สำนักงานวิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลอง กับผลการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ ผลการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกับผลการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการพิจารณาหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการกำหนดว่าเมื่อใดจะเกิดการเบรกดาวน์ในแกปทรงกลม

5.1 การทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์

ผลการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในบทที่ 3 แสดงถึงการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ไอออนบวก ไอออนลบ และขนาดของสนามไฟฟ้าที่เวลาต่าง ๆ ในขณะเกิดสตรีมเมอร์ ค่าเหล่านี้เป็นค่าที่ไม่สามารถตรวจวัดได้ในทางปฏิบัติ แต่อย่างไรก็ตามผลการคำนวณก็แสดงถึงขนาดของกระแสดีสชาร์จ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถทำการตรวจวัดได้จากการทดลองการเกิดเบรกดาวน์ของแกปทรงกลม โดยเนื้อหาในหัวข้อนี้จะประกอบไปด้วยรายละเอียดของวงจรและขั้นตอนต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์

5.1.1 วงจรที่ใช้ในการทดลอง

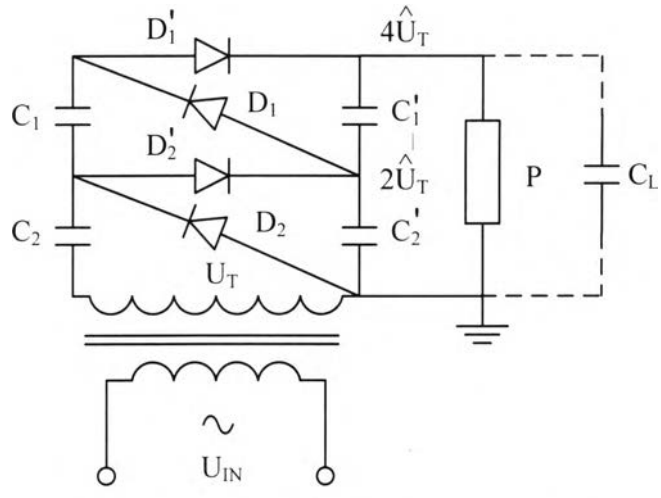
วงจรที่ใช้ในการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า ชุดทดลอง และอุปกรณ์การวัด โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ในแต่ละส่วนมีดังนี้

5.1.1.1 แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

ในการทดลองนี้ใช้แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการใช้วงจรแรงดันสองเท่า (voltage doubler circuit) จำนวน 2 ขั้นร่วมกับวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (half-wave rectifier circuit) ดังแสดงในรูปที่ 5.1

นอกจากนี้ทางด้านแรงดันขาออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงยังมีการต่อตัวเก็บประจุโหลดขนาด 2 ถึง 4 nF ขนานเพิ่มเข้าไป เพื่อช่วยให้แรงดันไฟฟ้ามีค่าคงที่ในขณะเกิดการเบรกดาวน์ ซึ่งแสดงไว้เป็นเส้นประในรูปที่ 5.1

I26269016



รูปที่ 5.1 วงจรแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง

เมื่อ U_{IN} คือแรงดันป้อนเข้า

U_T คือแรงดันขาออกของหม้อแปลง

$\hat{U}_T$ คือค่ายอดของแรงดันขาออกของหม้อแปลง

D_1, D_2 คือไดโอดของวงจรแรงดันสองเท่า

D_1', D_2' คือไดโอดของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

C_1, C_2 คือตัวเก็บประจุของวงจรแรงดันสองเท่า

C_1', C_2' คือตัวเก็บประจุวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น

C_L คือตัวเก็บประจุโหลด

P คือชุดทดลอง

5.1.1.2 ชุดทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์

การทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์จะใช้แกปทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน 2 ขนาด คือ แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm และแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm โดยรายละเอียดของระยะแกปที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ระยะแกปที่ใช้ในการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์

เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลม (cm)	ระยะแกป (cm)
5	0.5
25	0.6
	1.0
	1.5

โดยการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

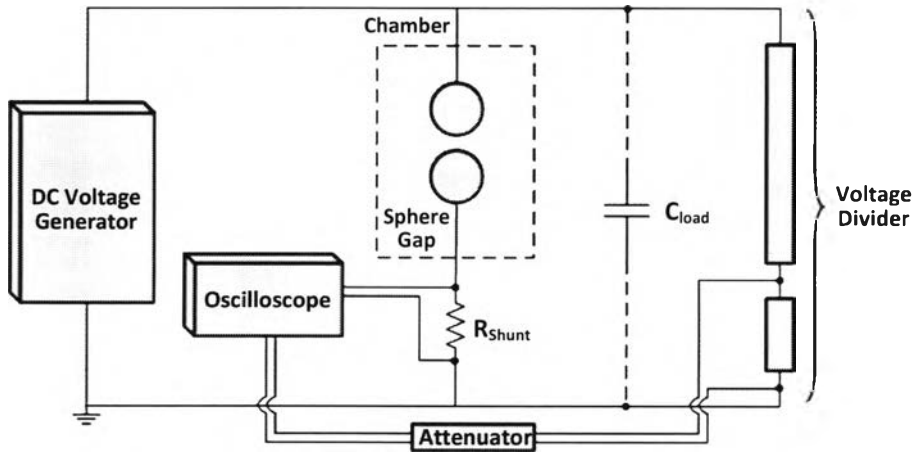
- การทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ที่ความดันบรรยากาศ ซึ่งการทดลองนี้จะทำในแกปทรงกลมทั้ง 2 ขนาด
- การทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ในสภาวะที่มีการควบคุมปริมาณความชื้นของอากาศ โดยแกปทรงกลมจะถูกบรรจุอยู่ในถังที่มีการปิดผนึกแยกจากสภาพแวดล้อมภายนอก โดยปริมาณความชื้นสัมบูรณ์ของอากาศที่ใช้ในการทดลองมีค่าอยู่ในช่วง 2 ถึง 20 g/m^3 แต่เนื่องจากข้อจำกัดด้านขนาดของถังจึงทำให้การทดลองนี้สามารถทำได้เพียงในกรณีแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm เท่านั้น

5.1.1.3 อุปกรณ์วัดและบันทึกผล

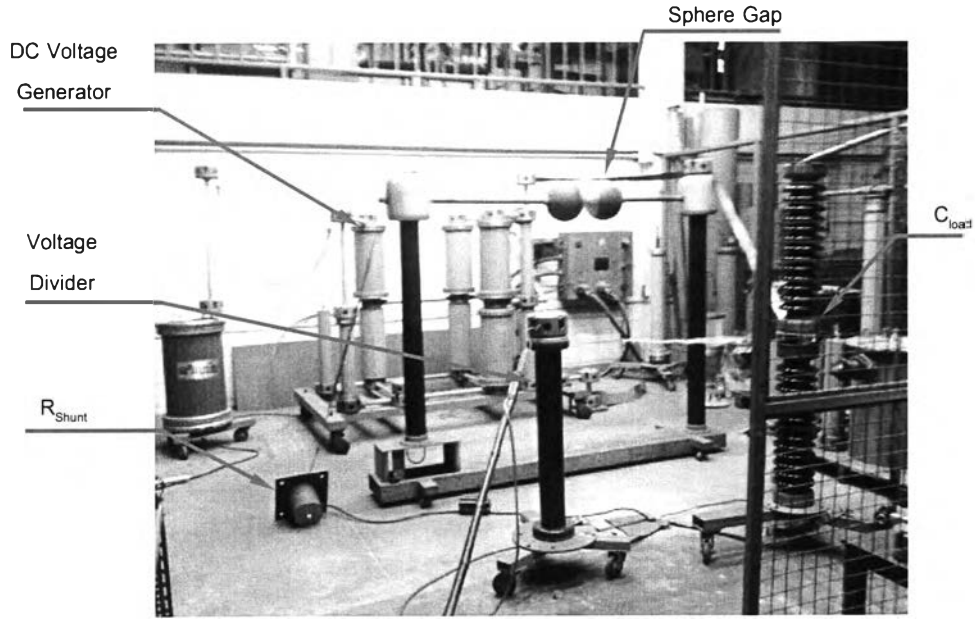
ค่าที่ทำการตรวจวัดในการทดลอง ได้แก่ ค่ากระแสเบรกดาวน์ และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแกปทรงกลม การวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ระหว่างแกปทรงกลมสามารถทำได้โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานชันท์ (shunt resistance) ที่ต่ออนุกรมกับทรงกลมด้านที่ต่อลงดิน ส่วนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแกปทรงกลมจะถูกวัดด้วยโวลเตจดิไวเดอร์ (voltage divider)

