บทที่ 1

บทนำทั่วไป

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

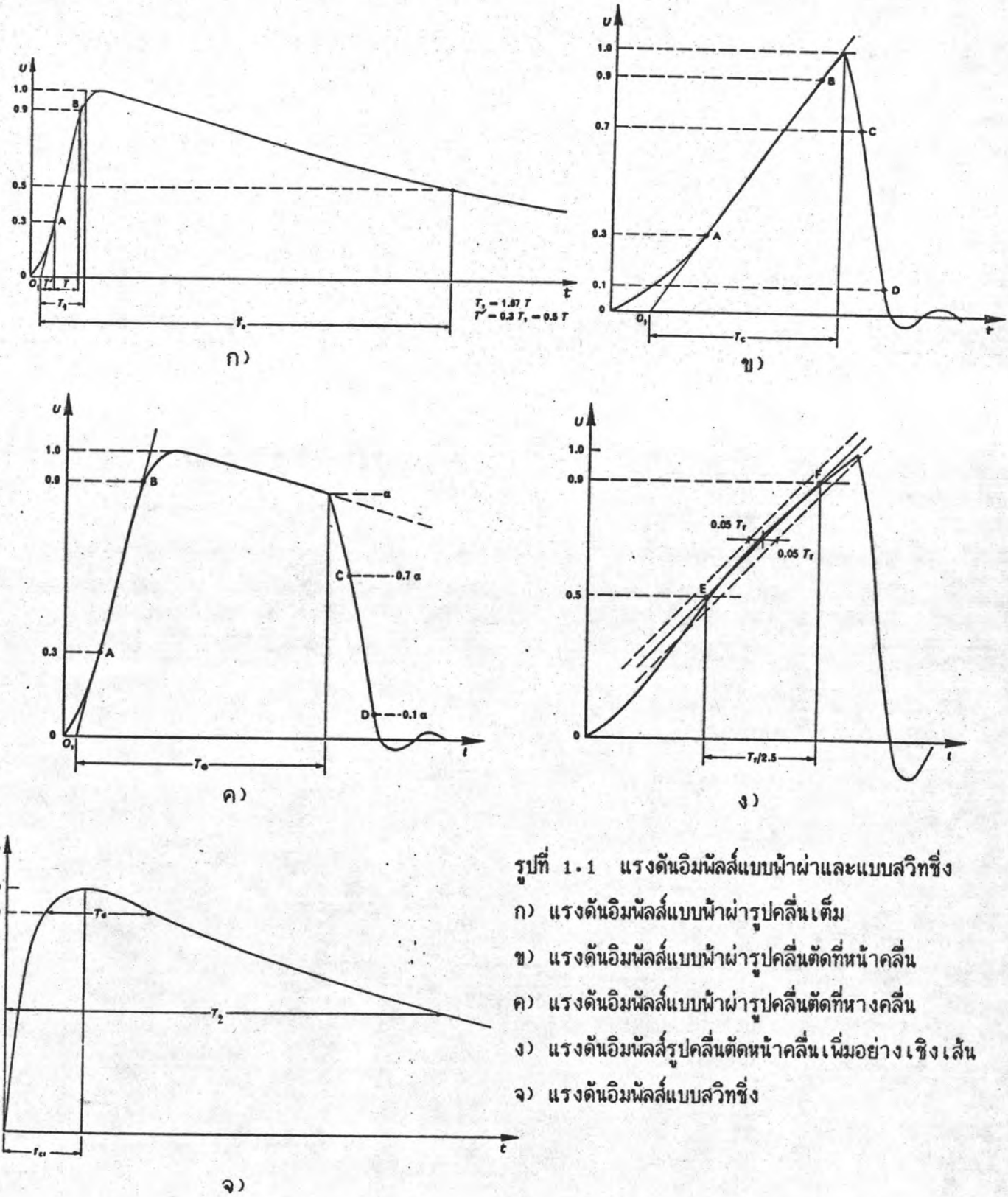
1.1 บทนำ

แรงดันอิมพัลส์ (impulse voltage) คือ แรงดันทรานเซี้ยนแบบไม่ใช่รายคาบ (aperiodic transient) [1] ที่อาจเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า (lightning impulse) เกิดจากการทำงานของสวิทช์ตัดตอน เรียกว่า แรงดันอิมพัลส์แบบสวิชชิ่ง (switching impulse) หรือเกิดจากการเบรกดาวน์ผ่านฉนวนก๊าซ เช่น ในสวิชเกียร์แบบฉนวนด้วยก๊าซ ทำให้เกิดแรงดันเกินอิมพัลส์ เรียกว่า EMP (electromagnetic pulse) เป็นต้น ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า มีโอกาสได้รับแรงดันอิมพัลส์แบบใดแบบหนึ่งตามที่กล่าวมา เพื่อให้แน่ใจว่าฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้า สามารถทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นได้ จึงต้องทดสอบการฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันทดสอบตามที่มาตรฐานกำหนด ดังเช่น ข้อกำหนดของ ไอ อี ซี ได้กำหนดขนาดของแรงดันทดสอบการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้า ตามขนาดของแรงดันสูงสุด ในระบบที่อุปกรณ์ไฟฟ้าจะนำไปใช้งาน ดังแสดงในตารางที่ 1.1 [2]

ตารางที่ 1.1 แสดงแรงดันทดสอบการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้า

ขนาดแรงดันสูงสุดในระบบ (kV)	3.6	7.2	12	17.5	24	36	52	72.5
แรงดันกระแสสลับ (kV)	10	20	28	38	50	70	95	140
แรงดันอิมพัลส์ (kV)	45	60	75	95	125	170	250	325

แรงดันอิมพัลส์ที่ใช้ในการทดสอบ อาจแบ่งตามลักษณะรูปคลื่นเป็นแบบฟ้าผ่าและแบบสวิทชิ่ง ดังในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าและแบบสวิทชิ่ง

ก) แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม

ข) แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

ค) แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หางคลื่น

ง) แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น

จ) แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทชิ่ง

แรงดันอิมพัลส์แต่ละแบบตามข้อกำหนดของ ไอ อี ซี{2} มีลักษณะดังนี้

