หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

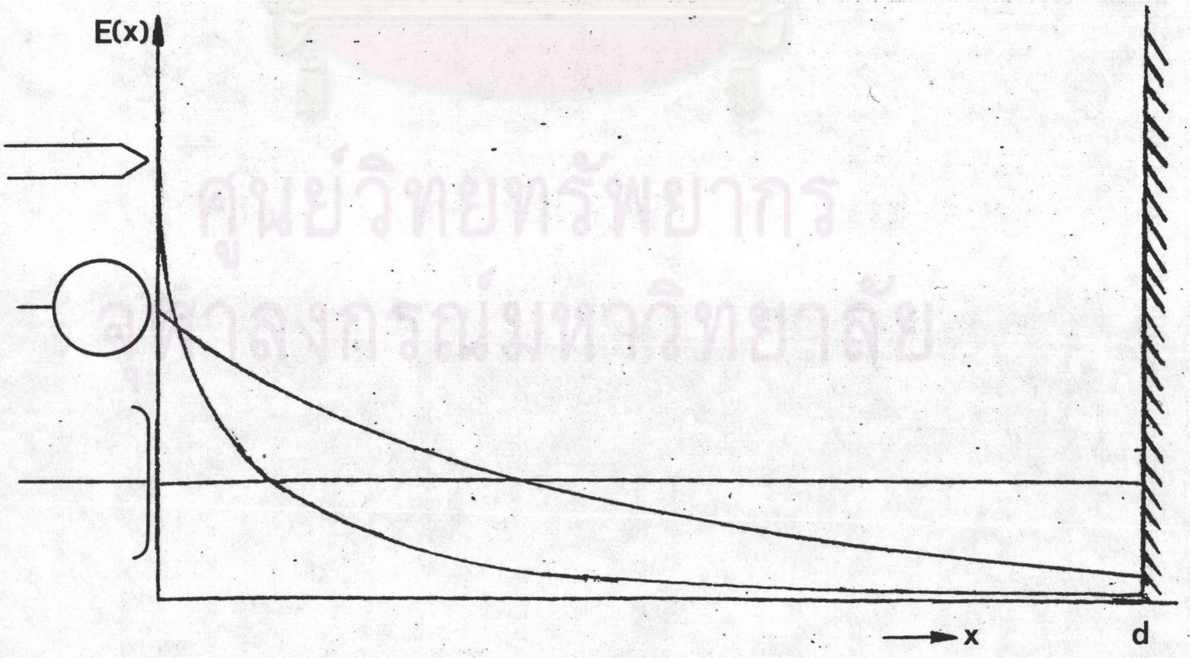
บทที่ 3

แรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน

แรงดันวาบไฟตามผิว หมายถึง ค่าแรงดันที่ป้อนเข้าในระหว่างอิเล็กโตรดของลูกถ้วยฉนวน แล้วทำให้เกิดเบรกดาวน์ โดยส่วนหนึ่ง หรือทั้งหมดของเส้นทางของอาร์กวิ่งไปบนผิวของลูกถ้วยฉนวนที่ห่อหุ้มด้วยอากาศ ซึ่งค่าแรงดันวาบไฟตามผิวนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้าสภาวะบรรยากาศ และลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ป้อน

3.1 แรงดันเบรกดาวน์ของก๊าซในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

อิเล็กโตรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดมีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้น ความแตกต่างกัน ณ. จุดต่าง ๆ จะมาก หรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมาก หรือน้อย ดังเช่น อิเล็กโตรดในรูปที่ 3.1 [7]



รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบสนามไฟฟ้าของอิเล็กโตรดลักษณะต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018481

อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงจะอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับผิวอิเล็กโตรดที่มีพื้นผิวน้อยที่สุด เช่น ปลายแหลมดังในรูป 3.1 จะมีโคโรนาเกิดขึ้นในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง และเกิดขึ้นที่แรงดันต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์ โคโรนานี้อาจคงสภาพอยู่ได้ในบางจุดโดยไม่เกิดเบรกดาวน์ เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรดค่าความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วดังในรูป 3.1 ฉะนั้นไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้เฉพาะบริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงเท่านั้น ที่ระยะห่างออกไปความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำเกินไปที่จะเกิดไอออไนเซชัน จึงไม่อาจเกิดเบรกดาวน์ได้ ฉะนั้นจะมีโคโรนาเกิดขึ้นที่บริเวณผิวอิเล็กโตรดที่มีรัศมีเล็กก่อนที่เกิดเบรกดาวน์ และจัดเป็นเบรกดาวน์ แบบโคโรนา (Corona Breakdown) เมื่อมีโคโรนาเกิดขึ้น สนามไฟฟ้าในแกปจะบิดเบือนไปจากสนามไฟฟ้าที่เป็นแบบอิเลคโตรสแตติกส์ หรือสนามไฟฟ้าที่คำนวณจากเรขาคณิตของแกปเพราะมีประจุค้าง

อย่างไรก็ตาม ความคงทนการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้านี้ นอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะแห่งเรขาคณิตของอิเล็กโตรด เช่น ระยะห่างของอิเล็กโตรด รัศมีความโค้งของอิเล็กโตรดแล้วยังขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์อื่น ๆ อีกหลายประการ เช่น เวลาที่ป้อนแรงดัน รูปคลื่นแรงดันความถี่แรงดันที่ป้อน อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น เป็นต้น [7,11,12]

ทฤษฎีที่อธิบายการเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมออาจอธิบายได้ด้วยทฤษฎีสตรีมเมอร์ ดังมีรายละเอียดดังนี้

