

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

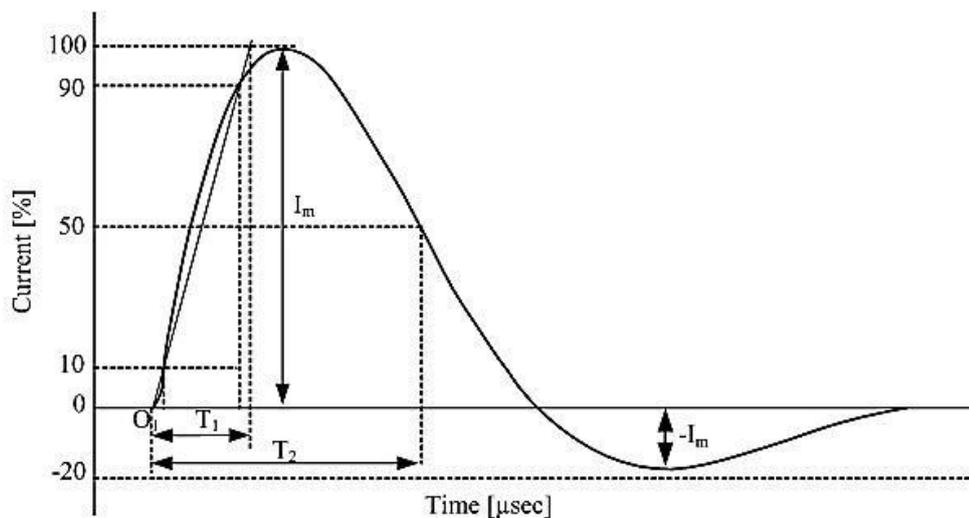
ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการคายประจุหรือการดีสชาร์จของประจุที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ การสะสมของประจุที่มีขั้วต่างกัันนั้นทำให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างกลุ่มประจุทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเกินค่าความเครียดวิกฤติทำให้เกิดการถ่ายเทประจุระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกหรือเรียกว่า“ฟ้าผ่า”



รูปที่ 2.1 การเกิดฟ้าผ่า

ขนาดของกระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นนั้น มีขนาดตั้งแต่กิโลแอมป์จนถึงหลายร้อยกิโลแอมป์ โดยค่ากระแสเฉลี่ยประมาณ 20 ถึง 30 กิโลแอมป์ ซึ่งอาจเป็นชั่วลบหรือบวกก็ได้

IEC Publ No.60060-1[3] ได้กำหนดรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐานโดยพยายามเลียนแบบรูปคลื่นที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติให้ใกล้เคียงที่สุด



รูปที่ 2.2 ลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน [4]

2.1.1 องค์ประกอบของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

1. เวลาหน้าคลื่น (Front time, T_1) หมายถึงช่วงเวลาที่กระแสอิมพัลส์เริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดของกระแสอิมพัลส์
2. เวลาหางคลื่น (Tail time, T_2) หมายถึงช่วงเวลาตั้งแต่กระแสอิมพัลส์เริ่มเพิ่มขึ้นจากศูนย์ผ่านกระแสค่ายอดกระแสอิมพัลส์จนกระทั่งขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสอิมพัลส์
3. ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ (Impulse Current Peak Value, I_m)
4. ค่ายอดกระแสอิมพัลส์กลับหัว ($-I_m$)

ตารางที่ 2.1 ชนิดของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

ชนิดรูปคลื่น	เวลาหน้าคลื่น (T_1) (μ s)	เวลาหลังคลื่น (T_2) (μ s)
1/20	1	20
4/10	4	10
8/20	8	20
30/80	30	80
10/350	10	350

2.1.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

IEC Publ No.60060-1 ได้กำหนดขอบเขตมาตรฐานค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์เอาไว้ [5]

1. การวัดค่าช่วงเวลาน้ำคลื่น (T_1) นั้นคำนวณจาก 1.25 เท่าของช่วงเวลาตั้งแต่กระแสอิมพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 10% ของค่ายอดจนถึงค่า 90% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์
2. การวัดค่าช่วงเวลาหางคลื่น (T_2) คำนวณจากเวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จนถึงกระแสอิมพัลส์ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดกระแสอิมพัลส์
3. จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นกระแส คือจุดระหว่างแกนนอน (แกนเวลา) กับเส้นตรงที่ลากผ่านระหว่างจุด 10% ของค่ายอดกระแสอิมพัลส์ และจุด 90% ของค่ายอดกระแสที่ด้านหน้าคลื่น

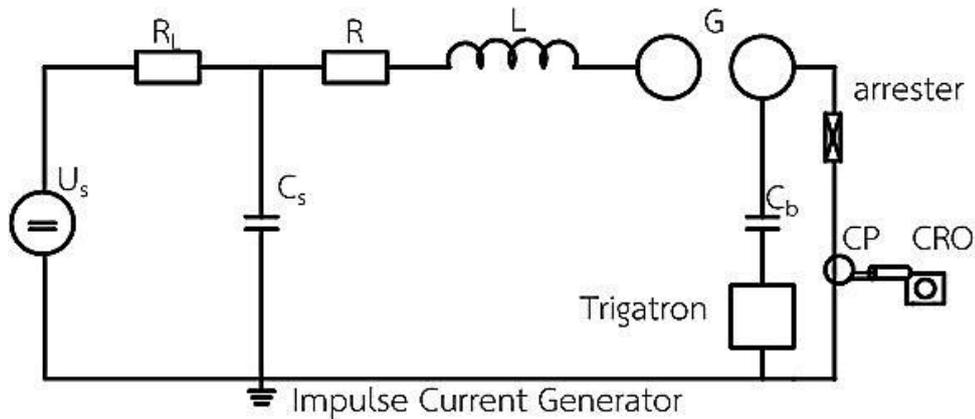
2.1.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ขนาด 8/20 μ s ตามมาตรฐาน IEC 60060-1 กำหนดดังนี้

1. ค่ายอดของกระแสอิมพัลส์ (I_m) $\pm 10\%$
2. เวลาหน้าคลื่น (T_1) $\pm 10\%$
3. เวลาหลังคลื่น (T_2) $\pm 10\%$

นอกจากนี้รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์อาจเกิดการแกว่ง ซึ่งการแกว่งของรูปคลื่นของกระแสอิมพัลส์นี้เมื่อกลับเข้าสู่ศูนย์แล้ว อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางชั่วได้ โดยค่ากระแสกลับหัวต้องมีค่าไม่เกิน 20% ของค่ายอดคลื่นกระแสอิมพัลส์

2.2 วงจรและหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ [1]

การสร้างกระแสอิมพัลส์นั้นอาศัยวงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดกระแสตรง(DC Generator, U_s) เป็นตัวป้อนแรงดันไฟฟ้าอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ (Capacitor, C_s) ซึ่งประกอบด้วยตัวเก็บประจุหลายตัวต่อกันจนกระทั่งได้แรงดันไฟฟ้าอัดประจุที่ต้องการแล้วเกิดเปลวไฟกระโดดที่ช่องว่างเปลวไฟกระโดด (Spark Gap, G) ทำให้เกิดการคายประจุไปยังตัวต้านทาน (Resistor, R) ที่มีตัวเหนี่ยวนำ(Inductor, L) เกิดเป็นรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ สำหรับวงจรวัดจะมีโรกอฟสกีคอยล์(Rogowski Coil, RC) ใช้วัดกระแสอิมพัลส์ดังรูป 2.3 [8]



รูปที่ 2.3 วงจรเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

ความหมายในรูปวงจร

- U_s คือแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงจ่ายป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้าอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุ (kV)
- C_s คือตัวเก็บประจุ (μF)
- R_L คือตัวต้านทานกระแสอัดประจุ (Ω)
- R คือตัวต้านทานสำหรับรูปคลื่น (Ω)
- L คือตัวเหนี่ยวนำสำหรับรูปคลื่น (μH)
- G คือสปาร์กแกป
- RC คือโรกอฟสกีคอยล์ใช้วัดกระแสอิมพัลส์
- CRO คือออสซิลโลสโคป

2.2.1 ตัวเก็บประจุ (C_s)

การเลือกค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการจ่ายกระแสอิมพัลส์นั้นต้องคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าอัดประจุที่ต้องการใช้งานดังนั้นจึงต้องเลือกค่าตัวเก็บประจุให้สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

2.2.1.1 ช่วงการอัดประจุ

เมื่อตัวเก็บประจุได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้าอัดประจุจากเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้า กระแสตรงก็เกิดการเก็บสะสมประจุ(Q) ขึ้นภายในตัวเก็บประจุโดยค่าของประจุที่มีการสะสมมีขนาดเท่ากับ

$$Q = CV \quad (2.1)$$

เมื่อ Q คือค่าพลังงานอัดประจุหน่วยเป็นคูลอมป์ (Coulomb)