ก) แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (full lightning impulse) คือ แรงดันอิมพัลส์ที่ไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของรูปคลื่นถูกรบกวน เนื่องจากเกิดดีสชาร์จทำลาย (disruptive discharge) ลักษณะรูปคลื่นกำหนดด้วยเวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 กับเวลาช่วงหลังคลื่น T_2 (ดูรูปที่ 1.1 ก)) จุดศูนย์เสมือน O_1 เป็นจุดซึ่งเกิดจากการลากเส้นตรงผ่านจุดที่แรงดันมีค่า 30 เปอร์เซ็นต์ กับ 90 เปอร์เซ็นต์ ของค่ายอดมาตัดแกนเวลา แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มมาตรฐาน คือ แรงดันอิมพัลส์ที่มีเวลา T_1/T_2 เป็น 1.2/50 ไมโครวินาที

ข) แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด (chopped lightning impulse) คือ แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าที่รูปคลื่นเกิดดีสชาร์จทำลาย ทำให้แรงดันตกลงสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว การตัดของแรงดันอาจเกิดที่หน้าคลื่น ดังรูปที่ 1.1 ข) ค่ายอดหรือส่วนหางคลื่น ดังรูป 1.1 ค) เวลาช่วงคลื่นตัด T_c (time to chopping) เป็นเวลาที่วัดจากจุดศูนย์เสมือน O_1 ไปถึงขณะที่คลื่นตัด (ดูรูปที่ 1.1 ข) และ ค)) แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดมาตรฐาน จะมีเวลาช่วงคลื่นตัดอยู่ระหว่าง 2-5 ไมโครวินาที

ค) อิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น (linearly rising front chopped impulse) คือ แรงดันที่มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยความชัน (steepness) คงที่โดยประมาณจนถึงขณะที่คลื่นตัด ความชันของรูปคลื่นหาได้จากเส้นที่ลากผ่านจุด 50 และ 90 เปอร์เซนต์ของค่าแรงดันขณะที่คลื่นตัด คือ จุด E และ F ในรูปที่ 1.1 ง) แรงดันอิมพัลส์ที่จะเรียกได้ว่าหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้นโดยประมาณ คือ เมื่อหน้าคลื่นตั้งแต่จุด 50 เปอร์เซนต์ ขึ้นไปถึงขณะที่คลื่นตัดอยู่ในระหว่างเส้นตรงสองเส้นที่ลากขนานกับเส้น EF ห่างออกไปด้วยเวลา $\pm 0.05T_r$ ทั้งหมดตลอดช่วง เมื่อ T_r คือ rise time มีค่าเท่ากับช่วงเวลาระหว่างจุด E และ F คูณด้วย 2.5

