บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

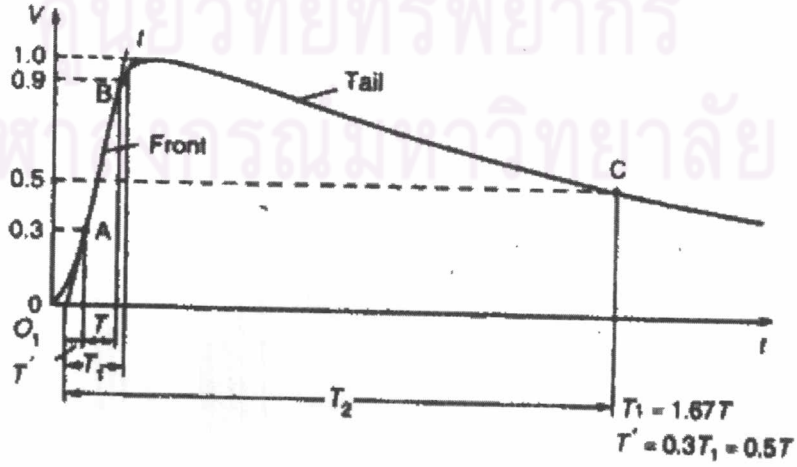
2.1 แรงดันอิมพัลส์

แรงดันอิมพัลส์เป็นแรงดันที่มีรูปคลื่นเลียนแบบมาจากรูปคลื่นที่ก่อให้เกิดการรบกวนในระบบไฟฟ้ากำลัง แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ชนิดแรกเป็นแรงดันเกินที่เกิดจากเหตุภายนอกซึ่งเกี่ยวข้องกับฟ้าผ่าเรียกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ส่วนชนิดที่สองเป็น แรงดันเกินที่เกิดจากสาเหตุภายในระบบส่งจ่ายเองเช่น การทำงานของเซอร์กิตเบรคเกอร์ เรียกแรงดันนี้ว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิ่ง

ความมุ่งหมายของการสร้างแรงดันอิมพัลส์ขึ้นในห้องทดลองก็เพื่อที่จะนำไปทดสอบอุปกรณ์ต่างๆก่อนที่จะนำไปใช้งาน เพื่อที่จะตรวจสอบว่าอุปกรณ์นั้นทนต่อแรงดันเกินได้หรือไม่ มาตรฐานได้มีการกำหนดรูปคลื่นอิมพัลส์ให้เป็นมาตรฐานขึ้นเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบได้ ซึ่งลักษณะของรูปคลื่นอิมพัลส์สามารถกำหนดได้ด้วย

1. ขนาดของแรงดัน โดยปกติจะหมายถึงค่ายอดของรูปคลื่นแรงดัน ในกรณีที่มีคลื่นระลอกซ้อน ซึ่งเกิดจากออสซิลเลชั่นใกล้ๆยอดรูปคลื่นให้ถือเอาค่าเฉลี่ยจากค่ายอดรูปคลื่นระลอก
2. ขั้วของแรงดันอาจจะเป็นบวกหรือลบก็ได้เมื่อเทียบกับดิน
3. T_1 หมายถึงช่วงเวลาที่หน้าคลื่น
4. T_2 หมายถึงช่วงเวลาที่หางคลื่น

ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม [3] (ต่อไปในวิทยานิพนธ์นี้กล่าวเพียงสั้นๆว่าแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs)



รูปที่ 2.1 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าเต็ม

ถ้าต้องการทราบว่าแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs ที่สร้างขึ้นเป็นไปตามมาตรฐานกำหนดหรือไม่ ให้หาค่า T_1 และ T_2 โดยวิธีการแสดงไว้ในรูปที่ 2.1 ว่าอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดต่อไปนี้หรือไม่

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_1 = 1.2 μs ± 30% คือ จะต้องอยู่ในช่วง 0.84 – 1.56 μs

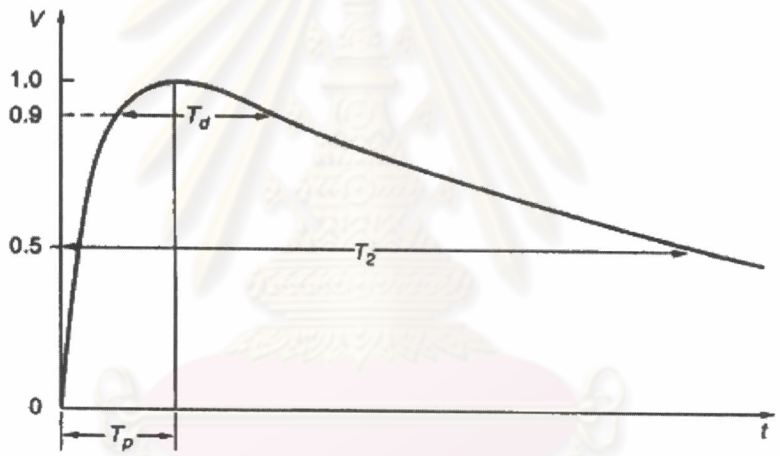
เวลาช่วงหางคลื่น T_2 = 50 μs ± 20% คือ จะต้องอยู่ในช่วง 40 – 60 μs

ค่ายอดแรงดัน V_m ยอมให้ผิดพลาดได้ ±3% ของค่าที่ระบุ

รูปที่ 2.2 แสดงถึงแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิ่ง ซึ่งแตกต่างไปจากแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs คือ ช่วงหน้าคลื่นจะยาวกว่า แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิ่งโดยทั่วไปจะมี T_P/T_2 = 250/2500 μs และกำหนดให้มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ดังนี้

เวลาช่วงหน้าคลื่น T_P = 250 μs ± 20%

เวลาช่วงหางคลื่น T_2 = 2500 μs ± 60%

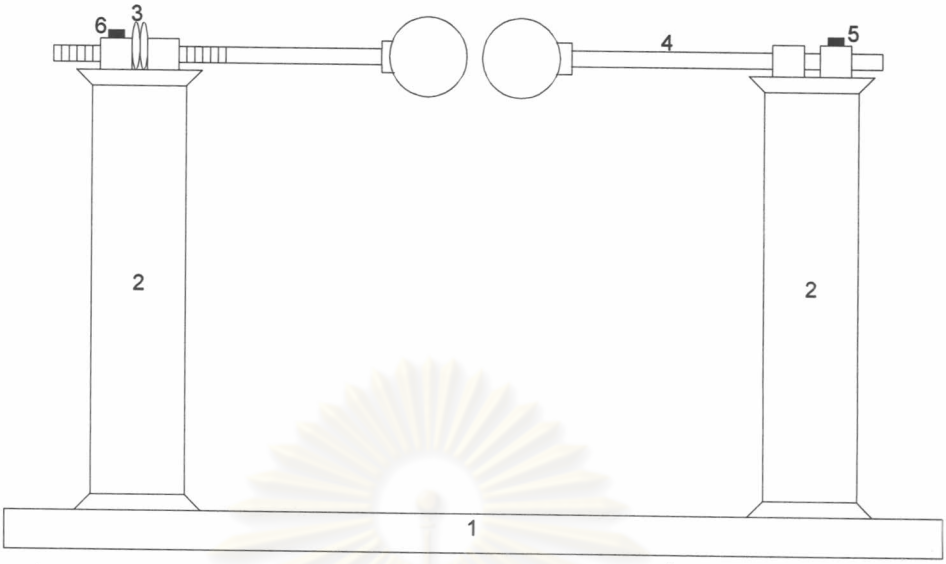


รูปที่ 2.2 แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นสวิตชิ่ง

2.2 การวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลม

โครงสร้างของแกปทรงกลมมาตรฐาน เมื่อทรงกลมมีขนาดไม่เกิน 25 cmได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 วิธีการวัดแรงดันอิมพัลส์ด้วยแกปทรงกลมต้องใช้การอัดประจุให้กับคาปาซิเตอร์แรงสูงของเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ให้ได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการก่อนแล้วจึงดีสชาร์จออกไปที่ช่องว่างทรงกลม ซึ่งอาจจะเกิดเบรกดาวน์หรือไม่เกิดก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็น (probability) และขนาดของแรงดัน ถ้าแรงดันอัดประจุต่ำเกินไปก็จะไม่เกิดเบรกดาวน์ที่ช่องว่างทรงกลม แต่ถ้าแรงดันอัดประจุเพิ่มสูงขึ้นมากพอก็จะทำให้มีโอกาสเกิดเบรกดาวน์มากขึ้น และถ้าแรงดันอัดประจุสูงมากเกินไปก็จะเกิดเบรกดาวน์ทุกครั้งที่ดิสชาร์จออกไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



1. ฐานเหล็ก,2. ฉนวน,3. เกียร์ขับทรงกลม,4. ก้านยึดทรงกลม,5. ที่ต่อสายแรงสูง,6. ที่ต่อสายดิน

รูปที่ 2.3 การติดตั้งช่องว่างทรงกลมวัดแรงดัน

ด้วยเหตุนี้เองการวัดแรงดันอิมพัลส์จึงกำหนดเป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ คือ $U_{b50\%}$ [4],[5] ซึ่งหมายถึงค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ค่าความน่าจะเป็นปานกลาง โดยที่ค่าแรงดันนี้จะทำให้จำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์ที่ช่องว่างทรงกลม เป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดิสชาร์จออกไป ดังนั้นการหาค่า $U_{b50\%}$ จึงหาได้โดยการดิสชาร์จออกไปเป็นจำนวนหลายๆครั้ง จนกระทั่งจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์เป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดิสชาร์จออกไปเช่น ดิสชาร์จ 10 ครั้ง แล้วเกิดเบรกดาวน์ที่ช่องว่างทรงกลม 5 ครั้ง ค่าแรงดันนั้นก็คือ $U_{b50\%}$ แต่การที่จะอัดประจุให้ได้แรงดันอัดประจุพอดีที่จะทำให้ได้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ห้าสิบเปอร์เซนต์นั้นทำได้ยากและเสียเวลาโดยทั่วไปจึงนิยมวัดค่าแรงดัน $U_{b50\%}$ 2 วิธีคือ

1) วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ (Multiple Level Voltage Method) หาค่า $U_{b50\%}$ ด้วยเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรกดาวน์กับค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนเริ่มโดยป้อนแรงดันอย่างน้อย 6 ครั้งที่แต่ละระดับแรงดัน ความแตกต่างของระดับแรงดันที่ป้อน ΔV ประมาณ 3% ของ $U_{b50\%}$ ที่คาดหมาย โดยเลือกระดับแรงดันที่มีโอกาสเกิดเบรกดาวน์ทั้งค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่า 50% ความน่าจะเป็นของการเบรกดาวน์ในแต่ละระดับแรงดันหาได้จากจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวน์ต่อจำนวนครั้งที่ป้อนในแต่ละระดับแรงดัน

2) วิธีปรับขึ้นลง (Up and Down Method) หาค่า $U_{b50\%}$ โดยเลือกระดับแรงดันค่าหนึ่งที่คาดว่าจะเป็น $U_{b50\%}$ ป้อนเข้าวัตถุทดสอบ ทุกครั้งที่ป้อนแรงดันถ้าหากไม่เกิดเบรกดาวน์ให้เพิ่มแรงดันขึ้น ΔU ถ้าหากเกิดเบรกดาวน์ให้ลดแรงดันลง ΔU โดย ΔU มีค่าประมาณ 3% ของค่า

$U_{b50\%}$ ที่คาดหมายเริ่มต้น ดั้งนั้นค่าแรงดันที่ป้อนต่อไปขึ้นกับผลจากป้อนแรงดันที่ผ่านมา จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันทั้งหมดควรมีค่าอย่างน้อย 20 ครั้ง หาค่า $U_{b50\%}$ ได้จากสมการ

$$U_{b50\%} = \left(\frac{\sum k_i v_i}{\sum k_i} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ k_i = จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันค่ายอด v_i

มาตรฐานสากล IEC No.52 จะกำหนดค่าแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมมาตรฐานไว้ที่สภาวะมาตรฐาน ฉะนั้นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่วัดได้ที่ภาวะอากาศของห้องทดลอง สามารถหาได้จากสมการ [2],[4] คือ

$$U = \delta \times k \times U_0 \quad (2.2)$$

เมื่อ U_0 = แรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน

U = แรงดันเบรกดาวน์ที่ภาวะอากาศของห้องทดลอง

δ = ตัวประกอบแก้ไขความหนาแน่นสัมพัทธ์ของอากาศ

k = ตัวประกอบแก้ไขความชื้น

โดยที่ δ และ k สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

$$\delta = \left(\frac{p}{p_0} \right) * \left(\frac{273 + T_0}{273 + T} \right) \quad (2.3)$$

โดยที่ p = ความดันของอากาศที่สภาวะทดสอบ

p_0 = ความดันอากาศ 760 มม.ปรอท

T = อุณหภูมิเป็นองศาเซลเซียสที่สภาวะทดสอบ

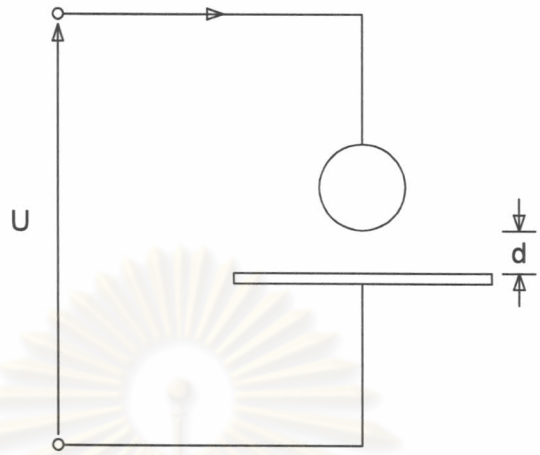
T_0 = 20 องศาเซลเซียส

$$k = 1 + \left(0.002 \times \left(\frac{h}{\delta} - 8.5 \right) \right) \quad (2.4)$$

h = ความชื้นสัมบูรณ์, g/m^3

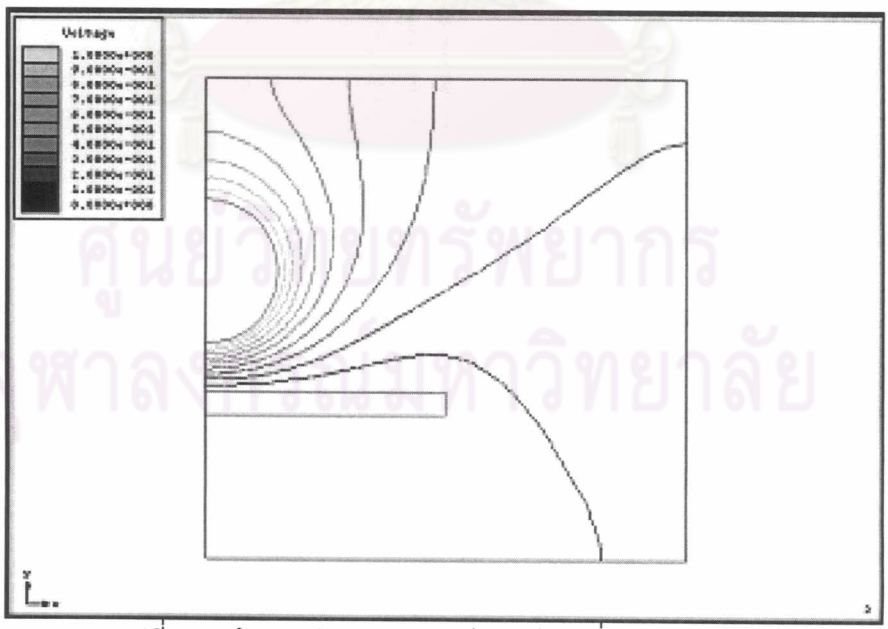
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly nonuniform field)



รูปที่ 2.4 อิเล็กโตรดแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างแกปอากาศของอิเล็กโตรดในรูปที่ 2.4 แต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดเอง [4] ถ้าเขียนเส้นศักย์เท่าจะได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เส้นศักย์เท่าของสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย

จะเห็นได้ว่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นที่ผิวของทรงกลม ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดคำนวณได้จากสมการ

$$E_{max} = \frac{U}{\left((d) \times (\eta^*)\right)} \quad (2.5)$$

เมื่อ U คือ แรงดันที่ป้อนระหว่างอิเล็กโตรด

d คือ ระยะแกป

η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีนิยามว่า

$$\eta^* = \frac{E_{av}}{E_{max}} \qquad 0 < \eta^* \leq 1 \quad (2.6)$$

โดยที่ E_{av} คือ ค่าเฉลี่ยสนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ U/d

จึงอาจกล่าวได้ว่า η^* ก็คือ ดรรชนีแสดงให้ทราบว่าอิเล็กโตรดนั้น มีลักษณะสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด และโดยอาศัยแฟกเตอร์สนามไฟฟ้านี้เอง จึงคำนวณหาความเครียดสนามไฟฟ้าเบรกดาวน์ของฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยในรูปที่ 2.4 ได้คือ

$$E_b = \frac{U_b}{\left((d) \times (\eta^*)\right)}$$

และค่าแรงดันเบรกดาวน์ $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$

แสดงว่าอิเล็กโตรดที่มีแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ก็จะลดลง สมการนี้ใช้ได้เฉพาะกรณีอิเล็กโตรดมีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือใช้กับกรณีที่ไม่มีโคโรนา

2.4 ไอออไนเซชั่นและการปล่อยอิเล็กตรอน

เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปหนึ่งอิเล็กตรอน อะตอมหรือโมเลกุลนั้นจะมีประจุเป็นบวก กระบวนการที่แยกอิเล็กตรอนออกจากอนุภาคของก๊าซและมีไอออนบวกเพิ่มขึ้นนี้เรียกว่า ไอออไนเซชั่น [4] หรือการแตกตัวของอิเล็กตรอนจากโมเลกุล ส่วนกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากของแข็ง (solid) เรียกว่าการปล่อยอิเล็กตรอน (electron emission) ในที่นี้อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากอิเล็กโตรด ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าขึ้นมาได้

อาจกล่าวได้ว่าก๊าซจะมีสภาพนำไฟฟ้าได้เมื่อมีประจุอิสระจำนวนมากๆ โดยกระบวนการทวีคูณเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนและไอออนในแกปนั้นแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการคือ กระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุลของก๊าซอันเกิดจากการชนของอนุภาคกับโมเลกุล (อิเล็กตรอน, ไอออน และโฟตอนชนกับโมเลกุล) และกระบวนการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวอิเล็กโตรดเมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูง หรือได้รับพลังงานความร้อน รังสี หรือไอออนวิ่งมากระทบกับผิวของอิเล็กโตรด

2.4.1 ไอออไนเซชั่นโดยการชน (collision ionization)

เมื่อมีอนุภาค m (อิเล็กตรอน, ไอออนหรืออะตอมเป็นกลาง) เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v และชนกันอะตอมมีมวล M จะมีการถ่ายทอดพลังงานจลน์ถ้าไม่มีผลให้เกิดการตื่นกระตุ้น (excitation) หรือไอออไนเซชั่น เรียกการชนนั้นว่า ชนแบบยืดหยุ่น (elastic eollision) แต่ถ้าชนแล้วอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชนเกิดตื่นกระตุ้นหรือไอออไนเซชั่น เรียกการชนนี้ว่า ชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic) นั้นหมายความว่าพลังงานจลน์ได้เปลี่ยนเป็นพลังงานศักย์ (potential energy) [3],[4],[6]

2.4.1.1 สัมประสิทธิ์การไอออไนเซชั่นในก๊าซ

ในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ไประหว่างอิเล็กโตรด อาจเกิดการไอออไนเซชั่นได้หลายครั้งก่อนถึงอิเล็กโตรด ทาวเซนด์ (Townsend) ได้ชี้ให้เห็นว่าจำนวนการชนเกิดไอออไนเซชั่นต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไปนั้นกำหนดด้วยแฟกเตอร์ที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชั่นของทาวเซนด์ โดยอนุภาควิ่งชนโมเลกุลในแกปแบ่งเป็นสัมประสิทธิ์ α และ β โดยที่ α เป็นสัมประสิทธิ์การชนแตกตัวด้วยอิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุล ส่วน β เป็นสัมประสิทธิ์การชนของไอออน ซึ่งพอจะนิยามสัมประสิทธิ์ทั้งสองได้ดังนี้

α คือ ค่าเฉลี่ยของการชนไอออไนเซชั่นของอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่ไปในแกปเป็นระยะ 1 เซนติเมตร มีหน่วยเป็น cm^{-1} (สัมประสิทธิ์การชนไอออไนเซชั่นที่หนึ่งของทาวเซนด์)

β คือ จำนวนการชนของไอออนบวกกับโมเลกุลเป็นกลาง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระกับไอออนบวกต่อหนึ่งหน่วยระยะทางในแกปตามแนวสนามไฟฟ้า

แต่เนื่องจากไอออนมีมวลมาก ฉะนั้นการได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจึงน้อย และการถ่ายทอดพลังงานเมื่อชนก็น้อยด้วย จะทำให้ $\alpha << \beta$ ฉะนั้นการชนแตกตัวในก๊าซจึงมักเกิดเนื่องจากกระบวนการ α ค่าสัมประสิทธิ์การไอออไนเซชั่น α ขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้า (E) และความหนาแน่นของก๊าซ (p) ซึ่งมีความสัมพันธ์

$$\left(\frac{\alpha}{p}\right) = f\left(\frac{E}{p}\right) \tag{2.7}$$

ความสัมพันธ์ของสมการ (2.7) สำหรับก๊าซชนิดต่างๆมีลักษณะคล้ายกันซึ่งอาจเขียนได้ด้วยสมการ

$$\left(\frac{\alpha}{p}\right) = A \exp\left(-\frac{B}{(E/p)}\right) \tag{2.8}$$

โดยที่ $B = A * U_i$ และ $A = A(T)$

A และ B เป็นค่าคงตัวขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ และฟังก์ชั่นดังกล่าวใช้ได้ในย่านจำกัดของ E/p ดังตาราง 2.1

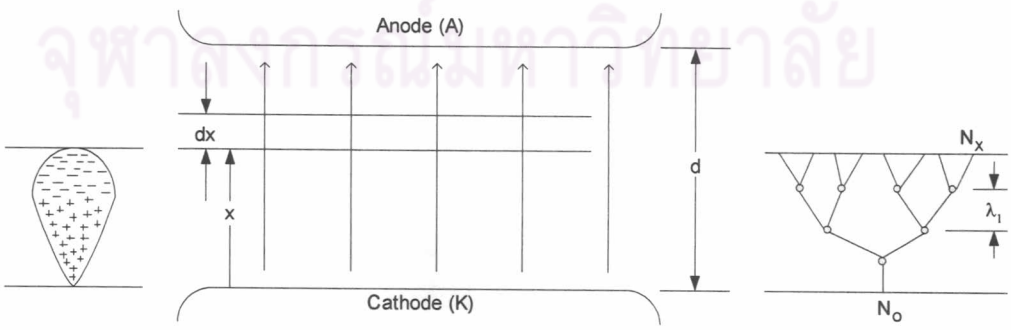
ตารางที่ 2.1 ค่าคงตัวของ A และ B ของก๊าซต่างๆ

ก๊าซ	A (cm - Torr)$^{-1}$	B (cm - Torr)$^{-1}$	ย่านที่ใช้ได้ (E/p) V * (cm - Torr)$^{-1}$
Air	15	365	100 - 800
N_2	12	342	100 - 600
H_2	5.1	138.8	20 - 600
He	3	34	20 - 150
Ne	4	100	100 - 400
A	14	180	100 - 600
Kr	17	240	100 - 1000
Xe	26	350	200 - 800
CO_2	20	466	500 - 1000
H_2O	12.9	289	150 - 1000

ค่าของ (α / p) = f(E / p) เป็นแฟกเตอร์สำคัญที่กำหนดการเพิ่มทวีคูณของอนุภาคประจุ และนำไปสู่การเบรกดาวน์ในก๊าซ

2.4.1.2 การเกิดอะวานลานช์อิเล็กตรอน (electron avanlanche)

พิจารณาจากสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอระหว่างอิเล็กโตรดแผ่นระนาบวางขนานกันดังรูปที่ 2.6 เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า E จะถูกเร่งวิ่งไปหาอะโนดพลังงานที่ได้รับจากสนามไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ ถ้าสูงมากพอจะทำให้เกิดไอออไนเซชั่น เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซนั่นคือทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลเป็นกลางที่เหลือก็เป็นไอออนบวก อิเล็กตรอนตัวใหม่ก็จะวิ่งไปชนโมเลกุลเกิดอิเล็กตรอนตัวใหม่เพิ่มขึ้นต่อๆไปจนกระทั่งเป็นอะวานลานช์ของอิเล็กตรอนขึ้น



รูปที่ 2.6 อะวาลานช์ของอิเล็กตรอน

ในช่องแคบ dx ห่างจากคะโถดเป็นระยะ x มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเป็น

$$dN_x = \alpha * N_x\, dx \qquad (2.9)$$

ที่ x = 0 จำนวนอิเล็กตรอนเริ่มต้น N_o

ที่ระยะ x จำนวนอิเล็กตรอนเป็น N_x

แต่เนื่องจาก E มีค่าเท่ากันตลอดแกป ฉะนั้น α จึงมีค่าคงที่

ที่ระยะ x จะมีจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานช์เป็น N_x คือ

$$N_x = N_o e^{\alpha x} \qquad (2.10)$$

จำนวนอิเล็กตรอนและไอออนบวกจะเพิ่มขึ้นเป็นเอกซ์โปเนนเชียล อิเล็กตรอนที่วิ่งไปถึงอะโนดจะมีจำนวน

$$N_d = N_o e^{\alpha d} \qquad (2.11)$$

เมื่อคูณด้วยประจุของอิเล็กตรอนจะได้กระแส

$$I = I_o e^{\alpha d} \qquad (2.12)$$

I_o คือ กระแสเริ่มต้นเป็นผลมาจากอิเล็กตรอนเริ่มต้นออกมาจากที่หลุดจากคะโถดเรียกว่ากระแสโฟโต (photo current)

เมื่อวัดกระแส I และ I_0 จากสมการ (2.12) ที่ระยะระหว่างอิเล็กโตรดเท่ากับ d มีค่าต่างๆ กัน จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การชนไอออไนเซชั่น α ได้ เมื่อเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน I/I_0 บนสเกลล็อกกับค่าระยะแกป d สเกลเชิงเส้นตรงจะได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง จากสมการ (2.12) คือ $I = I_o e^{\alpha d}$ ที่ระยะแกป $d = d_1$ จะได้

$$\alpha_1 = \left(\frac{1}{d_1}\right) \ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \qquad (2.13)$$

และที่ $d = d_2$ จะได้

$$\alpha_2 = \left(\frac{1}{d_2}\right) \ln\left(\frac{I_2}{I_0}\right) \qquad (2.14)$$

เมื่อรักษาให้อัตราส่วน E/p มีค่าคงตัว

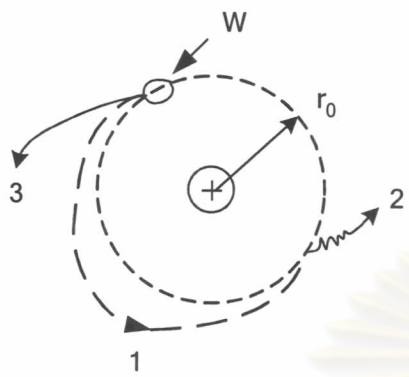
$$\alpha_1 = \alpha_2 \qquad (2.15)$$

2.4.1.3 โฟโตไอออไนเซชั่น (photo ionization)

ในรูปที่ 2.7 แสดงถึงอะตอมไฮโดรเจน มีอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากนิวเคลียสซึ่งมีประจุบวกเมื่อป้อนพลังงานให้อะตอมมากขึ้น จะทำให้อิเล็กตรอนแยกตัวห่างออกไปมากขึ้น ทำให้วงโคจรมีรัศมี r_0 โตขึ้น อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่อยู่ในวงโคจรที่แน่นอนวงหนึ่ง ในลักษณะเช่นนี้เรียกว่าอะตอมอยู่ในสภาพตื่นกระตุ้น พลังงานจะคงสภาพอยู่ในช่วงเวลาสั้นเพียง 10^{-8} ถึง 10^{-7} วินาทีเท่านั้นแล้วอะตอมก็กลับสู่สภาพต้นปกติ และขณะเดียวกันก็ปล่อยพลังงานที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ได้รับมาในตอนแรก ออกไปในรูปของโฟตอน (photon) ถ้าวิ่งไปกระทบเข้ากับอะตอมหรือโมเลกุลเป็นกลาง อาจทำให้ตื่นกระตุ้นหรือไอออไนเซชั่นได้



รูปที่ 2.7 อะตอมไฮโดรเจน
1: วงโคจรโตขึ้นเมื่ออยู่ในสภาพตื่นกระตุ้น
2: พลังงานโฟตอน
3: ไอออไนเซชั่น อิเล็กตรอนหลุดออกไป
W คือ พลังงานที่ให้กับอะตอม
R_0 คือ รัศมีของวงโคจรของอิเล็กตรอน $=10^{-8}$ cm

การเกิดไอออไนเซชั่นเนื่องจากโมเลกุลรับพลังงานรังสีโฟตอน เรียกว่าโฟตอนไอออไนเซชั่นพลังงานที่ทำให้โมเลกุลของก๊าซเกิดไอออไนเซชั่นได้ คือ

$$h\upsilon \geq W_e \quad \text{หรือ} \quad W_i$$

เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของ Plank $= 6.6257 \times 10^{-34}$ Joule-sec

υ คือความถี่ของรังสี

W_e คือพลังงานตื่นกระตุ้น, eV

W_i คือพลังงานไอออไนเซชั่นของโมเลกุลของก๊าซ, eV

2.4.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะ

การเกิดไอออไนเซชั่นโดยการที่อิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมของก๊าซ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา จัดเป็นกระบวนการเริ่มต้นหรือกระบวนการ α นับเป็นกระบวนการที่สำคัญในการสร้างจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณแต่ตามลำพังกระบวนการเริ่มต้นนั้นไม่พอที่จะทำให้เกิดเบรกดาวน์ได้ หากต้องมีกระบวนการอื่นเสริมจำนวนอิเล็กตรอนรวมอยู่ด้วย การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวของโลหะ (electron emission from metallic surface) [3],[4] ถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ช่วยเพิ่มทวีคูณจำนวนอิเล็กตรอนอิสระนำไปสู่การเบรกดาวน์ได้ ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอิเล็กโตรดจึงต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงานเนื่องจากแรงไฟฟ้าสถิตย์นั้น ศักดาไฟฟ้าที่ทำให้เกิดพลังงานนี้เรียกว่า work function(ϕ) ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของสารที่มาทำอิเล็กโตรด กระบวนการที่จะทำให้เกิดพลังงานเพื่อให้อิเล็กตรอนหลุดจากอิเล็กโตรดมีด้วยกันหลายวิธีโดยเฉพาะการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคะโถดโดยสนามไฟฟ้า และการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากคะโถดโดยพลังงานแสง จะถูกนำมาทดลองใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2.4.2.1 การปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวคะโถดโดยการชนของไอออนบวก

อิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากคะโถดได้ จะต้องได้รับพลังงานอย่างน้อยเท่ากับ $W_\alpha = eU_\alpha$ (เวอร์กฟังก์ชั่น) ของโลหะที่ใช้ทำคะโถดนั้น พลังงานดังกล่าวได้จาก

1) ไอออนบวกที่เกิดจากกระบวนการเบื้องต้น คืออิเล็กตรอนวิ่งชนโมเลกุลหรืออะตอมทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา เหลือไอออนบวกวิ่งเข้าหาคะโถด โดยเหตุที่ไอออนบวกมีมวลมาก (ประมาณ 1836 เท่าของมวลอิเล็กตรอน) จึงเคลื่อนที่ได้ช้า พลังงานจลน์ที่ไอออนบวกได้จากสนามไฟฟ้าจึงมีน้อย ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดไอออไนเซชั่น โดยการชนของไอออนบวกกับโมเลกุลของก๊าซได้ แต่ไอออนบวกมีพลังงานศักย์พอ ที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดกระจายออกมาจากผิวคะโถดได้ เมื่อไอออนวิ่งกระทบ เงื่อนไขที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ดังกล่าว พลังงานที่ไอออนบวกมีอย่างน้อยจะต้องมากกว่า W_α คือ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_a = eU_a$$

เมื่อ W_a = เวอร์กฟังก์ชันของโลหะคะโถด

2) โมเลกุลที่อยู่ในสภาพตื่นกระตุ้นในอะวาลานช์จะปล่อยพลังงานโฟตอนออกมา ในขณะที่อะตอมคืนเข้าสู่สถานะภาพพื้นฐาน (ground state) โดยอิเล็กตรอนกลับเข้าสู่วงโคจรเดิม พลังงานโฟตอนตกลงบนคะโถดทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากคะโถด และอาจทำให้เกิดอะวาลานช์ได้ กลวิธีการปล่อยนี้เรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอนด้วยพลังงานโฟตอน (photo emission)

3) โมเลกุลที่อยู่ในสภาพเมตาเสถียร (metastable) อาจแพร่กระจายกลับไปหาคะโถดแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้เมื่อโมเลกุลนั้นวิ่งไปกระทบคะโถด

อิเล็กตรอนที่เกิดใหม่ตามกลวิธีทั้งสามนี้ จัดเป็นผลสืบเนื่อง จึงเรียกกระบวนการเหล่านี้ว่าเป็นกระบวนการขั้นสอง (secondary process)

กระบวนการทั้งสามกลวิธีกำหนดด้วยสัมประสิทธิ์ γ ซึ่งนิยามได้ว่า เป็นจำนวนอิเล็กตรอนเฉลี่ยที่ได้จากกระบวนการขั้นสอง ที่เกิดขึ้นที่คะโถดต่อจำนวนอิเล็กตรอนหนึ่งตัวที่เกิดขึ้นในแกป จากกระบวนการชนเบื้องต้น (primary collision process) นั้นคือการชนไอออไนซ์ในแกปหนึ่งครั้ง

$$\gamma = \gamma_i + \gamma_{ph} + \gamma_m$$

γ คือ สัมประสิทธิ์ไอออไนเซชั่นที่สองของทาวน์เซนด์ (Townsend ionization coefficient)

โดยที่ γ_i เป็นผลจากการชนของไอออนบวก

γ_{ph} เป็นผลจากโฟตอน

γ_m เป็นผลจากเมตาเสถียร

2.4.2.2 การปล่อยอิเล็กตรอนออกโดยสนามไฟฟ้า (field emission)

อิเล็กตรอนอาจถูกดึงจากผิวของโลหะโดยสนามไฟฟ้าสถิตย์สูงๆได้ สนามไฟฟ้าที่จะทำให้เกิดกระแส 2-3 ไมโครแอมแปร์อยู่ระหว่าง 10^7-10^8 โวลท์/ซ.ม. สำหรับโลหะที่มี work function 4.5 eV. สนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวหน้าโลหะอาจมีค่าต่ำถึง 10 กิโลโวลท์/ซ.ม.

Fowler และ Nordheim ได้คิดสมการหาความหนาแน่นกระแส (J) เนื่องจากสนามไฟฟ้าสูงโดยใช้ทฤษฎีของควันตัม (quantum) ดังนี้

$$J = \left(\frac{c}{2\pi h}\right)\times\left(\frac{\mu}{(\mu+\phi)\phi^{1/2}}\right)E^2\varepsilon^{-\frac{(4k\phi)^{3/2}}{3E}} \qquad (2.16)$$

โดย $\mu = (3n^{3/2}/\pi)^{3/2} \times (h^2/8m)$ และ $k = 8\pi^2 m/h^2$

e และ m เป็นประจุและมวลของอิเล็กตรอนตามลำดับ

n เป็นจำนวนของอิเล็กตรอนอิสระ/ซ.ม.^{3}

ϕ เป็น work function ของโลหะสมการ (2.16) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$J = AE^2\varepsilon\left(-\frac{D}{E}\right) \qquad (2.17)$$

จากสมการ (2.17) ความหนาแน่นกระแสมีค่ามากขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้า E มีค่ามากขึ้น

2.4.2.3 การปล่อยอิเล็กตรอนออกโดยพลังแสง

อิเล็กตรอนอาจหลุดหรือกระจายออกมาจากผิวโลหะได้เมื่อได้รับพลังแสงมากพอ [7] ในปี 1887 ไฮริคเฮิร์ท (Heinrich Hertz) ได้ทดลองเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าค่าแรงดันสปาร์คระหว่างอิเล็กโตรดจะมีค่าต่ำลง เมื่อมีแสงจากการสปาร์คที่อื่นวิ่งมากระทบบนผิวของอิเล็กโตรดและได้แสดงให้เห็นว่ารังสีอุลต้าไวโอเลทให้ผลในลักษณะนี้ อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากผิวคะโถดเมื่อได้รับโฟตอนอาจมีพลังงานเหลือเฟือ และเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์วิ่งเข้าหาอะโนดได้ถึงแม้ว่าจะไม่มีสนามไฟฟ้าก็ตาม ความเร็วนั้นมีค่า

$$E = h\upsilon$$

$$\left(\frac{1}{2}\right)mv^2 = h\upsilon - W_a \qquad (2.18)$$

เมื่อ W_a คือ เวอร์คฟังก์ชันหรืองานที่ใช้แยกอิเล็กตรอนหนึ่งตัวโดยใช้โฟตอนที่มีพลังงาน $h\upsilon$ ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ในการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากผิวโลหะจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไขคือ

$$c = \lambda\upsilon$$

$$W_a \leq h\upsilon$$

$$\lambda * W_a \leq h * c$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หรือ $\lambda^{*}U_a \leq 1.245 \times 10^{-5}$ Vm (2.19)

υ คือความถี่ของรังสี

h ความคงตัวของแพลงค์ = 4.15×10^{-15} eV-s

c ความเร็วแสง = 3×10^{8} m/s

λ ความยาวคลื่น, m

ตัวอย่างค่าเวอร์คฟังก์ชันของธาตุต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าเวอร์คฟังก์ชันของธาตุต่างๆเป็น eV เมื่อใช้พลังงานแสงเทียบกับเมื่อใช้ความร้อน

ธาตุ	เวอร์คฟังก์ชัน (eV)	
	ใช้พลังแสง	พลังความร้อน
Ag	4.74	3.08 - 3.56
Al	2.98 - 4.43	-
Au	3.9 - 4.92	4.0 - 4.58
Ba	1.9 - 2.49	2.11
C	4.81	4.39
Ca	2.42 - 3.21	2.24
Cs	1.38 - 1.9	1.81
Cu	4.07 - 4.8	3.85 - 4.38
Fe	3.91 - 4.7	4.04 - 4.77
Ni	4.06 - 5.2	4.61 - 5.24
Ta	4.05 - 4.16	4.07 - 4.19
W	4.35 - 4.6	4.52

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.5 กลไกการเบรกดาวน์ (breakdown mechanisms)

การเกิดเบรกดาวน์ในก๊าซ หมายถึง การเปลี่ยนสภาพการฉนวนไปสู่สภาพการนำไฟฟ้า คือ เป็นช่วงต่อ (transition) ระหว่างสถานภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ (nonself-sustained) ไปสู่สถานภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ (self-sustained) ช่วงต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เมื่อแกปมีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนในอะวาลานช์มากพอจนทำให้แกปมีสภาพนำไฟฟ้าสูง และโดยทฤษฎีแล้วกระแสไหลเป็นค่าอนันต์ คือ กระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนช์ของวงจรภายนอกเท่านั้น

กระแสที่เพิ่มขึ้นหมายถึงจำนวนอนุภาคประจุ คือ อิเล็กตรอนและไอออนมีจำนวนมากขึ้นจนถึงค่าวิกฤตที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ ซึ่งในปัจจุบันมีทฤษฎีที่ใช้อธิบายกระบวนการเพิ่มจำนวนอนุภาคประจุถึงค่าวิกฤต หรือกลไกเบรกดาวน์มีอยู่สองทฤษฎี [3],[4],[8] คือ

- ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์
- ทฤษฎีกลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์

2.5.1 กลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ (streamer breakdown mechanism)

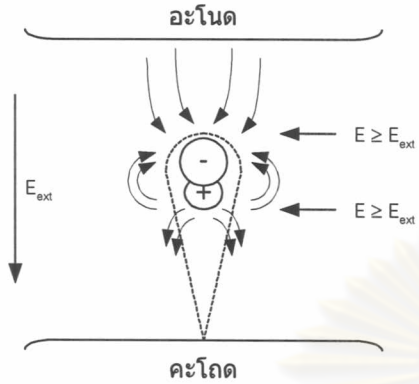
เนื่องจากกลไกเบรกดาวน์ตามทฤษฎีของทาวน์เซนด์ ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์เบรกดาวน์ได้ทุกกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับเวลาที่ใช้ในการก่อตัวของอะวาลานช์ (formative time) และไม่สามารถอธิบายผลของประจุค้าง (space charge) ที่อยู่เบื้องหลังของอิเล็กตรอนอะวาลานช์ก่อนๆได้

ทำให้นักวิทยาศาสตร์ และวิศวกรคิดค้นหาทฤษฎีใหม่ขึ้นมาอธิบายปรากฏการณ์เหล่านี้ ทฤษฎีที่มีเหตุผล และเป็นที่ยอมรับในปัจจุบัน คือ ทฤษฎีสตรีมเมอร์ Meek และ Loeb ได้เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์บวก (positive streamer) ในปี 1940 และในเวลาเดียวกัน Rather ก็เสนอทฤษฎีสตรีมเมอร์ลบ (negative streamer)

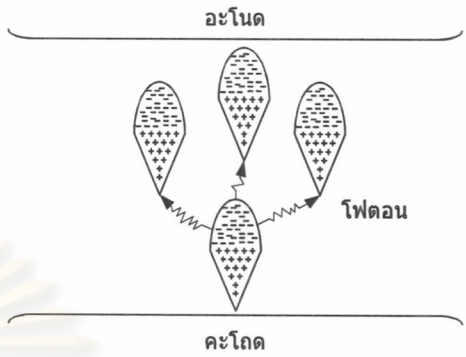
กลไกสตรีมเมอร์อธิบายการเกิดสปาร์กดิสชาร์จจากอะวาลานช์เดี่ยว ซึ่งมีประจุค้างเกิดขึ้นจากอะวาลานช์เอง เปลี่ยนจากอะวาลานช์ไปเป็นพลาสมาสตรีมเมอร์ ทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดเบรกดาวน์ขึ้นในแนวนี้

หลักการของการเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีกลไกสตรีมเมอร์ เป็นผลสืบเนื่องจากกระบวนการวิ่งชนไอออไนเซชั่น (กระบวนการ α) ของทาวน์เซนด์ เกิดอะวาลานช์ขึ้น ในอะวาลานช์เริ่มต้นนี้เองจะมีการไอออไนเซชั่นจำนวนมากจากพลังงานโฟตอน ที่เรียกว่าโฟตอนไอออไนเซชั่นของก๊าซโมเลกุลที่ส่วนหน้าของอะวาลานช์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของอะวาลานช์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดไอออไนเซชั่นขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเกือบจะเรียกได้ว่าอยู่กับที่ เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ปล่อยให้ไอออนบวกอยู่เบื้องหลังรวมกันเป็นหมอกประจุค้าง ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัว และหลังอะวาลานช์เพิ่มสูงขึ้น

($E_{ext}+E_r$) แต่ในบริเวณระหว่างอิเล็กตรอนกับหมอกประจุค้างไอออนบวกความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง ($E_{ext}+E_r$) ดังรูปที่ 2.8



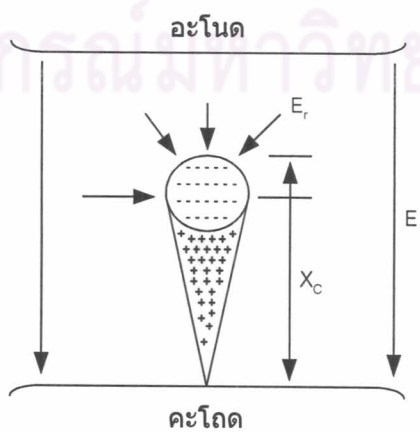
รูปที่ 2.8 ผลของความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากอะวาลานช์ต่อความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อน



รูปที่ 2.9 กลไกเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์

การเพิ่มสูงขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่างๆ ทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชั่นขยายตัวเพิ่มขึ้น เกิดอะวาลานช์ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังรูปที่ 2.9 หมอกประจุค้างเพิ่มขึ้นทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ระหว่างอะโนดกับคะโถด และเกิดเบรกดาวน์ตามแนวนี้จึงเรียกกลไกเบรกดาวน์ลักษณะนี้ว่า สตรีมเมอร์เบรกดาวน์ การขยายเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดโดยอาศัยโฟโตไอออไนเซชั่นสร้างอะวาลานช์เป็นไปด้วยความเร็วแสง การเกิดเบรกดาวน์ในลักษณะสตรีมเมอร์มีความเร็วที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลอง

เงื่อนไขการเปลี่ยนสถานะจากอะวาลานช์ไปสู่สตรีมเมอร์นั้นขึ้นอยู่กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่หัวอะวาลานช์มีค่าใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าที่ป้อน จากเงื่อนไขดังกล่าวจึงสามารถหาจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานช์วิกฤต คือ จะได้ความยาววิกฤตของอะวาลานช์เป็น $x = x_C$ ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระยะวิกฤตของอะวาลานช์อิเล็กตรอน

หาได้จากความสัมพันธ์ $\alpha x_c = 17.7 + \ln x_c + \ln \frac{E_r}{E}$

โดยเงื่อนไขของ Rather จะได้ $\alpha x_c = 17.7 + \ln x_c$ 2.20

Rather ได้ชี้ให้เห็นว่าตามทฤษฎีของทาวน์เซนด์ สปาร์กอาจเกิดขึ้นที่ $x_c = d$ แต่ตามทฤษฎีสตรีมเมอร์จะได้ $x_c < d$ ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอการเปลี่ยนจากอะวาลานช์ไปสู่สตรีมเมอร์เมื่ออะวาลานช์ข้ามแกปพอดีนั่นคืออะวาลานช์มีความยาวเท่ากับแกป d แทนค่า $x_c = d$ ในสมการ

$$\frac{\alpha}{p} \cdot pd = 17.7 + \ln d \qquad 2.21$$

แทน $\frac{\alpha}{p}$ ด้วย $f\left(\frac{U_b}{pd}\right)$ จะได้ $f\left(\frac{U_b}{pd}\right) \cdot pd = 17.7 + \ln d$ 2.22

ฉนั้นจากสมการ $\frac{\alpha}{p} = A \exp - \frac{B}{E/p}$

แทนค่า E ด้วย U/d จะได้ $\frac{\alpha}{p} = A \exp - \frac{Bpd}{U}$

แทนค่า α/p ในสมการ 2.21 จะได้แรงดันเบรกดาวน์ $U = U_b$ คือ

$$U_b = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apx_c}{177 + \ln x_c}} \qquad 2.23$$

จากค่า α ที่ทราบ และ p = 760 Torr จะพบว่าค่า X_C อยู่ในช่วง 1...2 เซนติเมตร ฉนั้นในสมการ 2.20 อาจเขียนได้ $\alpha x_c = 18$

ฉะนั้น $e^{\alpha x_c} = e^{\int_0^{x_c} \alpha dx} = 10^8$ 2.24

นั้นคือ ขนาดของอะวาลานช์วิกฤตจะเกิดขึ้น เมื่อจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานช์มีค่าประมาณ 10^8 ซึ่งเป็นเงื่อนไขอันหนึ่งที่ Rather กำหนดการเกิดสตรีมเมอร์จากอะวาลานช์ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น

2.5.2 ผลของขั้วแรงดันต่อแรงดันเริ่มต้น

แรงดันเริ่มต้น (inception voltage) หมายถึงแรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในแกปถ้าอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยแรงดันเริ่มต้นก็คือ แรงดันเบรกดาวน์โดยตรงกล่าวคือ เมื่อในแกปได้เงื่อนไขเบรกดาวน์ก็จะเกิดเบรกดาวน์ทันที ในกรณีของแกปในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ในย่านเบรกดาวน์แบบโคโรนาความดันก๊าซต่ำกว่าความดันวิกฤต $(p_c)^*$ แรงดันเริ่มต้นก็คือ แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอและแบบไม่สมมาตร แรงดันเริ่มต้นขั้วลบบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) จะมีค่าต่ำกว่าขั้วบวก ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า การจะเกิดเบรกดาวน์ได้นั้น จะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นเป็นตัวสร้างอะวาลานช์ ตามกระบวนการต่างๆที่กล่าวแล้วข้างต้น ตัวอย่างเช่น แกปของอิเล็กโตรดแท่งกับแผ่นระนาบ ถ้าแท่งเป็นขั้วลบ อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะเริ่มที่ผิวของปลายแท่ง ซึ่งเป็นบริเวณที่มี

ความเครียดสนามไฟฟ้าสูง จึงมีโอกาสเกิดไอออไนเซชั่นจากการชนได้มาก จึงสามารถสร้างอะวาลานช์วิกฤตของอิเล็กตรอนได้ง่าย ค่าแรงดันเบรกดาวน์จึงต่ำ แต่ถ้าแท่งเป็นขั้วบวก อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะต้องเริ่มในแกปที่ระยะห่างจากผิวอิเล็กโตรดแท่งไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง อย่างน้อยที่สุดเท่ากับระยะวิกฤต x_c เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสสร้างอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณถึงจำนวนวิกฤต ($N_c=10^8$) ได้ ซึ่งความยาวของอะวาลานช์วิกฤตอย่างน้อยจะต้องเท่ากับ x_c ตามเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของทฤษฎีสตรีมเมอร์ แต่ที่ระยะ x_c จากปลายแท่งเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้ามีความเครียดต่ำ โอกาสที่จะเกิดไอออไนเซชั่นจึงเป็นไปได้ยาก หรือเป็นไปไม่ได้ ถ้าจะให้เกิดไอออไนเซชั่นที่ระยะ x_c ได้ บริเวณนั้นจะต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นก็คือจะเกิดเบรกดาวน์ได้ต้องป้อนแรงดันสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เอง แรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของขั้วลบจึงต่ำกว่าขั้วบวก โดย

$$U_i^- < U_i^+$$

ถ้าเป็นเบรกดาวน์โดยตรงซึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อยหรือไม่สม่ำเสมอสูงที่ก๊าซมีความดัน $p > p_c$ จะได้ $U_b = U_i$ ในย่านนี้ค่าแรงดันเบรกดาวน์โดยตรงขั้วลบต่ำกว่าขั้วบวก คือ

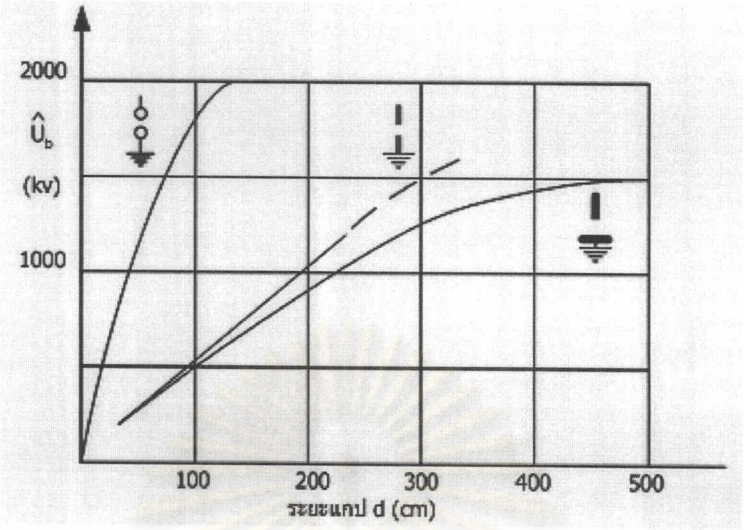
$$U_b^- < U_b^+$$

แต่ถ้าเบรกดาวน์เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง และ $p < p_c$ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเกิดเบรกดาวน์ ผลของโคโรนาทำให้เกิดประจุค้าง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ขั้วลบจะสูงกว่าขั้วบวก ซึ่งเป็นผลของประจุค้าง

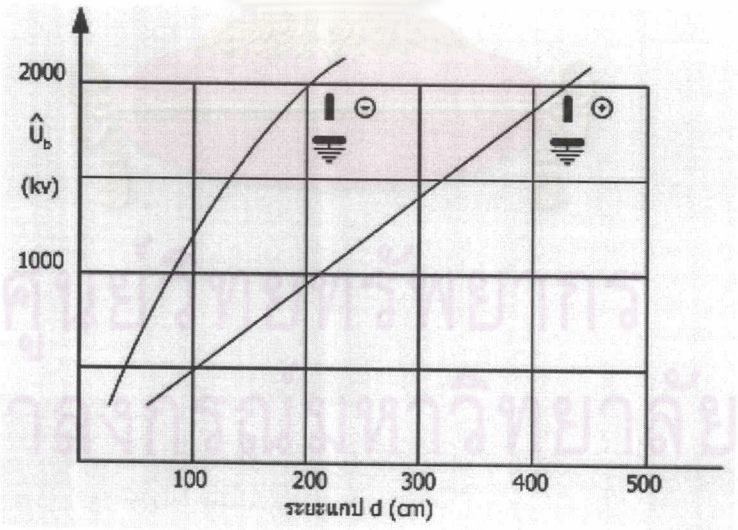
2.5.3 **ผลของรูปลักษณะอิเล็กโตรด** (electrode configuration)

รูปลักษณะอิเล็กโตรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าว่าเป็นแบบสม่ำเสมอ ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย หรือไม่สม่ำเสมอมาก ซึ่งกำหนดด้วยแฟคเตอร์สนามไฟฟ้า ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดกับค่าเฉลี่ยจะแตกต่างกันไม่มาก ค่าแรงดันเริ่มต้น ก็คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์นั้นเอง คือ เมื่ออะวาลานช์วิกฤตได้ตามเงื่อนไขก็จะเกิดเบรกดาวน์ทันที โดยไม่มีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเบรกดาวน์ เป็น เบรกดาวน์โดยตรง เช่น เบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นในแกปของทรงกลม ที่มีระยะห่างไม่มากนักเมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลาง ($d < D/2$) ขั้วแรงดันมีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์เพียงเล็กน้อย

ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ค่าแรงดันเริ่มต้นจะต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์อย่างเห็นได้ชัด ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอแบบสมมาตร เช่น แท่งกลม-แท่งกลม มีปลายเหมือนกัน ขั้วแรงดันไม่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ ในกรณีที่อิเล็กโตรดเป็นแบบไม่สมมาตรมาก เช่น แท่งกลมกับแผ่นระนาบค่าแรงดันเบรกดาวน์จะต่ำกว่าดังรูป 2.11 และมีผลของขั้วแรงดันดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 แรงดันเบรกดาวน์เฉลี่ยค่ายอดกระแสสลับ 50/60 Hz
ในอากาศที่สภาวะมาตรฐาน IEC ในเทอมระยะแกป d ของอิเล็กโตรดรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 2.12 แรงดันเบรกดาวน์ U_b กระแสตรงของอากาศในเทอมของระยะแกป