กระแสเบรกดาวน์และแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองจะถูกบันทึกและแสดงผลบนออสซิลโลสโคป เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข

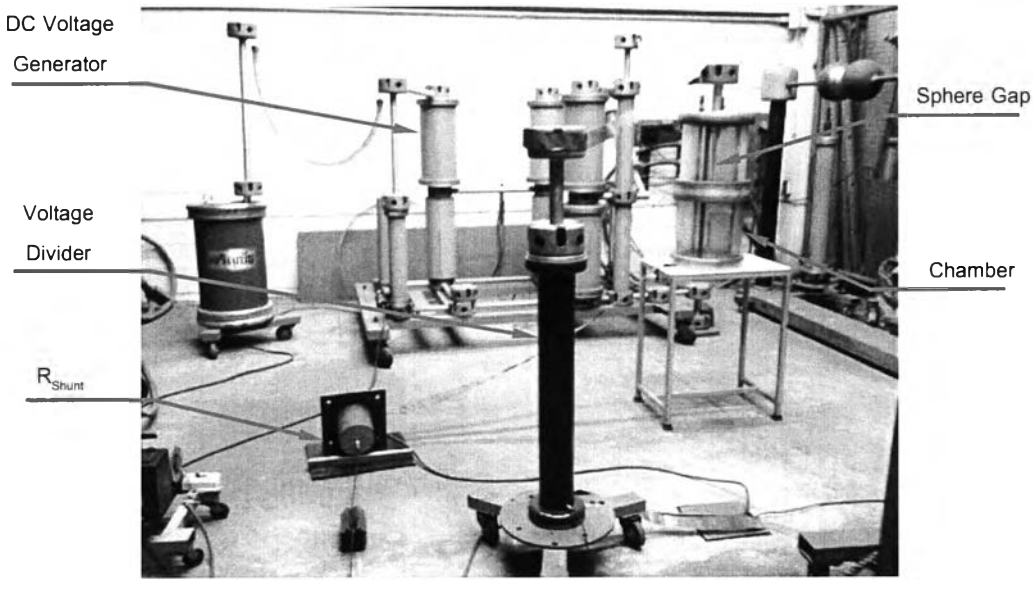
ไดอะแกรมการต่อวงจรและชุดทดลองที่ใช้ในการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ในแกปทรงกลมทั้ง 2 ขนาดได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.2 ไดอะแกรมการต่อวงจรที่ใช้ในการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์



รูปที่ 5.3 ชุดทดลองที่ใช้ในการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์
ในกรณีแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm



รูปที่ 5.4 ชุดทดลองที่ใช้ในการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์
ในกรณีแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm

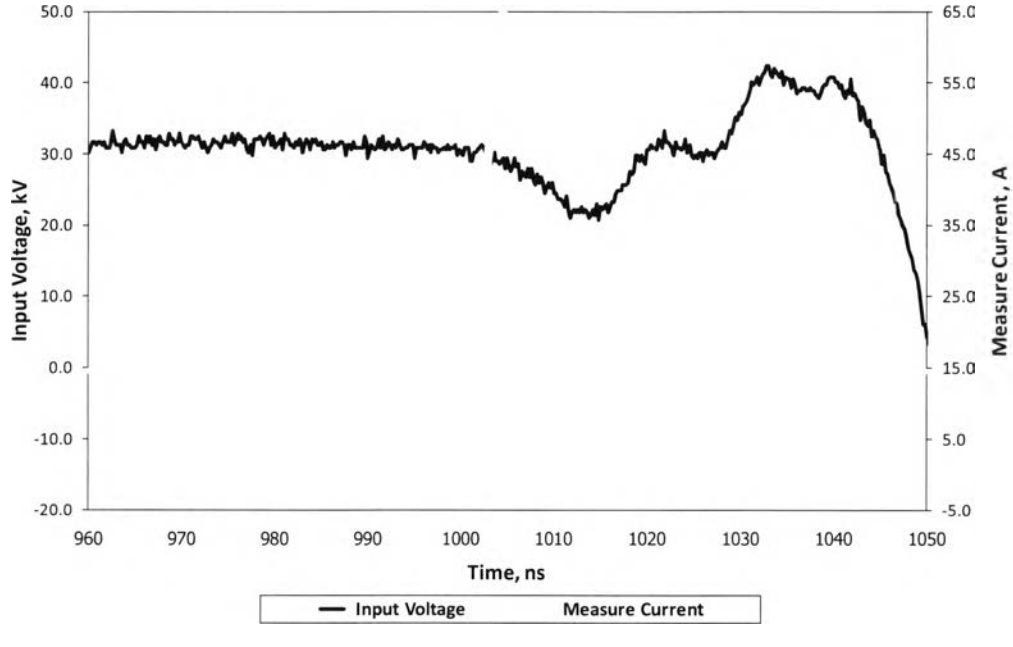
5.1.2 ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ในแกปทรงกลมทั้งในสภาวะความดันบรรยากาศ และสภาวะที่มีการควบคุมปริมาณความชื้นของอากาศ จะมีขั้นตอนการทดลองที่เหมือนกัน คือ