ง) แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทชิ่ง (switching impulse) คือแรงดันอิมพัลส์ที่มีช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่น ยาวนานกว่าแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า ลักษณะของแรงดันอิมพัลส์แบบสวิทชิ่งกำหนดด้วย

เวลาถึงค่ายอด T_{cr} เป็นเวลาที่วัดจากจุดศูนย์จริงของรูปคลื่นแรงดันถึงจุดที่แรงดันถึงค่ายอด

เวลาช่วงหลังคลื่น T_2 เป็นเวลาที่วัดจากจุดศูนย์จริงของรูปคลื่นแรงดันถึงจุดที่แรงดันลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของค่ายอดเป็นครั้งแรก

เวลามากกว่า 90 เปอร์เซนต์ของค่ายอด T_d เป็นช่วงเวลาที่รูปคลื่นแรงดันมีขนาดมากกว่า 90 เปอร์เซนต์ของค่ายอด

แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทชิ่งรูปคลื่นเต็มมาตรฐานมีเวลา T_{cr}/T_2 เป็น 250/2500 ไมโครวินาที

1.2 เทคนิคการวัดแรงดันอิมพัลส์

การวัดแรงดันอิมพัลส์ที่ใช้อยู่กันทั่วไป คือ การวัดด้วยช่องว่างทรงกลม (sphere gap) และการวัดด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ (voltage divider)

1.2.1 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยช่องว่างทรงกลม

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยช่องว่างทรงกลม อาศัยการเกิดเบรกดาวน์ของอากาศ ภายในช่องว่างทรงกลม แรงดันเบรกดาวน์ระหว่างช่องว่างทรงกลมขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างทรงกลม เส้นผ่าศูนย์กลางทรงกลม และ สภาวะอากาศรอบๆ ทรงกลม [3] การวัดแรงดันโดยใช้ช่องว่างทรงกลมมีลักษณะสมบัติดังนี้ คือ

ก) ใช้วัดได้ทั้งแรงดันกระแสตรง กระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์

ข) มีความถูกต้องเที่ยงตรง ±3 %

ค) เป็นการวัดค่ายอดแรงดันเท่านั้น

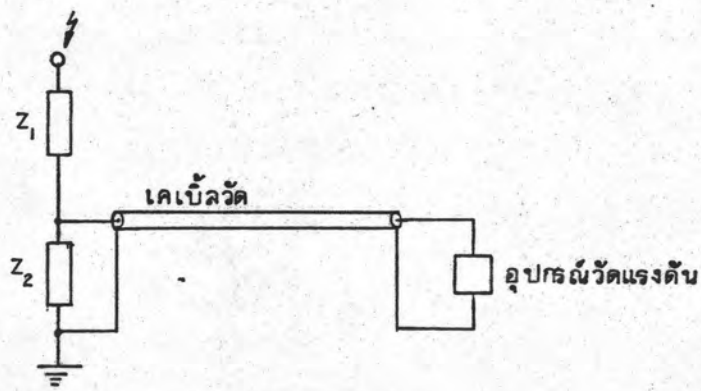
ง) ค่าแรงดันที่วัดได้ที่สภาวะทดลองต้องปรับไปที่สภาวะมาตรฐาน

จ) ค่าที่ถูกต้องได้จากการหาค่าเฉลี่ยจากการวัดหลายๆ ครั้ง

เนื่องจากการวัดด้วยช่องว่างทรงกลมไม่มีตัวชี้ จึงไม่สะดวกในการใช้งาน แต่เหมาะสำหรับใช้ปรับเทียบอุปกรณ์วัดแรงดันสูงอื่น

1.2.2 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดิไวเดอร์

โวลเตจดิไวเดอร์เป็นอุปกรณ์วัดแรงดัน ทำหน้าที่ลดทอนแรงดันสูงลงมาให้ต่ำ พอที่จะใช้อุปกรณ์วัดแรงดันต่ำวัดได้ โวลเตจดิไวเดอร์ประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูงอนุกรมกับอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ ดังรูปที่ 1.2 ปลายข้างหนึ่งของภาคแรงสูง จะต่ออยู่กับสายแรงสูงที่จะวัด ส่วนอีกข้างหนึ่งจะต่ออยู่กับปลายหนึ่งของภาคแรงต่ำ ปลายอีกข้างหนึ่งของภาคแรงต่ำต่อลงดิน แรงดันที่ตกคร่อมภาคแรงต่ำจะต่อไปยังอุปกรณ์วัดแรงดันต่ำด้วยเคเบิลวัด



