2 การกระจัดกระจายเวลาช่วงคลื่นตัด (dispersion of chopping time)

เวลาช่วงคลื่นตัดและการกระจัดกระจายเวลาช่วงคลื่นตัดของสปาร์กแกปจะขึ้นอยู่กับขนาดแรงดัน ชนิดขั้วของแรงดัน และระยะห่างของแกปดังแสดงในรูป 2.3 {6}



รูป 2.3 เวลาช่วงคลื่นตัด T_c และการกระจัดกระจายเวลาช่วงคลื่นตัด

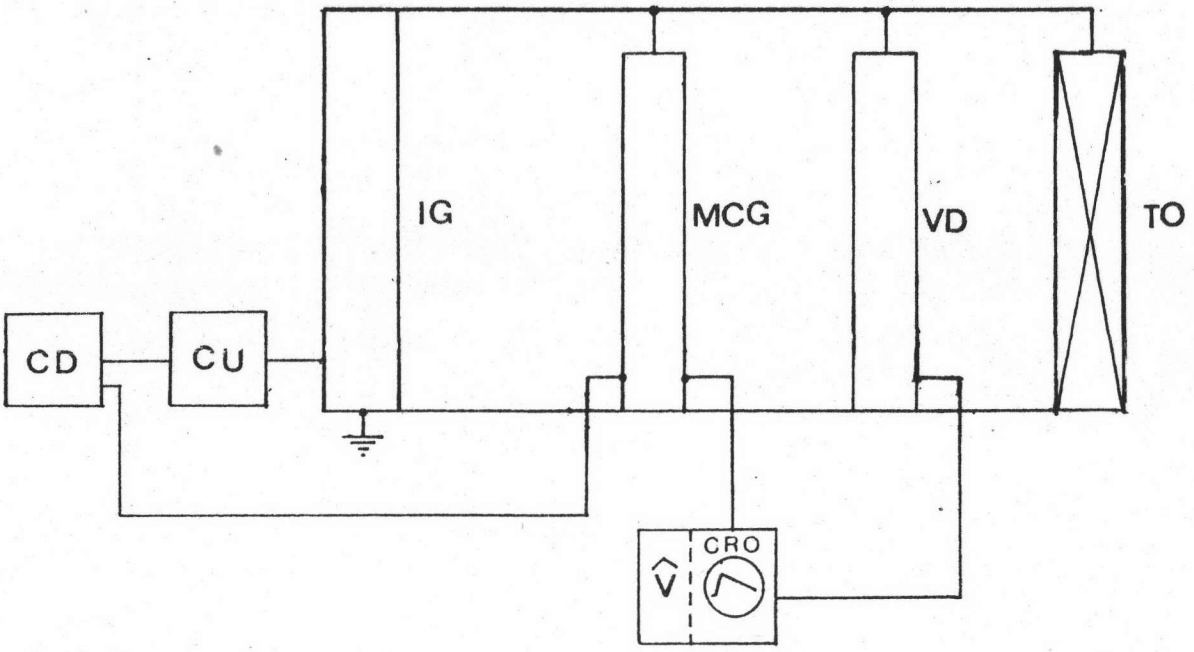
ในรูป 2.3 แสดงเวลาช่วงคลื่นตัดและการกระจัดกระจายเวลาช่วงคลื่นตัดแกนในแนวนอนแสดงแรงดันใช้งานเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับแรงดันใช้งานที่ทำให้แกปสปาร์กได้เองโดยไม่ต้องใช้ตัวกระตุ้น แกนในแนวตั้งแสดงเวลาช่วงคลื่นตัดเป็นไมโครวินาที กราฟเส้นเต็มแสดงแรงดันใช้งานเป็นชนิดขั้วลบ กราฟเส้นประแสดงแรงดันใช้งานเป็นชนิดขั้วบวก ถ้าแรงดันใช้งานเป็นขั้วลบที่ค่าแรงดันต่ำๆ ช่วงเวลาการตัดจะมากและการกระจัดกระจายเวลาการตัดมากดังเส้นในแนวดิ่งของกราฟ การตัดจะเกิดอยู่ในช่วงของเส้นดิ่งนั้น ถ้าเปอร์เซ็นต์แรงดันใช้งานมีค่าสูงมากขึ้นเวลาช่วงคลื่นตัดและการกระจัดกระจายเวลาช่วงคลื่นตัดจะลดลง ที่แรงดันมากกว่า 85 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันใช้งาน จะพบ

ว่า เวลาช่วงคลื่นตัดค่อนข้างจะคงที่และการกระจัดกระจายการตัดมีน้อยมาก ถ้าแรงดันใช้งานเป็นขั้วบวกก็จะได้กราฟลักษณะใกล้เคียงกับแรงดันใช้งานเป็นขั้วลบ แต่จะพบความแตกต่างของกราฟทั้งสองเส้นว่าพิสัยการกระตุ้นต่างกัน คือ พิสัยการกระตุ้นของกราฟเส้นแรงดันใช้งานขั้วลบมากกว่าเส้นแรงดันใช้งานขั้วบวก การกระจัดกระจายเวลาช่วงคลื่นตัดเมื่อแรงดันใช้งานเป็นขั้วบวกจะน้อยกว่าเมื่อแรงดันใช้งานเป็นขั้วลบ