C คือตัวเก็บประจุหน่วยเป็นฟารัด(Farad)

V คือแรงดันอัดประจุหน่วยเป็นโวลท์(Volt)

เมื่อมีการอัดประจุ(Q) ผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแส (R_L) ให้กับตัวเก็บประจุภายในเวลา (t) ย่อมได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$q(t) = CV(1 - e^{-\frac{t}{R_L C}}) \quad (2.2)$$

แต่ตัวต้านทานกระแสที่เพิ่มเข้ามาทำหน้าที่ควบคุมเวลาและการอัดประจุโดยมีค่าความคงที่เวลา(τ) คือเท่ากับ R_LC ซึ่งตัวเก็บประจุจะได้รับการอัดประจุจนถึงสภาวะคงตัว (Steadystate) ภายในเวลาทั้งหมดประมาณ 5 เท่าหรือ 5 τ หรือ 5R_LC ซึ่งในช่วงเวลาที่มีการสะสมของประจุที่ตัวเก็บประจุย่อมเกิดการสะสมของพลังงานในรูปสนามไฟฟ้าขึ้นโดยเมื่อเราพิจารณาในแง่ของกำลัง(P_c)ที่ตัวเก็บประจุจะได้รับเป็นดังสมการ(2.3)

$$\begin{aligned} \text{จาก} \quad i_c(t) &= \frac{dQ_{cr}}{dt} = \frac{Cve^{-\frac{t}{R_L C}}}{R_L C} \\ \text{และ} \quad V_c(t) &= V(1 - e^{-\frac{t}{R_L C}}) \\ \text{จะได้} \quad P_c(t) &= v_c(t) i_c(t) \\ &= \frac{V^2(1 - e^{-\frac{t}{R_L C}})e^{-\frac{t}{R_L C}}}{R} \end{aligned} \quad (2.3)$$

โดยที่ P_c(t) คือกำลังงานที่ตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt)

V_c(t) คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าอัดประจุ ณ เวลา t ใดๆมีหน่วยเป็นโวลท์ (Volt)

i_c(t) คือการอัดประจุ ณ เวลาใดๆมีหน่วยเป็นแอมป์(Ampere)

และพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในการสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ตัวเก็บประจุสะสมไว้คือ

$$\text{Energy} = \int_0^t P_c(t) dt = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV \quad (2.4)$$

$$\text{Loss} = I^2 R = \frac{V^2}{R} \quad (2.5)$$

เมื่อเครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง จ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานจำกัดกระแสย่อมเกิดค่าความสูญเสียขึ้น (Loss) ดังสมการ (2.5) เนื่องจากกระแสที่จ่ายมาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง โดยตัวต้านทานจำกัดกระแสทำหน้าที่ควบคุมปริมาณกระแสจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (หรือเป็นการควบคุมเวลาในการอัดประจุให้กับตัวเก็บประจุนั่นเอง) ซึ่งจะเกิดค่าความสูญเสียขึ้นในรูปของความร้อน

2.2.1.2 ช่วงคายประจุ

เมื่อมีการสะสมประจุของตัวเก็บประจุ ทำให้เกิดการสะสมของพลังงานมากขึ้นจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่สภาวะคงตัว (แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัวเก็บประจุ ย่อมเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ป้อนจากเครื่องกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง) พลังงานที่สะสมไว้นี้ จะถูกส่งผ่านไปที่อิเล็กโตรดทรงกลมซึ่งทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าตกรวมระหว่างขั้วอิเล็กโตรดทั้งสองมีค่าเท่ากับเครื่องกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง เราจึงใช้หลักการนี้ในการควบคุมอิเล็กโตรดให้ทำงานเหมือนสวิตช์ คือออกแบบอิเล็กโตรดเบรกดาวน (Break down) ภายใต้แรงเคลื่อนไฟฟ้าใกล้เคียงกับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอัดประจุ โดยการเบรกดาวนของอิเล็กโตรดทรงกลมาย่อมส่งผลให้ตัวเก็บประจุคายพลังงานในรูปของประจุเปลี่ยนแปลงตามเวลาผ่านไปยั้งตัวเหนี่ยวนำ โดยตัวเหนี่ยวนำได้เก็บพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็กเมื่อสะสมพลังงานเต็มที่แล้วจะเกิดการถ่ายเทพลังงานกลับไปยั้งตัวเก็บประจุใหม่ การถ่ายเทพลังงานกลับไปกลบมาระหว่างตัวเก็บประจุกับตัวเหนี่ยวนำนั้นทำให้เกิดการแกว่งของรูปคลื่นกระแส โดยมีอัตราการเพิ่มค่ายอด $\frac{di}{dt} = \frac{e}{L}$ ซึ่งในขณะที่รูปคลื่นกระแสเกิดการแกว่ง ตัวต้านทานภายในวงจรย่อมทำการหน่วงรูปคลื่นกระแสเพื่อลดการแกว่งที่เกิดขึ้น โดยพลังงานที่ตัวเก็บประจุส่งผ่านไปยั้ง R และ L คือ

$$w_c = \int_0^t i^2 R dt = \frac{1}{2} i^2 R^2 C = \frac{1}{2} C V^2 \quad (2.6)$$

ส่วนพลังงานที่ตัวเหนี่ยวนำสะสมจะอยู่ในรูปของสนามแม่เหล็กชั่วขณะ (Transient magnetic field) มีค่าเท่ากับ

$$W_L = \frac{1}{2} L i^2 \quad (2.7)$$

2.2.2 ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ (R_L)

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปนั้นมีการกำหนดจำนวนครั้งการคายประจุ เพราะการใช้เครื่องมือให้คายประจุด้วยอัตราเร็วเกินไป ย่อมทำให้เกิดผลเสียต่อองค์ประกอบต่างๆ เช่น ไดโอดแรงสูง ตัวเก็บประจุ เพราะการคายประจุเป็นสภาวะชั่วคราว มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าและกระแสอย่างรวดเร็ว นั่นคือการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อฉนวนขององค์ประกอบเครื่องกำเนิดในด้านความคงทนต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าหรือความเครียดสนามไฟฟ้า จึงทำให้อายุการใช้งานขององค์ประกอบสั้นลง ถ้าหากการคายประจุอย่างต่อเนื่องถี่เกินไปไม่มีเว้นช่วง การคายก็หมายถึงการประจุหรืออัดประจุด้วยเช่นกัน การจำกัดอัตราการอัดประจุทำได้โดยใช้ความต้านทานจำกัดกระแสอัดประจุ R_L ซึ่งต่ออนุกรมคั่นอยู่ระหว่างตัวจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกระแสตรง กับตัวเก็บประจุ C_S ให้มีค่าสูงมากพอ เพื่อให้ได้กระแสอัดประจุที่มีค่าต่ำคือไม่เกินพิกัดกระแสของตัวจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกระแสตรง i_o ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราเพิ่มแรงดันอัดประจุ $\frac{dv}{dt}$ ไม่ควรเร็วเกินไป

ค่ากระแสอัดประจุจึงเขียนได้ว่า $i = C \cdot \frac{dv}{dt}$ ฉะนั้นค่า R_L อาจหาได้จาก

$$R_L \geq \frac{V}{i}$$

และมีความคงทนต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าอัดประจุของตัวเก็บประจุได้ เพราะความต้านทาน R_L นั้นต้องรับแรงเคลื่อนไฟฟ้าเท่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอัดประจุที่กำหนดเมื่อตัวเก็บประจุอัดประจุเต็มแล้วนอกจากต้องเลือกค่าโอห์มและแรงเคลื่อนไฟฟ้าแล้วยังต้องคำนึงถึงค่ากำลังไฟฟ้าของการอัดประจุอีกด้วย กล่าวคือ ความต้านทาน R_L ต้องทนต่อกระแสอัดประจุได้สูงสุด

2.2.3 ตัวต้านทานปรับรูปคลื่น[6]

ความต้านทานปรับรูปคลื่นจะต้องสามารถทนแรงดันไฟฟ้า รับพลังงานดีสชาร์จทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นในเวลาสั้นๆได้ โดยไม่ทำให้อุณหภูมิสูงเกินไป โดยทั่วไปมักจะใช้ความต้านทานที่ทำด้วยลวดความต้านทาน อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นสามารถคำนวณได้จากสมการของพลังงานที่ผ่านความต้านทาน คือ

$$w = mc\Delta T \quad (2.8)$$

เมื่อ w คือพลังงานที่ป้อนผ่านความต้านทาน (kJ)

m คือมวลสารของเส้นลวดที่ประกอบเป็นความต้านทาน (kg)

c คือความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg $^{\circ}$ K)

ΔT คืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเป็นเซลเซียส ($^{\circ}$ C)

2.2.4 เทคนิคการพันตัวต้านทานแบบไร้ความเหนียวนำ [7]

ความเหนียวนำ นิยาม คือ “อัตราส่วนของค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์ (flux linkage) ผลรวมต่อกระแส I ที่คล้องเกี่ยวกับฟลักซ์ในตัวเหนียวนำ” ซึ่งเมื่อเขียนเป็นสูตรก็คือ \varnothing

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (2.9)$$

ค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์ จะมีค่าแตกต่างกันออกไป ตามลักษณะของตัวเหนี่ยวนำในกรณี ขดลวด ซึ่งมีจำนวนรอบของวงเส้นลวดเป็น N และมีฟลักซ์แม่เหล็ก Φ ผ่านวงของขดลวด ค่าการเชื่อมโยงฟลักซ์เป็น

$$\Phi = NI \quad (2.10)$$

สนามแม่เหล็กของตัวเหนี่ยวนำในขณะที่มีกระแส I ไหลผ่านมีค่าเป็น

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (2.11)$$

จากสมการข้างบนนี้ให้สูตรสำหรับคำนวณค่าความเหนี่ยวนำ L ได้คือ

$$L = \frac{2W}{I^2} \quad (2.12)$$

สำหรับค่าความเหนี่ยวนำที่เป็นขดลวดตั้งรูป(รูปความเหนี่ยวนำ)นี้ เราสามารถหาความเหนี่ยวนำได้ง่าย คือ

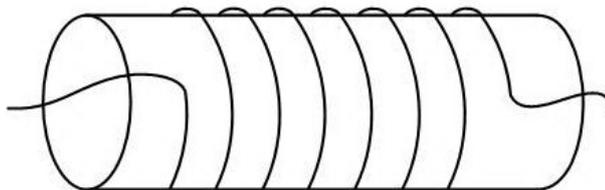
$$L = \frac{\mu N^2 \pi A^2}{\lambda} \quad (2.13)$$

μ คือ Permeability ของแกนตัวเหนี่ยวนำ (H/m)

λ คือ ความยาวของลวด (m)

A คือ รัศมีของพื้นที่หน้าตัดทรงกระบอกขดลวด (m)

N คือ จำนวนรอบขดลวด



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างการพันตัวเหนี่ยวนำ

2.2.5 สปาร์กแกป (SG)

เป็นช่องว่างอากาศระหว่างทรงกลมทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าอัดประจุ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ายอด (Peak) ระหว่างช่องว่างเปลวไฟกระโดดกับระยะห่างของช่องว่างเปลวไฟกระโดด ซึ่งจากตารางมาตรฐานเราจะสามารถหาค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ช่องว่างเปลวไฟกระโดดจะกระโดดถึงกันได้ โดยค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าอัดประจุที่ตัวเก็บประจุจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระยะห่างของช่องว่างเปลวไฟกระโดดและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่ใช้และยังขึ้นอยู่กับแรงเคลื่อนไฟฟ้าอัดประจุอีกด้วย

โดยหลักการทั่วไป ค่าแรงดันไฟฟ้าพังทลายของช่องว่างเปลวไฟกระโดดย่อมขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างทรงกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง และสถานะอากาศรอบๆ ทรงกลม แต่ในบางครั้งถึงแม้ว่าจะควบคุมตัวแปรต่างๆ เป็นอย่างดีแล้วก็ตาม ก็ยังไม่สามารถทำให้ช่องว่างเปลวไฟกระโดดเกิดกระโดดได้ เนื่องจากอากาศบริเวณช่องว่างเปลวไฟกระโดดไม่เกิดการแตกตัวนั่นเอง ดังนั้นจึงใช้สวิตช์เพื่อทำให้อิเล็กตรอนบริเวณรอบๆ ช่องว่างเปลวไฟกระโดดเกิดการแตกตัว ทำให้ช่องว่างเปลวไฟกระโดดเกิดการพังทลายของเปลวไฟกระโดดได้ หรือทำให้สามารถกำหนดเวลาหรือคาบหมายจุดเริ่มต้นของการคายประจุได้ และสามารถกำหนดขนาดกระแสอิมพัลส์ได้ หรือสามารถเลือกจุดเริ่มต้นของการบันทึกของออสซิลโลสโคปได้

ทริกเกอร์ (Trigger) หรือไกสวิตช์ ได้ติดตั้งไว้ที่ด้านใดด้านหนึ่งของชุดทรงกลมที่ทำหน้าที่เป็นช่องว่างเปลวไฟกระโดดหลัก เมื่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ประจุในตัวเก็บประจุมีค่าสูงถึงค่าที่ต้องการช่องว่างช่วยนี้ได้รับสัญญาณพัลส์ ทำให้เกิดการกระโดดขึ้นในช่องว่างช่วย เปลวไฟกระโดดในช่องว่างช่วยนี้จะเกิดอิเล็กตรอนอิสระในช่องว่างช่วย ส่งผลให้เกิดการคายประจุจากตัวเก็บประจุข้ามผ่านช่องว่างเปลวไฟกระโดดไปยังตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำทางด้านหลังของวงจรถูกทำให้เกิดกระแสอิมพัลส์ที่มีขนาดตามต้องการ

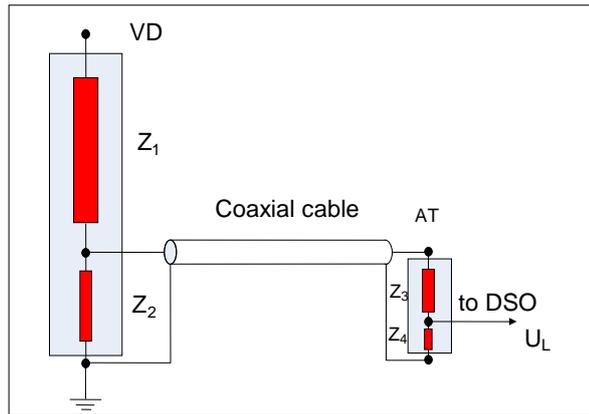
2.2.6 ตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้า (Voltage Divider, VD)

การวัดแรงดันไฟฟ้าแรงสูง ขึ้นอยู่กับชนิดของแรงดันแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

- แรงดันกระแสสลับ
- แรงดันกระแสตรง
- แรงดันอิมพัลส์

ซึ่งการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลต์เตจติไวเดอร์ เป็นการวัดที่สามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเทียบกับเวลา โดยใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เป็นอุปกรณ์วัดด้านแรงต่ำ

โดยทั่วไปการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยระบบโวลต์เตจติไวเดอร์ จะประกอบด้วย 4 ส่วนด้วยกัน คือ สายนำแรงสูง ตัวติไวเดอร์ อิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง (Z_1) และอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ (Z_2) สูงประมาณ 2.5 เมตร/เมกกะโวลต์ เคเบิลวัดแบบแกนร่วม (Coaxial cable) และออสซิลโลสโคป ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 วงจรวัดแรงดันอิมพัลส์

โวลต์เตจดีไวเดอร์ที่สร้างขึ้นใช้กันทั่วไปมีหลายชนิดสามารถจำแนกตามองค์ประกอบวงจรที่ใช้
ดังนี้

- แบบความต้านทาน (Resistor voltage divider)
- แบบความต้านทานมีชีลด์ (Shielded resistor voltage divider)
- แบบตัวเก็บประจุหรือคาปาซิเตอร์ (Capacitor voltage divider)
- แบบผสม (Mixed voltage divider)
- แบบตัวเก็บประจุมีความต้านทานหน่วง (Damped capacitor voltage divider)

2.2.7 การวัดกระแสอิมพัลส์ [8]

2.2.7.1 มาตรฐานของระบบการวัดกระแสอิมพัลส์

1. ความผิดพลาดในการวัดค่ายอดคลื่นกระแสไม่เกิน $\pm 3\%$
2. ความผิดพลาดในการวัดค่าทางเวลาซึ่งเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์
ไม่เกิน $\pm 10\%$

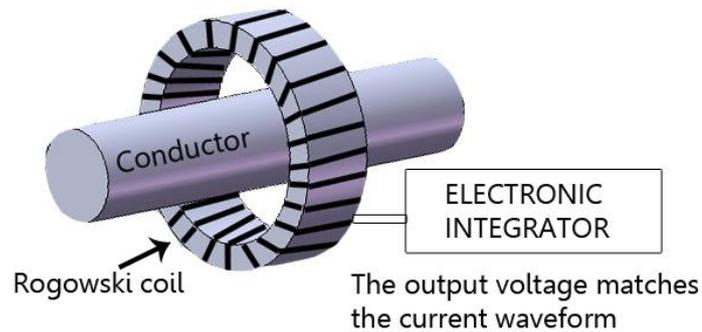
การวัดกระแสสูงที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างรวดเร็วสามารถทำได้ดังนี้

- อุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้าตกรวมความต้านทานบริสุทธิ์หรือขั้ว
- อุปกรณ์ที่ใช้หลักการการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก
- หม้อแปลงกระแส
- อุปกรณ์ที่ใช้หลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์
- อุปกรณ์ที่ใช้หลักการของ Magneto-optic

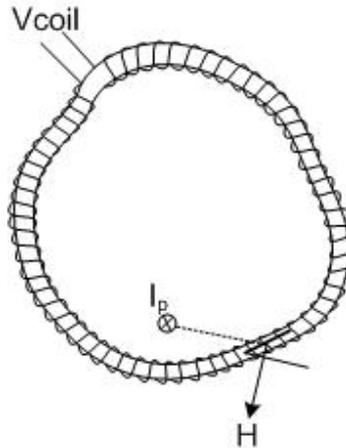
โดยเลือกใช้โรกอฟสกีคอยล์เป็นอุปกรณ์วัดกระแสที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์

2.2.7.2 หลักการของโรกอฟสกีคอยล์[8]

โรกอฟสกีคอยล์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดกระแส ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งสร้างเส้นแรงแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เมื่อเส้นแรงแม่เหล็กคล้องผ่านขดลวดที่พันรอบแกนที่ไม่เป็นแม่เหล็กของขดโรกอฟสกี ผลจากสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนไปตามเวลาย่อมไปคาบเกี่ยวหรือคล้อง (Link) กับขดลวดที่วางอยู่เป็นวงกลมรอบตัวนำและเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่ปลายของขดลวด เมื่อนำแรงเคลื่อนไฟฟ้างกล่าวไปผ่านตัวอินทิเกรตที่เหมาะสมทำให้ได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการวัดอย่างถูกต้องดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การวัดกระแสด้วยโรกอฟสกีคอยล์



รูปที่ 2.7 หลักการวัดด้วยโรกอฟสกีคอยล์

จากรูปที่ 2.7 แสดงหลักการวัดกระแสของโรกอฟสกีคอยล์โดยมีขดลวด n รอบต่อเมตรและพื้นที่หน้าตัด A วางอยู่ล้อมรอบตัวนำที่มีกระแส i_p ผ่าน เมื่อพิจารณาในช่วงความยาว dl เป็น $d\theta$ ซึ่ง

$$d\theta = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot di_p \quad (2.14)$$

และเมื่ออินทิเกรตรอบขดลวดย่อมได้เส้นแรงแม่เหล็กที่มากล้องขดลวดทั้งหมด

$$\theta = \int d\theta = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \int H \cdot \cos\alpha \cdot dl \quad (2.15)$$

จากกฎของแอมแปร์

$$\oint H \cdot \cos\alpha \cdot dl = i_p \quad (2.16)$$

แทน (2.16) ลงใน (2.15) จะได้

$$\Phi = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot i_p \quad (2.17)$$

จากกฎของฟาราเดย์

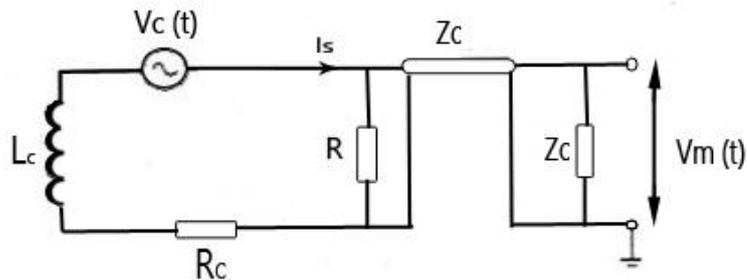
$$M = \mu_0 \cdot n \cdot A$$

M (μH) คือค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

$$V_c = \frac{d\Phi}{dt} = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot \frac{di_p}{dt} = M \cdot \frac{di_p}{dt} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) เห็นได้ว่าการวัดกระแสอิมพัลส์ของโรกอฟสกีคอยล์นั้น ต้องทำการอินทิเกรตแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขดลวดซึ่งการอินทิเกรตที่ใช้สำหรับโรกอฟสกีคอยล์ที่สร้างขึ้นเป็นแบบพาสซีฟ ชนิด Self Integrator

2.2.7.3 หลักการทำงานของโรกอฟสกีคอยล์แบบพาสซีฟ ชนิด Self Integrator วงจร Self Integrator คือวงจรที่ต่อขาออกที่โรกอฟสกีคอยล์ด้วยความต้านทานค่าต่ำ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โรกอฟสกีคอยล์ชนิด Self integrator

V_c คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Volt)

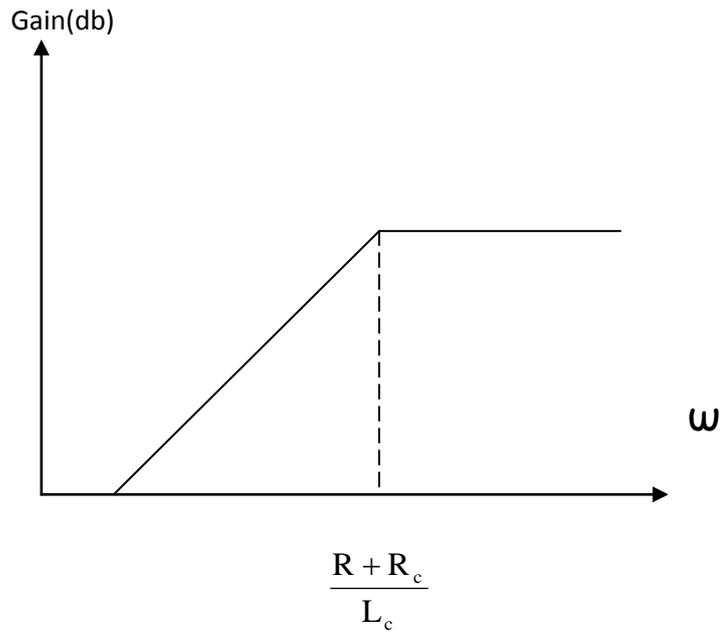
L_c คือความเหนี่ยวนำของขดลวดโรกอฟสกี(Henry)

R_c คือความต้านทานของขดลวดโรกอฟสกี(Ohm)

R คือความต้านทานโหลด (Ohm)

Z_c คือเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายวัดและแมชชีงอิมพีแดนซ์ (Ohm)

V_m คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้ (Volt)



รูปที่ 2.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของโรกอฟสกีคอยล์ชนิด Self integrator

จากรูปที่ 2.8 สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าดังนี้

$$V_c = M \frac{di_p(t)}{dt} = L_c \frac{di_c(t)}{dt} + i_s(t) [R_c + R] \quad (2.19)$$

เนื่องจาก $L_c \frac{di_c(t)}{dt} \gg i_s(t) [R_c + R]$

$$V_c = L_c \frac{di_s(t)}{dt} \quad (2.20)$$

ทำการอินทิเกรตได้กระแสในขดลวด

$$i_s(t) = \frac{1}{L_c} \int V_c(t) dt \quad (2.21)$$

และแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้

$$V_m = i_s(t) R \quad (2.22)$$

แทน i_s จาก (2.22) ลงใน (2.21)

$$V_m(t) = \frac{R}{L_c} \int V_c(t) dt \quad (2.23)$$

แทน V_c จาก (2.18) ลงใน (2.23)

$$V_m = \frac{R}{L_c} M i_p(t) \quad (2.24)$$

จากสมการที่ (2.24) แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้กับกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการวัดซึ่งใช้ในการออกแบบโครงสร้างโรกอฟสกีคอยล์ต่อไปนอกจากขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้แล้วยังต้องคำนึงถึงผลตอบสนองความถี่ของวงจรด้วยจากสมการที่ (2.3) ทำการแปลงลาปลาซ

$$M i_p(t) = I_s(s) [sL_c + R + R_c] \quad (2.25)$$

จัดรูปใหม่ได้

$$\frac{I_s(s)}{I_p(s)} = \frac{M_s}{sL_c + R + R_c} \quad (2.26)$$

จาก $V_m(s) = i_s(s) R$ จะได้

$$\frac{V_m(s)}{I_p(s)} = \frac{RM_s}{(R+R_c+sL_c)} \quad \frac{V_m(s)}{I_p(s)} = \frac{\left(\frac{RM}{L_c}\right)s}{s + \frac{(R+R_c)}{L_c}} \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.27) สามารถเขียนผลตอบสนองความถี่ของวงจร Self integrator ซึ่งเป็นวงจรรองความถี่สูงผ่านดังรูปที่ 2.9 ที่มีความถี่หักมุม

$$\omega_t = \frac{(R+R_c)}{L_c} \quad (2.28)$$