รูปที่ 1.2 วงจรทั่วไปของโวลเตจดิไวเดอร์

Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง

Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ

การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ เป็นวิธีการวัดโดยตรง สะดวก และ รวดเร็ว สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับเวลา โดยใช้ออสซิลโลสโคปเป็นอุปกรณ์วัดแรงดันต่ำ ความถูกต้องของการวัดขึ้นกับความเที่ยงตรงของอุปกรณ์วัดและอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ ซึ่งอาจเปลี่ยนแปลงเมื่อความถี่เปลี่ยนหรือได้รับผลกระทบจากความร้อน

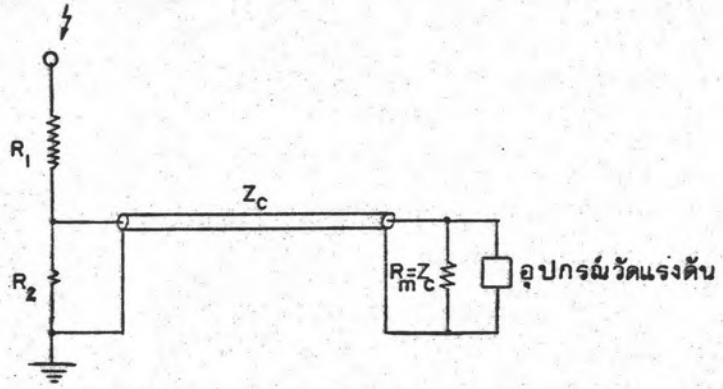
โวลเตจดิไวเดอร์ที่สร้างขึ้นใช้กันทั่วไปมีหลายชนิด สามารถจำแนกตามองค์ประกอบวงจรที่ใช้ดังนี้ คือ

ก) แบบความต้านทาน (resistor voltage divider)
ข) แบบตัวเก็บประจุ (capacitor voltage divider)
ค) แบบผสม (mixed voltage divider)
ง) แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง (damped capacitive voltage divider)

1.2.2.1 โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดนี้อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และ ภาคแรงต่ำเป็นความต้านทาน ดังรูปที่ 1.3 ความต้านทานภาคแรงสูงมักจะใช้แบบเส้นลวดพันให้เกิดความเหนี่ยวนำต่ำแช่อยู่ในน้ำมันหม้อแปลง {4}

โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดนี้ใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับย่านต่ำกว่าหนึ่งร้อยกิโลโวลต์ เหมาะสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง ส่วนการวัดแรงดันสูงอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าจะมีผลกระทบจาก ความจุสเตรลงดิน จึงนิยมใช้วัดไม่เกิน 2,300 กิโลโวลต์ {5}



รูปที่ 1.3 โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน

R_1 คือ ความต้านทานภาคแรงสูง

R_2 คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ

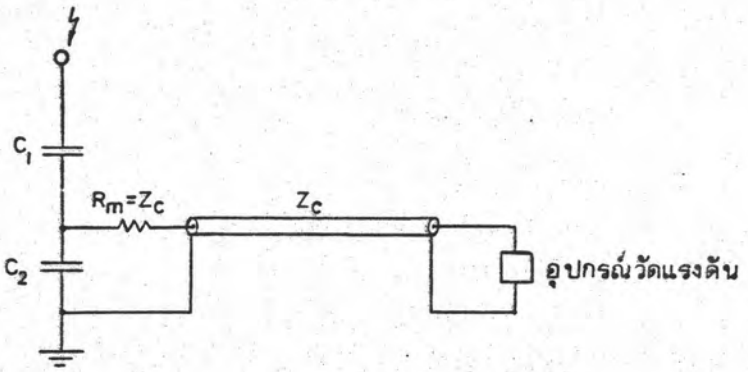
R_M คือ ความต้านทานแมชชิ่งของเคเบิลวัด

Z_C คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

1.2.2.2 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

โวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้มีอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง และ ภาคแรงต่ำเป็นแบบตัวเก็บประจุ ดังรูปที่ 1.4

ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงอาจเป็นแบบตัวเก็บประจุย่อยหรือตัวเก็บประจุเดี่ยวก็ได้ ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุย่อยจะใช้ตัวเก็บประจุย่อย มาต่ออนุกรมกันให้ได้ค่าความจุและแรงดันตามต้องการ ตัวเก็บประจุย่อยอาจเป็นแบบกระดาษชุบน้ำมันหรือแบบเซรามิค เป็นต้น ถ้าเป็นแบบตัวเก็บประจุเดี่ยวจะใช้เป็นตัวเก็บประจุแบบก๊าซอัดความดัน มีโครงสร้างอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม ก๊าซอัดความดันที่ใช้อาจเป็นก๊าซคาร์บอนไดอ๊อกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน หรือก๊าซซัลเฟอร์เฮกซาฟลูออไรด์ (SF_6)



รูปที่ 1.4 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ

C_1 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงสูง

C_2 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

R_M คือ ความต้านทานแมชชิ่งของเคเบิลวัด

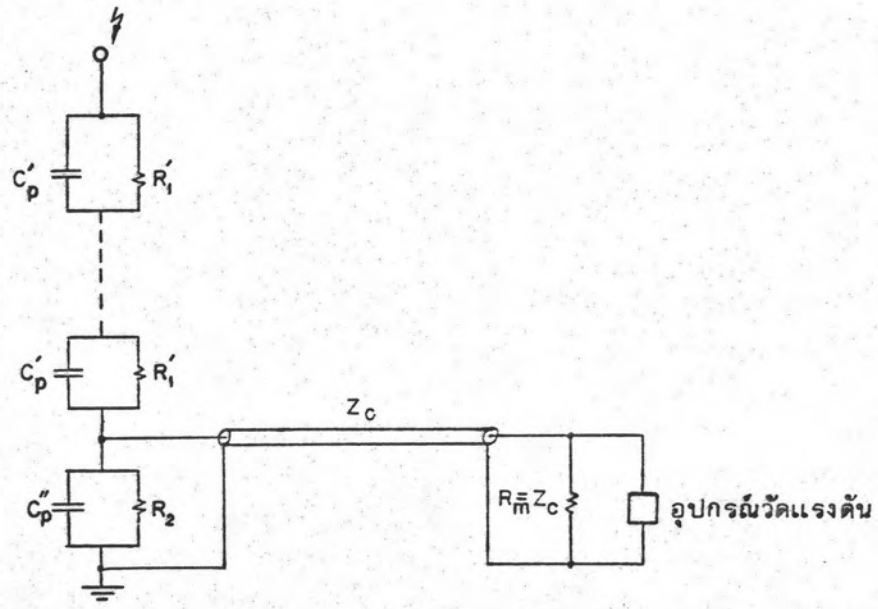
Z_C คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

โวลเตจดิไวเดอร์ชนิดนี้ เมื่อใช้วัดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จะเกิดการแกว่งอย่างมาก แต่ถ้าใส่ความต้านทานแมชชิ่งและความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม ร่วมกับตัวเก็บประจุภาคแรงสูงที่เป็นแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วมฉนวนด้วยก๊าซอัดความดัน จะให้ผลตอบสนองและเวลาตอบสนองที่ดี มีอัตราส่วนแรงดันที่คงที่ไม่ขึ้นกับความถี่[63] ใช้วัดได้ทั้งแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์

1.2.2.3 โวลเตจดิไวเดอร์แบบผสม

โวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้ดัดแปลงมาจากโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทาน โดยต่อตัวเก็บประจุย่อยขนานเข้าไปกับความต้านทานเพื่อลดผลกระทบของการกระจายแรงดันที่ไม่เป็นเชิงเส้นในภาวะเริ่มแรก ของแรงดันอิมพัลส์ ผลตอบสนองจะดีขึ้น เมื่อตัวเก็บประจุขนานที่ต่อเข้าไปมีค่าประมาณ 3 เท่า ของความจุสเตรลงดิน และค่าคงที่เวลาของภาคแรงสูงและแรงต่ำเท่ากัน

วงจรทั่วไปของโวลเตจดิไวเดอร์ชนิดนี้แสดงไว้ในรูปที่ 1.5 โวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้จะเหมาะสำหรับวัดแรงดันอิมพัลส์ ถ้าตัวเก็บประจุขนานที่ต่อเข้าไปไม่ใหญ่เกินไป