การควบคุมให้พิสัยการกระตุ้นมีมาก จะมีประโยชน์ในการทำให้เกิดการสปาร์กของแกปได้หลายระดับของขนาดแรงดัน แต่มีข้อจำกัดที่การกระจัดกระจายเวลาช่วงคลื่นตัด เพราะการกระจัดกระจายเวลาช่วงคลื่นตัดจะมีผลต่อการนำไปใช้งาน เช่น งานที่จำกัดเกี่ยวกับการกระจัดกระจายเวลาการตัด อย่างการทดสอบหม้อแปลง จะเลือกใช้ในช่วง 85 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันทำงานตามที่กล่าวมาแล้ว เพราะว่าการกระจัดกระจายเวลาช่วงคลื่นตัดจะไม่มี เหตุที่เลือกช่วงนี้เนื่องจากในการทดสอบหม้อแปลงนั้นจะทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มชนิดขั้วลบที่ขนาดแรงดันลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันทดสอบก่อนหนึ่งครั้ง แล้วทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่ขนาด 115 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันทดสอบรูปคลื่นเต็มสองครั้ง จากนั้นทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มขนาด 100 เปอร์เซ็นต์ ของแรงดันที่ต้องทดสอบอีกสองครั้ง จะเห็นได้ว่าการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดจะต้องกระทำถึงสองครั้งติดต่อกัน เพราะฉะนั้นรูปคลื่นทั้งสองจะต้องเหมือนกัน คือ เวลาช่วงคลื่นตัดจะต้องเท่ากันและมีการกระจัดกระจายเวลาการตัดน้อยมาก ถ้ามีการกระจัดกระจายเวลาการตัดจะทำให้เวลาช่วงคลื่นตัดทั้งสองครั้งไม่เท่ากัน อาจจะทำให้มีผลผิดพลาดในการทดสอบได้

2.5 การใช้มัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปทำให้เกิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด

แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มมาตรฐานที่สร้างขึ้นโดยเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ สามารถทำให้เกิดรูปคลื่นตัดได้ตามต้องการโดยอาศัยมัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปที่ต่อขนานเข้ากับวัสดุทดสอบในวงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์ดังแสดงในรูป 2.4 ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ และลำดับขั้นการทำงานดังต่อไปนี้



รูป 2.4 วงจรทดสอบแรงดันอิมพัลส์

CD	– ตู้ควบคุมการทดลอง	CU	– ตัวจ่ายแรงดันกระแสไฟตรง
IG	– เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์	VD	– อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์
MCG	– มัลติเปิลซ็อบปิ้งแกป	TO	– วัสดุทดสอบ
$\hat{V}$	– โวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด	CRO	– ออสซิลโลสโคป

ก) เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Generator) เป็นอุปกรณ์สร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มได้ตามต้องการ มีลักษณะวงจรดังรายละเอียดที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 1.5

ข) ตู้ควบคุมการทดลอง (control desk) แรงดันที่อัดประจุให้กับ C_s ได้จากตัวจ่ายแรงดันกระแสตรง (charging unit-CU) ซึ่งเปลี่ยนขั้วของแรงดันบวกหรือลบได้ การควบคุมแรงดันอัดประจุตั้งแต่ศูนย์จนถึงค่าที่ต้องการ ทำได้โดยการปรับและบังคับจากตู้ควบคุม รวมทั้งการบังคับขนาดแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นให้มีค่าเท่าใด ซึ่งกำหนดด้วยระยะห่างของสปาร์กแกปของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ การปรับระยะห่างของแกปอาจเป็นแบบควบคุมระยะไกลจากตู้ควบคุมการทดลอง การทำให้สปาร์กแกปเกิดการสปาร์กได้ตามความต้องการต้องมีสัญญาณพัลส์ไปกระตุ้นสปาร์กแกปนั้น อุปกรณ์สำคัญที่สร้างสัญญาณพัลส์กระตุ้นนี้ คือ ทริกกาตรอน (trigatron) อุปกรณ์นี้เป็นตัวสำคัญในการควบคุมเวลาเกิดการตัดคลื่นของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดด้วย ดังจะได้กล่าวรายละเอียดต่อไปในเรื่องการควบคุมเวลาช่วงคลื่นตัด

