บทที่ 3

เงื่อนไขการเกิดวาบไฟตามผิวและเจาะทะลุ

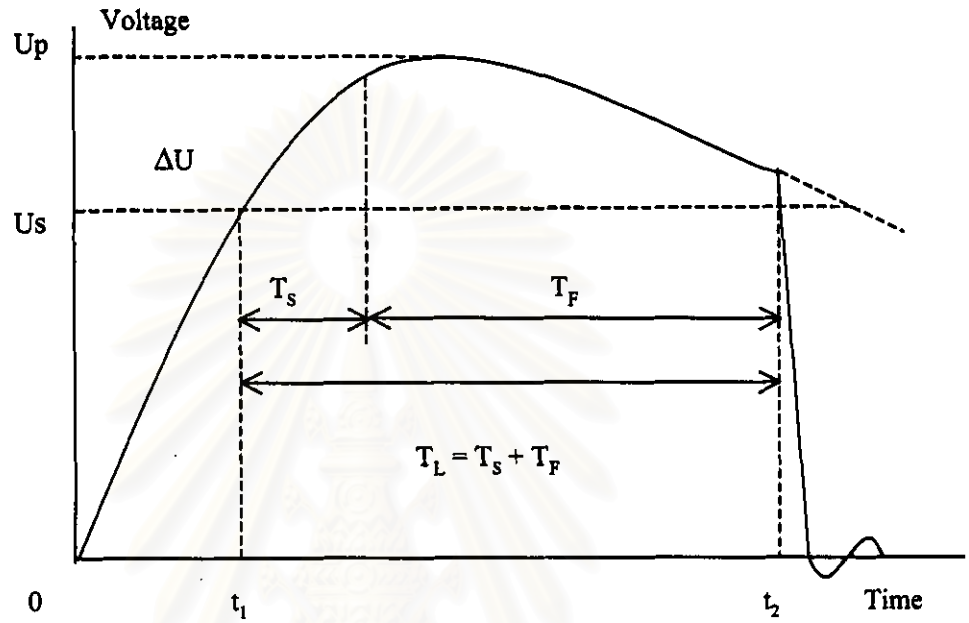
โดยปรกติทั่วไปการออกแบบลูกถ้วยฉนวน จะต้องคำนึงถึงความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า แรงกล ความร้อน สภาวะอากาศและที่สำคัญประการหนึ่งที่ต้องพิจารณาก็คือ รูปลักษณะของลูกถ้วยฉนวนที่ติดตั้งใช้งานในบรรยากาศ จะต้องทำให้เกิดวาบไฟตามผิวได้ง่ายกว่าการเกิดเจาะทะลุ การเกิดเจาะทะลุย่อมหมายถึงการเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวร

3.1 การเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์

ลักษณะการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์ (Up) จะแตกต่างจากการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันสถานะอยู่ตัว (Steady state voltage, Us) เช่นแรงดันกระแสตรงหรือแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงานตรงที่เมื่อแรงดันสถานะอยู่ตัวเพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งจะเกิดเบรกดาวน์ทันที โดยถือว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าคงตัว ในส่วนของแรงดันอิมพัลส์จะคงอยู่ในช่วงระยะเวลาอันสั้นและส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าจะคงอยู่ในช่วงเวลาอันสั้นด้วย เมื่อแรงดันอิมพัลส์มีค่าเท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัวควรจะเกิดเบรกดาวน์ทันที แต่ปรากฏว่ายังไม่เกิดเบรกดาวน์ซึ่งจะต้องรออีกช่วงระยะเวลาหนึ่งถึงจะเกิดเบรกดาวน์ ช่วงระยะเวลาตั้งแต่ขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแแรงดันสถานะอยู่ตัวไปจนถึงเวลาที่เกิดเบรกดาวน์ขึ้นจริง เรียกช่วงระยะเวลานี้ว่า เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ (T_L) [10]สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 3.1

การเกิดเบรกดาวน์ได้ทุกกรณีนั้นจะต้องมีสนามไฟฟ้าและอิเล็กตรอนอิสระอย่างน้อยหนึ่งตัวเพื่อสร้าง อะวาลานช์และต้องเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในสภาวะที่พอเหมาะคือ มีพลังงานพอที่จะทำให้เกิดไอออไนเซชันเพื่อสร้างอะวาลานช์ต่อไปได้ หมายความว่าอิเล็กตรอนอิสระตัวแรกที่สร้างอะวาลานช์ซึ่งอยู่ในสนามไฟฟ้าที่สูงพอและมีระยะห่างแอโนดอย่างน้อยเท่ากับระยะอะวาลานช์วิกฤต X_c ในกรณีแรงดันสถานะอยู่ตัวมีเวลานานพอที่จะหาอิเล็กตรอนอิสระเริ่มต้นได้และมีมากพอในธรรมชาติ[9] แต่ในกรณีแรงดันอิมพัลส์จะมีช่วงเวลาเพียงไมโครวินาที เพราะฉะนั้น อิเล็กตรอนที่พอเหมาะจากธรรมชาติอาจจะมีไม่เพียงพอที่จะเริ่มต้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของแกปที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอ อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ในปริมาตรแกปกระจายเป็นสถิติ ฉะนั้นเวลานับตั้งแต่แรงดันอิมพัลส์เพิ่มสูงขึ้นเท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัว Us จนกระทั่งพบอิเล็กตรอนเริ่ม

ต้นจึงเป็นสถิติด้วย เรียกว่า เวลาล่าช้าสถิติ T_S (Statistic time lag) เมื่อพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นแล้วจะต้องใช้เวลาในการไอออไนเซชันเพื่อสร้างอะวาลานช์ เพื่อให้เกิดเบรกดาวน์ เรียกช่วงเวลานี้ว่าเวลาล่าช้าก่อตัว T_F (Formative time lag) ดังนั้น เวลาล่าช้า $T_L = T_S + T_F$



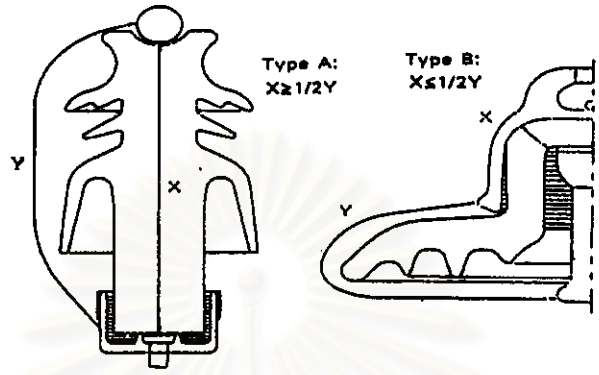
รูปที่ 3.1 เวลาล่าช้าการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์[10]

3.2 การประสานสัมพันธ์การฉนวนของฉนวนภายนอกกับฉนวนภายใน

การออกแบบลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าโดยปกติจะให้เกิดวาบไฟตามผิว ซึ่งเป็นฉนวนภายนอกได้ง่ายกว่าการเบรกดาวน์ในเนื้อฉนวนแข็งซึ่งเป็นฉนวนภายใน[11] เนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ในเนื้อฉนวนแข็งเป็นการเสียสภาพการฉนวนอย่างถาวรไม่สามารถกลับคืนเป็นฉนวนได้อย่างเดิมเหมือนฉนวนภายนอกที่เป็นอากาศ เงื่อนไขดังกล่าวอาจทำได้ง่ายสำหรับกรณีแรงดันกระแสตรงหรือแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงานหรือแรงดันอิมพัลส์ปกติ แต่ในกรณีแรงดันอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่นชัน เวลาของสนามไฟฟ้าสั้นจะยังไม่เกิดเบรกดาวน์ในอากาศที่เป็นฉนวนภายนอกด้วยเหตุผลที่ได้อธิบายในหัวข้อ3.1ยิ่งไปกว่านั้นถ้าหากลูกถ้วยที่มีความหนาของเนื้อฉนวนตามแนวระยะเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนแข็งน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของระยะวาบไฟตามผิวหรือเป็นลูกถ้วยฉนวนประเภทB[1] ดังรูปที่ 3.2 ยิ่งมีโอกาสเกิดเจาะทะลุได้ง่ายขึ้นถ้าหากสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ฉนวนแข็งของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าจะทนได้จะเกิดเบรกดาวน์ทันทีซึ่งใช้เวลาน้อยมาก

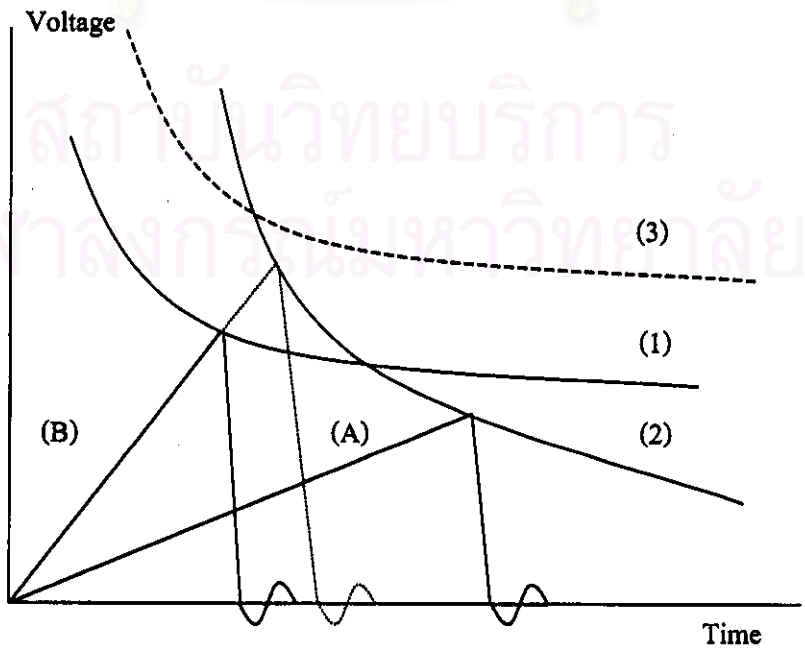
ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวน์ในฉนวนแข็งของลูกถ้วยฉนวนที่สำคัญมีสองประการคือประการแรกขึ้นอยู่กับขนาดแรงดันและความชันของแรงดันอิมพัลส์ซึ่งเป็นไปตามลักษณะเส้นแรงดัน-เวลา (Voltage-time characteristic) ของลูกถ้วยฉนวน[6] ดังรูปที่ 3.3 เส้นโค้ง (1) เป็นลักษณะเส้น

แรงดัน-เวลาของเนื้อฉนวนแข็ง ส่วนเส้นโค้ง (2) เป็นลักษณะเส้นแรงดัน–เวลาของอากาศที่หุ้มผิวลูกถ้วยฉนวน เมื่อแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชันต่ำจะเกิดวาบไฟตามผิวในอากาศดังเช่นในกรณี (A)



รูปที่ 3.2 ลูกถ้วยฉนวนประเภท A และ B[12]

แต่ถ้าหากแรงดันอิมพัลส์มีความชันเพิ่มสูงขึ้นเลยจุดตัดกันระหว่างลักษณะเส้นแรงดัน-เวลาของฉนวนอากาศกับฉนวนแข็งอาจทำให้เกิดเจาะทะลุในเนื้อฉนวนแข็งได้ก่อนที่จะเกิดวาบไฟตามผิว ดังเช่นในกรณี (B) ดังนั้นวิธีป้องกันคือจะต้องเพิ่มคุณสมบัติของเนื้อฉนวนแข็งให้มีความคงทนทางไฟฟ้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้กราฟลักษณะแรงดัน-เวลา ของฉนวนแข็งสูงขึ้นทำให้เกิดวาบไฟตามผิวก่อนเกิดเจาะทะลุผ่านเนื้อฉนวนแข็งดังเช่นเส้นโค้ง(3) นั่นคือปัจจัยประการที่สองที่มีผลต่อการเกิดเบรกดาวน์เจาะทะลุขึ้นอยู่กับความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของเนื้อฉนวน อย่างไรก็ตามลักษณะเส้นแรงดัน-เวลายังขึ้นอยู่กับรูปแบบของลูกถ้วยฉนวน



รูปที่ 3.3 กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาของลูกถ้วยฉนวน