รูปที่ 1.5 โวลเตจดิไวเดอร์แบบผสม

R'_1 คือ ความต้านทานย่อยในภาคแรงสูง

C'_p คือ ตัวเก็บประจุย่อยขนานในภาคแรงสูง

R_2 คือ ความต้านทานภาคแรงต่ำ

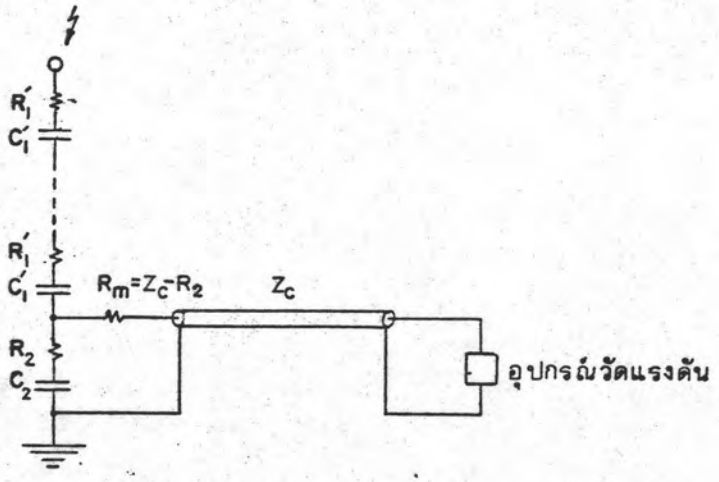
C_p คือ ตัวเก็บประจุขนานในภาคแรงต่ำ

R_M คือ ความต้านทานแมชชิ่งของเคเบิลวัด

Z_C คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

1.2.2.4 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

โวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้ ภาคแรงสูง และ ภาคแรงต่ำ ประกอบด้วย ความต้านทานและตัวเก็บประจุต่ออนุกรมกัน ดังรูปที่ 1.6 ความต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้จะเป็นตัวหน่วงการแกว่งภายในตัวโวลเตจดิไวเดอร์ ถ้าเลือกใช้ความต้านทานหน่วงที่เหมาะสม โวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้ก็ให้ผลตอบสนองที่ดีแม้ว่าจะใช้กับระดับแรงดันสูงมากก็ตาม [13] โวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้ใช้วัดได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์และแรงดันกระแสสลับ



รูปที่ 1.6 โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง

R'_1 คือ ความต้านทานอนุกรมย่อยในภาคแรงสูง

C'_1 คือ ตัวเก็บประจุย่อยในภาคแรงสูง

R_2 คือ ความต้านทานอนุกรมในภาคแรงต่ำ

C_2 คือ ตัวเก็บประจุภาคแรงต่ำ

R_M คือ ความต้านทานแมชชิ่งของเคเบิลวัด

Z_c คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเคเบิลวัด

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ที่มาของปัญหา

ในอนาคตอันใกล้นี้ อุตสาหกรรมภายในประเทศจะสามารถผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง สำหรับใช้กับระบบแรงดัน 72.5 กิโลโวลต์ ซึ่งต้องทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ 325 กิโลโวลต์ การวัดแรงดันอิมพัลส์ดังกล่าวจำเป็นต้องใช้โวลเตจดิไวเดอร์ที่ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศในราคาที่สูง เมื่อพิจารณาถึงเทคโนโลยีที่มีอยู่พบว่าสามารถสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ขึ้นใช้เอง โดยใช้วัสดุและ อุปกรณ์ประกอบ ที่ผลิตได้เองภายในประเทศ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าได้เคยวิจัยออกแบบ และ สร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานขนาด 300 กิโลโวลต์ ซึ่งใช้สำหรับวัดแรงดันทดสอบการฉนวนในระบบ 52 กิโลโวลต์ สำเร็จมาแล้ว [4] แต่โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานเหมาะสำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสตรง และ แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า ส่วนโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุซึ่งสามารถใช้วัดได้ทั้งแรงดันสูงกระแสสลับ แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าและแบบสวิชชิ่ง ยังไม่มีการออกแบบสร้างขึ้นภายในประเทศมาก่อน เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับวิจัยค้นคว้าออกแบบสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ที่วัดได้ทั้งแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าและแบบสวิชชิ่ง จึงสมควรที่จะได้ทำการค้นคว้าวิจัยโวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุขึ้น

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้าง อิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุให้วัดแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าได้ถึง 400 กิโลโวลต์ มีอัตราส่วนแรงดัน 1000 ต่อ 1 ใช้ตัวเก็บประจุภาคแรงสูงแบบก๊าซอัดความดันมีโครงสร้างอิเล็กโทรดแบบทรงกระบอกซ้อนแกนร่วม