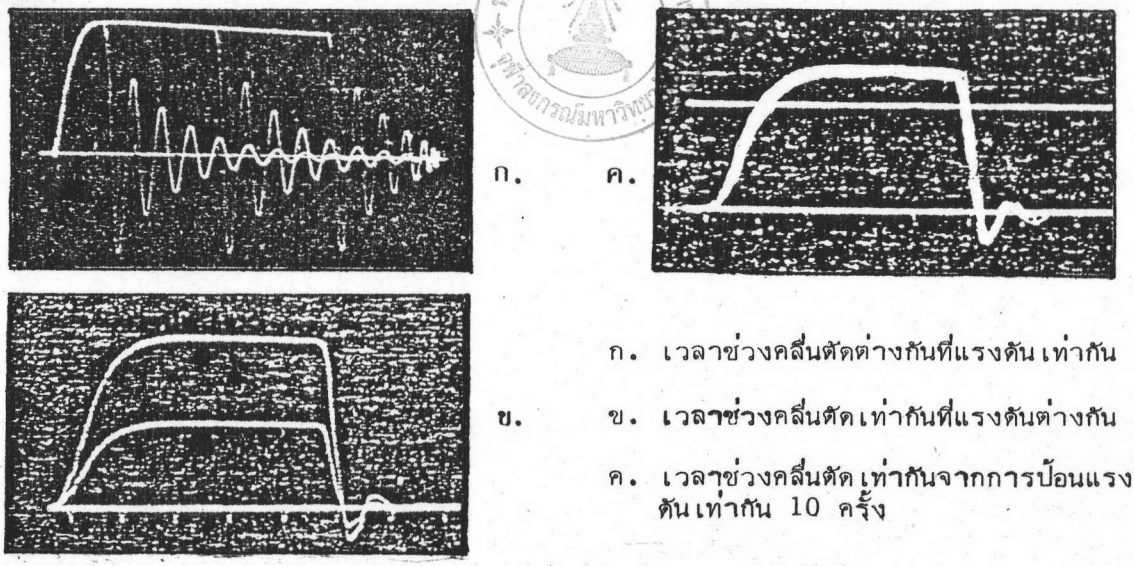
ค) มัลติเปิลซ็อบปิ้งแกป เมื่อได้รับสัญญาณพัลส์กระตุ้นจากตู้ควบคุมการทดลองก็จะทำให้เกิดสปาร์กขึ้นที่แกปแรกก่อน การสปาร์กที่แกปแรกเป็นผลให้เกิดการสปาร์กต่อเนื่อง ทำให้แกปต่อๆ ไปทำงานตามลำดับดังหลักการที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.3 การสปาร์กที่มัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปจะเกิดเร็วหรือช้าอยู่กับการที่ได้รับสัญญาณกระตุ้นเร็วหรือช้า อันเป็นผลให้เกิดช่วงเวลาคลื่นตัดสั้นหรือยาวตามต้องการได้ การส่งสัญญาณกระตุ้นไปยังมัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปให้เร็วหรือช้าทำได้โดยปรับตั้งเวลาด้วยทริกกาตรอนที่อยู่ในตู้ควบคุมการทดลอง

ง) อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ เป็นอุปกรณ์ส่วนหนึ่งของระบบวัดแรงดันอิมพัลส์ ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันให้มีค่าต่ำพอที่จะใช้เครื่องวัดแรงดัน เช่น โวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด $\hat{V}$ และ/หรือออสซิลโลสโคป CRO ได้ โวลเตจดิไวเดอร์นี้อาจเป็นแบบความต้านทาน แบบคะแปซิเตอร์ แบบผสม หรือแบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วง ในทางปฏิบัติอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์จะต่ออยู่ใกล้กับวัสดุทดสอบ TO ดังรูป 2.4

2.6 การควบคุมเวลาช่วงคลื่นตัด

โดยเหตุที่มาตรฐานได้กำหนดเวลาช่วงคลื่นตัดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่จะใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้นมีช่วงเวลาที่กำหนดแน่นอน (2-6 ไมโครวินาที) และตัวอย่างวัสดุทดสอบบางอย่างไม่สามารถที่จะทดลองป้อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหลายๆ ครั้งได้ เพราะจะเป็นผลเสียต่อการฉนวนของวัสดุทดสอบ ฉะนั้นช่วงเวลาคลื่นตัดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่จะป้อนให้กับวัสดุทดสอบนั้นต้องสามารถบังคับได้ตามต้องการ

การบังคับเวลาช่วงคลื่นตัดให้ได้ตามต้องการนั้นทำได้โดยใช้มัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปประกอบเข้ากับทริกกาตรอนซึ่งอยู่ในตู้ควบคุมการทดลอง ทริกกาตรอนเป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของระบบการวัดแรงดันอิมพัลส์โดยสร้างสัญญาณพัลส์ไปกระตุ้น 3 จุด ซึ่งเป็นอิสระต่อกันและสามารถเลือกปรับ delay time ได้ตามต้องการ จุดหนึ่งส่งสัญญาณพัลส์ไปยังเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เป็นตัวทำให้เริ่มเกิดแรงดันอิมพัลส์ ขณะเดียวกันสัญญาณส่งไปยังออสซิลโลสโคปเพื่อกระตุ้นให้ออสซิลโลสโคปเริ่มทำงานกวาดสัญญาณแกนเวลาในแนวนอน เมื่อจัด delay time ของพัลส์ทั้งสอง ได้อย่างเหมาะสมจะทำให้ออสซิลโลสโคปสามารถจับรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตั้งแต่เริ่มต้นได้ ส่วนอีกจุดหนึ่งสัญญาณพัลส์ส่งไปยังมัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปซึ่งขณะนั้นได้รับแรงดันอิมพัลส์อยู่ เพื่อกระตุ้นให้แกปล่างเกิดการสปาร์กและยังผลให้แกปต่อๆ ไปสปาร์กตามไปด้วย จึงทำให้เกิดการสปาร์กต่อเนื่องกันตลอด เป็นเหตุให้เกิดการลัดวงจรของแรงดันอิมพัลส์จะได้รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดขึ้น สัญญาณพัลส์ของจุดที่สามนี้ปรับ delay time อ้างอิงกับพัลส์จุดแรกได้ตามต้องการ ถ้าต้องการให้ได้เวลาช่วงคลื่นตัดยาวมากขึ้นดังในรูป 2.5 ก. สัญญาณพัลส์ที่จะส่งไปมัลติเปิลซ็อบปิ้งแกปก็จะช้ามากขึ้น โดยการที่เราสามารถบังคับเวลาช่วงคลื่นตัดได้นี้เองจึงทำให้สามารถสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดได้โดยที่ขนาดแรงดันเท่ากัน ดังในรูป 2.5 ค. ที่ได้จากการป้อนแรงดัน 10 ครั้ง ส่วนรูป 2.5 ข. นั้นแสดงให้เห็นว่าถึงแม้ว่าแรงดันอิมพัลส์ไม่เท่ากันก็ยังสามารถบังคับให้เกิดรูปคลื่นตัดได้ในช่วงเวลารูปคลื่นตัดที่เท่ากัน