- บันทึกค่าสภาวะของอากาศ ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ และความชื้น เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณตัวปรับแก้ค่าแรงดันเบรกดาวน์ และค่าแรงดันไฟฟ้าที่ต้องป้อนให้กับแกปทรงกลม
- ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับแกปทรงกลม โดยการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอย่างรวดเร็วจนแรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ 75 % ของแรงดันที่คาดว่าจะเกิดการเบรกดาวน์
- จากนั้นให้ทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเกิดการเบรกดาวน์ระหว่างแกปทรงกลม
- ทำการบันทึกค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวน์

5.2 ผลการทดลอง

ผลการทดลองการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์จะแสดงในรูปของกราฟกระแสและแรงดันไฟฟ้าในช่วงที่เกิดการเบรกดาวน์ระหว่างแกปทรงกลม โดยตัวอย่างผลการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าได้แสดงในรูปที่ 5.5 ส่วนผลการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแกปทรงกลมทั้ง 2 ขนาดที่สภาวะความดันบรรยากาศและปริมาณความชื้นของอากาศค่าต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างผลการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวน์ระหว่างแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ระยะแกป 1.0 cm

จากรูปที่ 5.5 จะเห็นว่าเมื่อแกปทรงกลมเกิดการเบรกดาวน์ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแกปทรงกลมจะเกิดการยุบตัว โดยจะตรงกับช่วงเวลาที่กระแสเบรกดาวน์ที่ทำการวัดมีขนาดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การเปลี่ยนดังกล่าวถือเป็นเงื่อนไขสำคัญที่ทางผู้วิจัยจะนำไปใช้ในการพิจารณาหลักเกณฑ์การเกิดเบรกดาวน์ในแกปทรงกลมซึ่งจะกล่าวถึงในภายหลัง

5.3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง

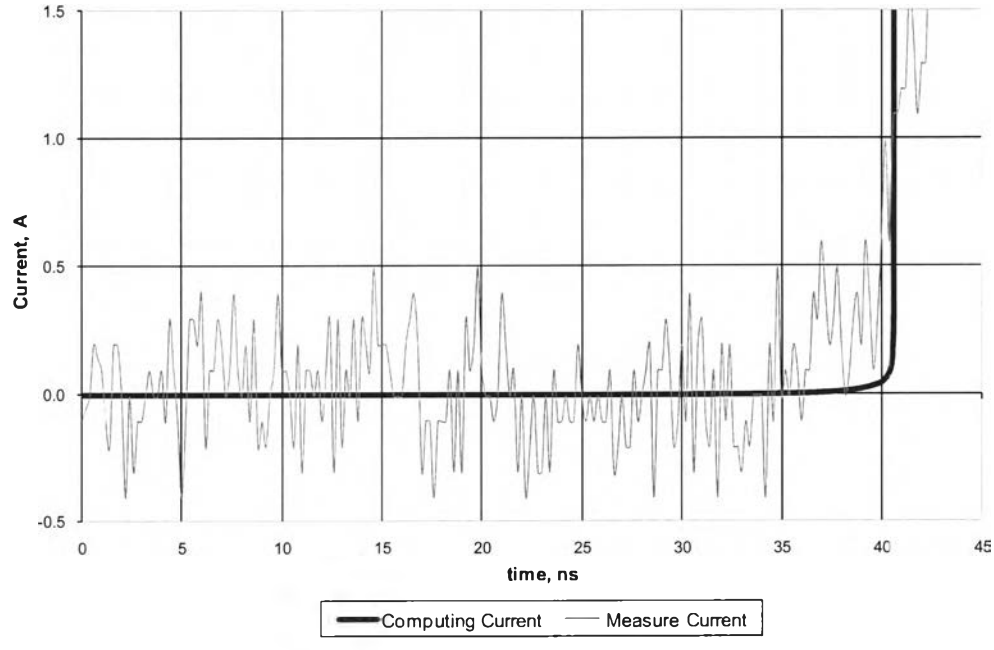
ในหัวข้อนี้จะแสดงถึงการเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากระแสดีสชาร์จที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขกับผลการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดลองในแกปทรงกลม 2 ขนาด คือ แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ที่ระยะแกป 0.5 cm และแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ที่ระยะแกป 1 cm โดยทำการพล็อตค่ากระแสทั้งสองลงในกราฟเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 5.6

จากรูปที่ 5.6 จะเห็นว่ากระแสดีสชาร์จที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขมีความใกล้เคียงกับผลการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นว่าระบบสมการที่ใช้ในแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถใช้อธิบายการเกิดดีสชาร์จระหว่างแกปอากาศที่มีการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าแบบค่อนข้างสม่ำเสมอได้ นอกจากนี้ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขยังแสดงให้เห็นถึงลักษณะการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ การเปลี่ยนแปลงจำนวนอนุภาคที่มีประจุ การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างแกป และลักษณะการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าในขณะเกิดการดีสชาร์จดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาหาหลักเกณฑ์การเกิดเบรกดาวน์ในแกปดังที่จะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

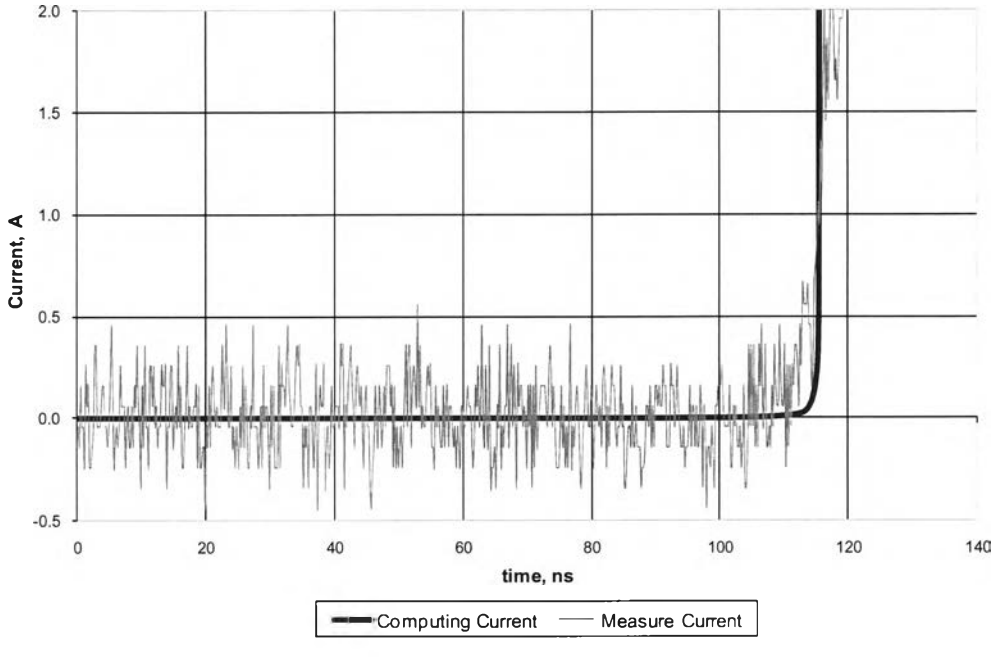
5.4 หลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาการเกิดเบรกดาวน์

ผลการเปรียบเทียบกระแสดีสชาร์จที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลองในข้างต้นแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเชิงตัวเลขสามารถใช้อธิบายการเกิดดีสชาร์จในแกปอากาศได้ แต่ยังคงมีข้อสงสัยว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณควรมีค่าเท่าไหร่ถึงจะเพียงพอหรือที่ระยะเวลาเท่าใดจึงจะเกิดการเบรกดาวน์ในแกปซึ่งเป็นปรากฏการณ์สำคัญที่วิศวกรใช้ในการออกแบบฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง

จากการพิจารณาข้อมูลของกระแสและแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดลอง พบว่าในขณะเกิดการเบรกดาวน์ขึ้นในแกป แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแกปจะเกิดการยุบตัวและขนาดของกระแสเบรกดาวน์จะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นค่ากระแสเบรกดาวน์ที่ช่วงเวลาดังกล่าวจะต้องมีความสัมพันธ์กับการเกิดเบรกดาวน์ในแกป อย่างไรก็ตามขนาดของกระแสที่ได้จากการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ในแต่ละกรณีไม่สามารถนำมาเปรียบ



ก) แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแกป 0.5 cm

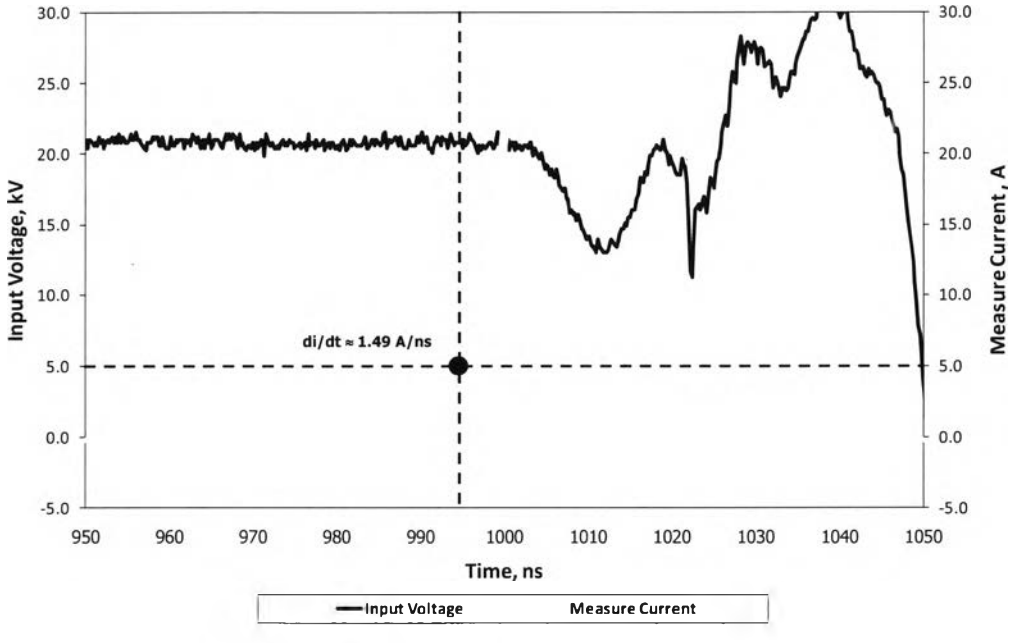


ข) แกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ระยะแกป 1 cm

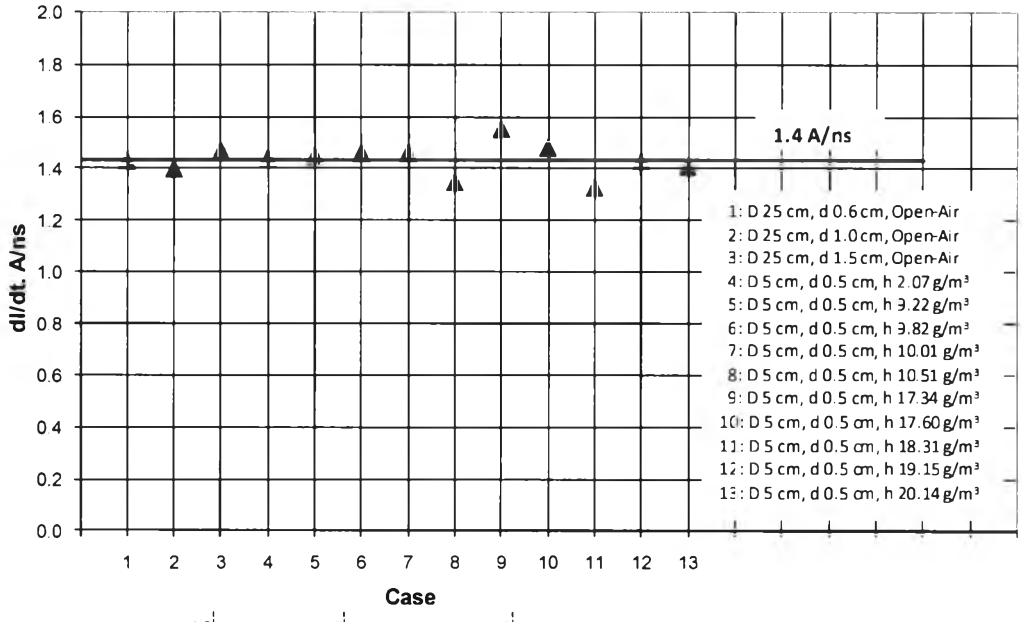
รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากระแสดีสชาร์จที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข กับผลการวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดลอง

เทียบกันได้เนื่องจากขนาดของทรงกลมและระยะแกปที่ใช้มีขนาดไม่เท่ากัน อีกทั้งในกรณีของทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm การทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน์ยังทำในสภาวะที่ความชื้นสัมบูรณ์มีค่าแตกต่างกัน ทางผู้วิจัยจึงทำการปรับเปลี่ยนเป็นการพิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวน์ในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิดการยุบตัวดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 5.7 ผลการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดลองในกรณีต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง ซึ่งค่าเฉลี่ยของอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวน์ในแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.8

จากรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวน์ที่ได้จากการทดลองในแต่ละกรณีมีความใกล้เคียงกันโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.4 A/ns แสดงให้เห็นว่าขนาดของทรงกลม ระยะแกป และปริมาณความชื้นสัมบูรณ์ไม่ได้ส่งผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวน์ในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิดการยุบตัว เมื่อนำค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข พบว่ามีความใกล้เคียงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสดีสชาร์จในขณะที่สตรีมเมอร์บวกเคลื่อนที่ถึงแอโนด



รูปที่ 5.7 การหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวน์
ในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิดการยุบตัว



รูปที่ 5.8 ค่าเฉลี่ยอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวน์
ในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิดการยุบตัว

ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า *การเบรกดาวน์ในแกปทรงกลมที่ความดันบรรยากาศจะเกิดขึ้นเมื่อสตรีมเมอร์บวก (CDS) เคลื่อนที่ถึงแอโนด ซึ่งในขณะนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสดีสชาร์จมีค่าประมาณ 1.4 A/ns*

เพื่อเป็นการทดสอบว่าหลักเกณฑ์ที่ได้เสนอมาในข้างต้นสามารถใช้ประเมินการเกิดเบรกดาวน์ในแกปทรงกลมได้ ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการคำนวณแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ระยะแกป 1cm ใหม่โดยกำหนดให้แรงดันป้อนเข้ามีขนาดเท่ากับ 0.9 pu และ 1.1pu ซึ่งก็คือการคำนวณในกรณีที่ 6 และกรณีที่ 7 นั่นเอง (รูปที่ ง.6 และรูปที่ ง.7 ในภาคผนวก ง) จากผลการคำนวณเมื่อแรงดันป้อนเข้ามีขนาดเท่ากับ 0.9 pu พบว่าไม่มีสตรีมเมอร์บวกเกิดขึ้นและขนาดของกระแสดีสชาร์จจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องหลังจากที่สตรีมเมอร์ลบเคลื่อนที่ถึงแอโนด แต่ในกรณีที่แรงดันป้อนเข้ามีขนาดเท่ากับ 1.1 pu พบว่ามีสตรีมเมอร์บวกเกิดขึ้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสดีสชาร์จในขณะที่สตรีมเมอร์บวกเคลื่อนที่ถึงแคโทดสอดคล้องกับค่าที่เสนอในหลักเกณฑ์การพิจารณา คือประมาณ 1.4 A/ns นอกจากนี้ผลการคำนวณยังแสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่สตรีมเมอร์ใช้ในการเชื่อมต่อแกปทั้งหมดมีค่าลดลงเมื่อขนาดของแรงดันป้อนเข้ามีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.0 pu ไปเป็น 1.1 pu