กลไกสตรีมเมอร์อธิบายการเกิดสปาร์กดีสชาร์จจากอะวาลานช์เดี่ยว ซึ่งมีประจุค้างเกิดจากอะวาลานช์เอง เปลี่ยนจากอะวาลานช์ไปเป็นสตรีมเมอร์ ทำให้สภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว และเกิดเบรกดาวน์ขึ้นในแนวนี้ หลักการของการเกิดเบรกดาวน์ตามทฤษฎีกลไกสตรีมเมอร์ เป็นผลสืบเนื่องจากกระบวนการวิ่งชนไอออไนเซชันของทาวน์เซนด์ กล่าวคือจะมีการไอออไนเซชันเป็นจำนวนมากจากพลังงานโฟตอน ที่เรียกว่าโฟตอนไอออไนเซชัน (Photon Ionization) ของก๊าซโมเลกุลที่ส่วนหน้าของอะวาลานช์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของสตรีมเมอร์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดไอออไนเซชันเพิ่มขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าจะเรียกได้ว่าอยู่กับที่ เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่วิ่งข้ามช่องแกปไปสู่อะโนดเกิดหมอกอิเล็กตรอนเป็นลำระหว่างอิเล็กโตรด ปล่อยให้ไอออนบวกอยู่เบื้องหลังรวมกันเป็นหมอก ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ส่วนหัว และส่วนหลังอะวาลานช์เพิ่มสูงขึ้น แต่ในบริเวณระหว่างอิเล็กตรอนกับหมอกไอออน ความเครียดสนามไฟฟ้าจะลดลง การเพิ่มสูงขึ้นของความเครียดสนามไฟฟ้าตามจุดต่าง ๆ ทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชันขยายตัวเพิ่มขึ้นเกิดอะวาลานช์

ใหม่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หมอกประจุเพิ่มขึ้นทำให้ความนำไฟฟ้าสูงขึ้นเป็นแนวมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ ระหว่างอะโนด กับคะโถด และเกิดเบรกดาวน์ตามแนวนี้จึงเรียกกลไกเบรกดาวน์ลักษณะนี้ว่า สตรีมเมอร์เบรกดาวน์ การขยายเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรด โดยอาศัยโฟโตไอออไนเซชันสร้างอะวานลานช์เป็นไปด้วยความเร็วเท่าแสง การเกิดเบรกดาวน์ในลักษณะสตรีมเมอร์มีความเร็วประมาณ 1-10 เมตรต่อไมโครวินาที [7]

3.1.1 เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้าง

เงื่อนไขการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยช่วงต่อของการเปลี่ยนสถานะภาพจากอิเล็กตรอนอะวานลานช์ไปสู่สตรีมเมอร์ ซึ่งแบ่งอธิบายออกเป็นสองแบบ [7] คือ

1) การเปลี่ยนจากอิเล็กตรอนอะวานลานช์เดี่ยวไปสู่สตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าเนื่องจากไอออนบวกที่หัวอะวานลานช์มีค่าประมาณเท่า ๆ กับความเครียดสนามไฟฟ้าที่ป้อนจากภายนอก

2) สตรีมเมอร์เบรกดาวน์กำหนดด้วยสนามไฟฟ้าจากประจุค้าง โดยกำหนดว่าสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวานลานช์มีจำนวนอิเล็กตรอน หรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออไนเซชัน $e^{\alpha x}$ ประมาณ 10^{8} โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ หรือความดันก๊าซ หรือระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

3.1.2 แรงดันเริ่มต้นขั้วลบต่ำกว่าขั้วบวก

แรงดันเริ่มต้น (Threshold Voltage, Starting Voltage) หมายถึง แรงดันที่ทำให้เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในแกป ถ้าอิเล็กโตรดเป็นแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย แรงดันเริ่มต้นก็คือ แรงดันเบรกดาวน์โดยตรง (Direct Breakdown) กล่าวคือ เมื่อในแกปได้เงื่อนไขเบรกดาวน์ก็จะเกิดเบรกดาวน์ทันที ในกรณีของแกปที่สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูงในย่านเบรกดาวน์แบบโคโรนาความดันก๊าซต่ำกว่าความดันวิกฤต (P_c) แรงดันเริ่มต้นก็คือ แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (Corona Inception Voltage) ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ และแบบไม่สมมาตรแรงดันเริ่มต้นขั้วลบบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด จะมีค่าต่ำกว่าแบบขั้วบวก ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า การจะเกิดเบรกดาวน์ได้นั้นจะต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นเป็นตัว

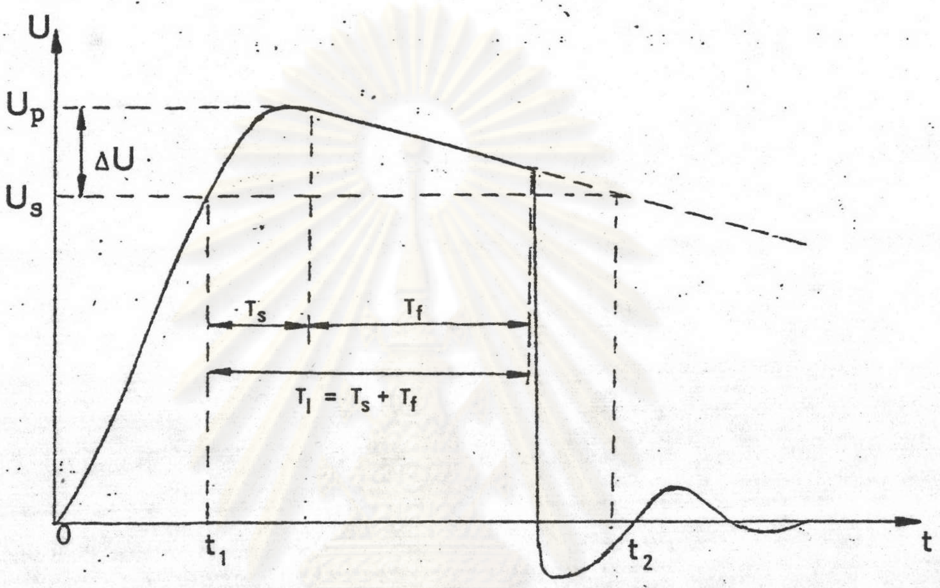
สร้างอะวานลานช์ตามกระบวนการต่าง ๆ ที่กล่าวแล้วข้างต้น สมมติว่าเป็นแกปของอิเล็กโตรดร็อดกับแผ่นระนาบ ถ้าที่ร็อดเป็นขั้วลบ อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะเริ่มที่ผิวของปลายร็อดซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ดูรูปที่ 3.1 มีโอกาสเกิดไอออไนเซชันจากการชนได้มาก จึงสามารถสร้างอะวานลานช์วิกฤตของอิเล็กตรอนได้ง่าย ค่าแรงดันเบรคดาวน์จึงต่ำ แต่ถ้าร็อดเป็นขั้วบวก อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะต้องเริ่มในแกปที่ระยะห่างจากผิวอิเล็กโตรดร็อดไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงอย่างน้อยที่สุดเท่ากับระยะวิกฤต x_c เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสสร้างอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณถึงจำนวนวิกฤต ($N_c = 10^8$)ได้ซึ่งความยาวของอะวานลานช์วิกฤตอย่างน้อยจะต้องเท่ากับ x_c ตามเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของทฤษฎีสตรีมเมอร์ แต่ที่ระยะ x_c จากปลายร็อดเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้ามีความเครียดต่ำ โอกาสที่จะเกิดไอออไนเซชันเพื่อสร้างอะวานลานช์จึงเป็นไปได้ยาก หรือเป็นไปไม่ได้ ถ้าจะทำให้เกิดไอออไนเซชันที่ระยะ x_c ได้ บริเวณนั้นจะต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้น นั่นคือจะเกิดเบรกดาวน์ได้ต้องป้อนแรงดันสูงขึ้น ด้วยเหตุนี้เองแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของขั้วลบจึงต่ำกว่าของขั้วบวก แต่ถ้าเบรกดาวน์เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง และ $p < p_c$ จะมีโคโรนาเกิดขึ้นก่อนเกิดเบรกดาวน์ ผลของโคโรนาทำให้เกิดประจุค้าง ค่าแรงดันเบรกดาวน์ขั้วลบจะสูงกว่าขั้วบวก

3.2 เบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์

การเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซในกรณีของแรงดันสถานะอยู่ตัว (Steady State Voltage) เช่น แรงดันกระแสตรง หรือแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน ถือว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าคงตัวฉะนั้นแรงดันเบรกดาวน์จะเป็นฟังก์ชันของ α, β, n และช่องแกป d แต่ในกรณีที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์แรงดันจะคงอยู่ในระยะเวลาอันสั้น นั่นก็หมายถึงสนามไฟฟ้าจะคงมีอยู่ในช่วงเวลาอันสั้นด้วย เมื่อขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัวควรจะเกิดเบรกดาวน์ได้ แต่ปรากฏว่ายังไม่เกิดเบรกดาวน์จะต้องรอเวลาอีกช่วงระยะหนึ่งเบรกดาวน์จึงจะเกิดขึ้นได้ ดังนั้นการเกิดเบรกดาวน์ของแรงดันอิมพัลส์ นอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะสนามไฟฟ้า และความหนาแน่นสัมพัทธ์ของก๊าซ แล้วยังขึ้นอยู่กับเวลาอีกด้วย

3.2.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์

เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ T_1 คือ ช่วงระยะเวลานับตั้งแต่ขนาดแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะอยู่ตัวแล้วไปจนถึงเวลาเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นจริงของแรงดันอิมพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์

ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าเบรกดาวน์จะเกิดขึ้นได้นั้นทุกกรณี จะต้องมีอะวานลานช์ของอิเล็กตรอน ซึ่งต้องมีอิเล็กตรอนเริ่มต้นอย่างน้อยหนึ่งอิเล็กตรอน และต้องเป็นอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะที่พอเหมาะ คือ มีพลังงานพอที่จะทำให้เกิดไอออไนเซชันสร้างอะวานลานช์ต่อไปได้ นั่นคือ จะเริ่มต้นด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่ในบริเวณสนามไฟฟ้าที่สูงพอ และมีระยะห่างอะโนดอย่างน้อยเท่ากับระยะอะวานลานช์วิกฤต x_c ในกรณีของแรงดันที่สถานะคงตัว สนามไฟฟ้าจะคงตัวอยู่เป็นเวลาเหลือเฟือพอที่จะหา หรือพบอิเล็กตรอนอิสระเริ่มต้นได้ง่าย และมีมากพอจากธรรมชาติ เช่น อิเล็กตรอนอิสระจากรังสีคอสมิค เป็นต้น อย่างไรก็ตามในกรณีของแรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสนามไฟฟ้าคงตัวอยู่ในช่วงเวลาเพียงเป็นไมโครวินาที ฉะนั้นอิเล็กตรอนอิสระที่พอเหมาะจากธรรมชาติอาจจะไม่เพียงพอที่จะเริ่มต้นได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาตรของแกปที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอ เบรกดาวน์อาจจะไม่เกิดขึ้นก็ได้ถ้าหากไม่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน เช่น การฉายแสงรังสี เป็นต้น

อิเล็กตรอนอิสระที่มีอยู่ในปริมาตรแกปกระจายเป็นสถิติ ฉะนั้นเวลานับตั้งแต่แรงดันอิมพัลส์เพิ่มสูงเท่าแรงดันสถานะคงตัว คือ U_s จนกระทั่งพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นจึงเป็นสถิติด้วย เรียกว่า เวลาล่าช้าสถิติ T_s (Statistic Time Lag) เมื่อพบอิเล็กตรอนเริ่มต้นแล้วจะต้องใช้เวลาในการไอออไนเซชันสร้างอะวานลานช์ตามกระบวนการกลไกเบรกดาวน์ เพื่อให้ได้จำนวนอิเล็กตรอนตามเงื่อนไข เรียกช่วงเวลานี้ว่า เวลาล่าช้าก่อตัว T_f (Formative Time Lag) จึงสรุปได้ว่าเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ประกอบด้วย

$$T_l = T_s + T_f$$

แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ U_b จะต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันเบรกดาวน์สถานะอยู่ตัว U_s อัตราส่วนของแรงดัน U_b ต่อแรงดัน U_s คือ U_b/U_s เรียกว่า อัตราส่วนอิมพัลส์ (Impulse Ratio) โดยปกติค่าอัตราส่วนอิมพัลส์นี้มีค่าสูงกว่า 1 ยกเว้นในกรณีของโคโรนาเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอสูง และมีผลโคโรนาคงสภาพ (Stabilized Corona) ทำให้แรงดันเบรกดาวน์สูงกว่าเมื่อไม่มีโคโรนาค่าอัตราส่วนอิมพัลส์จะต่ำกว่าหนึ่ง แต่ในทางปฏิบัติการออกแบบลักษณะของอิเล็กโตรด หรือส่วนของอุปกรณ์จะต้องหลีกเลี่ยงมิให้เกิดโคโรนา ฉะนั้นการทดสอบความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอุปกรณ์ด้วยแรงดันอิมพัลส์ จึงมีค่าสูงกว่าแรงดันสถานะอยู่ตัว

ค่าอัตราส่วนอิมพัลส์ขึ้นอยู่กับเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ T_l และอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงดันที่ป้อน ตัวอย่างเช่น ในกรณีของแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า ถ้าหากความชัน (Steepness) คือ dU/dT ยิ่งมีค่าสูง เวลาช่วงหน้าคลื่น หรือเวลาที่แรงดันเพิ่มขึ้นถึงค่ายอดแล้วลดลงก็ยิ่งสั้น ย่อมหมายถึงช่วงเวลาที่สนามไฟฟ้าคงอยู่นั้นยิ่งสั้นตามไปด้วย โอกาสที่จะหาอิเล็กตรอนเริ่มต้นก็ยิ่งน้อยลงไป และเวลาที่ใช้ก่อตัวอะวานลานช์ก็อาจจะไม่พอ โอกาสที่จะเกิดเบรกดาวน์ก็น้อยลง เพื่อให้มีโอกาสเบรกดาวน์สูงขึ้นจำเป็นต้องมีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นนั่นคือ ต้องป้อนแรงดันให้สูงขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

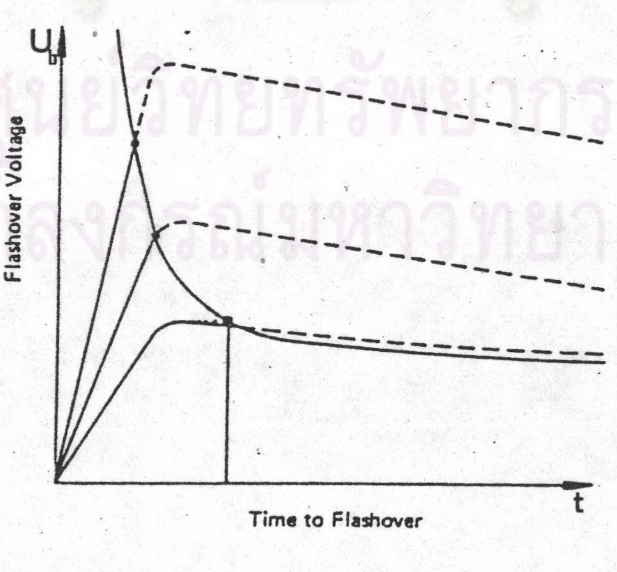
จากคำอธิบายเกี่ยวกับเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ดังกล่าว จะช่วยให้เข้าใจได้อย่างชัดเจนเกี่ยวกับแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ห้าสิบเปอร์เซนต์ U_{b50} นั้นหมายความว่าอย่างไร และเกิดขึ้น หรือเป็นอย่างไร ทั้ง ๆ ที่ป้อนแรงดันเท่ากันที่แกปเดียวกันเงื่อนไขเหมือนกันแต่บางครั้งก็เบรกดาวน์บางครั้งก็ไม่เบรกดาวน์ทำให้เกิดเบรกดาวน์ออกมาที่เปอร์เซ็นต์ต่างๆ กันที่แกปของอิเล็กโตรดที่กำหนดให้โอกาสที่จะเกิดเบรกดาวน์มาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับความชันของแรงดันที่ป้อนซึ่งเป็นลักษณะสมบัติอันหนึ่งของแกปนั้น เรียกว่า ลักษณะเส้นแรงดันเวลา (Voltage

Time Characteristics)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.2 <u>ลักษณะเส้นแรงดัน - เวลา</u>

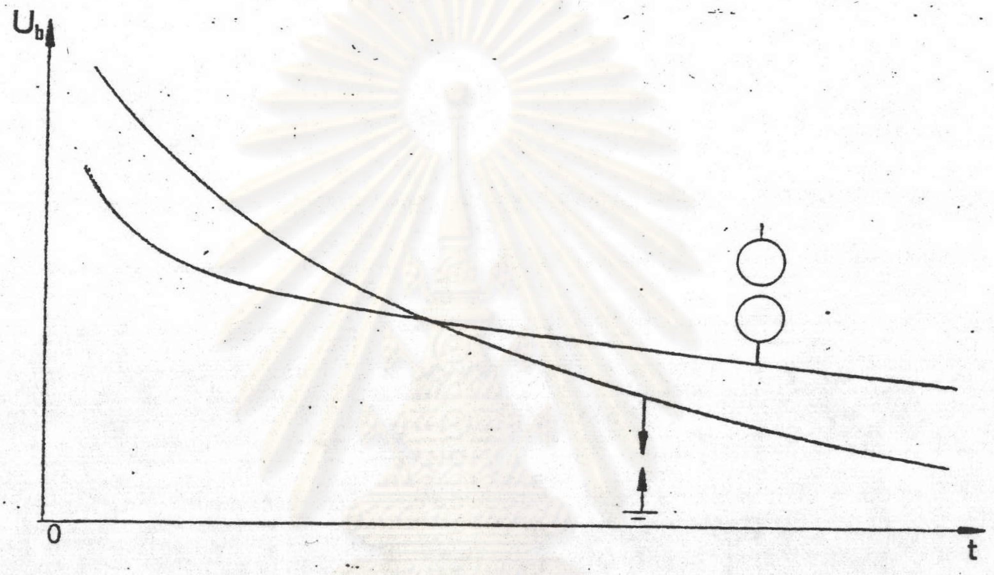
ในข้อที่แล้วได้ชี้ให้เห็นชัดเจนถึงผลของช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันมีผลอย่างมากต่อแรงดันเบรกดาวน์ของแกปโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ การสร้างอิเล็กตรอนอิสระเพื่อก่ออะวานลานช์ให้ได้ค่าวิกฤตจะต้องใช้เวลา (เวลาก่อตัวอะวานลานช์ T_f) ถ้าช่วงเวลาแรงดันคงตัวอยู่น้อย จำเป็นต้องใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อให้สตรีมเมอร์เกิดขึ้นได้ตามเงื่อนไขในเวลาอันรวดเร็ว นั่นคือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์จะสูงขึ้นถ้าหากช่วงเวลาคงตัวของแรงดันสั้นลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนจะดีขึ้นถ้าใช้กับแรงดันมีช่วงเวลาสั้นลง ในกรณีแรงดันอิมพัลส์ความคงทนของไดอิเล็กตริกอาจแสดงได้ด้วย <u>ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์</u> ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน์ กับเวลาเบรกดาวน์ หรือเวลาคลื่นตัด (Chopped Time) ได้จากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีความชัน (Steepness) ต่าง ๆ กัน แล้ววัดค่าแรงดันเบรกดาวน์ (U_b) ถ้าคลื่นตัดที่ช่วงหางคลื่น ค่ายอด คือ ค่าแรงดันเบรกดาวน์ แต่ถ้าคลื่นตัดช่วงหน้าคลื่นค่าแรงดันเบรกดาวน์ก็คือ แรงดัน ณ. จุดที่เกิดเบรกดาวน์ทุกค่าแรงดันเบรกดาวน์จะได้ค่าเวลาคลื่นตัด T_c เมื่อนำค่า U_b และ T_c มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ก็จะได้ลักษณะเขตอิมพัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 [13]



รูปที่ 3.3 ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์จะลดลงในช่วงที่เวลาน้อย ๆ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นลักษณะเส้นเกือบคงตัวเป็นเส้นระดับ แต่ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์จะลดลงตลอดเมื่อช่วงเวลาของแรงดันเพิ่มขึ้น อัตราการลดลงจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับลักษณะอิเล็กโตรด ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์ของแกปทรงกลมและแกปแท่งกลมปลายแหลม

ความแตกต่างของลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์ระหว่าง แกปของทรงกลม กับแกปของแท่งกลมปลายแหลม อาจอธิบายได้ด้วยผลของเวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ ในช่วงเวลาน้อย ความชันของรูปคลื่นมาก หรือช่วงเวลาแรงดันคงตัวน้อย เวลาน้อยจนใกล้เคียงกับเวลาที่ใช้ในการสร้างอะวานลานช์ ฉะนั้น $T_1 = T_s + T_f$ จึงมีผลอย่างมากต่อค่า U_b ที่เวลามาก ๆ เหลือเฟือ เวลาของ T_1 จะไม่มีผลต่อ U_b ฉะนั้นความแตกต่างของลักษณะเส้นเขตอิมพัลส์จึงขึ้นอยู่กับแฟคเตอร์สำคัญ 2 ประการ คือ

1) ปริมาตรของแกปยังผล

2) สนามไฟฟ้ากระจาย (Field Distribution) ของแกป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกรณีแกปของทรงกลมกับแกปของแท่งกลมปลายแหลม อย่างแรกย่อมมีปริมาตรของแกปยังผล (ปริมาตรที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอที่จะทำให้เกิดการชนไอออไนเซชันได้) มากกว่าอย่างหลัง จำนวนอิเล็กตรอนที่มีโอกาสเริ่มต้นสร้างอะวานลานช์มีมากกว่า และสนามไฟฟ้ากระจายของแกปทรงกลม E(x) ยังลดลงไม่มากที่ระยะห่างออกไปจากผิวทรงกลม โอกาสสร้างอะวานลานช์วิกฤตมีมาก และง่ายกว่า ในช่วงของเวลาน้อย ๆ แกปทรงกลมจึงใช้ความเครียดสนามไฟฟ้าน้อยกว่าของแกปปลายแหลม เพราะแกปของปลายแหลมมีปริมาตรมีปริมาตรยังผลน้อยกว่า และสนามไฟฟ้ากระจายจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อระยะห่างออกไปจากผิวอิเล็กโตรด กล่าวคือ สนามไฟฟ้าจะมีความเครียดสูงแต่เฉพาะใกล้ ๆ ผิวอิเล็กโตรดเท่านั้น (ดูรูปที่ 3.4) เพื่อให้สามารถสร้างอะวานลานช์วิกฤตได้จากปริมาตรยังผลน้อยกว่า และเวลาสั้นจึงต้องป้อนแรงดันเข้าไปสูงกว่า เพื่อให้ได้สนามไฟฟ้าสูงพอ แต่ที่เวลามากๆ คือ $t \gg T_1$ เรื่องเวลาจึงไม่มีความหมายในเรื่อง หรือมีผลต่อการสร้างอะวานลานช์วิกฤต แต่จะมีผลของความเคียดสนามไฟฟ้าสูงสุด แบบปลายแหลมจะมี E_{max} สูงกว่า คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า n^* ต่ำกว่า ค่า U_b จึงต่ำกว่า [7] โดยสังเกตได้จากสมการ

$$U_b = E_b \cdot d \cdot n^*$$

E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์เรียกว่าความคงทนทางไฟฟ้าของการฉนวน

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโตรด

n^* คือ แฟคเตอร์สนามไฟฟ้า (Field Utilization Factor) โดยที่

$$n^* = E_{av}/E_{max} \leq 1$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ผลของความหนาแน่นของก๊าซ

สภาวะมาตรฐานของบรรยากาศตาม IEC กำหนดให้ความหนาแน่นของอากาศสัมพัทธ์ = 1 เมื่อความดันบรรยากาศ (p) = 760 Torr อุณหภูมิ (t) = 20 °C (ซึ่งเท่ากับ T = 273 + 20 = 293 °K) [13] ดังนั้นค่าความหนาแน่นอากาศสัมพัทธ์ (Relative Air density) คำนวณได้จาก

$$\delta = (0.386).(p/(273+t))$$

เมื่อ p คือความดันของอากาศเป็น Torr

t อุณหภูมิเป็น $^{\circ}C$

เมื่อทราบค่าความหนาแน่นอากาศ และค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ความหนาแน่นอากาศ สามารถหาค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐานได้จาก [9]

$$U(\delta) = \delta \cdot U_{bn}$$

โดยที่ U_b เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่ความหนาแน่นอากาศ = δ

U_{bn} เป็นค่าแรงดันเบรกดาวน์ที่สภาวะมาตรฐาน

3.4 ผลของความชื้นในอากาศ

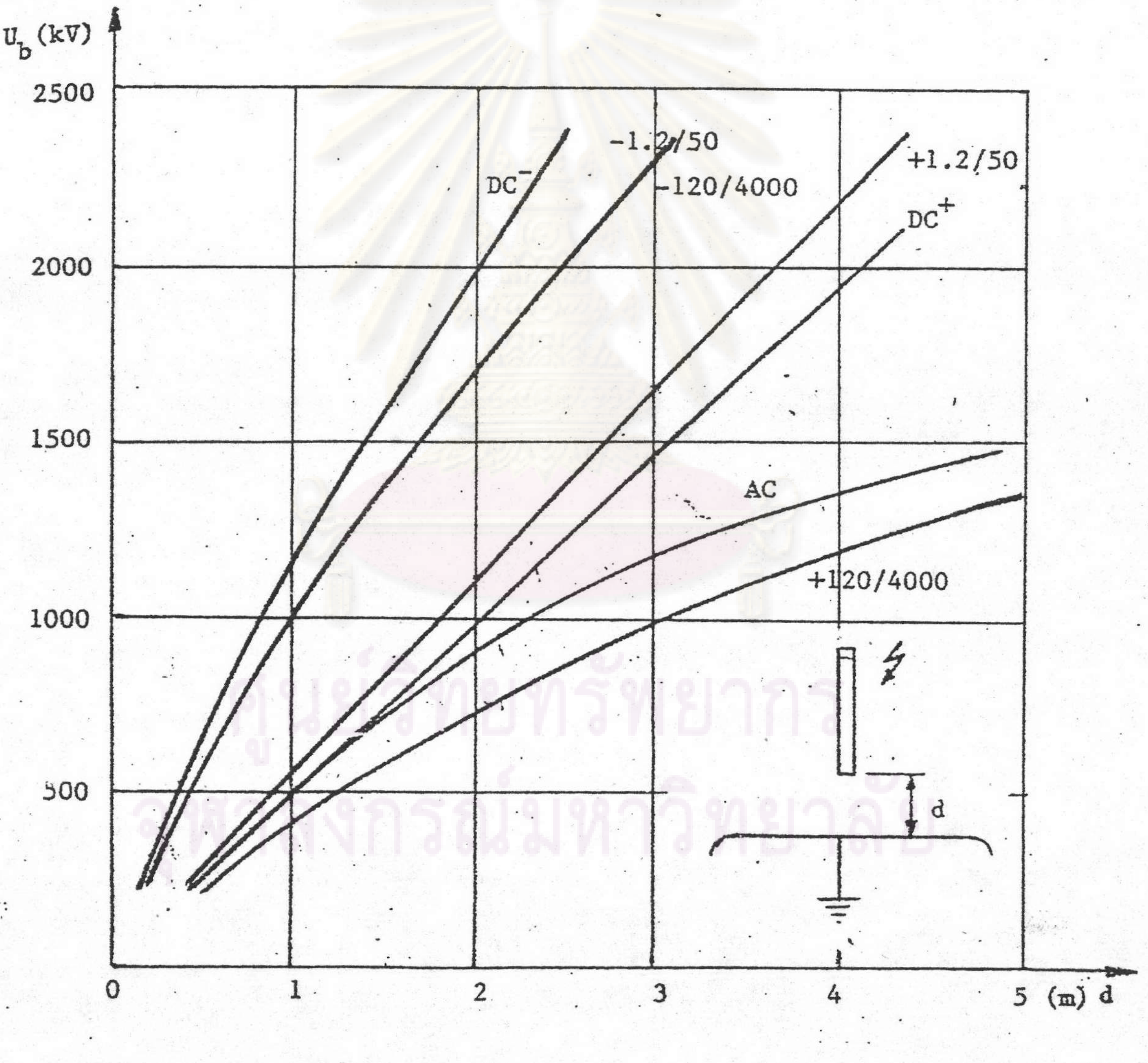
โมเลกุลของน้ำในอากาศมีลักษณะเป็นก๊าซไฟฟ้าลบอ่อนๆ เพราะมีอะตอมของออกซิเจนประกอบอยู่ ทำให้อากาศที่มีความชื้น มีความคงทนต่อแรงดันสูงขึ้นตราบเท่าที่ความชื้นนี้ยังไม่กลั่นตัวเป็นหยดน้ำ หรือยังไม่ถึงจุดน้ำค้างในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอที่ไม่มีดีสชาร์จก่อน (Predischarge) หรือในแกปของทรงกลม ($d < D/2$) ผลของความชื้นที่มีต่อแรงดันเบรกดาวน์น้อยมากละเลยได้ แต่ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่เกิดดีสชาร์จก่อน ความชื้นมีผลต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ และมีผลมากที่สุดสำหรับแรงดันกระแสตรง ถ้าแรงดันมีช่วงเวลาน้อย เช่น แรงดันอิมพัลส์ความชื้นมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์น้อย

3.5 ผลของรูปคลื่นแรงดันต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ในอากาศระหว่าง ร็อด กับระนาบ

แรงดันเบรกดาวน์ขึ้นอยู่กับรูปคลื่นของแรงดันดังตัวอย่างในรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกดาวน์ในอากาศในฟังก์ชันของระยะแกปในสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอแบบไม่สมมาตร คือ ระหว่างร็อด กับแผ่นระนาบ (Rod-Plate) จะเห็นได้ว่า

แรงดันแบบอิมพัลส์สวิตช์ชิ่งขั้วบวกมีค่าเบรกดาวน์ต่ำสุด แรงดันกระแสตรงขั้วลบมีค่าเบรกดาวน์สูงสุด แต่สูงกว่าแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ (แบบฟ้าผ่า และสวิตช์ชิ่ง) ขั้วลบเล็กน้อย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าความคงทนของอากาศต่อแรงดันขั้วลบทุกรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน แรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก และกระแสตรงขั้วบวก จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนเชิงเส้นโดยตรงกับระยะแกป แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่าขั้วบวกสูงกว่าแรงดันกระแสตรงขั้วบวกเล็กน้อย แต่แรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า

และแรงดันกระแสตรงขั้วบวก มีค่าแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าขั้วลบ และสูงกว่าแบบอิมพัลส์สวิตชิ่งขั้วบวก ส่วนแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน (50-60 Hz) จะมีค่าเบรกดาวน์เท่า ๆ กับแรงดันเบรกดาวน์กระแสตรงขั้วบวกในแกปที่ระยะห่างไม่เกิน 150 cm ที่ระยะแกปห่างกว่านี้แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับจะต่ำกว่าแรงดันกระแสตรงขั้วบวกมากขึ้นเมื่อระยะแกปเพิ่มขึ้น แต่กลับไปใกล้เคียงกับแรงดันอิมพัลส์แบบสวิตช์ชิ่งขั้วบวก แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขึ้นอยู่กับความชันของรูปคลื่น และยังขึ้นอยู่กับขั้วแรงดันอีกด้วย



รูปที่ 3.5 ค่าแรงดันเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดแท่ง กับระนาบในอากาศ ในเทอมของระยะแกป เมื่อแรงดันที่ป้อนมีรูปคลื่นต่าง ๆ ที่สภาวะมาตรฐาน IEC [7]

3.6 ผลของประจุค้างที่มีต่อแรงดันเบรกดาวน์ต่างขั้ว [7]

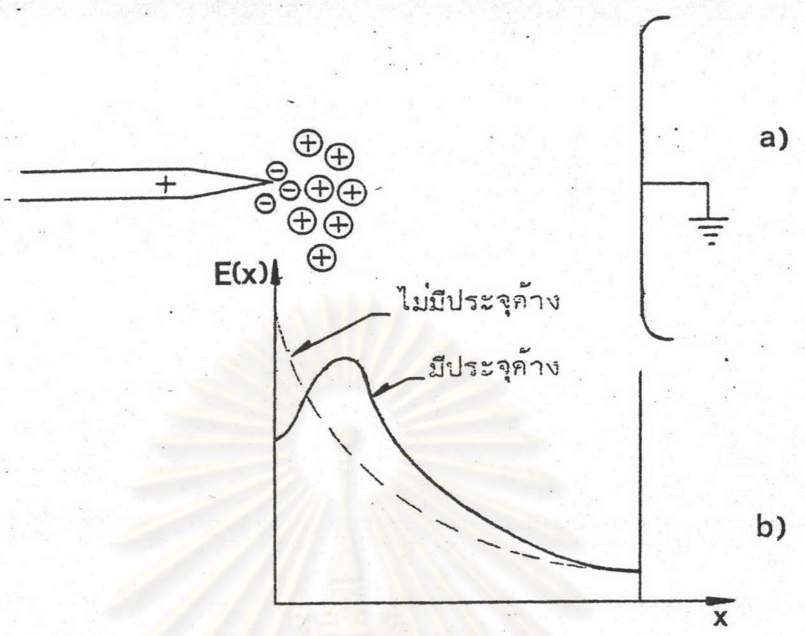
ประจุค้าง (Space Charge) เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ ผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรกดาวน์ของขั้วบวก และขั้วลบต่างกัน ในทางตรงข้ามกับแรงดันเบรกดาวน์โดยตรง [1] กล่าวคือ แรงดันเบรกดาวน์โดยตรง หรือแรงดันเริ่มต้นของขั้วลบจะต่ำกว่าของขั้วบวกเสมอ แต่ผลของประจุค้างทำให้แรงดันเบรกดาวน์ขั้วลบสูงกว่าขั้วบวก ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นกับแรงดันทุกรูปแบบ (ทั้งแรงดันกระแสตรง แรงดันกระแสสลับ และแรงดันอิมพัลส์) และในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอของอิเล็กโตรดแบบไม่สมมาตร ดังตัวอย่างเช่น ปลายแหลมกับแผ่นระนาบ การอ้างถึงแรงดันขั้วบวก หรือขั้วลบ หมายถึง ขั้วแรงดันบนอิเล็กโตรดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด

1) <u>ปลายแหลมขั้วบวก</u>

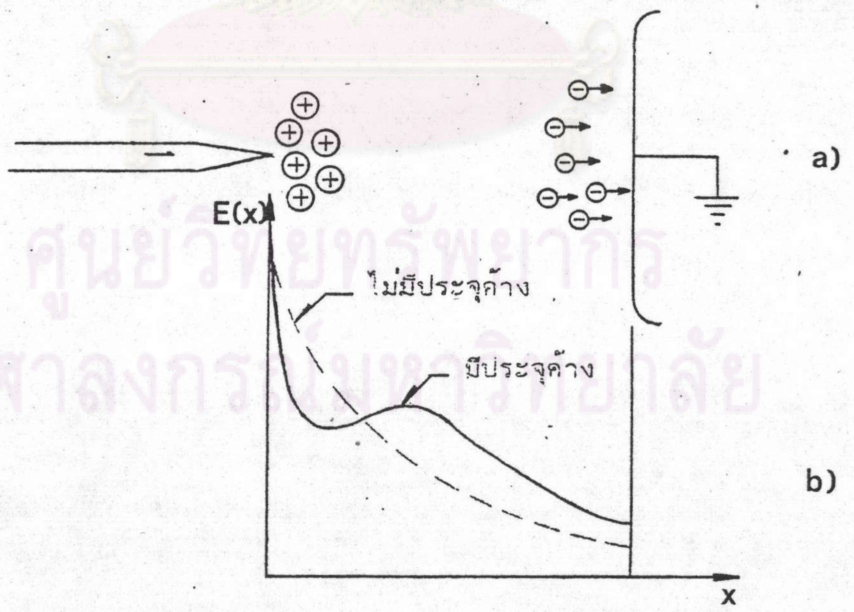
ที่ปลายแหลมเป็นขั้วบวกเทียบกับแผ่นระนาบดังรูปที่ 3.6 เมื่อแรงดันสูงถึงค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ก๊าซในปริมาตรของแกปจะเกิดไอออไนเซชันรอบ ๆ ปลายแหลม อิเล็กตรอนซึ่งเคลื่อนที่ได้เร็วจะวิ่งเข้าหาอะโนดคือ ปลายแหลม และรวมตัวเป็นกลาง ปล่อยให้ไอออนบวกซึ่งเคลื่อนที่ได้ช้าค้างออกันอยู่ที่หน้าปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่ปลายแหลมมีความเครียดน้อยลง แต่ความเครียดสนามไฟฟ้าทิศทางเข้าหาคะโถดคือ แผ่นระนาบจะมีค่าสูงขึ้น ประจุไอออนบวกหน้าปลายแหลมเสมือนหนึ่งว่าทำให้อิเล็กโตรดยาวขึ้น เมื่อระยะแกปสั้นลง และเวลาเดียวกับความเครียดสนามไฟฟ้าในแกปเพิ่มขึ้นเป็นผลให้เกิดเบรคดาวน์ได้ง่ายขึ้น นั่นคือ ประจุค้างทำให้แรงดันเบรคดาวน์ขั้วบวกต่ำลง

2) <u>ปลายแหลมขั้วลบ</u>

ปลายแหลมเป็นขั้วลบตามรูปที่ 3.7 อิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนไนเซชันเคลื่อนที่ไปหาระนาบอะโนดซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าต่ำ อิเล็กตรอนอาจเกาะตัวบนโมเลกุลได้ และรวมตัวเป็นกลางที่อะโนด ส่วนประจุไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเข้าหาคะโถดปลายแหลมจะค้างอยู่บริเวณหน้าปลายแหลม ทำให้สนามไฟฟ้าที่หน้าปลายแหลมมีความเครียดสูงขึ้น แต่สนามไฟฟ้าระหว่างหมอกประจุค้างกับอะโนด (ระนาบ) จะกลับสม่ำเสมอดีขึ้นเนื่องจากประจุค้าง จึงทำให้เกิดเบรคดาวน์ได้ยากขึ้น ฉะนั้นผลของประจุค้างจะทำให้แรงดันเบรคดาวน์ขั้วลบมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.6 ผลของประจุค้างของปลายแหลมขั้วบวก



รูปที่ 3.7 ผลของประจุค้างของปลายแหลมขั้วลบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย