แบบจำลองเชิงตัวเลขของการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ในแกปอากาศที่ความดันบรรยากาศ

นายณัฐพงศ์ ตัณฑนุช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A NUMERICAL MODEL OF STREAMER BREAKDOWN IN AIR GAPS AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Mr. Nutthaphong Tanthanuch

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

532118

4 9 7 1 8 4 7 9 2 1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	แบบจำลองเชิงตัวเลขของการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ในแกปอากาศที่ความดันบรรยากาศ
โดย	นายณัฐพงศ์ ตัณฑนุช
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. อภิบาล พฤกษานุบาล)

ณัฐพงศ์ ตัณฑนุช : แบบจำลองเชิงตัวเลขของการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ในแกปอากาศที่ความดันบรรยากาศ. (A NUMERICAL MODEL OF STREAMER BREAKDOWN IN AIR GAPS AT ATMOSPHERIC PRESSURE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์, 102 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองเชิงตัวเลขของการเกิดสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ในแกปอากาศที่ความดันบรรยากาศ โดยระบบสมการที่ใช้ในการอธิบายการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ประกอบด้วยสมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุและสมการปัวร์ซองที่คิดรวมผลการเกิดโฟโตไอออไนเซชัน แกปอากาศที่ใช้ในการคำนวณเป็นแกปทรงกลมที่อ้างอิงขนาดของมิติและการจัดวางมาจากมาตรฐาน IEC 60052 ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์

ผลการวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายการเกิดดีสชาร์จในแกปอากาศที่มีการกระจายของสนามไฟฟ้าแบบค่อนข้างสม่ำเสมอได้ โดยการเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จก่อนเกิดการเบรกดาวน์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนตามลักษณะการเกิดและการพัฒนาของสตรีมเมอร์แต่ละชนิด จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าการเบรกดาวน์ในแกปทรงกลมที่ความดันบรรยากาศจะเกิดขึ้นเมื่อสตรีมเมอร์บวกเคลื่อนที่ถึงแคโทด ซึ่งในขณะนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสดีสชาร์จมีค่าประมาณ 1.4 A/ns

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2553

##4971847921 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS : NUMMERICAL MODEL / STREAMER / PHOTOIONIZATION/
DISCHARGE CURRENT

NUTTHAPHONG TANTHANUCH : A NUMERICAL MODEL OF STREAMER BREAKDOWN IN AIR GAPS AT ATMOSPHERIC PRESSURE. THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR KOMSON PETCHARAKS Dr.Sc.Techn, 102 pp.

This thesis presents a numerical model of streamer breakdown of air gap at atmospheric pressure. The streamer propagation is described by a system of equations, including charge continuity equation and Poisson's equation. In addition, the photoionization effect is integrated into the model. The dimensions and arrangements of air gap are referred from IEC 60052: Voltage measurement by means of standard air gaps. The numerical results was compared with the measurement of breakdown current.

From the results, the system of equations used in this research can be used to explain the discharge process in a nearly uniform field gap. The increase of discharge current before the gap breakdown could be divided into three stages according to the development of each type of streamer. This research came to the conclusion that the air gap will breakdown when positive streamer reaches the cathode, at this moment the rate of increase of discharge current is about 1.4 A/ns.

Department Electrical Engineering Student's Signature N. Tanthanuch

Field of study Electrical Engineering Advisor's Signature K. Petcharaks

Academic year 2010

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้โอกาสทางการศึกษาและมอบทุนอุดหนุนการศึกษาฯ 72 พรรษา ให้แก่ผู้วิจัยตลอดช่วงระยะเวลาที่ได้ศึกษาในระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรักษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและผู้ควบคุมการค้นคว้าวิจัยที่ได้กรุณาให้คำแนะนำอันมีค่า ตลอดจนได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช อาจารย์ ดร. พีรวุฒิ ยุทธโกวิท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคุณนิวัฒน์ ภู่เจริญ เจ้าหน้าที่สำนักบริการคอมพิวเตอร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับตำรา และความอนุเคราะห์ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณถาวร เอื้อดี และคุณเกรียงไกร โอฐธนู เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับวิธีการใช้เครื่องมือและขั้นตอนในการทดลองต่าง ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล อาจารย์ ดร.วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา และอาจารย์ ดร. อภิบาล พฤกษานุบาล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำตลอดจนช่วยตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ในการศึกษาครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณทุกท่านที่มิได้กล่าวนามไว้ในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือในการศึกษาค้นคว้าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนแล้วเสร็จสมบูรณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูป ..... ญ

บทที่

1. บทนำ 1
    1.1 บทนำทั่วไป 1
    1.2 ที่มาของปัญหา 1
    1.3 บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3
    1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ 7
    1.5 เนื้อหาวิทยานิพนธ์ 7
2. ทฤษฎีและระบบสมการที่เกี่ยวข้อง 8
    2.1 กลไกการเบรกดาวน์ 8
        2.1.1 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ของทาวน์เซนด์ 9
        2.1.2 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ 11
    2.2 ระบบสมการที่เกี่ยวข้อง 12
3. แบบจำลองเชิงตัวเลข 16
    3.1 สมการควบคุมที่ใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลข 16
    3.2 แบบจำลองของแกปอากาศ 20
    3.3 เงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณ 21
    3.4 ผลการคำนวณ 22