ก. เวลาช่วงคลื่นตัดต่างกันที่แรงดันเท่ากัน

ข. เวลาช่วงคลื่นตัดเท่ากันที่แรงดันต่างกัน

ค. เวลาช่วงคลื่นตัดเท่ากันจากการป้อนแรงดันเท่ากัน 10 ครั้ง

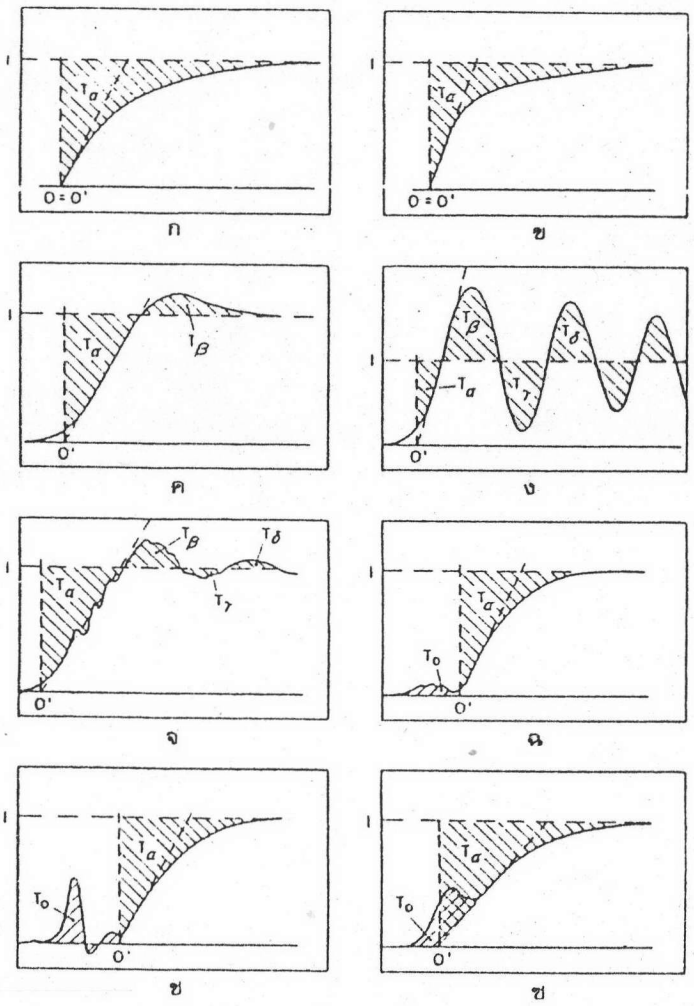
รูป 2.5 ผลการใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปสร้างแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดลักษณะต่างๆ (สเกลแกนเวลา 1 μsec/div.)

2.7 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยคอลัมน์คะแปซิเตอร์ของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป

ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.2 ว่าคอลัมน์ควบคุมการกระจายแรงดันของมัลติเปิลช็อบปิ้งแกป ประกอบด้วย คะแปซิเตอร์อนุกรมกับความต้านทานค่าต่ำๆ (ดูรูป 2.1) เพื่อทำหน้าที่ควบคุมให้แรงดันตกคร่อมตลอดความสูงของคอลัมน์เท่าๆ กัน หลักการอันนี้เหมือนกับการทำงานของโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำ (low-damped capacitive voltage divider) {11} ฉะนั้นเมื่อใส่คะแปซิเตอร์ภาคแรงต่ำไว้ที่ส่วนล่างของคอลัมน์เพื่อทำเป็นอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำจะทำให้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปทำหน้าที่เหมือนโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำทุกประการ การศึกษาลักษณะสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ว่าจะใช้วัดแรงดันต่างๆ ได้ดีหรือไม่เพียงใดทำได้โดยทดสอบหาลักษณะสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ผลตอบสนองรูปขั้น และค่าอัตราส่วนแรงดัน เพื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดในมาตรฐาน เช่น มาตรฐานสากลไออีซี เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของลักษณะสมบัติที่สำคัญไว้พอเป็นสังเขป

2.7.1 ผลตอบสนอง

ผลตอบสนองเป็นคุณสมบัติสำคัญประการหนึ่งของโวลเตจดิไวเดอร์ เพื่อจะบอกให้ทราบว่าโวลเตจดิไวเดอร์นั้นเหมาะสมที่จะใช้วัดแรงดันอิมพัลส์ประเภทใด การหาผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์อาจทำได้โดยใช้ผลตอบสนองรูปขั้น ผลตอบสนองรูปขั้นอาจมีแบบต่างๆ ดังภาพออสซิลโลแกรมที่แสดงในรูป 2.6 ซึ่งเป็นผลจากการทดลอง { 8 }



รูป 2.6 ผลตอบสนองรูปขั้นแบบต่างๆ ของโวลเตจดิไวเดอร์ในทางปฏิบัติ

ลักษณะของผลตอบสนองเหล่านี้จะบอกลักษณะสมบัติความถี่ของระบบการวัดไว้อย่างครบถ้วน คือ ความชันส่วนหน้าเป็นตัวบอกให้ทราบถึงขีดความสามารถความถี่พีกัด ถ้ามีการแกว่งดังรูป ง. และ จ. จะแสดงถึงเรโซแนนซ์ (resonance) ของระบบวัด อัมปลิจูดของผลตอบสนองจะแสดงถึงอัตราส่วนของโวลเตจดิไวเดอร์ ผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์ดีหรือไม่ดูได้จากเวลาตอบสนอง มาตรฐานสากลไออีซีได้พิสูจน์หาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาตอบสนอง T กับผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย g(t) ในเชิงคณิตศาสตร์ไว้ว่า {8.}

$$T = \int_{0}^{\infty} (1 - g(t))\, dt \qquad .....(2.4)$$

นั่นคือ เวลาตอบสนอง T จะเท่ากับผลรวมตามพีชคณิตของพื้นที่ระหว่างเส้นอัมปลิจูดหนึ่งหน่วย กับผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย ฉะนั้นจากออสซิลโลแกรมผลตอบสนองดังในรูป 2.6 ง. จึงอาจหาค่าเวลาตอบสนองได้จากสมการ

$$T = T_{\alpha} + T_{\beta} + T_{\gamma} \ldots\ldots \qquad \ldots\ldots(2.5)$$

ผลตอบสนองรูปขั้นดังกล่าวอาจทดลองหาได้ที่ระดับแรงดันสูงหรือต่ำก็ได้ แต่โดยทั่วไปมักจะนิยมทำกันที่ระดับแรงดันต่ำ โดยสมมุติเอาว่าองค์ประกอบของโวลเตจดิไวเดอร์และวงจรมีคุณสมบัติเชิงเส้น เมื่อใช้กับแรงดันสูงถึงค่าที่กำหนดก็ยังมีคุณสมบัติความถี่สูงอย่างเดิม ในทางปฏิบัติเมื่อเลือกตัวประกอบวงจรและออกแบบสร้างดีแล้วก็ถือได้ว่า โวลเตจดิไวเดอร์มีลักษณะสมบัติเชิงเส้น

ในกรณีที่ลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นนั้นอาจเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆ ที่สำคัญ คือ

ก) โคโรน่า (corona) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันสูงมากและทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าเกินค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติของฉนวน ฉะนั้นการออกแบบภาคแรงสูงที่ถูกต้องควรหลีกเลี่ยงโครงสร้างที่แหลมคม หรือใส่ชีลด์เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้า หรือแช่ในน้ำมันฉนวน หรือใช้แกสอัดความดัน

ข) ผลกระทบจากความร้อนภายในตัวประกอบวงจร เช่น ตัวความต้านทานและตัวคะแปซิเตอร์ ตัวประกอบบางชนิดจะเปลี่ยนแปลงค่าอย่างไม่เป็นเชิงเส้นเมื่ออุณหภูมิหรือแรงดันเปลี่ยนไป

การหาผลตอบสนองที่ระดับแรงดันสูงนั้นเหมาะที่จะใช้กับโวลเตจดิไวเดอร์ที่มีค่าแรงดันที่กำหนดสูงๆ (สูงกว่า 2 MV) ทั้งนี้เพราะโวลเตจดิไวเดอร์เหล่านี้จะมีค่าอัตราส่วนแรงดันสูง ถ้าทดสอบด้วยระดับแรงดันต่ำจะทำให้ผลตอบสนองรูปขั้นที่ออกมามีค่าน้อยค่าที่วัดได้อาจผิดพลาดได้มาก การทดสอบหาผลตอบสนองที่แรงดันสูงจะได้ผลถูกต้องใกล้เคียงกับสภาพใช้งานจริง

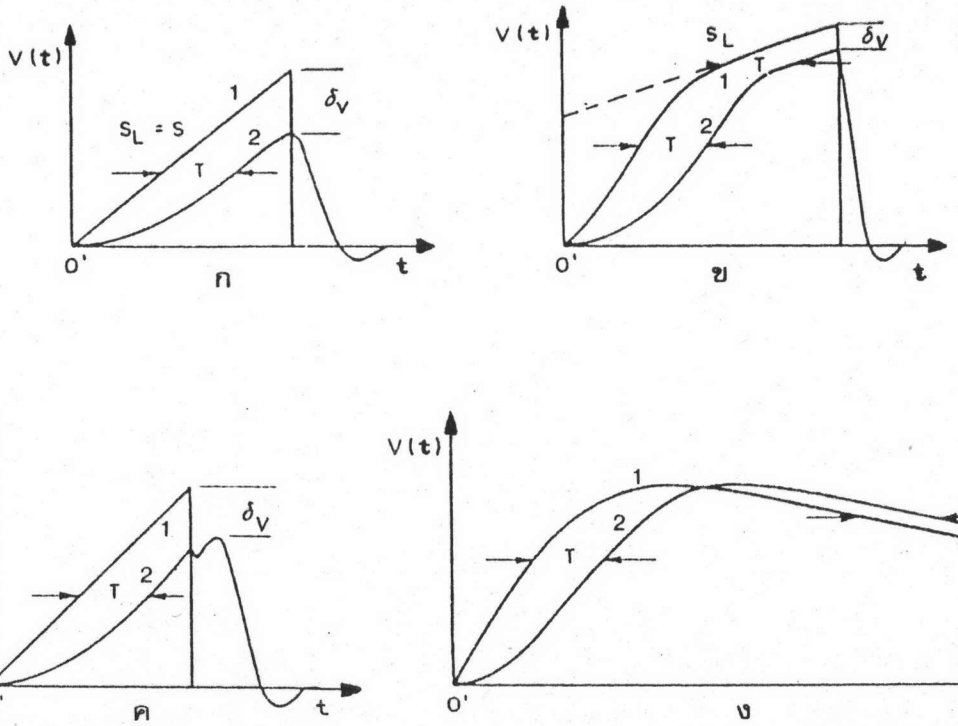
เวลาตอบสนองจะมีผลต่อการวัดเวลาข่วงคลื่นและอัมปลิจูดของแรงดันอิมพัลส์มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่นในรูป 2.7 แสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนในการวัดแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆ เมื่อทราบเวลาตอบสนองของระบบการวัดอาจคำนวณหาความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด และความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลาของคลื่นแรงดันอิมพัลส์แบบต่างๆ ได้ดังนี้

ก) ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอด δ_V คือ ความแตกต่างระหว่างค่ายอดของแรงดันที่ป้อนกับค่าที่วัดได้จากระบบการวัด คำนวณได้จากสมการ

$$\delta_V = S_L \cdot T \qquad .....(2.6)$$

เมื่อ S_L = ความชันของแรงดันที่ป้อนเข้าไปก่อนเกิดการตัดคลื่น

T = เวลาตอบสนองของระบบการวัด



1 รูปคลื่นแรงดันที่ต้องการวัด 2 รูปคลื่นแรงดันที่วัดได้

รูป 2.7 ความคลาดเคลื่อนในการวัดเนื่องจากเวลาตอบสนอง

รูป ก. เป็นกรณีที่พบบ่อยในทางปฏิบัติ คือ แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น รูป ข. คือ แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นไม่เป็นเชิงเส้น รูป ค. แสดงให้เห็นกรณีที่เกิดการเพี้ยนก่อนถึงค่ายอดของแรงดันที่ต้องการวัด ซึ่งเกิดจากผลกระทบของการเพี้ยนของเวลาเริ่มต้นในผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย (ดูรูป 2.6 ช, ซ) และยังแสดงให้เห็นด้วยว่าขณะที่วัดค่ายอดจะไม่ใช่เวลาเดียว

กันกับขณะที่คลื่นตัด แต่จะล้าหลังอยู่เล็กน้อยซึ่งทำให้สมการ (2.6) ใช้ไม่ได้ อย่างไรก็ดีปรากฏการณ์นี้อาจละเลยไม่ต้องคำนึงถึงได้ถ้ามีผลกระทบไม่มาก ในกรณีที่มีผลกระทบมากก็จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงระบบการวัดใหม่ การวัดค่ายอดของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นเต็มดังในรูป ง. จะหาความคลาดเคลื่อนในการวัดค่ายอดจากสมการ (2.6) ไม่ได้เพราะค่าความชันตรงจุดนั้นจะเป็นศูนย์ อันที่จริงค่ายอดของแรงดันจะคลาดเคลื่อนไปบ้างเหมือนกันแต่จะน้อยกว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกรณีที่เป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

ข) ความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลา δ_t คือ ความแตกต่างระหว่างช่วงเวลาของแรงดันที่วัดได้กับช่วงเวลาของแรงดันที่ต้องการวัด จากรูป 2.7 ก. เป็นกรณีที่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น ความคลาดเคลื่อนของช่วงเวลา คือ $\delta_t = T$ แต่แรงดันแบบรูป 2.7 ข, ค, และ ง. ไม่มีความสัมพันธ์เป็นกฎเกณฑ์ดังแบบรูป 2.7 ก. ในกรณีรูปคลื่นเต็มดังรูป 2.7 ง. นั้นความคลาดเคลื่อนในการวัดช่วงเวลา จะเกิดทั้งที่ตอนหน้าและตอนหางคลื่น แต่ความคลาดเคลื่อนจะมีผลกระทบมากเมื่อวัดเวลาช่วงหน้าคลื่น

2.7.2 อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์

อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์ หมายถึงอัตราส่วนแรงดันสูงที่ขั้วเข้าของสายนำไฟแรงสูงต่อแรงดันออกที่ปลายของเคเบิลวัดก่อนเข้าเครื่องวัดนั่นคือ

$$a = \frac{V_1}{V_2} \qquad .....(2.7)$$

เมื่อ a = อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์

V_1 = แรงดันที่ขั้วเข้าของสายนำไฟแรงสูง

V_2 = แรงดันออกที่ปลายของเคเบิลวัด

โวลเตจดิไวเดอร์ที่ดีต้องมีอัตราส่วนแรงดันคงที่ตลอดช่วงความถี่กว้าง และไม่ขึ้นกับระดับแรงดันตั้งแต่ค่าแรงดันต่ำจนถึงค่าแรงดันที่กำหนด

อัตราส่วนแรงดันของโวลเตจดิไวเดอร์แบบใดๆ อาจหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

ก) โดยวิธีคำนวณจากอิมพีแดนซ์ของตัวประกอบวงจรที่ทราบค่าจากการวัด

ข) โดยการวัดแรงดันพร้อมกันทั้งขาเข้า V_1 และขาออก V_2 ของโวลเตจดิไวเดอร์

ค) โดยใช้วงจรบริดจ์เทียบค่าแรงดันขาออกของโวลเตจดิไวเดอร์กับแรงดันขาออกของดิไวเดอร์มาตรฐานที่ปรับอัตราส่วนแรงดันได้

ง) โดยวิธีเทียบกับระบบการวัดทราบอัตราส่วนแรงดันแล้ว

ทั้ง 4 วิธีที่ใช้กันอยู่นี้ วิธี ก. เหมาะสำหรับหาอัตราส่วนแรงดันในทางทฤษฎี ซึ่งอาจแตกต่างไปจากเวลาใช้งานจริงได้ วิธี ข. และ ค. นั้นโดยมากทำกันที่ระดับแรงดันต่ำๆ ไม่เกิน 500 โวลต์ ซึ่งอาจเป็นแรงดันไฟตรงหรือไฟสลับแล้วแต่ว่าเป็นโวลเตจดิไวเดอร์แบบใด ถ้าเป็นโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานใช้ได้ทั้งไฟตรงและไฟสลับ แต่ถ้าเป็นโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์ต้องใช้แรงดันไฟสลับ และควรจะทดลองหาที่ความถี่ต่างๆ อย่างน้อย 2 ค่า เช่น ที่ความถี่ไฟฟ้ากำลัง 50 แฮร์ตซ์ และที่ 1 กิโลแฮร์ตซ์ ตามคำแนะนำของมาตรฐานสากลไออีซี {8} ส่วนวิธี ง. ใช้ได้กับโวลเตจดิไวเดอร์ทุกแบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์และแบบผสม

2.8 โวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำ

โวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงต่ำเป็นวิวัฒนาการล่าสุดของโวลเตจดิไวเดอร์ มีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถวัดแรงดันได้ทุกรูปแบบของสัญญาณตั้งแต่แรงดันกระแสสลับ ถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัด และสามารถออกแบบสร้างให้วัดแรงดันสูงมากๆ ได้โดยมีเวลาตอบสนองต่ำ โวลเตจดิไวเดอร์แบบก่อนๆ คือ โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานหรือแบบคะแปซิเตอร์จะมีปัญหามากเมื่อต้องการวัดแรงดันขนาดสูงมากๆ กล่าวคือ โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานจะมีเวลาตอบสนองมากเกินกว่าที่จะสร้างสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์สูงกว่า 2 เมกกะโวลต์ได้ ส่วนโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์ล้วนจะเกิดการแกว่งอย่างมากในผลตอบสนอง เพราะผลกระทบของสเตรอินดัคแตนซ์ในวงจรและในตัวคะแปซิเตอร์เองด้วย {11} การแก้ปัญหาการแกว่งในผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะปแซิเตอร์ล้วนทำได้โดยเพิ่มความต้านทานหน่วงในวงจร วิธีที่ใช้กันอยู่ คือ การใส่ตัวต้านทานค่าพอเหมาะไว้ตอนบนของโวลเตจดิไวเดอร์ ผลปรากฏว่าจะหน่วงการแกว่งได้ดีพอสมควร โวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้เรียกว่าโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์หน่วงในสายนำ (capacitor - voltage divider with damp lead-in) การแก้ปัญหาแบบนี้ไม่สามารถขจัดการสะท้อนของคลื่นภายในตัวโวลเตจดิไวเดอร์ได้ ต่อมาได้มีการพัฒนาโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดนี้ไปเป็นโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงเหมาะสม (optimal damped capacitive voltage divider) ซึ่งสามารถแก้ปัญหาผลตอบสนองได้ดีพอสมควร แต่ค่าความต้านทานของโวลเตจดิไวเดอร์แบบ

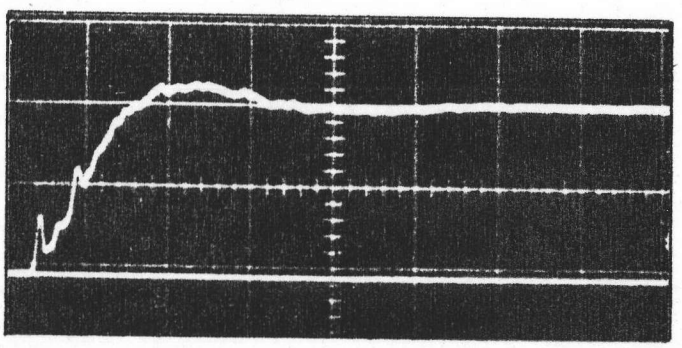
นี้มีค่าค่อนข้างมากทำให้มีผลกระทบต่อรูปร่างของแรงดันที่อุปกรณ์ทดสอบมากพอสมควรถ้าหากโหลดคะแปซิแตนซ์มีค่าน้อย ทั้งนี้เพราะเหตุว่าค่าคงที่เวลาภายในโวลเตจดิไวเดอร์มีค่าสูงมาก K. Feser ได้ดัดแปลงต่อโดยใช้ความต้านทานหน่วงค่าน้อยต่ออนุกรมกับคะแปซิเตอร์กระจายอยู่ตลอดภาคแรงสูงของโวลเตจดิไวเดอร์ เรียกว่าโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงกระจายในภาคแรงสูง (capacitive voltage divider with damping resistor distributed on the primary side) หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์ความต้านทานหน่วงต่ำ (low damped capacitive voltage divider) ในทางปฏิบัติค่าความต้านทานหน่วงมีค่าดังนี้ {12}

$$R \simeq (0.25 \ldots\ldots 1.5)\sqrt{L/C} \qquad \ldots\ldots(2.8)$$

เมื่อ L - อินดัคแตนซ์ทั้งหมดของระบบวัด

C - คะแปซิแตนซ์ทั้งหมดของโวลเตจดิไวเดอร์

การแกว่งภายในตัวโวลเตจดิไวเดอร์จะถูกหน่วงด้วยความต้านทานนี้ ในทางปฏิบัติเงื่อนไขนี้จะสอดคล้องกับความจริงที่ว่าสายนำไฟแรงสูงจะมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ใกล้เคียงกับค่าของความต้านทานภายในของโวลเตจดิไวเดอร์ ฉะนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีความต้านทานหน่วงภายนอกมาต่อในสายนำไฟแรงสูงอีก จากตัวอย่างการออกแบบทั่วๆ ไปที่รวบรวมได้พบว่าใช้ค่าความต้านทานประมาณ 50 โอห์ม ถึง 300 โอห์ม {12} ซึ่งจะได้ผลตอบสนองดีดังตัวอย่างแสดงในรูป 2.8



สเกลแกนเวลา 200 nS/div.
เวลาตอบสนอง 75 nS

รูป 2.8 ผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์ความต้านทานหน่วงต่ำ ขนาด 1.6 MV ที่มี R = 152 Ω C = 900 pF

อัตราส่วนการลดทอนแรงดัน (voltage ratio) ของโวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้กำหนดโดยคะแปซิเตอร์ภาคแรงสูงและแรงต่ำ {13} มีความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

$$a = \frac{c_1 + c_2 + c_c}{c_1} \qquad \text{.....(2.9)}$$

เมื่อ a - อัตราส่วนแรงดัน

c_1 - คะแปซิแตนซ์ภาคแรงสูง

c_2 - คะแปซิแตนซ์ภาคแรงต่ำ

c_c - คะแปซิแตนซ์ของสายเคเบิลวัด

2.9 การใช้มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปเป็นโหลดคะแปซิเตอร์สำหรับเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์

ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 1.5 เรื่องวงจรเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ดังรูป 1.5 ว่าโหลดคะแปซิเตอร์ C_b มีผลกระทบต่อช่วงหน้าคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ที่สร้างขึ้นดังความสัมพันธ์ในสมการ 1.2 ถ้าหากจัดค่าโหลดคะแปซิเตอร์ไม่เหมาะสมเวลาช่วงหน้าคลื่นไม่เป็นไปตามกำหนด ถึงแม้ว่า T_1 จะขึ้นกับ R_d และ C_s ด้วยก็ตามแต่ในทางปฏิบัติแล้วค่า C_s ในวงจรของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์เมื่อออกแบบสร้างแล้วจะมีค่าคงที่ สำหรับค่า R_d ของวงจรอาจเปลี่ยนแปลงได้บ้างแต่ก็ไม่สะดวกมากนักซึ่งขึ้นกับโครงสร้างของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ด้วย อีกอย่างหนึ่งการใช้ค่า R_d มากๆ จะมีผลกระทบทำให้แรงดันขาออกมีขนาดลดลงด้วย ในการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์จะกำหนดค่าของ R_d ที่เหมาะสมเอาไว้ การควบคุมช่วงเวลาหน้าคลื่นจึงมักใช้โหลดคะแปซิเตอร์แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงปัญหาประสิทธิภาพของวงจรบ้างเหมือนกัน มัลติเปิลช็อบปิ้งแกปเป็นเสมือนคะแปซิเตอร์ที่มีค่าคงที่เวลาไม่มากนัก เพราะความต้านทานหน่วงมีค่าต่ำ จึงสามารถรวมกับสเตรคะแปซิแตนซ์อื่นๆ ของวงจรให้เป็นโหลดคะแปซิเตอร์ได้ด้วย การทำเช่นนี้มีประโยชน์มากโดยเฉพาะในวงจรขนาดใหญ่ที่ขนาดแรงดันสูงมากๆ เพราะจะช่วยลดขนาดของวงจรลงอย่างมากและไม่ต้องใช้โหลดคะแปซิเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ราคาแพงมากอย่างหนึ่ง ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและที่สำคัญอย่างยิ่ง คือ บริเวณพื้นที่ทดสอบจะลดลงได้มาก นั่นคือไม่ต้องสร้างห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงขนาดโตเกินไปนั่นเอง