บทที่ 4

วิธีการคำนวณแรงดันเริ่มต้นของฉนวนอากาศในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

การฉนวนรองรับหรือยึดสายไฟในระบบส่งจ่ายโดยใช้ลูกถ้วยฉนวนนั้น หน้าที่หลักของลูกถ้วยฉนวนก็คือรับน้ำหนักและแรงกล โดยมีฉนวนที่อยู่โดยรอบลูกถ้วยคืออากาศต่างหากที่เป็นฉนวนหลัก ฉะนั้นลูกถ้วยจะทนแรงดันได้มากน้อยเท่าใด ก็ขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของลูกถ้วยฉนวนว่าจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าในอากาศอย่างไร ความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอากาศนี้ เมื่อถึงค่าวิกฤต ก็จะทำให้เกิดการดีสชาร์จหรือเบรกดาวน์ในอากาศขึ้น

ในปัจจุบันนี้ ทฤษฎีที่จะนำมาอธิบายกระบวนการเกิดดีสชาร์จของก๊าซหรืออากาศ คือ ทฤษฎีของทาวน์เซนด์และทฤษฎีของสตรีมเมอร์ ในการคำนวณหาแรงดันเริ่มต้นในอากาศจะใช้เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์ในกรณีของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และใช้ทฤษฎีของสตรีมเมอร์ในการหาแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

4.1 เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์

จากทฤษฎีของทาวน์เซนด์ เมื่อเกิดความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอในก๊าซ จะทำให้เกิดการทวีคูณของอิเล็กตรอนอิสระอันเนื่องจากการชนแตกตัวของอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้ากับโมเลกุลของก๊าซ และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนทำให้เกิดกระแสซึ่งเขียนได้ในรูปสมการ[1]

$$I = \frac{I_o \cdot e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \qquad (4.1)$$

เมื่อ I_0 คือกระแสเริ่มต้น เป็นผลของอิเล็กตรอนเริ่มต้นที่หลุดจากแคโทด

α คือสัมประสิทธิ์การชนแตกตัวด้วยอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล (Townsend's First Ionization Coeffient)

γ คือสัมประสิทธิ์ไอออนไนเซชันที่สองของทาวน์เซนด์

d คือระยะของแกป

เมื่อความต่างศักย์เพิ่มขึ้นถึงจุด ๆ หนึ่ง กระแสไฟฟ้าจะกลายเป็นกระแสดีสชาร์จที่เพิ่มขึ้นเองได้ (self-sustaining discharge) ณ จุดนี้ ค่ากระแสไฟฟ้าจะเพิ่มเป็นค่าอนันต์ ซึ่งก็คือเงื่อนไขของการเกิดเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์นั่นเอง[15] ค่าของส่วนในสมการ (4.1) จะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \tag{4.2}$$

สมการที่ (4.2) เป็นเงื่อนไขของการเกิดสปาร์ก และเรียกว่าเป็น "เงื่อนไขของการเกิดสปาร์กของทาวน์เซนด์" หรือ "เงื่อนไขของการเกิดเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์" สามารถเขียนอีกรูปแบบหนึ่งได้เป็น[15]

$$\alpha d = \ln(\frac{1}{\gamma} + 1) \tag{4.3}$$

โดยทั่วไปแล้ว ค่า γ จะมีค่าเล็กมาก ($<10^{-2}$ - 10^{-3}) ดังนั้น $1/\gamma$ จะมีค่าที่สูง ทำให้ค่า $\ln(\frac{1}{\gamma} + 1)$ จะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และจะมีค่าอยู่ใน order ของ 8 - 10 [15] และสามารถที่จะประมาณเป็นค่าคงที่สำหรับเงื่อนไขนี้ที่ค่าของความดัน และความเข้มสนามไฟฟ้าค่าต่าง ๆ ได้ ดังนั้น จากสมการที่ (4.3) สามารถคำนวณแรงดันเริ่มต้นของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจากสมการ

$$\alpha d = 8 \tag{4.4}$$

โดยใช้ค่าของ α ตามสมการต่อไปนี้ [1]

$$\frac{\alpha}{p} = 0.191\left\{\frac{E}{p} - 24.4\right\}^2$$
$$\alpha = 0.191(p)\left\{\frac{E}{p} - 24.4\right\}^2 \tag{4.5}$$

เมื่อ E มีหน่วยเป็น kV/cm

p มีหน่วยเป็น bar

เนื่องจากในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ อากาศจะเกิดเบรกดาวน์โดยตรงไม่มีการเกิดโคโรนาขึ้นก่อน จากสมการที่ (4.4) และสมการที่ (4.5) สามารถคำนวณแรงดันเบรกดาวน์ของอากาศในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอได้

เนื่องจากกลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์เหมาะที่จะนำมาอธิบายเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ แต่ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์การเกิดเบรกดาวน์ได้ทุกกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดคลื่นตัดที่หน้าคลื่น และไม่สามารถอธิบายถึงเวลาที่ใช้ในการก่อ

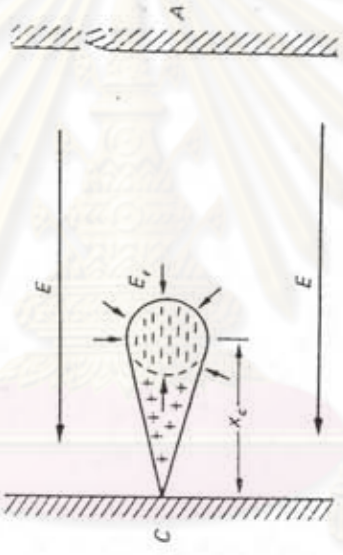
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16840380

ตัวของอะวาลานช์ในช่องแกปกว้าง ๆ หรือในช่องแกปที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ทำให้มีการเสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ขึ้นมาเพื่อที่จะอธิบายฏการณ์เหล่านี้

4.2 เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของสตรีมเมอร์

ทฤษฎีของสตรีมเมอร์เป็นทฤษฎีที่อธิบายถึงการเกิดสปาร์กดีสชาร์จจากอะวาลานช์เดี่ยว ซึ่งสามารถใช้ได้ในบริเวณที่ไม่มีประจุค้างอยู่ หรือบริเวณที่ผลของประจุค้างสามารถละเลยได้เมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าภายนอก ทฤษฎีนี้เป็นทฤษฎีที่มีเหตุผลและเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน



รูปที่ 4.1 ประจุค้างและสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอะวาลานช์ของอิเล็กตรอน

ทฤษฎีนี้กล่าวว่า เมื่ออะวาลานช์มีจำนวนของอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนและไอออไนเซชัน $e^{\alpha x}$ ประมาณ 10^8 จะทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของกระแสอย่างรวดเร็วและเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ขึ้น[15]

กลไกสตรีมเมอร์อธิบายการเกิดสปาร์กดีสชาร์จจากอะวาลานช์เดี่ยว ซึ่งมีประจุค้างเกิดขึ้นจากอะวาลานช์เอง เปลี่ยนจากอะวาลานช์ไปเป็นพลาสมาสตรีมเมอร์ ทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและเกิดเบรกดาวน์ขึ้นในแนวนี้ หลักการของการเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์เป็นผลสืบเนื่องจากกระบวนการวิ่งชนไอออไนเซชันของทาวน์เซนด์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของสตรีมเมอร์จะทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและเกิดไอออนไนเซชันเพิ่มขึ้นมาก ดังรูปที่ 4.1[15]ไอออนบวกจะเคลื่อนที่ได้ช้าเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอน ทำให้ความเครียดสนามไฟ

ฟ้าที่ส่วนหัวและส่วนหลังของอะวาลานช์เพิ่มสูงขึ้น แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กตรอนกับหมอกไอออนบวกจะลดลง ทำให้เกิดอะวาลานช์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 4.2[15] หมอกประจุที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวระหว่างแอโนดกับแคโทด และจะทำให้เกิดเบรกดาวน์ขึ้นตามแนวนี้

รูปที่ 4.2 อะวาลานช์ใหม่ที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีของสตรีมเมอร์

เงื่อนไขของการเปลี่ยนสถานภาพจากอะวาลานช์ไปสู่สตรีมเมอร์

ขนาดของอะวาลานช์วิกฤตินั้นจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุค้างมีค่าสูงจนเท่ากับค่าสนามไฟฟ้าภายนอก ($E_r \approx E_o$) และจะได้ว่า [15]

$$\alpha X_c = 17.7 + \ln X_c \qquad (4.6)$$

X_c เท่ากับระยะของอะวาลานช์วิกฤติ ดังรูปที่ 4.3 [15]

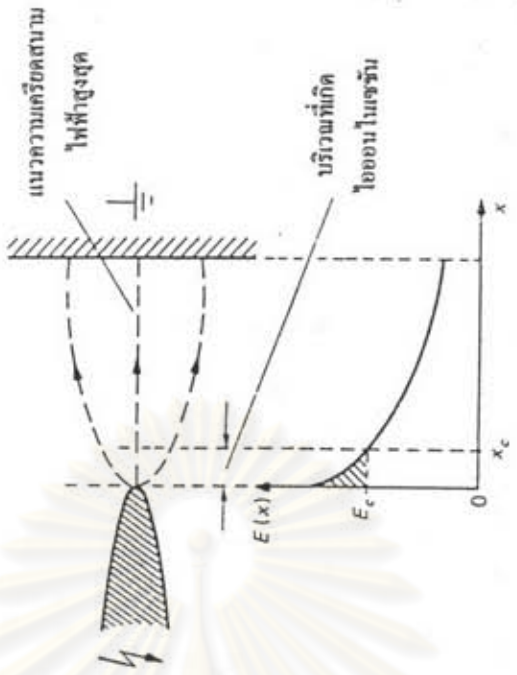
จากการวัดในปฏิบัติการ เราพบว่า ที่ค่าความดัน (p) เท่ากับ 760 Torr จะพบว่าค่า X_c อยู่ในช่วง 1 ถึง 2 เซนติเมตร ดังนั้นจะเขียนสมการ (2.5) ได้ว่า [1]

$$\alpha X_c = 18 \qquad (4.7)$$

หรือ

$$\int_0^{X_c} (\alpha) dX = 18 \qquad (4.8)$$

$e^{\alpha X_c}$ นี้ คือขนาดของอะวาลานช์วิกฤติ เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่เป็นตัวกำหนดการเกิดสตรีมเมอร์อะวาลานช์ โดยมีค่าประมาณ 10^8



รูปที่ 4.3 ระยะวิกฤติของอะวาลานช์อิเล็กตรอน

ดังนั้น จากเงื่อนไขของการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ก็คือ จำนวนของอิเล็กตรอนในอะวาลานช์ เท่ากับค่าวิกฤติคือ $N_C = 10^8$ เราจะหาแรงดันเริ่มต้นของอากาศในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอจากสมการ

$$\int_0^{Xc} \alpha dX = \ln(N_C) = 18 \qquad (4.9)$$

ในกรณีของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปแล้วว่า [1] สมการที่ (4.9) นี้สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอได้ โดยใช้ค่าของ α ตามสมการที่ (4.5) ถ้าหากทราบสนามไฟฟ้ากระจาย การอินทิเกรตจะเป็นไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด และเนื่องจากค่าของ α จะเป็นฟังก์ชันของสนามไฟฟ้า โดยมีขอบเขตการอินทิเกรตเท่ากับความยาวของเส้นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด จนถึงระยะวิกฤติของอะวาลานช์อิเล็กตรอน

ฉะนั้น จากทฤษฎีของทาวเซนด์และทฤษฎีของสตรีมเมอร์ ก็จะสามารถคำนวณแรงดันเริ่มต้นในอากาศได้จากเงื่อนไขในสมการที่ (4.4) และ (4.9) และใช้ค่าของ α ตามสมการที่ (4.5)