บทที่ 1

บทนำทั่วไป

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.1 บทนำ

ในช่วงระยะ 10 ปีที่แล้วมาการพัฒนาอุตสาหกรรมไฟฟ้าแรงสูงในประเทศไทยได้เจริญรุดหน้าไปอย่างรวดเร็ว รัฐบาลมีนโยบายที่จะส่งเสริมให้โรงงานอุตสาหกรรมสามารถผลิตอุปกรณ์ต่างๆ ขึ้นเอง เพื่อจะเป็นส่วนช่วยให้เศรษฐกิจของประเทศดีขึ้น ดังนั้นความต้องการในด้านเทคนิคไฟฟ้าแรงสูงจึงได้เพิ่มขึ้นเป็นเงาตามตัว ในปัจจุบันการพัฒนาการผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงจะอยู่ในย่านแรงดันสูงปานกลาง คือ ระดับระบบจำหน่าย ตั้งแต่ 1 กิโลโวลท์ จนถึง 36 กิโลโวลท์ เช่น ลูกถ้วย ฉนวนไฟฟ้า สายเคเบิล หม้อแปลงไฟฟ้า สวิทช์ตัดตอน และวัสดุฉนวน เป็นต้น และคาดว่าการพัฒนานี้จะมีแนวโน้มไปสู่ระบบแรงดันสูงที่ใช้ในระบบส่งจ่ายในอนาคตอันใกล้นี้

โดยหลักการการผลิตผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไฟฟ้าแรงสูงเหล่านี้จะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดหรือมาตรฐาน กล่าวคือ จะต้องมีคุณลักษณะใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย ในทางปฏิบัติอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ในขณะใช้งานมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกิน ซึ่งอาจอยู่ในรูปแรงดันเกินสวิทชิ่ง (switching overvoltage) หรือแรงดันเกินแบบฟ้าผ่า (lightning overvoltage) ฉะนั้นเพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่าอุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้เมื่อนำไปใช้งานจะมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้และไม่เป็นเหตุให้เกิดความผิดพร่องในระบบอันเนื่องมาจากความล้มเหลวของการฉนวน จึงจำเป็นจะต้องทำการทดสอบอุปกรณ์เหล่านั้นก่อนนำไปใช้งาน โดยเหตุที่การฉนวนของอุปกรณ์เหล่านี้จะต้องมีความคงทนต่อแรงดันเกินแบบฟ้าผ่าได้ จึงต้องทำการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากแรงดันฟ้าผ่าตามธรรมชาติ การทดสอบการฉนวนขั้นพื้นฐานด้วย แรงดันอิมพัลส์นี้เรียกว่า Basic Impulse Insulation Level (BIL) ขนาดแรงดันทดสอบอุปกรณ์ขึ้นอยู่กับระบบแรงดันที่อุปกรณ์เหล่านั้นใช้งาน ดังตัวอย่างแรงดันทดสอบที่มาตรฐานสากลไออีซีกำหนดไว้ดังนี้ {15} คือ

ตารางที่ 1.1

แรงดันทดสอบอิมพัลส์ (BIL)

ระบบแรงดัน (kV)	3.6	7.2	12	17.5	24	36	52	72.5
BIL (kV)	45	60	75	95	125	170	250	325

จะเห็นได้ว่าขนาดแรงดันทดสอบนั้นมีค่าสูงมากซึ่งไม่อาจจะวัดโดยตรงด้วยเครื่องวัดแรงดันขนาดต่ำๆ ที่ใช้งานอยู่ทั่วไปได้ เทคนิคการวัดแรงดันอิมพัลส์สูงๆ เช่นนี้อาจวัดได้โดยตรงโดยใช้ sphere gap หรือแบ่งลดทอนแรงดันด้วยอิมพีแดนซ์ให้ต่ำลงมามากพอที่จะวัดได้ด้วยเครื่องวัดแรงดันต่ำ ตัวอิมพีแดนซ์ลดทอนแรงดันนี้เรียกว่า โวลเตจดิไวเดอร์ แต่เนื่องจากการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วย sphere gap นั้น เป็นการวัดค่ายอดเท่านั้น คือ ไม่ทราบลักษณะของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ฉะนั้นการวัดแรงดันอิมพัลส์ในห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูงทั่วไปจึงนิยมใช้วัดด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ประกอบกับเครื่องวัดแรงดันต่ำ เช่น โวลต์มิเตอร์วัดค่ายอด หรือออสซิลโลสโคป ซึ่งจะทำให้สามารถทราบลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เป็นวิธีการวัดที่สะดวก มีความถูกต้องและปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน

1.2 ที่มาของปัญหา

เป็นที่เห็นเด่นชัดแล้วว่าการวัดแรงดันอิมพัลส์นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องวัดด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ ในอดีตที่ผ่านมาเราได้สั่งซื้อโวลเตจดิไวเดอร์มาจากต่างประเทศ เพื่อให้สามารถสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ขึ้นใช้ได้เองโดยใช้วัสดุที่หาได้หรือผลิตขึ้นภายในประเทศ จึงได้ศึกษาค้นคว้าวิจัยเพื่อหาทางสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ดังกล่าว และเป็นพื้นฐานในการสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ที่ขนาดแรงดันสูงๆ ต่อไป จากตารางที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ที่ใช้กับระบบจำหน่ายไม่เกิน 52 กิโลโวลท์ จะทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ไม่เกิน 250 กิโลโวลท์ และด้วยเหตุผลในแง่วิศวกรรมจึงวิจัยสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 300 กิโลโวลท์

1.3 ประวัติความเป็นมาของโวลเตจดิไวเดอร์

J.D. Craggs และ J.M. Meek {14} ได้รวบรวมประวัติการคิดสร้างและพัฒนาโวลเตจดิไวเดอร์ตามลำดับดังต่อไปนี้

ในปี 1927 D. Gábor ริเริ่มเทคนิคการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ประกอบกับออสซิลโลสโคป โดยใช้สายเคเบิลวัด อิมพีแดนซ์ลดทอนแรงดันที่ใช้เป็นความต้านทาน หรือความต้านทานและคะแปซิเตอร์ผสมกัน ใช้เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลวัดและความต้านทานแมทชิ่งเป็นอิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำ ต่อมาในปี 1932 F.P. Burch ได้ศึกษาและทดลองโวลเตจดิไวเดอร์ต่อและชี้ให้เห็นข้อเสียของโวลเตจดิไวเดอร์แบบของ D. Gábor คือ ใช้ได้ที่ระดับแรงดันต่ำและมีความผิดพลาดสูง เขาเสนอแนะให้ใช้อิมพีแดนซ์ภาคแรงต่ำต่ออนุกรมกับอิมพีแดนซ์ภาคแรงสูง เพื่อแบ่งแรงดันไปเข้าออสซิลโลสโคป และทำการวิเคราะห์โวลเตจดิไวเดอร์ในเชิงคณิตศาสตร์ นอกจากนั้นเขาเป็นคนแรกที่เน้นให้เห็นความจำเป็นที่ต้องใช้โวลเตจดิไวเดอร์ที่มีอิมพีแดนซ์สูงๆ เพื่อไม่ให้เป็นโหลดของวงจร ในปี 1933 J.C. Dowell และ C.M. Foust ใช้หลักการของ F.P. Burch สร้างโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานขนาด 1 MV ในปีเดียวกัน P.L. Bellaschi ได้วิเคราะห์ผลกระทบของสเตรคะแปซิแตนซ์ที่มีต่อโวลเตจดิไวเดอร์ และทดลองด้วยโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานและแบบคะแปซิเตอร์ หลังจากนั้นในปี 1937 J.H. Hagenguth ได้ใช้โวลเตจดิไวเดอร์ในการศึกษาแรงดันอิมพัลส์ที่มีอัตราการเปลี่ยนแรงดันสูงขึ้น ดังเช่น การศึกษาการเกิดสปาร์กโอเวอร์ของช่องว่างอากาศระหว่างอีเลกโตรดแบบต่างๆ ทำให้เห็นความจำเป็นที่จะต้องใช้โวลเตจดิไวเดอร์ที่มีลักษณะสมบัติที่เหมาะสม ในปี 1938 R. Davis และ G.W. Bowdler ได้ศึกษาโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติและเสนอวิธีวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของโวลเตจดิไวเดอร์ในทางคณิตศาสตร์ ในปี 1946 H. Tropper ได้ทำการศึกษาและทดลองผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานคล้ายกับที่ F.P. Burch ได้ศึกษาไว้แต่คิดรวมผลของสเตรคะแปซิแตนซ์และความสูญเสียเปล่าในสายเคเบิลวัดด้วย นอกจากนั้นยังได้ศึกษาถึงผลกระทบจากสเตรคะแปซิแตนซ์ของเครื่องวัดและความต้านทานแมทชิ่งที่มีต่อการสะท้อนในสายเคเบิลวัด ก่อนหน้านี้เล็กน้อย ในปี 1945 A. Liechti ได้วิเคราะห์และปรับปรุงผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ โดยออกแบบเป็นแบบผสมและแบบชีลด์ ซึ่ง W. Raske และ R. Elsner เคยได้ศึกษามาก่อนบ้างแล้ว ในปี 1956 F.C. Greed {6} สร้างโวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีชีลด์สำหรับแรงดันอิมพัลส์ขนาด 400 kV

ส่วนโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์ได้รับการพัฒนาน้อยในระยะแรก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุไม่สามารถหาคะแปซิเตอร์ที่มีคุณภาพดีตามต้องการได้ ในปี 1939 W. Raske ได้ศึกษาวิเคราะห์โวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้และเน้นให้เห็นถึงคุณสมบัติที่อาจใช้วัดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้ ต่อมาในปี 1952 P.R. Howard ได้พัฒนาโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์ขนาด 400 kV และชี้ให้เห็นปัญหาการสะท้อนของคลื่นภายในตัวโวลเตจดิไวเดอร์ นอกจากนั้นเขายังได้วิเคราะห์ผลตอบสนองของโวลเตจดิไวเดอร์โดยใช้วงจรสมมูลย์อย่างที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ในระยะต่อมาเทคนิคไฟฟ้าแรงสูงได้เจริญขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงต้องพัฒนาโวลเตจดิไวเดอร์สำหรับวัดแรงดันสูงขึ้น และใช้กับอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันสูงมากขึ้น โวลเตจดิไวเดอร์แบบความต้านทานมีขีดจำกัดไม่เกิน 2-3 MV เนื่องจากปัญหาเกี่ยวกับเวลาตอบสนองจะมากเกินไป จึงได้พัฒนาโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์และแบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงขึ้นอย่างมาก K. Feser {10} ได้ปรับปรุงวิธีแก้ไขการสะท้อนของคลื่นในโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์ โดยใช้ความต้านทานหน่วงกระจายอยู่ตลอดภาคแรงสูง และสร้างโวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 3 MV ขึ้น W. Zaengl {4} ได้ศึกษาวิเคราะห์โวลเตจดิไวเดอร์แบบต่างๆ และพัฒนาโวลเตจดิไวเดอร์แบบคะแปซิเตอร์มีความต้านทานหน่วงซึ่งมีลักษณะสมบัติดีเหมาะอย่างยิ่งที่จะใช้กับแรงดันสูงมากๆ และอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันสูง ในปัจจุบันสามารถสร้างโวลเตจดิไวเดอร์แบบนี้วัดแรงดันได้ถึง 6.4 MV {11}

ในประเทศไทยขณะนี้มีอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ขนาดแรงดันสูงสุด 1.2 MV แบบความต้านทานและแบบคะแปซิเตอร์ที่ห้องทดลองไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นโวลเตจดิไวเดอร์ที่ได้มาตามโครงการให้ความช่วยเหลือจากรัฐบาลประเทศสวิตเซอร์แลนด์ที่ให้แก่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตราบเท่าถึงปัจจุบันนี้ยังไม่มีการสร้างอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ขึ้นใช้เอง จึงอาจนับได้ว่าอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ขนาด 300 kV นี้เป็นอิมพัลส์โวลเตจดิไวเดอร์ตัวแรกที่ได้รับการพัฒนาและสร้างขึ้นในประเทศไทย

1.4 นิยามและคำศัพท์เทคนิค

เพื่อให้ผู้อ่านเกิดความเข้าใจได้ง่ายขึ้น จึงได้ให้ศัพท์เทคนิคตามคำนิยามของไออีซีที่จำเป็นไว้ดังต่อไปนี้

<u>แรงดันอิมพัลส์</u> (Impulse Voltage) คือ แรงดันทรานเซี้ยนแบบไม่ใช่รายคาบ (Aperiodic - transient) ที่เจาะจงป้อนให้อุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อการทดสอบการฉนวน มีลักษณะรูปคลื่นที่ค่าแรงดัน

เพิ่มอย่างรวดเร็ว เมื่อถึงค่ายอดแล้วจะลดค่าลงสู่ศูนย์ด้วยอัตราที่ช้ากว่าตอนเพิ่ม รูปร่างของแรงดันอิมพัลส์โดยทั่วไปแทนได้ด้วยผลบวกพีชคณิตของฟังชั่นเอกซ์โปเนนเชียล 2 เทอม คือ

$$f(t) = A\,(\varepsilon^{-\alpha t} - \varepsilon^{-\beta t})$$

เมื่อ A คือ ค่ากำหนดขนาดแรงดัน

α, β คือ ค่าคงที่เวลาของลูกคลื่น

แรงดันอิมพัลส์อาจแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า และ แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทชิ่ง

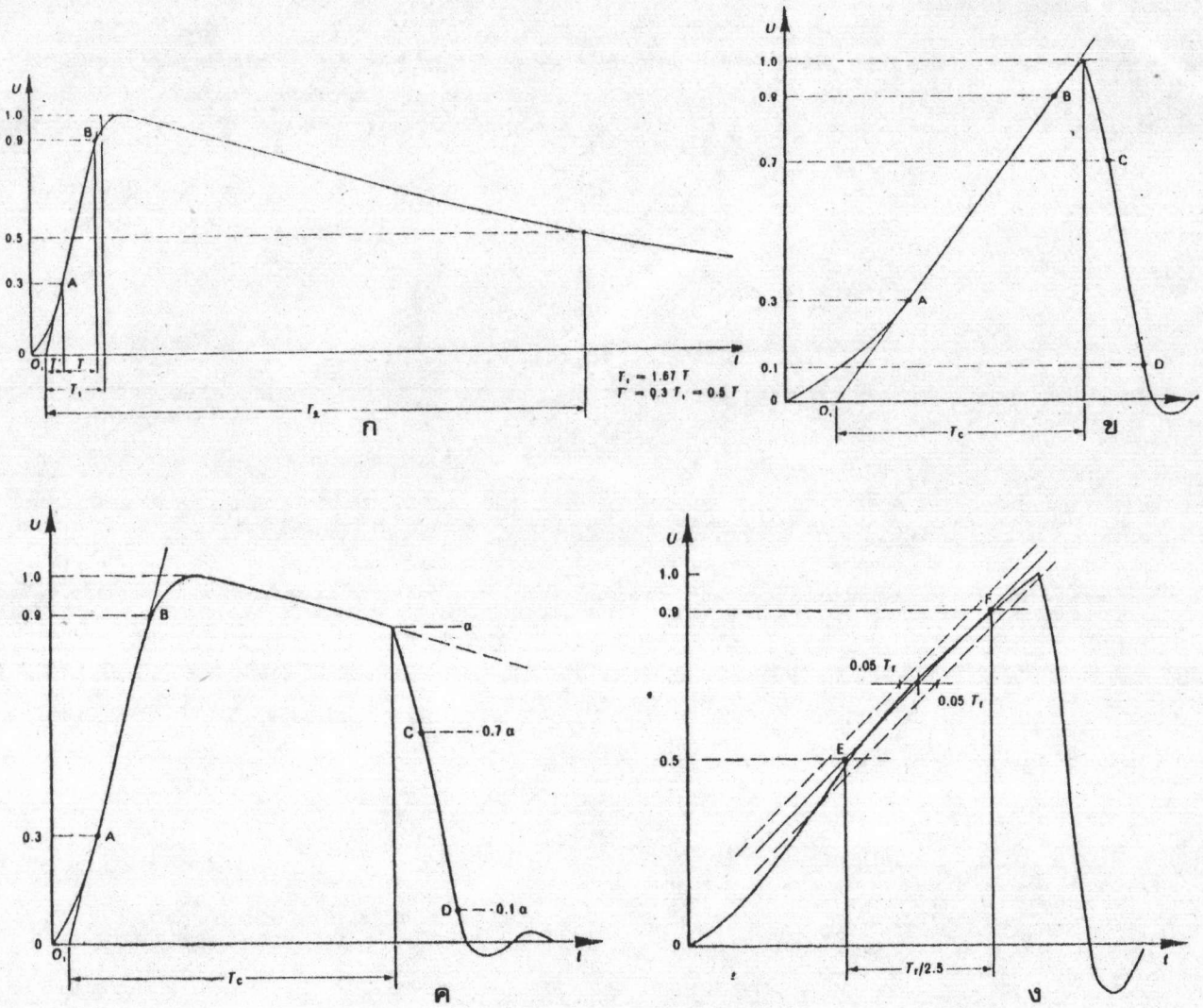
<u>แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า และ แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทชิ่ง</u> (Lightning impulse and Switching impulse)

แรงดันทั้งสองแบบมีข้อแตกต่างพื้นฐาน คือ เวลาช่วงหน้าคลื่น กล่าวคือ แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ามีเวลาช่วงหน้าคลื่น ตั้งแต่น้อยกว่าหนึ่งไมโครวินาทีถึง ไม่กี่ สิบไมโครวินาที แต่แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทชิ่งจะมีช่วงหน้าคลื่น ตั้งแต่หลายสิบถึงหลายพันไมโครวินาที อาจแยกลักษณะแรงดันทั้งสองได้อีกอย่างหนึ่งโดยการพิจารณาช่วงเวลาทั้งหมด คือ แรงดันอิมพัลส์แบบสวิทชิ่งจะมีช่วงเวลาทั้งหมดยาวนานกว่าแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า

แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะใหญ่ๆ ดังนี้

1) แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม (Full lightning impulse) ดังรูป 1.1 ก.

2) แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด (Chopped lightning impulse) ซึ่งมีหลายลักษณะ ดังรูป 1.1 ข, ค, และ ง



รูป 1.1 แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าลักษณะต่างๆ

ก. แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม

ข. แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หน้าคลื่น

ค. แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัดที่หางคลื่น

ง. แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น

<u>แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม</u>

อิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็ม คือ อิมพัลส์ที่ไม่มีส่วนหนึ่งส่วนใดของรูปคลื่นถูกรบกวน เนื่องจากเกิดดิสชาร์จทำลาย (disruptive discharge) (ดูรูป 1.1 ก)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 (front time)

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ 1.67 เท่าของช่วงเวลา T ระหว่างจุดที่อิมพัลส์มีค่า 30 และ 90 เปอร์เซนต์ของค่ายอด คือ จุด A และ B ในรูป 1.1 ก, ข และ ค ถ้ารูปคลื่นมีสัญญาณแกว่งซ้อนอยู่ด้วยให้ลากเส้นโค้งเฉลี่ยสัญญาณแกว่งเสียก่อนแล้วจึงค่อยหาจุด A และ B

จุดเริ่มต้นเสมือน O_1 (virtual origin)

จุดเริ่มต้นเสมือน O_1 ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ จุดซึ่งคิดเป็นเวลาห่างจากจุด A ในรูป 1.1 ก, ข, และ ค ไปข้างหน้าเท่ากับ 0.3 T_1 หรือคือจุดตัดของแกนเวลากับเส้นตรงที่ลากผ่านจุด A และ B สำหรับรูปคลื่นแรงดันที่บันทึกโดยแกนเวลากวาดอย่างเชิงเส้น

เวลาช่วงหางคลื่น T_2 (time to half value)

เวลาช่วงหางคลื่น T_2 ของแรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่า คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือน O_1 และจุดที่แรงดันลดค่าลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดทางตอนหางของหางคลื่น

แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มมาตรฐาน (Standard lightning impulse)

อิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นเต็มมาตรฐาน คือ อิมพัลส์ที่มีเวลา T_1/T_2 เป็น 1.2/50 ไมโครวินาที ซึ่งเป็นรูปคลื่นมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบแรงดันอิมพัลส์ทั่วๆ ไปตามกำหนดของมาตรฐานสากลไออีซี

แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด

แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่ารูปคลื่นตัด คือ แรงดันอิมพัลส์แบบฟ้าผ่าที่รูปคลื่นเกิดดีสชาร์จทำลายทำให้แรงดันตกลงสู่ค่าศูนย์อย่างรวดเร็ว การตัดของแรงดันอาจเกิดที่หน้าคลื่น ค่ายอด หรือส่วนหางของคลื่นก็ได้ ดูรูป 1.1 ข และ ค

ขณะที่คลื่นตัด (Instant of chopping)

ขณะที่คลื่นตัด คือ ขณะที่เริ่มเกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในรูปคลื่นนั้น

แรงดันขณะที่คลื่นตัด (Voltage at the instant of chopping)

แรงดันขณะที่คลื่นตัด คือ แรงดันในขณะที่เกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นในรูปคลื่นนั้น

เวลาช่วงคลื่นตัด T_c (Time to chopping)

เวลาช่วงคลื่นตัด T_c คือ ช่วงเวลาระหว่างจุดเริ่มต้นเสมือน และขณะที่คลื่นตัด

อิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น

อิมพัลส์รูปคลื่นตัดหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้น คือ แรงดันที่มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยความชัน (Steepness) คงที่โดยประมาณ จนถึงขณะที่คลื่นตัดเส้นตรงที่เหมาะสมที่สุดที่จะนิยามอิมพัลส์แบบนี้ คือ เส้นที่ลากผ่านจุด 50 และ 90 เปอร์เซนต์ของค่าแรงดันขณะที่คลื่นตัด คือ จุด E และ F ในรูป 1.1 ง แรงดันอิมพัลส์ที่จะเรียกได้ว่าหน้าคลื่นเพิ่มอย่างเชิงเส้นโดยประมาณ คือ เมื่อหน้าคลื่นตั้งแต่จุด 50 เปอร์เซนต์ขึ้นไปถึงขณะที่คลื่นตัดอยู่ในระหว่างเส้นตรงสองเส้นที่ลากขนานกับเส้น EF ห่างออกไปด้วยเวลา $\pm 0.05\ T_r$ ทั้งหมดตลอดช่วง เมื่อ T_r คือ rise time มีค่าเท่ากับช่วงเวลาระหว่างจุด E และ F คูณด้วย 2.5

ดิสชาร์จทำลาย (disruptive discharge)

คือ ปรากฏการณ์เมื่อฉนวนภายใต้ความเครียดทางไฟฟ้าเกิดสูญเสียคุณสมบัติการเป็นฉนวน อาจเป็นชั่วคราวหรือถาวรก็ได้ แล้วทำให้เกิดดิสชาร์จข้ามตลอดฉนวนนั้น มีผลทำให้แรงดันระหว่างอิเลกโตรดลดลงเป็นศูนย์หรือเกือบเป็นศูนย์ คำนี้สามารถใช้ได้กับการเบรคดาวน์ (breakdown) ทางไฟฟ้าทั้งหลายที่เกิดในไดอีเลกตริก ทั้งแบบของแข็ง ของเหลว หรือกาซ หรือประกอบด้วยไดอีเลกตริกเหล่านั้น

ผลตอบสนอง G (Response)

ผลตอบสนอง G ของระบบการวัด คือ ผลขาออกเป็นฟังชั่นของเวลา หรือความถี่เมื่อป้อนแรงดันขาเข้าให้กับระบบนั้น

ผลตอบสนองรูปขั้น G(t) (Step Response)

ผลตอบสนองรูปขั้น G(t) คือ ผลตอบสนองเป็นฟังชั่นของเวลา เมื่อสัญญาณทางขาเข้าเป็นแรงดันรูปขั้น (step voltage) รูปแบบที่สะดวกและใช้กันทั่วไป คือ ผลตอบสนองรูปขั้นหนึ่งหน่วย

g(t) (unit step response) โดยถือว่าค่าคงที่ของผลขาออกมีขนาดเป็นหนึ่งหน่วย

<u>เวลาตอบสนอง T</u> (Response Time)

เวลาตอบสนอง T ของระบบการวัด คือ ดัชนีชี้ความผิดพลาดซึ่งเกิดขึ้นเมื่อทำการวัดแรงดันที่เปลี่ยนแปลงค่าอย่างรวดเร็ว นิยามดังนี้

$$T \simeq \frac{a_i - a_m}{\frac{d}{dt} a_m}$$

เมื่อ a_i เป็น ค่าของฟังชั่นขาเข้าแบบแรมป์ (ramp input function) ที่เวลากำหนดใดๆ และ

a_m เป็น ค่าที่วัดได้ของปริมาณนั้น โดยมีข้อแม้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟังชั่นขาเข้าและอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าที่ต้องการวัด $\frac{d}{dt} a_m$ คงที่และมีค่าเท่ากัน