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ หน้า

4. การวิเคราะห์ผลการคำนวณ 26

4.1 การเกิดและการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ 26

4.2 กระแสดีสชาร์จระหว่างแกปทรงกลม 28

4.3 ตำแหน่งของประจุเริ่มต้น 32

5. การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองกับผลการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ 35

5.1 การทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ 35

5.1.1 วงจรที่ใช้ในการทดลอง 35

5.1.2 ขั้นตอนการทดลอง 38

5.2 ผลการทดลอง 39

5.3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง 40

5.4 หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาการเกิดเบรกดาวน์ 40

6. สรุปและข้อเสนอแนะการวิจัย 44

6.1 สรุปผลการวิจัย 44

6.2 ข้อเสนอแนะ 45

รายการอ้างอิง 46

ภาคผนวก 49

ภาคผนวก ก 50

ภาคผนวก ข 52

ภาคผนวก ค 58

ภาคผนวก ง 63

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 102

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 งานวิจัยที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายกระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในขณะเกิดการนำไฟฟ้าในแก๊ส 4

3.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม (D) ระยะแกป(d) และแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าของแกปทรงกลมที่ใช้ในการคำนวณ 20

3.2 รายละเอียดของแบบจำลองเชิงตัวเลขในแต่ละกรณี 22

5.1 ระยะแกปที่ใช้ในการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ 36

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส (i) – แรงดันไฟฟ้า (U) 8
2.2 การเคลื่อนที่ของฟลักซ์ของอนุภาคในปริมาตรทรงลูกบาศก์ 13
3.1 การปล่อยโฟตอนจากอนุภาคในสภาวะตื่นกระตุ้น 18
3.2 การคำนวณการเกิดโฟโตไอออไนเซชันในทรงกระบอกย่อย ๆ
โดยกำหนดให้รัศมีของสตรีมเมอร์มีขนาดคงที่ 19
3.3 แบบจำลองแกปทรงกลมในระนาบ $r - z$ เมื่อทรงกลมด้านบนเป็นอิเล็กโตรด
ขั้วบวกและทรงกลมด้านล่างเป็นอิเล็กโตรดที่ต่อลงดิน 21
3.4 เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ได้การคำนวณในกรณีที่ 2 23
3.5 เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนบวกที่ได้การคำนวณในกรณีที่ 2 23
3.6 เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนลบที่ได้การคำนวณในกรณีที่ 2 24
3.7 เส้นชั้นความสูงขนาดสนามไฟฟ้าที่ได้การคำนวณในกรณีที่ 2 24
3.8 กระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแกปทรงกลมที่ได้การคำนวณในกรณีที่ 2 25
4.1 ตำแหน่งและความเร็วของอิเล็กตรอนอะวาลานช์และสตรีมเมอร์
ที่ได้จากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 1 27
4.2 ตำแหน่งและความเร็วของอิเล็กตรอนอะวาลานช์และสตรีมเมอร์
ที่ได้จากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 2 28
4.3 ตำแหน่งและความเร็วของอิเล็กตรอนอะวาลานช์และสตรีมเมอร์
ที่ได้จากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 3 28
4.4 การเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จที่ได้การคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 1 29
4.5 การเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จที่ได้การคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 2 29
4.6 การเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จที่ได้การคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 3 30
4.7 กระแสดีสชาร์จระหว่างแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ระยะแกป 1 cm
และแรงดันป้อนเข้าขนาด 1 pu ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงผลของการรวมตัวกันของอนุภาคที่
มีประจุ 31
4.8 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากระแสดีสชาร์จระหว่างแกปทรงกลม
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ระยะแกป 1 cm และแรงดันป้อนเข้าขนาด 1 pu 32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.9 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์และสตรีมเมอร์เมื่อประจุเริ่มต้น ไม่ได้วางอยู่ในแนวแกนของแกปทรงกลม 33

4.10 การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าในแกปทรงกลม 33

5.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 36

5.2 ไดอะแกรมการต่อวงจรที่ใช้ในการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ 37

5.3 ชุดทดลองที่ใช้ในการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ ในกรณีแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 25 cm 38

5.4 ชุดทดลองที่ใช้ในการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ ในกรณีแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 5 cm 38

5.5 ตัวอย่างผลการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวน์ระหว่าง แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ระยะแกป 1.0 cm 39

5.6 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากระแสดีสชาร์จที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข กับผลการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดลอง 41

5.7 การหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวน์ ในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิด การยุบตัว 42

5.8 ค่าเฉลี่ยอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวน์ ในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิด การยุบตัว 43