

สื่อการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

THE MEDIA FOR TEACHING HIGH-VOLTAGE ENGINEERING

จัดทำโดย

นายจ่านงค์ ใจนวล

นายไพโรจน์ ปิยรังสรรค์

ปฏิญานีพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ

พ.ศ. 2536

หัวข้อปริญญาโท

สื่อการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

(THE MEDIA FOR TEACHING HIGH-VOLTAGE ENGINEERING)

โดย

นายจำนงค์ ใจนวล รหัส 3446427518-8

นายไพโรจน์ ปิยรังสรรค์ รหัส 3446427505-5

ภาควิชา

ครุศาสตร์ไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท

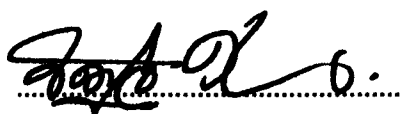
อาจารย์จัดตุฤทธิ์ ทองปรอน

บัณฑิตศึกษา สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ อนุมัติปริญญาโท
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต

.....
(อ.พิชัย เฟ่งพันธ์พัฒน์)

ผู้ประสานงานบัณฑิตวิทยาลัย ครุศาสตร์อุตสาหกรรม
สาขาไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
วิทยาเขตภาคพายัพ

คณะกรรมการสอบปริญญาโท


.....
(อ.จัดตุฤทธิ์ ทองปรอน)

ประธานกรรมการ

.....
(อ.ดำรง ผ่องพันธ์)

กรรมการ

.....
(อ.นคร ทองเล็ก)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตศึกษา

สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ

หัวข้อปริญญานิพนธ์	สื่อการสอนนิสิตวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (THE MEDIA FOR TEACHING HIGH-VOLTAGE ENGINEERING)
ชื่อนักศึกษา	นายจ่านงค์ ใจนวล รหัส 3446427518-8 นายไพโรจน์ ปิยรังสรรค์ รหัส 3446427505-5
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง
ปีการศึกษา	2536
เลขประจำหนังสือ	14/2536

บทคัดย่อ

เนื่องจากการเรียนการสอนในวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (HIGH-VOLTAGE ENGINEERING) ตามหลักสูตรของสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง เนื้อหาวิชามีความสลับซับซ้อนยากแก่การเข้าใจ และยังขาดแคลน สื่อในการเรียนการสอนในวิชานี้ ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงได้จัดทำปริญญานิพนธ์นี้ขึ้น

ปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตสื่อการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ประกอบด้วย แผ่นใส ใบความรู้ และแผงแสดงวงจรชุดประกอบสร้างแรงดันสูง AC, DC, impulse เพื่อให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในเนื้อหาวิชาได้ง่ายและรวดเร็วยิ่งขึ้น

การจัดทำสื่อการสอนนี้ได้รวบรวมเนื้อหาวิชาจากตำราภาษาไทยและเอกสารที่เกี่ยวข้องกับวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง โดยได้ค้นเอาคำอธิบายรายวิชาจากหลักสูตรของสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ มาเป็นหลักอ้างอิงในการจัดทำใบความรู้ แผ่นใสและแผงแสดงวงจรชุดประกอบสร้างแรงดันสูง ซึ่งจากคำอธิบายรายวิชาได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 หน่วยเรียน คือ พื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สนามไฟฟ้า ฉนวนไฟฟ้าและกลไกการเสียหายฉนวน การผลิตไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์และการวัด การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันสูง ฟิวส์และการป้องกัน ส่วนแผงแสดงวงจรชุดประกอบสร้างแรงดันสูง AC, DC และ impulse ได้จำลองมาจากวงจรทดสอบของห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง โรงประลองไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

สื่อการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงที่ได้จัดทำขึ้นทั้งหมดนี้ ตรงตามหลักสูตรของสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ ในระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลังอาจารย์ผู้สอนวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สามารถใช้เป็นสื่อการสอน ทำให้การเรียนการสอนมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำสื่อการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยได้รับความอนุเคราะห์และช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ซึ่งได้ให้คำปรึกษาทั้งทางด้านทฤษฎี และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ดังนี้ อาจารย์ ดร.สุพล คำรงกิตติกุล ที่ปรึกษาด้านตำราและเนื้อหา อาจารย์จัดศุภฤทธิ์ ทองปรอน ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์พิจิตร ประทุมทิพย์ และอาจารย์นิพนธ์ วงศ์ทา ที่ปรึกษาด้านเทคนิค อีกทั้งกรรมการควบคุมการสอบปริญญาโท อาจารย์ดำรง ผ่องพันธ์ และอาจารย์นคร ทองเล็ก คณะบุคคลดังกล่าวและผู้ที่เกี่ยวข้อง ล้วนแล้วแต่มีส่วนทำให้ปริญญาโทนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ซึ่งคณะผู้จัดทำต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

.....
(นายจ่านงค์ ใจนวล)

.....
(นายไพโรจน์ ปิยรังสรรค์)

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
บทที่ 1 บทนำ	
ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
วัตถุประสงค์	1
คำจำกัดความในการเขียนโครงการ	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
ขอบเขตการดำเนินโครงการ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการ	
ลักษณะรายวิชา	4
คำอธิบายรายวิชา	5
การแบ่งหน่วยเรียน	6
จุดประสงค์การสอน	7
เอกสารที่ใช้ประกอบทำโครงการ	12
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ	
วิธีดำเนินการ	13
ระยะเวลาดำเนินการ	15
รายการวัสดุอุปกรณ์	16
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์	
หน่วยที่ 1 พื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง	17
หน่วยที่ 2 สนามไฟฟ้า	26
หน่วยที่ 3 ฉนวนไฟฟ้า	45
หน่วยที่ 4 การผลิตไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์และการวัด	93
หน่วยที่ 5 การทดสอบด้านไฟฟ้าแรงสูง	117
หน่วยที่ 6 พิน้ำและการป้องกัน	140

บทที่ 5 สรุปผลของโครงการ

สรุปผลของโครงการ	172
ข้อเสนอแนะ	173
บรรณานุกรม	174
ภาคผนวก ก ตารางมาตรฐานของระดับฉนวนไฟฟ้า	175
ภาคผนวก ข ตารางสูตรการคำนวณประจุจินตภาพภายในทรงกลม	177
ภาคผนวก ค แผนที่แสดงสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายในประเทศไทย	178
ภาคผนวก ง สัญลักษณ์ที่ใช้ในวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง	179
ประวัติผู้จัดทำ	180

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้า นับว่ามีความสำคัญและจำเป็นต่อชีวิตมนุษย์ โดยเฉพาะความเจริญทางด้านเทคโนโลยีและการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมทำให้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น แต่แหล่งพลังงานมีอยู่บริเวณบางพื้นที่เท่านั้น ดังนั้น การจะนำเอาพลังงานไฟฟ้ามาใช้ก็จะต้องส่งพลังงานไฟฟ้าในระยะทางไกล ๆ จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในสายส่ง เพื่อลดการสูญเสียพลังงานจึงใช้วิธีส่งพลังงานไฟฟ้าในรูปแรงดันสูง แต่ในทางปฏิบัติการเพิ่มระดับแรงดันจะทำให้ฉนวนที่ใช้ราคาเพิ่มขึ้นด้วยเหตุนี้การสร้างระบบส่งกำลังไฟฟ้า จะต้องมีการวางแผนและวิเคราะห์ทางด้านราคาฉนวนการเลือกระดับแรงดันให้เหมาะสมและองค์ประกอบอื่น ๆ อีก

เพื่อให้การศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้และให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในเนื้อหาวิชานี้มากยิ่งขึ้น ดังนั้น นักศึกษา คอบ.ไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ จึงได้จัดทำสื่อการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงขึ้น ซึ่งประกอบด้วย แผ่นใส ใบความรู้ และแผนวงจรชุดประกอบสร้างแรงดันสูง เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอน วิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ให้ได้ผลสำเร็จมากที่สุด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อใช้เป็นสื่อประกอบการสอน ในวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
2. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับพื้นฐานทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สนามไฟฟ้า ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในแรงสูง การผลิตไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การวัดแรงดันสูงตลอดจนการศึกษาเกี่ยวกับฟ้าผ่าและการป้องกันฟ้าผ่า

คำจำกัดความที่ใช้ในการเขียนโครงการ

" สื่อการสอน วิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง "

วิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เป็นวิชาที่เกี่ยวข้องกับ ระบบการผลิตและการส่งพลังงานไฟฟ้า ซึ่งการใช้ไฟฟ้าแรงสูงในการส่งพลังงาน จะช่วยลดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า เพิ่มประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบ ผลทำให้มีความเหมาะสมตามหลักการทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ใ้้ความรู้ ใช้ประกอบการเรียนการสอนในวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เนื้อหาได้เรียบเรียงมาจากตำราภาษาไทยที่เกี่ยวกับวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงตรงตามหลักสูตรทำให้ค้นคว้าได้สะดวกขึ้น
2. แผ่นใส ใช้ประกอบการเรียนการสอนในวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ก่อให้เกิดความเข้าใจได้ดีขึ้น เนื่องจากได้สรุปเนื้อหาที่สำคัญจากใบความรู้และเอกสารอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกัน
3. แผงวงจร ชุดประกอบสร้างแรงดันสูง ทำให้ผู้เรียนได้เรียนรู้ถึงขั้นตอนการผลิต การส่ง การวัด และการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันสูง ได้ดียิ่งขึ้น

ขอบเขตการดำเนินโครงการ

รวบรวมเนื้อหาและจัดทำสื่อการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สำหรับใช้สอนนักศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง โดยนำเสนอในรูปแบบของใบความรู้ แผ่นใส และแผงวงจรประกอบการสอน ชุดประกอบสร้างแรงดันสูง ซึ่งครอบคลุมเนื้อหาดังต่อไปนี้

1. พื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
 11. ความเครียดของฉนวนไฟฟ้า
 12. แรงดันเกิน
 13. การเกิดเบรคดาวน
 14. ระดับของฉนวน
 15. การจัดสัมพันธฉนวน

2. สนามไฟฟ้า

21. สนามไฟฟ้าในวงจรไดโพลเล็กตริก
22. การวิเคราะห์คำนวณสนามไฟฟ้า
23. สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดระนาบ
24. สนามไฟฟ้าในทรงกระบอกและในทรงกลมซ้อน
25. สนามไฟฟ้าในช่องว่างระหว่างทรงกลม

3. จนวนไฟฟ้าและกลไกการเสียหายฉนวน

31. จนวนไฟฟ้าของแข็ง
32. จนวนไฟฟ้าของก๊าซ
33. จนวนไฟฟ้าของเหลว
34. กลไกการเสียหายฉนวนในจนวนไฟฟ้า

4. การผลิตไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์และการวัด

41. การผลิตไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ
42. การผลิตไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
43. การผลิตไฟฟ้าแรงสูงอิมพัลส์
44. เทคนิคการวัดในระบบแรงดันสูง

5. การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันสูง

51. มาตรฐานการทดสอบ
52. วงจรทดสอบแรงดันสูง
53. การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง

6. ไฟฟ้าผ่าและการป้องกัน

61. ปรากฏการณ์และกลไกการเกิดฟ้าผ่า
62. กระแสฟ้าผ่า
63. อันตรายของฟ้าผ่าต่อสิ่งมีชีวิต
64. รากสายดิน
65. การป้องกันฟ้าผ่า

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการ

ลักษณะรายวิชา

รหัสและชื่อวิชา	422-401 วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (HIGH-VOLTAGE ENGINEERING)
สภาพรายวิชา	วิชาชีพเฉพาะสาขาในหลักสูตรปริญญาตรีครุศาสตร์ อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาเอก วิศวกรรมไฟฟ้า
ระดับพื้นฐาน	ชั้นปีที่ 2 ภาคเรียนที่ 2
พื้นฐาน	-
เวลาเรียน	ทฤษฎี 3 คาบ/สัปดาห์ รวมทั้งสิ้น 54 คาบ/ภาคเรียน

จุดมุ่งหมายรายวิชา

1. เข้าใจพื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
2. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและการคำนวณค่าสนามไฟฟ้า
3. รู้จักฉนวนไฟฟ้าและกลไกการเสียดสภาพฉนวน
4. เข้าใจการผลิตไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์และการวัด
5. รู้วิธีการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันสูง
6. เข้าใจการเกิดฟ้าผ่าและการป้องกันฟ้าผ่า

วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (HIGH VOLTAGE ENGINEERING)

คำอธิบายรายวิชา

การผลิตไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์ และการวัดกระแสสูงสนามไฟฟ้าในวัสดุ
เนื้อสารชนิดเดียวกัน และต่างชนิดกัน การดิสชาร์จในก๊าซ อาร์คไฟฟ้าการเกิดเบรคดาวน์ในฉนวน
ที่เป็นของแข็ง ของเหลว การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันสูงฟ้าผ่าและการป้องกัน

การแบ่งหน่วยเรียน

หน่วยที่	ชื่อหน่วยเรียน	คาบเรียน	
		ทฤษฎี	ปฏิบัติ
1	พื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง	3	-
2	สนามไฟฟ้า	9	-
3	ฉนวนไฟฟ้าและกลไกการเสียดสภาพฉนวน	9	-
4	การผลิตไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์และการวัด	9	-
5	การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันสูง	6	-
6	ฟ้าผ่าและการป้องกัน	6	-
	รวม	48	-
	ทดสอบและทบทวน	6	-
	รวมทั้งสิ้น	54	-

จุดประสงค์การสอน

หน่วยที่	จุดประสงค์การสอน	เวลา (นาที)	
		ทฤษฎี	ปฏิบัติ
1	พื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง		
	11.เข้าใจความเครียดของฉนวนไฟฟ้า	30	-
	111.บอกชนิดความเครียดของฉนวนไฟฟ้า		
	112.อธิบายผลของความเครียดต่อฉนวนไฟฟ้า		
	12.เข้าใจแรงดันเกิน	30	-
	121.บอกชนิดของแรงดันเกิน		
	122.บอกสาเหตุของการเกินแรงดันเกิน		
	123.อธิบายผลของแรงดันเกินต่อระบบ		
	13.เข้าใจการเสียดสภาพฉนวน	30	-
	131.บอกความหมายของการเสียดสภาพฉนวน		
	132.บอกชนิดของการเสียดสภาพฉนวน		
	14.เข้าใจการทดสอบและระดับฉนวนไฟฟ้า	30	-
	141.บอกชนิดของการทดสอบฉนวนไฟฟ้า		
	142.อธิบายการจัดระดับของฉนวน		
	15.เข้าใจการจัดสัมพันธฉนวน	30	-
151.บอกความสำคัญของการจัดสัมพันธฉนวน			
2	สนามไฟฟ้า		
	21.เข้าใจสนามไฟฟ้าในวงจรไดอิเล็กทริก	50	-
	211.บอกลักษณะสนามไฟฟ้าในวงจรไดอิเล็กทริก		
	212.อธิบายความแตกต่างระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก		
	213.เขียนสมการของสนามไฟฟ้า		
	22.เข้าใจการวิเคราะห์คำนวณสนามไฟฟ้า	100	-
221.อธิบายการหาสนามไฟฟ้าโดยวิธีลากเส้นสนามไฟฟ้า			

หน่วยที่	จุดประสงค์การสอน	เวลา (นาที)	
		ทฤษฎี	ปฏิบัติ
3	222.อธิบายการหาสนามไฟฟ้าโดยใช้โมเดลจำลอง	100	-
	223.อธิบายการหาสนามไฟฟ้าโดยวิธีคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์		
	224.เขียนสมการของสนามไฟฟ้าตามกฎของเกาส์		
	23.เข้าใจสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดระนาบ		
	231.อธิบายสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดระนาบ		
	232.เขียนสมการของสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดระนาบ		
	24.เข้าใจสนามไฟฟ้าในทรงกระบอกข้อันและในทรงกลมข้อัน	100	-
	241.อธิบายสนามไฟฟ้าในทรงกระบอกและในทรงกลมข้อัน		
	242.เขียนสมการของสนามไฟฟ้าในทรงกระบอกและทรงกลมข้อัน		
	25.เข้าใจสนามไฟฟ้าในช่องว่างระหว่างทรงกลม	100	-
	251.อธิบายสนามไฟฟ้าในช่องว่างระหว่างทรงกลม		
	252.เขียนสมการของสนามไฟฟ้าในช่องว่างระหว่างทรงกลม		
ฉนวนไฟฟ้าและกลไกการเสถียรภาพฉนวน	100	-	
31.เข้าใจฉนวนไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ			
311.อธิบายฉนวนไฟฟ้าของแข็ง			
312.อธิบายฉนวนไฟฟ้าของก๊าซ			
313.อธิบายฉนวนไฟฟ้าของเหลว	350	-	
32.เข้าใจกลไกการเสถียรภาพฉนวนในฉนวนไฟฟ้า			

หน่วยที่	จุดประสงค์การสอน	เวลา (นาที)	
		ทฤษฎี	ปฏิบัติ
4	321.อธิบายกลไกการเสียดสภาพฉับพลันในฉนวนไฟฟ้าก๊าซ	100	-
	322.อธิบายกลไกการเสียดสภาพฉับพลันในฉนวนไฟฟ้าของเหลว		
	323.อธิบายกลไกการเสียดสภาพฉับพลันในฉนวนไฟฟ้าของแข็ง		
	การผลิตไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์และการจัด	100	-
	41.วิธีการผลิตไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ		
	411.บอกวิธีการผลิตแรงดันสูงกระแสสลับ		
	412.อธิบายการทำงานของวงจรผลิตแรงดันสูงกระแสสลับ		
	42.วิธีการผลิตไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง		
	421.บอกวิธีการผลิตแรงดันสูงกระแสตรง		
	422.อธิบายการทำงานของวงจรสร้างแรงดันสูงกระแสตรง		
	43.วิธีการผลิตแรงดันสูงอิมพัลส์		
	431.อธิบายการทำงานของวงจรผลิตแรงดันสูงอิมพัลส์		
	432.บอกลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ชนิดต่าง ๆ		
	44.เข้าใจเทคนิคการวัดในระบบแรงดันสูง		
441.บอกชนิดของเครื่องมือวัดที่ใช้ในระบบแรงดันสูง			
442.อธิบายการทำงานของเครื่องวัดแรงดันสูงชนิดต่าง ๆ			

หน่วยที่	จุดประสงค์การสอน	เวลา (นาที)	
		ทฤษฎี	ปฏิบัติ
5	การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงดันสูง		
	51.เข้าใจมาตรฐานการทดสอบ	50	-
	511.บอกการทดสอบแบบปล่อยประจุทำลาย		
	512.บอกการทดสอบแบบความทนต่อแรงดันไฟฟ้า		
	52.เข้าใจวงจรและการทดสอบด้วยแรงดันสูง	150	-
	521.อธิบายวงจรสร้างแรงดันสูง		
	522.อธิบายการทดสอบด้วยแรงดันสูงกระแสลับ		
	523.อธิบายการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า		
	53.เข้าใจวิธีการทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง	100	-
	531.บอกวิธีการทดสอบลุกด้วยไฟฟ้า		
532.บอกวิธีการทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า			
6	ฟ้าผ่าและการป้องกัน		
	61.เข้าใจปรากฏการณ์และกลไกการเกิดฟ้าผ่า	50	-
	611.บอกความหมายของฟ้าผ่า		
	612.อธิบายขั้นตอนของการเกิดฟ้าผ่า		
	62.เข้าใจชนิดของกระแสฟ้าผ่า	50	-
	621.บอกชั่วของกระแสฟ้าผ่า		
	612.บอกขนาดของกระแสฟ้าผ่า		
	63.เข้าใจอันตรายของฟ้าผ่าต่อสิ่งมีชีวิต	50	-
	631.บอกลักษณะของฟ้าผ่าที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต		
	632.บอกสาเหตุของการเกิดฟ้าผ่าซ้ำซ้อน		
64.เข้าใจระบบรากสายดินและการวัดความต้านทานดิน	50	-	
641.บอกชนิดของรากสายดิน			
642.อธิบายวิธีวัดความต้านทานดิน			

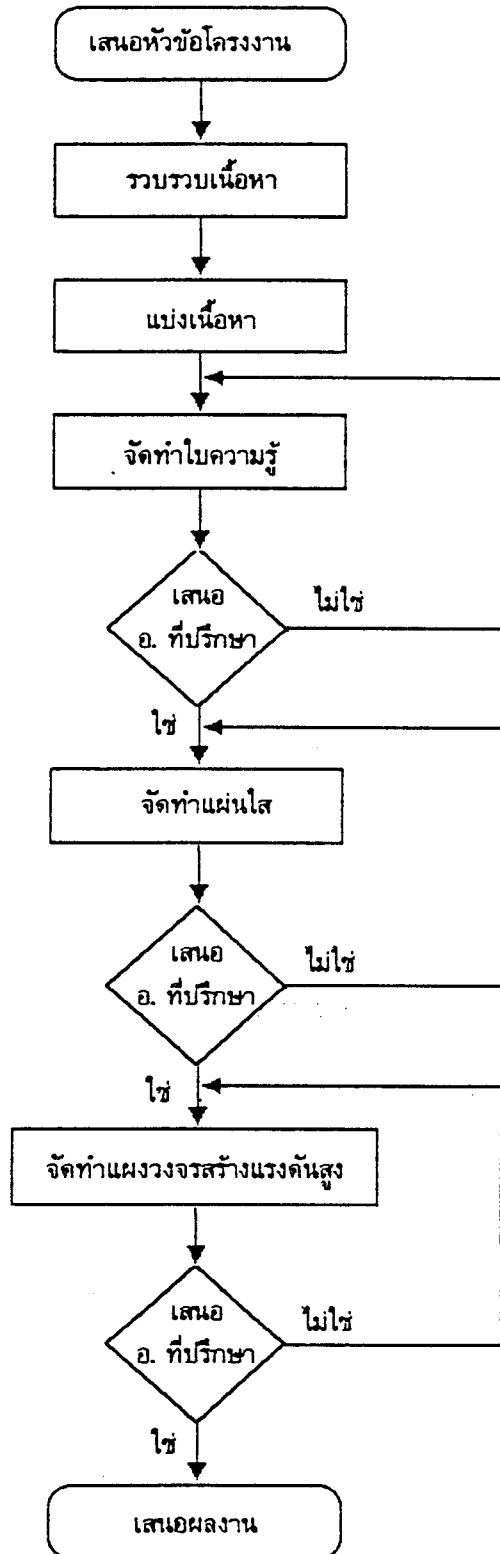
หน่วยที่	จุดประสงค์การสอน	เวลา (นาที)	
		ทฤษฎี	ปฏิบัติ
	65.เข้าใจวิธีการป้องกันฟ้าผ่า 651.บอกความหมายของการป้องกันฟ้าผ่า 652.บอกส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า 653.อธิบายหลักการป้องกันฟ้าผ่า 654.ออกแบบระบบล่อฟ้า	100	-

เอกสารที่ใช้ประกอบ

- (1). สุพหล คำรงกิตติกุล, ดร. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2535
- (2). สำรวย สังข์สอาด, รศ.ดร. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528
- (3). ชำนาญ ห่อเกียรติ, รศ.ดร. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2522
- (4). จิตตฤทธิ ทองปรอน, อาจารย์ เอกสารประกอบการสอน สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ, 2536
- (5). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เอกสาร HIGH VOLTAGE LABORATORY, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2533
- (6). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เอกสาร HIGH VOLTAGE LABORATORY, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า , 2534
- (7). M.P.Chourasia, D.V.Razeving, 'High Voltage Engineering', Khanna Plublishers , Delhi, 1984.

บทที่ 3

วิธีดำเนินการ ลำดับขั้นการจัดทำโครงการ



วิธีดำเนินการ

1. รวบรวมเนื้อหาจากหนังสือและเอกสาร ที่เกี่ยวกับวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง
 - หนังสือวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ของ อ.ดร.สุรพล คำรงกิตติกุล
 - หนังสือวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ของ รศ.ดร.สำรวย สังข์สอาด
 - หนังสือวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ของ รศ.ดร.ชำนาญ ห่อเกียรติ
 - เอกสารประกอบการสอน ของ อาจารย์ จิตตฤทธิ ทองปรอน
 - เอกสาร HIGH VOLTAGE LABORATORY ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 - เอกสาร HIGH VOLTAGE LABORATORY ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
2. จัดแบ่งเนื้อหาตามคำอธิบายรายวิชา
 - แบ่งหน่วยเรียนและบทเรียน
 - เขียนจุดประสงค์ทั่วไปและจุดประสงค์เชิงพฤติกรรม
 - เสนออาจารย์ที่ปรึกษาเสร็จแล้วปรับปรุงแก้ไข
3. จัดทำใบความรู้
 - จัดพิมพ์เนื้อหา โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์
 - เสนออาจารย์ที่ปรึกษา เพื่อทำการปรับปรุงแก้ไข
 - จัดทำเข้ารูปเล่ม
4. จัดทำแผ่นใส
 - แยกเนื้อหาที่สำคัญจากใบความรู้และเอกสารประกอบ พิมพ์ลงเครื่องคอมพิวเตอร์
 - พิมพ์งานลงบนกระดาษ เอ.4 โดยใช้ พลอตเตอร์
 - เสนออาจารย์ที่ปรึกษา เพื่อทำการปรับปรุงแก้ไข
 - พิมพ์งานลงบนแผ่นใส โดยใช้ พลอตเตอร์
 - เข้าพิมพ์ แผ่นใส
5. จัดทำผังวงจรสร้างแรงดันสูง
 - เขียนแบบวงจรสร้างแรงดันสูง
 - เสนออาจารย์ที่ปรึกษา เพื่อทำการปรับปรุงแก้ไข
 - ถ่ายแบบลงบนเฟรมสกรีน
 - สกรีนรูปวงจรถ่ายลงบนแผ่นพลาสติก
6. ตรวจสอบและแก้ไข ก่อนเสนอโครงการ
7. เสนอโครงการกับอาจารย์ที่ปรึกษา

ระยะเวลาดำเนินการ

ระยะเวลา	พ.ย.				ธ.ค.				ม.ค.				ก.พ.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
วิธีดำเนินการ																
1. รวบรวมเนื้อหา																
- หนังสือ	**	**														
- เอกสาร			**	**												
2. จัดแบ่งเนื้อหาตามหลักสูตร																
- แบ่งหน่วยและบทเรียน						**										
- เขียนจุดประสงค์						**										
3. จัดทำใบความรู้																
- พิมพ์ใบความรู้						**	**									
4. จัดทำแผ่นใส																
- แยกเนื้อหาที่สำคัญ							**	**								
- พิมพ์เนื้อหา										**						
- พิมพ์เนื้อหาลงบนแผ่นใส									**	**	**					
5. จัดทำแผงแสดงวงจรชุดประกอบสร้างแรงดันสูง																
- เขียนแบบอาร์ทเวิร์ค														**		
- เขียนแบบลงบนเฟรม													**			
- ถ่ายแบบลงบนแผ่นพลาสติก														**		
6. ตรวจสอบความเรียบร้อย													**	**		
7. เสนอผลงาน																**

รายการวัสดุอุปกรณ์

ลำดับ ที่	รายการวัสดุ/อุปกรณ์	จำนวน	หน่วย	ราคา (บาท)
1	กระดาษถ่ายเอกสาร เอ.4	3	ท่อน	600
2	แผ่นใสชนิดถ่ายเอกสารได้ พร้อมกรอบ	1	กล่อง	500
3	ปากกาพลอตเตอร์ ชนิดเขียนแผ่นใส(กันน้ำ)	6	แท่ง	1,500
4	แผ่นพลาสติก ขนาด 130x80	1	แผ่น	700
5	อุปกรณ์การทำซิลด์สกรีนด์	1	ชุด	2,000
6	ค่าจัดทำแผงและเข้ากรอบอลูมิเนียม	1	แผง	1,200
7	ค่าถ่ายเอกสาร/เข้าเล่ม	6	เล่ม	1,500
8	ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด			1,000
		รวมทั้งหมด		9,000

บทที่ 4 หน่วยที่ 1

พื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

1.1 ความเครียดของฉนวนไฟฟ้า

ฉนวนไฟฟ้าที่นำมาใช้งานในระบบแรงสูงมีทั้ง 3 ชนิด ชนิดของแข็งเช่น ลูกถ้วยไฟฟ้า ชนิดของเหลวเช่น น้ำมันในหม้อแปลง และ ชนิดก๊าซเช่น ก๊าซ SF₆ (sulphur hexafluoride) อากาศและสูญญากาศในเบรกเกอร์ ฉนวนไฟฟ้าเหล่านี้ได้รับความเครียด (stress) ทั้งในสภาพการทำงานปกติและในกรณีผิดปกติ ความเครียดจำแนกออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

ก. ความเครียดทางไฟฟ้า (electrical stress) หมายถึง ความเครียดอันเนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้า แยกออกได้เป็น 2 ส่วนย่อย คือ

1. แรงดันที่เกิดขึ้นจากสาเหตุในระบบไฟฟ้าแรงสูงเอง ได้แก่
 - แรงดันของระบบ
 - แรงดันเกินสวิตชิง (switching overvoltage)
 - แรงดันเกินชั่วคราว (temporary overvoltage)
2. แรงดันที่เกิดขึ้นจากสาเหตุทางธรรมชาติ ได้แก่
 - แรงดันเกินฟ้าผ่า (lightning overvoltage)

หมายเหตุ แรงดันเกินชนิดต่าง ๆ ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 1.5 ถัดไป

ข. ความเครียดทางกล (mechanical stress) หมายถึงความเครียดจากการเกิดแรงบนฉนวน ยกตัวอย่างเช่น ลูกถ้วยไฟฟ้า (insulator) ชนิดแขวนได้รับแรงดึง เนื่องจากน้ำหนักของสาย การหดตัวและการขยายตัวของลูกถ้วยตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เป็นต้น การลัดวงจรทำให้เกิดแรงอัดหรือแรงผลักรัน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเครียดทางกลที่ฉนวนได้เช่นกัน

ค. ความเครียดทางเคมี (chemical stress) หมายถึงความเครียดที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพไปทีละน้อยๆ ปฏิกิริยาอาจเกิดจากฝุ่นละอองบนผิวฉนวน น้ำฝนที่ปะปนสารเคมี แสงแดด การเกิดอาร์กในฉนวนไฟฟ้า การสะสมความร้อนในเนื้อฉนวน เป็นต้น ความเครียดต่างๆรวมกันอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ฉนวนมีอายุในการใช้งานสั้นลง หรืออาจนำไปสู่การเสียหายฉนวนของฉนวนไฟฟ้า

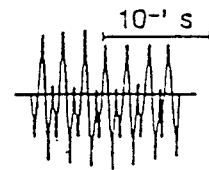
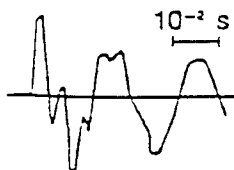
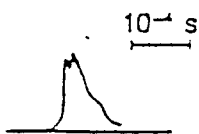
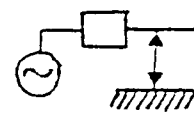
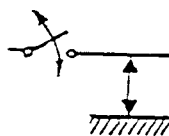
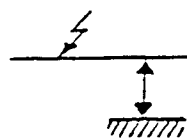
(insulation breakdown) ยกตัวอย่าง เช่น ฝิวของลูกถ้วยไฟฟ้าชนิดปอร์ซเลน (porcelain) ที่ใช้งานอยู่นานปี จะมีฝุ่นละออง ไอเกลือ หรือสารเคมีจากโรงงานมาเกาะติดแน่น และเมื่อเกิดฝนตก ฝิวฉนวนจะเปียกบางทำให้กลายเป็นสื่อนำไฟฟ้า ทำให้เกิดอาร์กบนฝิวและเกิดช็อคทางความร้อน (thermal shock) ซึ่งเป็นการเกิดความเครียดทางไฟฟ้าและทางกลพร้อม ๆ กัน และอาจก่อให้เกิดการชำรุดเสียหายของฉนวนได้

1.2 แรงดันเกิน (OVERVOLTAGE)

แรงดันเกินสามารถเกิดขึ้นได้ในขณะทำการปิดเปิดวงจรปกติ หรือในขณะที่เกิดสภาวะผิดปกติ เช่น การลัดวงจรหรือฟ้าผ่า การวิเคราะห์เพื่อหาขนาด ลักษณะของรูปคลื่นแรงดันที่เปลี่ยนไปตามเวลา และการทราบสาเหตุในการเกิด เป็นสิ่งสำคัญยิ่งในการออกแบบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง และการหาวิธีป้องกัน ในเบื้องต้นนี้จะกล่าวถึงแรงดันเกินแต่ละประเภทอย่างคร่าว ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1.4

1.2.1 แรงดันเกินฟ้าผ่า (LIGHTNING OVERVOLTAGE)

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ที่มีการถ่ายเทประจุไฟฟ้าระหว่างกลุ่มเมฆ หรือจากก้อนเมฆสู่พื้นดินและอาจส่งผลกระทบต่อระบบสื่อสารและก่อให้เกิดความเสียหายกับสิ่งที่ถูกฟ้าผ่าหรืออยู่ข้างเคียง ฟ้าผ่าอาจทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นในระบบแรงสูง เมื่อถูกฟ้าผ่าโดยตรงหรืออาศัยการเหนี่ยวนำทั้งทางไฟฟ้าสถิตย์และทางแม่เหล็กไฟฟ้าเข้าสู่ระบบแรงสูงนั้น



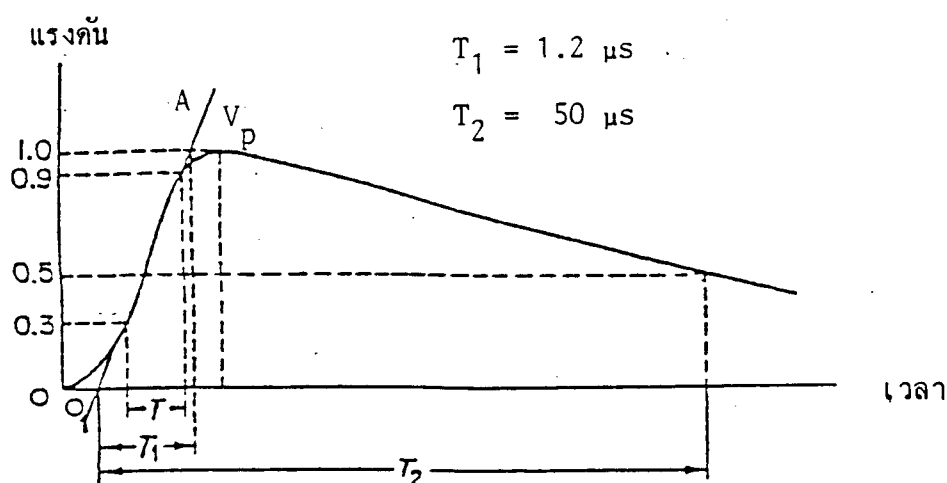
แรงดันเกินฟ้าผ่า

แรงดันเกินสวิตชิง

แรงดันเกินชั่วคราว

รูปที่ 1.4 แรงดันเกิน 3 ประเภท

ในเชิงการวิเคราะห์และการทดลองแรงดันเกินฟ้าผ่าสามารถทดแทนด้วยรูปคลื่นแรงดันมาตรฐานอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งเหมาะกับการใช้เป็นแรงดันทดสอบฉนวนไฟฟ้า ในงานภาคปฏิบัติรูปคลื่นแรงดันมาตรฐานที่ใช้กันทั่วไปเรียกว่า 1.2/50 μs lightning impulse ซึ่งมีลักษณะเป็น double exponential form ดังแสดงในรูปที่ 1.5 T_1 คือเวลาช่วงหน้าคลื่น (front time) เท่ากับ 1.2 ไมโครวินาที T_2 คือเวลาที่ขนาดอิมพัลส์ลดลงไปครึ่งหนึ่ง (time to half-value) เท่ากับ 50 ไมโครวินาที V_p คือขนาดสูงสุดของแรงดัน (peak value) ในที่นี้เวลา T_1 เริ่มนับจากจุด O_1 ซึ่งเป็นจุดโดยประมาณของการเริ่มต้นของแรงดันอิมพัลส์ซึ่งเป็น virtual origin ในการกำหนดรูปคลื่นมาตรฐานนี้ หน่วยงานสากล IEC (International Electrotechnical Commission) ได้กำหนดให้ T_1 และ T_2 มีความคลาดเคลื่อนได้เป็น $\pm 30\%$ และ $\pm 20\%$ ตามลำดับ และขนาด V_p ให้มีความคลาดเคลื่อนได้ $\pm 3\%$



รูปที่ 1.5 รูปคลื่นมาตรฐาน แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs lightning impulse

1.2.2 แรงดันเกินสวิตชิง (SWITCHING OVERVOLTAGE)

แรงดันเกินสวิตชิง อาจเกิดขึ้นได้จากสาเหตุต่าง ๆ เช่น ความเปลี่ยนแปลงโดย กระทันหันในวงจร การลัดวงจร และการทำงานของเบรกเกอร์ แรงดันเกินประเภทนี้มีความสำคัญต่อการออกแบบฉนวนไฟฟ้าในระบบแรงสูงประมาณ 300 กิโลโวลท์ขึ้นไป แต่สำหรับระบบที่ต่ำกว่านี้ ฉนวนไฟฟ้าที่ผ่านการทดสอบด้วยเกณฑ์พิภักของแรงดันเกินฟ้าผ่าจะมีความคงทนต่อแรงดันเกินสวิตชิงสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นในทุก ๆ กรณี รูปคลื่นแรงดันมาตรฐานของแรงดันเกินสวิตชิงคล้ายกับของแรงดันเกินฟ้าผ่า แต่มีช่วงเวลานานกว่า จึงเรียกว่าแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง 250/2500 μs switching impulse โดยมีลักษณะดังในรูปที่ 1.5 แต่เวลาช่วงหน้าคลื่น (T_1) จะนับจากจุด O ซึ่งเป็นเวลาเริ่มต้นจริงไปจนถึงจุดยอดของแรงดัน

งันเป็นเวลาเท่ากับ 250 ไมโครวินาที และเวลา T_2 เป็นค่าที่นับจากจุด 0 ไปจนแรงดันลดลงครึ่งหนึ่ง T_2 เท่ากับ 2,500 ไมโครวินาที มาตรฐาน IEC ได้กำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของ T_1 และ T_2 เป็น $\pm 20\%$ และ $\pm 60\%$ ตามลำดับ สำหรับ V_p ให้มีความคลาดเคลื่อน $\pm 3\%$

1.2.3 แรงดันเกินชั่วคราว (TEMPORARY OVERVOLTAGE)

แรงดันเกินชั่วคราวเป็นแรงดันเกินที่มีสาเหตุคล้ายกันกับแรงดันเกินสวิตชิงแต่มีลักษณะที่ต่างกัน คือ มีช่วงเวลาของแรงดันยาวกว่ามากและมีความถี่เท่ากับความถี่กำลัง 50 เฮิร์ตซ์ หรือเป็นฮาร์มอนิกของความถี่กำลัง รูปคลื่นของแรงดันเกินอาจลดลงช้า ๆ หรือคงที่ ตัวอย่างของการเกิดแรงดันเกินชั่วคราว ได้แก่ การตัดโหลดที่ปลายสายส่งออกทันทีทำให้แรงดันปลายสายส่งสูงกว่าขณะมีโหลดต่ออยู่ การเกิดปรากฏการณ์เฟอร์โรเรโซแนนซ์ (ferroresonance) เนื่องจากอำนาจความอิมิตีวของวงจรแม่เหล็กทำให้เกิดแรงดันเกินในวงจรไฟฟ้า การเลือกพิคคัสของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเช่น กับดักลิวร์จ (surge arrester) ต้องพิจารณาถึงขนาดแรงดันเกิน กับดักลิวร์จต้องหยุดหน้ากระแสขณะที่มีแรงดันเกินชั่วคราวเกิดติดตามลิวร์จของแรงดันเกินฟ้าผ่าหรือแรงดันเกินสวิตชิง เพื่อป้องกันมิให้ตัวมันชำรุดเสียหายเนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้น

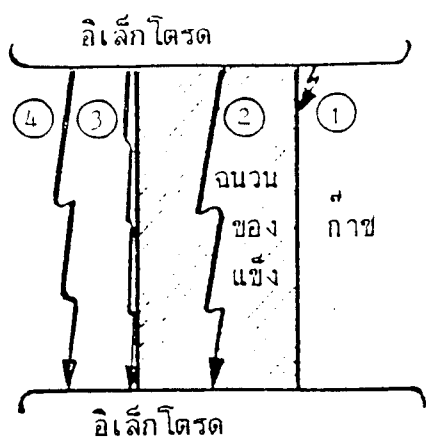
1.3 การเสียดสภาพฉนวน (BREAKDOWN)

ฉนวนไฟฟ้าที่ได้รับความเครียดสนามไฟฟ้า อาจเกิดการปล่อยประจุ (discharge) ซึ่งทำให้ฉนวนไฟฟ้าเปลี่ยนสภาพไปเป็นตัวนำได้อย่างชั่วคราว หรืออย่างถาวร การปล่อยประจุนี้อาจเกิดขึ้นเฉพาะเพียงบางส่วนของเนื้อหรือผิวฉนวนเท่านั้น ซึ่งเรียกว่าเป็นการปล่อยประจุบางส่วน (partial discharge) แต่สำหรับการปล่อยประจุทั่วผิวหรือผ่านเนื้อฉนวนไฟฟ้าจากอิเล็กโตรดหนึ่งไปยังอีกอิเล็กโตรดหนึ่งจะเรียกว่าการเสียดสภาพฉนวน (breakdown) หรือการปล่อยประจุทำลาย (disruptive discharge)

ในรูปที่ 1.6 ได้แสดงถึงลักษณะการปล่อยประจุแบบต่าง ๆ กัน 4 ชนิด คือ

- การเสียดสภาพฉนวนในฉนวนไฟฟ้าก๊าซหรือของเหลว เรียกว่า ประกายข้าม (sparkover)
- การเสียดสภาพฉนวนในฉนวนของแข็ง เรียกว่า การเจาะทะลุ (puncture)
- การเสียดสภาพฉนวนบนผิวฉนวนของแข็งเรียกว่า การวาบไฟตามผิว (flashover)
- การปล่อยประจุบางส่วน (partial discharge) เรียกว่า โคโรนา (corona) ซึ่งเกิด

ขึ้นในบริเวณที่ความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง ๆ ถ้ารุนแรงอาจสังเกตเห็นเป็นแสงเรือง ๆ และได้ยินเสียง



- ① การปล่อยประจุบางส่วน, โคโรนา
- ② การเจาะทะลุ (puncture)
- ③ การวาบไฟตามผิว (flashover)
- ④ ประกายข้าม (sparkover)
- ② 3 และ 4 เป็นการเสียหายฉนวน

รูปที่ 1.6 การปล่อยประจุ (discharge) ในแบบต่าง ๆ

ฉนวนไฟฟ้าแต่ละชั้นที่สร้างขึ้นให้มีลักษณะเหมือนกันให้มากที่สุด ทั้งรูปร่างและความสม่ำเสมอในเนื้อสารเมื่อนำมาทดสอบการเสียหายฉนวน (breakdown) พบว่าขนาดของแรงดันทดสอบแต่ละครั้งมีค่าใกล้เคียงกันทั้งนี้เพราะว่า สภาพแวดล้อมของการทดสอบในชั่วขณะใด ๆ เช่น อุณหภูมิ การไหลเวียนของอากาศและสภาพในเนื้อฉนวนแต่ละชั้นมีความแตกต่างกันได้โดยธรรมชาติ ดังนั้นในการทดสอบการเสียหายฉนวนจึงได้ค่าแรงดันทดสอบแบบค่ากระจายที่นำไปหาค่าเฉลี่ยได้ค่าเฉลี่ยของแรงดันทดสอบการเสียหายฉนวนนี้ เรียกว่าแรงดันเสียหายฉนวน 50% (50 % breakdown voltage หรือ 50 % disruptive discharge voltage)

1.4 การทดสอบฉนวนไฟฟ้า

วัสดุหรืออุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้าสำหรับระบบไฟฟ้าแรงสูง จำเป็นต้องได้รับการทดสอบความทนของฉนวนเสียก่อน เพื่อให้เกิดความแน่ใจที่จะไม่เกิดข้อบกพร่องในการนำมาใช้งาน การทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดขึ้นโดยสากลหรือตามแต่ละประเทศ ซึ่งจะประกอบด้วย การทดสอบด้วยแรงดันประเภทต่าง ๆ ได้แก่ แรงดันกระแสสลับ แรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า แรงดันอิมพัลส์ สวิตชิ่งและแรงดันกระแสตรง การเลือกชนิดแรงดันขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุหรืออุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้า และความต้องการเฉพาะอย่าง ซึ่งอาจแยกเป็นแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

ก) การทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง แต่เดิมใช้ในการทดสอบสายเคเบิลแรงสูง ซึ่งไม่สามารถทำการทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับได้ เพราะขนาดของกระแสจะสูงเกินไป เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของสายมีค่ามาก นอกจากนั้นยังใช้ในการตรวจสอบลักษณะการปล่อยประจุภายในเนื้อฉนวน ในปัจจุบันได้มีการนำระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมาใช้ ทำให้มีการทดสอบความทนและการเสียหายฉนวนจากแรงดันกระแสตรงด้วย

ข) การทดสอบความทนด้วยแรงดันกระแสสลับ (AC withstand voltage test) เป็นการทดสอบความคงทน โดยใช้แรงดันกระแสสลับที่มีความถี่ไฟฟ้ากำลัง ทดสอบในระยะเวลาสั้น เช่น 1 นาที แรงดันทดสอบจะเลือกให้มีขนาดสูงกว่าขนาดแรงดันพิกัดที่ฉนวนจะได้รับความเครียดในการนำไปใช้งาน เช่น ขนาดของแรงดันอาจจะให้เท่ากับขนาดของแรงดันเกินที่เกิดจากการละโหลด (load rejection) พร้อมทั้งเกิดการลัดวงจรเฟสเดียวลงสู่ดิน (single line to ground fault) เป็นต้น บางครั้งอาจเพิ่มแรงดันทดสอบขึ้นไปอีก และมีการเปลี่ยนแปลงสภาวะในการทดสอบ เช่น การทดสอบในสภาวะแห้ง (dry test) และในสภาวะเปียก (wet test) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการทดสอบด้วยแรงดันที่ความถี่สูงกว่าความถี่ไฟฟ้ากำลัง เพื่อศึกษาลักษณะการเสียดสภาพฉนวนและความทนของฉนวน

ค) การทดสอบความทนทานในสภาวะการใช้งาน (endurance test) เป็นการทดสอบด้วยแรงดันและความถี่ตามพิกัดของอุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้านั้น เพื่อใช้ในการตรวจสอบ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ กำลังสูญเสียในฉนวน การปล่อยประจุบางส่วน (partial discharge หรือ PD) และเพื่อศึกษาการเสื่อมอายุของฉนวนไฟฟ้า

ง) การทดสอบฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ (impulse voltage test) เป็นการทดสอบในสภาวะทรานเซียนต์ โดยใช้แรงดันเกินฟ้าผ่าหรือแรงดันเกินสวิตชิงเป็นแรงดันทดสอบเพื่อศึกษาความทนของฉนวน ในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าหรือการเกิดแรงดันเกินสวิตชิง

1.5 ระดับของฉนวน (INSULATION LEVEL)

การทดสอบฉนวนไฟฟ้า สามารถทำให้ทราบถึงคุณลักษณะของฉนวนและสามารถที่จะ กำหนดขนาดของแรงดันที่ฉนวนมีความทนทานและนำไปใช้งานได้อย่างปลอดภัย หน่วยงานมาตรฐานสากล IEC (International Electrotechnical Commission) จึงได้กำหนดขนาดแรงดันชนิดต่าง ๆ เป็นระดับของฉนวน เพื่อใช้ในการกำหนดหรือการเลือกใช้ฉนวนสำหรับอุปกรณ์ในระบบแรงสูง

ระดับของฉนวน (insulation level) ที่ได้กำหนดขึ้นเป็นมาตรฐานของ IEC ได้แก่ ฉบับที่ 71 - 1976 ในหัวข้อการจัดสัมพันธ์ของฉนวน (insulation coordination) ตารางที่ 1.5 (ก), (ข) และ (ค) เป็นตัวอย่างโดยย่อของระดับของฉนวน สำหรับช่วงแรงดันของระบบที่แบ่งออกเป็น 3 ช่วง

ตารางที่ 1.5 (ก), (ข) และ (ค) ระดับของฉนวนตามมาตรฐานของ IEC

V_s	คือ แรงดันระหว่างสายค่า RMS ที่สูงที่สุดในระบบ	
$V_{lightning}$	คือแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ฉนวนมีความทน	เป็นค่าจุดยอดของแรงดัน(lightning impulse withstand voltage)

$V_{\text{power-freq.}}$ คือ แรงดันที่ความถี่ไฟฟ้ากำลัง ที่ใช้ทดสอบความทนของฉนวนในเวลาสั้น 1 นาที ค่า RMS (power-frequency short duration withstand voltage)

$V_{\text{switching}}$ คือ แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงที่ฉนวนมีความทน เป็นค่าจุดยอดของแรงดัน (switching impulse withstand voltage)

(ก) แรงดันช่วง A : $1 \text{ kV} < V_s < 52 \text{ kV}$, หน่วยแรงดันเป็นกิโลโวลต์

V_s (RMS)	$V_{\text{lightning}}$ (PEAK)	$V_{\text{power-freq.}}$ (RMS)
3.6	20, 40	10
7.2	40, 60	20
12.0	60, 75	28
17.5	75, 95	38
24.0	95, 125	50
36.0	145, 170	70

(ข) แรงดันช่วง B : $52 \text{ kV} < V_s < 300 \text{ kV}$, หน่วยแรงดันเป็นกิโลโวลต์

V_s (RMS)	$V_{\text{lightning}}$ (PEAK)	$V_{\text{power-freq.}}$ (RMS)
52	250	95
72.5	325	140
123	450, 550	185, 230
145	450, 550, 650	185, 230, 275
170	550, 650, 750	230, 275, 325
245	650, 750, 850, 950, 1050	275, 325, 360, 395, 460

หมายเหตุ : การเลือกระดับของฉนวนจากระดับต่ำไปสูง ขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบแรงสูง และความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน

(ค) แรงดันช่วง C : $V_s > 300 \text{ kV}$, หน่วยแรงดันเป็นกิโลโวลต์

V_s (RMS)	$V_{\text{lightning}}$ (PEAK)	$V_{\text{switching}}$ (RMS)
300	750, 850	850, 950, 1050
362	850, 950	950, 1050, 1175

420	950, 1050	1050, 1175, 1300, 1425
525	1050, 1175	1175, 1300, 1425, 1550
765	1300, 1425, 1550	1425, 1550, 1800, 1950, 2100, 2400

หมายเหตุ : การเลือกระดับของฉนวนจากระดับต่ำไปสูง ขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบแรงสูงและความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน

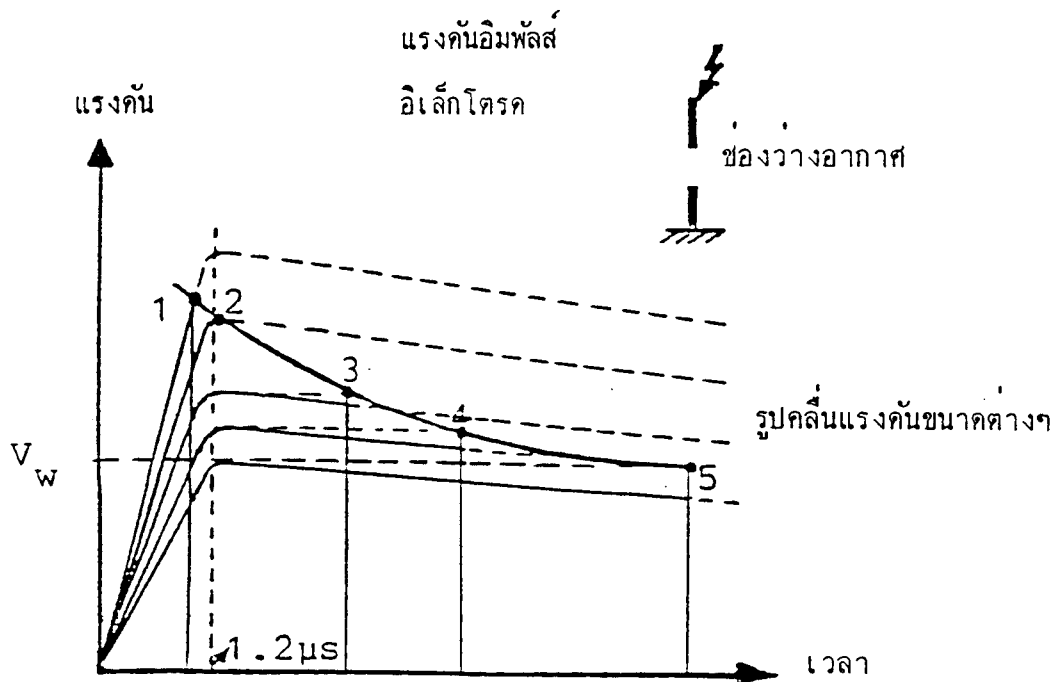
การเลือกใช้ระดับของฉนวนมาตรฐานในระบบเดียวกันอาจไม่จำเป็นต้องให้มีค่าสูงที่สุด เพราะราคาของฉนวนจะแพงมากควรเลือกให้พอดี ๆ และควรมีการวิเคราะห์การเกิดแรงดันเกินภายในระบบเพื่อช่วยในการเลือกระดับของฉนวนในแต่ละแห่งภายในระบบได้อย่างเหมาะสม และในกรณีของระบบที่มีขนาดแรงดัน (V_S) สูงกว่า 300 กิโลโวลต์ ต้องเลือกฉนวนให้มีความทนต่อแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งอีกด้วย

ตัวอย่างการเลือกระดับของฉนวนของหม้อแปลงของระบบแรงสูง 230 กิโลโวลต์ ซึ่งอาจมีแรงดันของระบบสูงถึงค่า 245 กิโลโวลต์ ควรเลือกระดับฉนวนให้มีความทนแรงดันเกินฟ้าผ่าไม่ต่ำกว่า 650 กิโลโวลต์ขึ้นไป และทนแรงดันที่ความถี่กำลังในช่วงเวลา 1 นาที ได้ถึง 275 กิโลโวลต์ ถ้าเลือกระดับของฉนวนให้สูงขึ้น เนื่องจากการป้องกันแรงดันเกินมีขีดจำกัด ก็ยิ่งเพิ่มความปลอดภัยยิ่งขึ้น

1.6 เส้นโค้งลักษณะของแรงดันเสียหายฉนวนและเวลา (VOLT-TIME CHARACTERISTIC CURVE)

การเสียหายฉนวนเนื่องจากฉนวนได้รับแรงดันอิมพัลส์ ขึ้นอยู่กับเวลา ขนาด และรูปคลื่นของแรงดัน ในกรณีที่เป็แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าหรือแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง จะสามารถทดลองป้อนแรงดันอิมพัลส์ชนิดโคซนิกหนึ่งโดยให้ขนาดเปลี่ยนค่าได้และจับเวลาที่ฉนวนเกิดการเสียหายฉนวน (breakdown) เส้นโค้งที่เขียนขึ้นโดยให้ขนาดของแรงดันอิมพัลส์เป็นฟังก์ชันของเวลา จึงเป็นเส้นโค้งลักษณะของแรงดันและเวลา (voltage-time characteristic) ดังแสดงในรูปที่ 1.7 ซึ่งเป็นของฉนวนก๊าศที่ใช้ฮีลิกโตรดเป็นชนิดแท่ง (rod) และป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มี ขนาดสูง ทำให้เกิดประกายข้ามที่ช่วงหน้าคลื่น (wave-front sparkover) ตรงจุดที่ 1 ถ้าหากลดขนาดแรงดันลงการเกิดประกายข้ามจะเลื่อนมายังช่วงหางคลื่น (wave tail sparkover) ได้แก่ จุดที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ จุดเหล่านี้จะเป็นจุดตัดของค่า 2 ค่า คือ ขนาดสูงสุดของแรงดันอิมพัลส์และเวลาที่ใช้ในการเกิดประกายข้าม สำหรับจุดที่ 2 นั้น เป็นจุดที่มีการเกิดประกายข้ามที่จุดสูงสุดของคลื่นแรงดันพอดี เส้นโค้งที่ลากต่อเนื่องผ่านจุดที่ 1 ถึง 5 เป็นเส้นโค้งลักษณะของฉนวนชนิดนี้ โดยใช้ฮีลิกโตรดแบบแท่ง แนวโน้มของเส้นกราฟจะเริ่มเข้าสู่แนวระดับเมื่อเวลายาวขึ้น ค่า V_w เป็นขนาดของแรงดันอิมพัลส์ที่ต่ำที่สุด ที่ยังทำให้เกิดประกายข้ามได้ จึงเรียกว่า แรงดันประกายข้ามวิกฤต (critical sparkover)

สำหรับฉนวนไฟฟ้าแรงสูงทั่ว ๆ ไป ระดับของฉนวน (insulation level) มีส่วนสัมพันธ์กับเส้นโค้งลักษณะของแรงดันและเวลาที่ต้องกำหนดให้ระดับของฉนวนมีขนาดสูงกว่าค่าบนเส้นโค้ง ฉนวนควรมีความทนต่อแรงดันที่มีขนาดสูงกว่าค่าบนเส้นโค้งลักษณะเป็นจำนวนเท่า เช่น 1.25 เท่า เป็นต้น ดังนั้นขนาดแรงดันต่ำสุดที่ฉนวนทนได้จึงกำหนดเป็นระดับของฉนวนพื้นฐานที่เรียกว่า BIL (basic lightning impulse insulation level) และ ถ้าเป็นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง จะเรียกว่าระดับของฉนวนของแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง หรือ SIL (switching impulse insulation level) เพื่อใช้เป็นข้อกำหนดมาตรฐานขั้นต่ำที่ฉนวนมีความทนต่อแรงดันอิมพัลส์แต่ละชนิดได้



รูปที่ 1.7 เส้นโค้งลักษณะของแรงดันและเวลา (volt-time characteristic)

1.7 ความหมายของการจัดสัมพันธ์ของฉนวน (INSULATION COORDINATION)

การจัดสัมพันธ์ของฉนวนของระบบแรงสูง คือ การจัดการเกี่ยวกับการใช้ฉนวนโดย มีการเลือกระดับของฉนวนของอุปกรณ์ให้มีความทนต่อแรงดันอย่างพอเหมาะไม่เผื่อให้มากเกินไปรวมทั้งอาศัยการเลือกใช้วิธีการป้องกันแรงดันเกินที่มีขนาดเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ ซึ่งอาจต้องมีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินได้หลายประเภท เช่น สายล่อฟ้า (overhead ground wire) กับดักเสิร์จ (surge arrester) ทั้งนี้ก็เพื่อให้เกิดผลดีในเชิงเศรษฐศาสตร์ และยังเป็นระบบแรงสูงที่มีความเชื่อถือได้ การจัดสัมพันธ์ของฉนวนนั้น มีความสำคัญมากยิ่งขึ้น สำหรับระบบแรงสูงพิเศษ (EHV) และระบบแรงสูงยิ่ง (UHV) ทั้งนี้เพราะว่าการเผื่อระดับการฉนวนมากเกินไปจะมีผลให้ฉนวนยิ่งแพง จึงเหมาะสมกว่าในการหาวิธีป้องกันและลดแรงดันเกินไม่ให้มีค่าสูงเกินกว่าระดับของฉนวนโดยไม่ต้องเผื่อให้สิ้นเปลือง

หน่วยที่ 2 สนามไฟฟ้า

2.1 สนามไฟฟ้าในวงจรไดอิเล็กตริกและการกระจายของสนามไฟฟ้า

ฉนวนไฟฟ้าเป็นไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่ง ซึ่งแยกให้เห็นความแตกต่างจากสารกึ่งตัวนำในการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล กล่าวคือถ้าฉนวนได้รับพลังงานโฟตอนถึง 3 อิเล็กตรอนโวลต์ (1.6×10^{-19} จูล) ก็ยังไม่มีเกิดการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ดังนั้น ช่องว่างพลังงาน (energy gap) ของฉนวนไฟฟ้าจะกว้างกว่า 3 อิเล็กตรอน-โวลต์ ขึ้นไป ไดอิเล็กตริกถูกกำหนดลักษณะด้วยค่าคงตัวไดอิเล็กตริกหรือเพอร์มิตติวิตี (ϵ) ซึ่งให้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (D) และสนามไฟฟ้า (E) ดังนี้

$$D = \epsilon E \quad (2.1)$$

ในระบบเอสไอ ϵ เป็นผลคูณของ ϵ_0 (permittivity of free space) 8.85×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร และ ϵ_r (relative permittivity) จากการทดลองพื้นฐานของฟาราเดย์ พบว่าคอนเดนเซอร์ชนิดแผ่นประกบกันจะมีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) มากขึ้น ตามค่าของ ϵ_r แต่สัญญาณภาคและก๊าซชนิดต่าง ๆ ก็มีค่า ϵ_r เท่ากับ 1

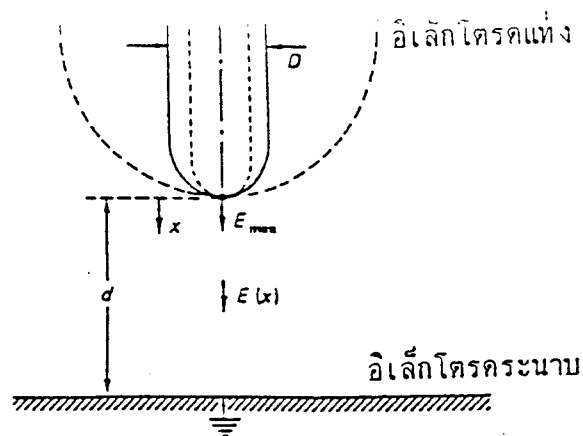
สนามไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญในการบ่งชี้ความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวน ความเข้มและการกระจายของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของอิเล็กโตรด ชนิดของฉนวน และค่า ϵ หัวข้อนี้อธิบายถึงพื้นฐานทางสนามไฟฟ้าที่สำคัญ ๆ ต่อระบบฉนวนไฟฟ้าและที่มีส่วนที่เกี่ยวกับงานด้านฉนวนไฟฟ้าในงานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ฉนวนไฟฟ้าอาจอยู่ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ (uniform field) หรือในแบบไม่สม่ำเสมอ (non-uniform field) ขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของอิเล็กโตรด ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีอิเล็กโตรด 2 ชนิด ด้านบนเป็นแท่งอิเล็กโตรดกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง D วางห่างเป็น ระยะ d จากอิเล็กโตรดระนาบด้านล่าง สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าแปรเปลี่ยนตามค่า d และ D ที่ระยะ x สนามไฟฟ้าในแนว x และอยู่กึ่งกลางแท่งอิเล็กโตรดมีการกระจายของสนามไฟฟ้าดังนี้ กรณีที่ D มีค่าใหญ่มากใกล้ค่านั้นค่า $D \gg d$ สนามไฟฟ้า $E(x)$ จะมีค่าสม่ำเสมอจากอิเล็กโตรดด้านบนไปถึงระนาบด้านล่าง ถ้าให้ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรด เท่ากับ V จึงได้

$$\text{สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ } E(x) = \frac{V}{d} \quad (2.2)$$

กรณี D มีค่าน้อยสนามไฟฟ้าจะมีค่าไม่สม่ำเสมอและมีค่าสูงสุด (E_{max}) ที่ปลายแท่งอิเล็กโตรดด้านบน และลดลงไปถึงค่าต่ำสุดที่ผิวระนาบด้านล่าง การหาค่า $E(x)$ ต้องใช้การวิเคราะห์ที่ซับซ้อน การกำหนดความไม่สม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าในทางปฏิบัตินิยมใช้ค่า η (field efficiency factor) ถ้ากำหนดให้สนามไฟฟ้าเฉลี่ย E_{mean} ระหว่างอิเล็กโตรดมีค่าเป็นดังสมการที่ (2.2) และให้สนามไฟฟ้าค่าสูงสุด E_{max} ค่า η จึงเป็นดังต่อไปนี้

$$\eta = \frac{E_{mean}}{E_{max}} = \frac{V}{dE_{max}} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.1 อิเล็กโตรดรูปแท่งและระนาบ

ค่า η มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ถ้าค่า η มากขึ้นสนามไฟฟ้ายิ่งมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ซึ่งขึ้นกับรูปลักษณะของอิเล็กโตรด เมื่อทราบค่า η แล้วการหาค่าแรงดันเสียหายฉาบพัตัน (breakdown voltage, V_b) อาจเขียนอยู่ในเทอมของ η และสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดการเสียหายฉาบพัตัน (breakdown electric field, E_b) ได้ดังนี้

จากสมการที่ (1.6) $E_{max} = E_b$

$$V = V_b$$

ดังนั้น $V_b = \eta d E_b \quad (2.4)$

ตัวอย่างการคำนวณโดยใช้สมการที่ (2.4) ถ้ามีอิเล็กโตรดระนาบคู่หนึ่งวางห่างกัน 10 ซม. ($d = 10$) มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ($\eta = 1$) และมีอากาศเป็นฉนวนซึ่งมีการเสียดสภาพฉนวนที่ค่า $E_b = 26.6$ กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ความดันบรรยากาศ 101.3 กิโลปาสกาล (kPa) และความชื้นสัมบูรณ์ 11 กรัมต่อลูกบาศก์เมตร ดังนั้น V_b จึงคำนวณจากสมการที่ 2.4 ได้เท่ากับ 266 กิโลโวลต์ ถ้า η น้อยกว่า 1 ค่า V_b ยิ่งต่ำลงไปอีก จึงสรุปได้ว่าในกรณีทั่วไป ถ้าสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ ย่อมพบว่าแรงดันที่ทำให้ฉนวนเสียดสภาพฉนวน (break-down) จะต่ำกว่ากรณีของอิเล็กโตรดมีลักษณะที่ให้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของความดัน ความชื้นและอุณหภูมิ ยังมีผลต่อค่า V_b ดังอธิบายไว้ในบทความภาควิชา

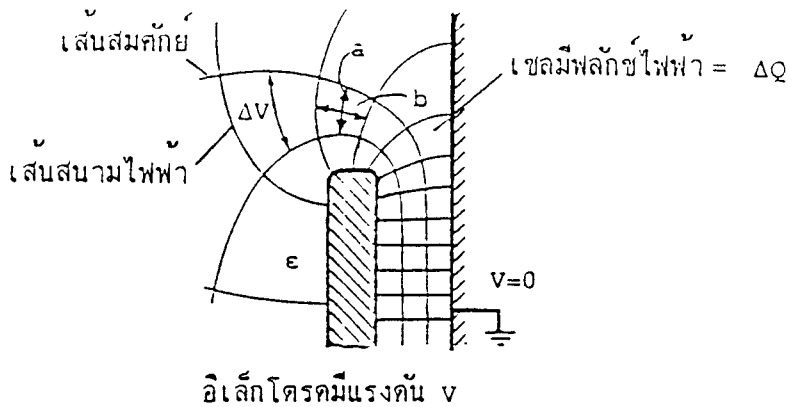
2.2 การวิเคราะห์คำนวณสนามไฟฟ้า

การออกแบบฉนวนของระบบแรงสูงจำเป็นต้องทราบลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าในฉนวน และค่าความทนต่อสนามไฟฟ้า (electric field withstand strength) ในที่นี้สนามไฟฟ้าเป็นสนามไฟฟ้าสถิตซึ่งคำนวณได้ตามสมการของแมกซ์เวลล์ [4] การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและการวาดเส้นสนามไฟฟ้า จำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

- ก. วิธีลากเส้นสนามไฟฟ้าหรือโดยใช้สูตรคำนวณ
- ข. โมเดลจำลองทางวงจรไฟฟ้าและการทดลองวัด
- ค. วิธีคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์

ก. การหาสนามไฟฟ้าโดยวิธีลากเส้นสนามไฟฟ้า

การหาสนามไฟฟ้าที่ใช้วิธีอย่างง่ายโดยการคำนวณเป็นสูตรจะนำไปอธิบายในหัวข้อถัดๆ ไป ซึ่งมุ่งเน้นแต่เฉพาะสนามไฟฟ้าในระบบฉนวนที่พบกันมากในงานระบบแรงสูง สำหรับการหาสนามไฟฟ้าโดยการลากเส้นกระทำได้อย่างประมาณ โดยใช้หลักของทิศของสนามไฟฟ้างดงจากกับเส้นสมศักย์ (equipotential line) และให้อิเล็กโตรดเป็นแนวของเส้นสมศักย์เริ่มแรกดังแสดงเป็นตัวอย่างรูปที่ 2.2 วิธีนี้สามารถหาค่าของสนามไฟฟ้า (E) ได้โดยง่ายแต่เนื่องจากต้องใช้การวัดระยะในรูปเป็นจำนวนมาก จึงไม่ละเอียด



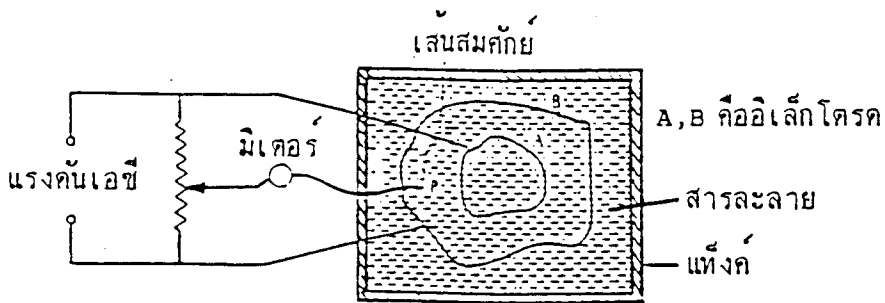
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างแสดงเส้นสมศักย์ (equipotential line) และเส้นสนามไฟฟ้า (electric field line)

การลากเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นสมศักย์จะเริ่มจากบริเวณที่คาดคะเนเส้นสนามไฟฟ้าได้ เช่น ในรูปที่ 2.2 ได้แก่ บริเวณที่อเล็กโตรดวางขนานกัน เส้นสนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับผิวอเล็กโตรดทั้งคู่ วิธีทำเริ่มจากการเขียนช่องสี่เหลี่ยม เรียกว่า เซล แบ่งแรงดัน V ระหว่างอเล็กโตรด ออกเป็น 3 ส่วน หรือ แล้วแต่ความเหมาะสม แต่ละส่วนมีความต่างศักย์เป็น ΔV ดังนั้น สนามไฟฟ้าที่จุดใดๆ (E) จะเท่ากับ $\Delta V/a$ และความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (D) จึงเท่ากับ ϵE หลังจากได้ลากเส้นสนามไฟฟ้าและเส้นสมศักย์ทั่วพื้นที่อย่างประมาณแล้วจึงทำการปรับการลากเส้นให้เรียงยิ่งขึ้นวิธีนี้เป็นวิธีดั้งเดิมก่อนมีการนำคอมพิวเตอร์มาช่วยวิเคราะห์หาสนามไฟฟ้า

ข. โมเดลจำลองทางวงจรไฟฟ้าและการทดลองวัด

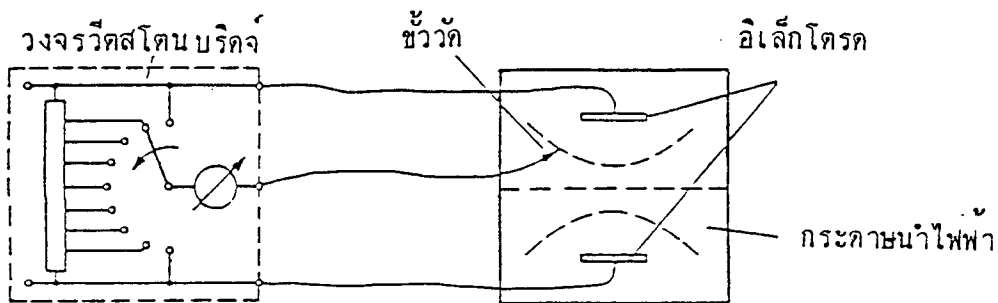
การหาค่าสนามไฟฟ้าโดยการวัดค่าจริงๆ ในระบบฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงนั้น สามารถกระทำได้โดยตรงซึ่งอาจเป็นความจำเป็นในการทดสอบในภาคสนามของการทำงานแต่กรณีที่จะวัดค่าดังกล่าวนี้อาจต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมในหลายๆ ด้านประกอบกัน เช่น อุปกรณ์ที่ต้องใช้สถานที่และความปลอดภัย เป็นต้น อย่างไรก็ตามเราสามารถสร้างโมเดลขึ้นแทนอเล็กโตรดและฉนวน แล้วทำการทดลองวัดหาเส้นสมศักย์แล้วจึงลากเส้นตั้งฉากเป็นเส้นสนามไฟฟ้าการวัดค่าแรงดันที่จุดต่างๆ ทำให้โมเดลที่นำมาใช้โดยทั่วไป มีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ โมเดลแบบแท็งค์อเล็กโตรไลต์ (electrolytic tank) และโมเดลแบบแผ่นนำไฟฟ้า

แบบแท่งคือเล็กโครไลท์ จะเป็นวิธีสร้างแบบจำลองของอิเล็กโตรดและใช้สารละลายอิเล็กโตรไลท์ เช่น น้ำหรือน้ำมัน แทนเนื้อจนวน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แท่งจะต้องใหญ่พอที่จะไม่ส่งผลกระทบต่อสนามไฟฟ้าและควรวัดแท่งที่เป็นจนวนไฟฟ้า แรงดันที่ใช้ควรเป็นชนิดเอซีไม่เกิน 50 โวลท์ และขนาดกำลังประมาณ 10 วัตต์ เพื่อความปลอดภัยในการวัดค่าแรงดันที่จุดต่าง ๆ ซึ่งอาจใช้วงจรวัดสโตนบริดจ์



รูปที่ 2.3 โมเดลแบบแท่งคือเล็กโครไลท์ที่ใช้ในการหาสนามไฟฟ้า

โมเดลแบบแผ่นนำไฟฟ้าอาจเลือกใช้แผ่นกระดาษนำไฟฟ้าแทนเนื้อจนวนและติดอิเล็กโตรดจำลองขึ้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.4 วิธีการวัดเส้นสนามไฟฟ้าใช้หลักการวัดเพื่อหาเส้น สมคักย์ก่อน เช่นเดียวกับแบบแท่งคือเล็กโครไลท์ กระดาษที่นิยมใช้ได้แก่ กระดาษแกรไฟต์



รูปที่ 2.4 โมเดลแบบกระดาษนำไฟฟ้าที่ใช้ในการหาสนามไฟฟ้า

ก. วิธีคำนวณเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์

วิธีนี้คำนวณหาสนามไฟฟ้าโดยทั่วไป เริ่มมาจากการแก้สมการของ Poisson หรือของ Laplace แล้วแต่กรณี ลักษณะทั่วไปของสมการเป็นดังนี้

$$\text{div} (\epsilon \text{ grad } V) = \text{div } D = \rho \quad (2.5)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าเป็นปริมาณเวกเตอร์

ρ คือ ความหนาแน่นของประจุ

V คือ แรงดันที่ตำแหน่งนั้นเทียบกับจุดอ้างอิง

ถ้า $\rho = 0$ สมการที่ (2.5) จะเป็นสมการ Laplace และถ้า $\rho \neq 0$ จะเรียกว่าสมการ Poisson สำหรับฉนวนไฟฟ้าที่ไม่มีประจุหลงค้างอยู่ในเนื้อฉนวนเลย จะมีค่า $\text{div } D$ เป็นศูนย์

วิธีการแก้สมการที่ (2.5) สามารถใช้วิธีเชิงตัวเลขได้หลายวิธี วิธีที่นิยมใช้มี 2 แบบแบบแรก ได้แก่ วิธี finite difference ซึ่งสร้างสมการความแตกต่างพีชคณิต (algebraic difference equation) ของสมการที่ (2.5) ขึ้น เพื่อหาค่าตัวแปรแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในสนามไฟฟ้าแบบที่สอง ได้แก่ วิธี finite element ซึ่งใช้หลักการมีสถานะที่พลังงานมีค่าต่ำสุดภายในพื้นที่ที่ต้องการหาสนามไฟฟ้า เพื่อสร้างสมการที่ใช้หาค่าตัวแปรแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในพื้นที่ที่จะหาค่าสนามไฟฟ้าต่อไป [5] [6] ทั้งสองวิธีที่กล่าวมาแล้วสามารถใช้ในการหาสนามไฟฟ้าที่มีไดอิเล็กตริกมากกว่า 1 ชนิด

นอกจากวิธีคำนวณเชิงตัวเลข 2 วิธีที่กล่าวถึงแล้ว ยังมีวิธีของ charge simulation ใช้การเปลี่ยนสมการ (2.5) ให้เป็นรูปสมการอินทิเกรต ซึ่งเป็นสมการของกฎของเกาส์ Gauss's Law ดังต่อไปนี้

$$\oint_A D \cdot dA = \int_V \rho dV \quad (2.6)$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่ปิด (พื้นที่บนผิว) , v เป็นปริมาตรภายในพื้นที่ปิด

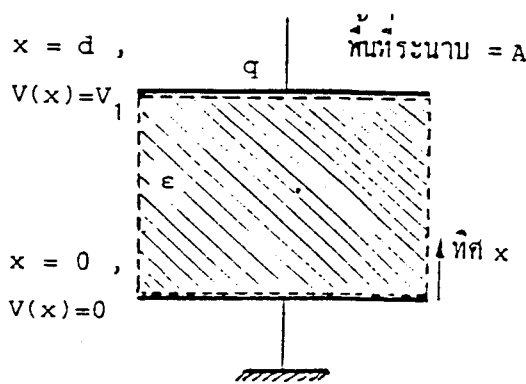
แรงดันที่ตำแหน่งต่างๆ ในสนามไฟฟ้า หาได้จากการแทนค่า D ในสมการที่ (2.6) โดยวิธีที่ใช้ประจุอิสระที่สมมุติขึ้น และนำไปวางไว้ในตำแหน่งต่างๆ ที่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างประจุและแรงดันของอิเล็กโตรดและทำให้หาค่าสนามไฟฟ้าได้

2.3 สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดระนาบ

ในหัวข้อนี้จะทบทวนถึงค่าและสมการต่าง ๆ เกี่ยวกับสนามไฟฟ้าที่จะนำไปวิเคราะห์ในแบบใช้สูตร โดยจะเริ่มจากอิเล็กโตรดแบบง่าย ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งเป็นอิเล็กโตรดระนาบมีพื้นที่ A ตารางเมตร

ในการวิเคราะห์หาสนามไฟฟ้า อาจเริ่มจากเกรเดียนของศักย์ไฟฟ้า (∇v) ซึ่ง หมายถึง ค่าการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าสูงสุดต่อหน่วยความยาวในทิศทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และมีความสัมพันธ์กับเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (E) ดังนี้

$$E = -\text{grad } V = \nabla V \quad (2.7)$$



หน่วยของ A : m^2 , d : ม.

v : โวลต์

E : โวลต์ / ม.

q : คูอมบ/ ตร.ม.

รูปที่ 2.5 อิเล็กโตรดระนาบ

เมื่อนำค่าเกรเดียนไปแทนในสมการที่ (2.5) และจัดให้อยู่ในระบบแกน xyz จะได้สมการของ Poisson ($\eta = 0$) หรือของ Laplace ($\eta = 0$)

$$\nabla^2 v = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = \frac{-\rho}{\epsilon} \quad (2.8)$$

จากรูปที่ 2.5 ถ้าให้ฉนวนไม่มีประจุค้างอยู่ภายใน และมีสนามไฟฟ้าในแนวแกน x กล่าวคือไม่คิดผลของสนามบริเวณของอิเล็กโตรด ค่าสนามไฟฟ้า (E) ในแนวแกน x หาได้จาก สมการที่ (2.8) ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0 \quad (2.9)$$

และกำหนดให้ k_1 และ k_2 เป็นค่าคงที่ จากสมการที่ (2.9)

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = k_1 \quad (2.10)$$

$$v = k_1 x + k_2 \quad (2.11)$$

เงื่อนไขจากรูปที่ 2.5 $x=0, v=0$ และ $x=d, v=0$ $x=d, v=v_1$

$$\text{ดังนั้น } k_2 = 0 \quad \text{และ } k_1 = \frac{v_1}{d}$$

นำไปแทนค่าในสมการที่ (2.11) จึงได้

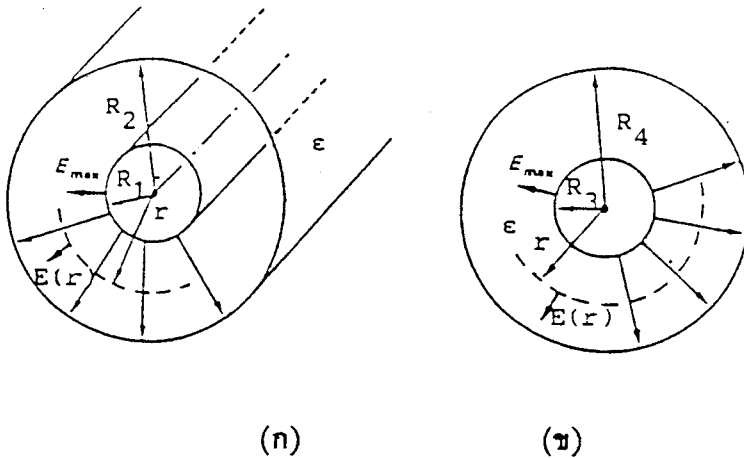
$$v = \frac{v_1}{d} x \quad (2.12)$$

$$E = -\nabla v = -\frac{v_1}{d} \quad (2.13)$$

E มีค่าเป็นลบ เพราะว่ามีทิศสวนทางกับทิศของแนวแกน x จึงมีทิศชี้ไปจากด้านที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่า และมีขนาดเท่ากับ V_1/d

2.4 สนามไฟฟ้าในทรงกระบอกซ้อนและในทรงกลมซ้อน

อิเล็กโตรสถิตทรงกระบอกซ้อน และสถิตทรงกลมซ้อน ดังแสดงในรูปที่ (2.6) จะมีสนามไฟฟ้ากระจายอย่างสมมาตรรอบแกนกลางในกรณีเป็นทรงกระบอก และรอบจุดศูนย์กลางในกรณีเป็นทรงกลม ทั้งสองกรณีเส้นสนามไฟฟ้าจะมีทิศในแนวรัศมี ดังนั้นสนามไฟฟ้า (E) จึงเป็น ฟังก์ชันของระยะรัศมี (r) จากจุดหรือแนวศูนย์กลาง



รูปที่ 2.6 (ก) อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อน (ข) อิเล็กโตรดทรงกลมซ้อน

ในการนำไปใช้งานจะป้อนแรงดัน V ที่อิเล็กโตรดในของรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข) ทำให้เกิดการสะสมประจุอยู่บนผิวของอิเล็กโตรด ถ้ากำหนดให้อิเล็กโตรดทรงกระบอก มีประจุต่อหน่วยความยาวเท่ากับ q และอิเล็กโตรดทรงกลมมีประจุทั้งหมดเท่ากับ q จากกฎของเกาส์ สามารถหาค่า $E(r)$ ที่ระยะ r ได้ โดยเริ่มจากความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า D หรือปริมาณการกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) :

$$\text{อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อน : } D = \frac{q}{2\pi r} \quad (2.14)$$

$$E = \frac{q}{2\pi \epsilon} \cdot \frac{1}{r} \quad (2.15)$$

$$V = \int_{R_1}^{R_2} E \, dr = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \left[\frac{R_2}{R_1} \right] \quad (2.16)$$

แทนค่า q จากสมการที่ (2.16) ลงในสมการ (2.15)

$$E = \frac{V}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \cdot \frac{1}{r} \quad (2.17)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับอิเล็กโตรดทรงกลมซ้อนกันจะได้

$$E = \frac{q}{4\pi \epsilon} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (2.18)$$

$$V = \int_{R_3}^{R_4} E \, dr = \frac{q}{4\pi \epsilon} \left[\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_4} \right] \quad (2.19)$$

$$E = V \frac{(R_3 R_4)}{R_4 - R_3} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (2.20)$$

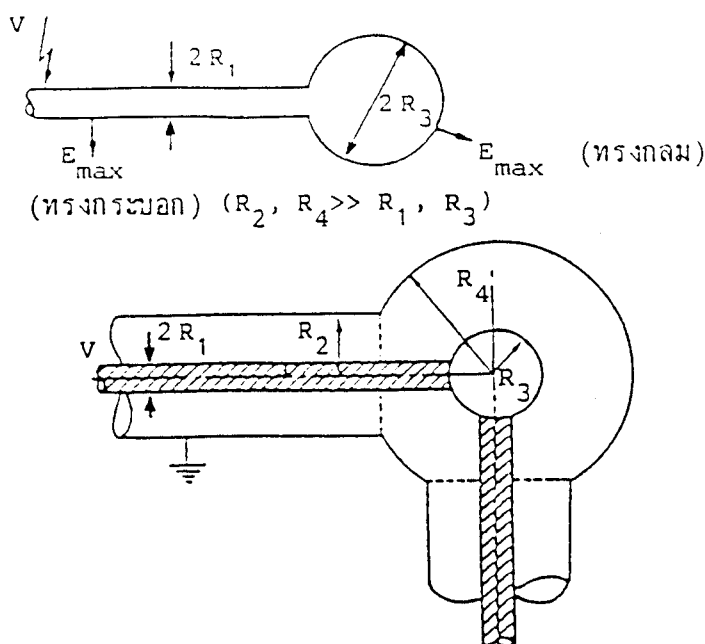
สูตรของแรงดันและสนามไฟฟ้าที่หาได้ จะสามารถนำไปหาค่าของความจุไฟฟ้า และค่า field efficiency factor ได้นอกจากนี้ยังสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_{max}) ซึ่งเกิดขึ้นที่ระยะรัศมีสั้นที่สุดได้ดังนี้

$$\text{อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อน} \quad E_{max} = \frac{V}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \cdot \frac{1}{R} \quad (2.21)$$

$$\text{อิเล็กโตรดทรงกลมซ้อน} \quad E_{max} = \frac{V}{(1 - R_3)} \cdot \frac{1}{R_3} \quad (2.22)$$

จากสมการที่ (2.21) และ (2.22) ถ้าให้รัศมีของอิเล็กโตรดของทั้งสองชนิด เท่ากัน ทั้งอิเล็กโตรดในและนอก ย่อมสรุปได้ว่า E_{max} ของอิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อนตาม สมการที่ (2.21) มีค่าน้อยกว่า E_{max} ของอิเล็กโตรดทรงกลม ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างการออกแบบขนาดของอิเล็กโตรดในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

ตัวอย่างที่ 1 จากรูปที่ 2.7 (ก) เป็นชุดอิเล็กโตรดทรงกระบอกและทรงกลมซึ่งใช้สำหรับป้อนแรงดันสูงในห้องปฏิบัติการ โดยการประมาณ จึงสมมุติให้ผนังของห้องซึ่งบุด้วยลวดตาข่ายที่ต่อลงดินเป็นอิเล็กโตรดนอกของทรงกระบอกและทรงกลมและครึ่งหนึ่งของระยะความกว้างหรือความสูงของห้องที่สั้นกว่า เป็นรัศมีของอิเล็กโตรดนอก ถ้ากำหนดให้สนามไฟฟ้าที่ทำให้อากาศเสียสภาพฉับพลัน เท่ากับ E_b จงหาค่า R_1 และ R_3 สำหรับป้อนแรงดันสูง V ที่เริ่มทำให้สนามไฟฟ้า E_{max} เท่ากับ E_b



รูปที่ 2.7 (ก) อิเล็กโตรดทรงกระบอกรัศมี R_1 ต่อกับทรงกลมรัศมี R_3

(ข) อิเล็กโตรดทรงกระบอกและทรงกลมซ้อนที่มูรรอยต่อของบัสบาร์ของสถานีไฟฟ้าย่อยฉนวนแก๊ส (GIS)

วิธีทำ โดยการประมาณ $R_3/R_4 \ll 1$

$$\text{จากสมการที่ (2.22) } R_3 \sim \frac{V}{E_b} \quad (2.23)$$

ในการหาค่า R_1 อาจพิจารณาให้สมการที่ (2.21) และสมการที่ (2.22) เท่ากันคือเท่ากับ E_b ดัง

นั้น

$$R_1 \ln \left[\frac{R_2}{R_1} \right] = R_3 \left[1 - \frac{R_3}{R_4} \right] \approx R_3 \quad (2.24)$$

หากกำหนดให้

$E_b = 15$ เควีต่อซม และ $V = 1$ เมกกะโวลต์ ย่อมแทนค่าได้ดังนี้

จากสมการที่ (2.23) $R_3 = 66.67$ ซม.

และถ้าให้ $R_2 \approx R_4 \approx 20$ (กล่าวคือเฟดานห้องสูงประมาณ 38 เมตร)

จากสมการที่ (2.24) $R_1 = 21.14$ ซม.

ตัวอย่างที่ 2 จากรูปที่ 2.7 (ข) เป็นบัสบาร์ของสถานีไฟฟ้าย่อยที่ใช้ก๊าซเป็น ฉนวน (GIS, Gas Insulated Substation) บัสบาร์เป็นทรงกระบอกกลาง และหักมุมฉากโดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ทรงกลมช่วยลดความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดหักมุม ทำให้ E_{max} คงที่ตลอดแนวบัสบาร์ ถ้ากำหนดให้รัศมีของอิเล็กทรอนิกส์ตัวนอกคงที่ (R_2, R_4 คงที่) จงหาค่า R_1 และ R_3 ที่ E_{max} ต่ำที่สุด (minimum) และค่า η (field efficiency factor)

วิธีทำ หาค่าจุดต่ำสุดของ E_{max} เมื่อแปรค่า R_1 และ R_3 ดังต่อไปนี้

$$\text{กรณีทรงกระบอก} \quad \frac{dE_{max}}{dR_1} = 0$$

$$\text{จากสมการที่ (2.22)} \quad \frac{-V}{\{R_1 \cdot \ln(R_2 / R_1)\}^2} \{ \ln(R_2 / R_1) - 1 \} = 0$$

$$\begin{aligned} \text{ตัดเศษ : } \ln \left[\frac{R_2}{R_1} \right] - 1 &= 0 \\ R_1 &= e^{-1} R_2 \end{aligned} \quad (2.25)$$

กรณีทรงกลม จากสมการที่ (2.20) ในทำนองเดียวกัน

$$\begin{aligned} \frac{dE_{max}}{dR_3} &= 0 \\ R_3 &= \frac{R_4}{2} \end{aligned} \quad (2.26)$$

ค่า field efficiency factor η ของตัวอย่างในรูปที่ 2.7(ข) สามารถหาได้ดังต่อไปนี้กรณีทรงกระบอก : แทนค่า E_{mean} และ E_{max} จากสมการที่ (2.4) และ (2.21) จะได้

$$\eta = \frac{1}{R_2 - R_1} R_1 \ln(R_2 / R_1)$$

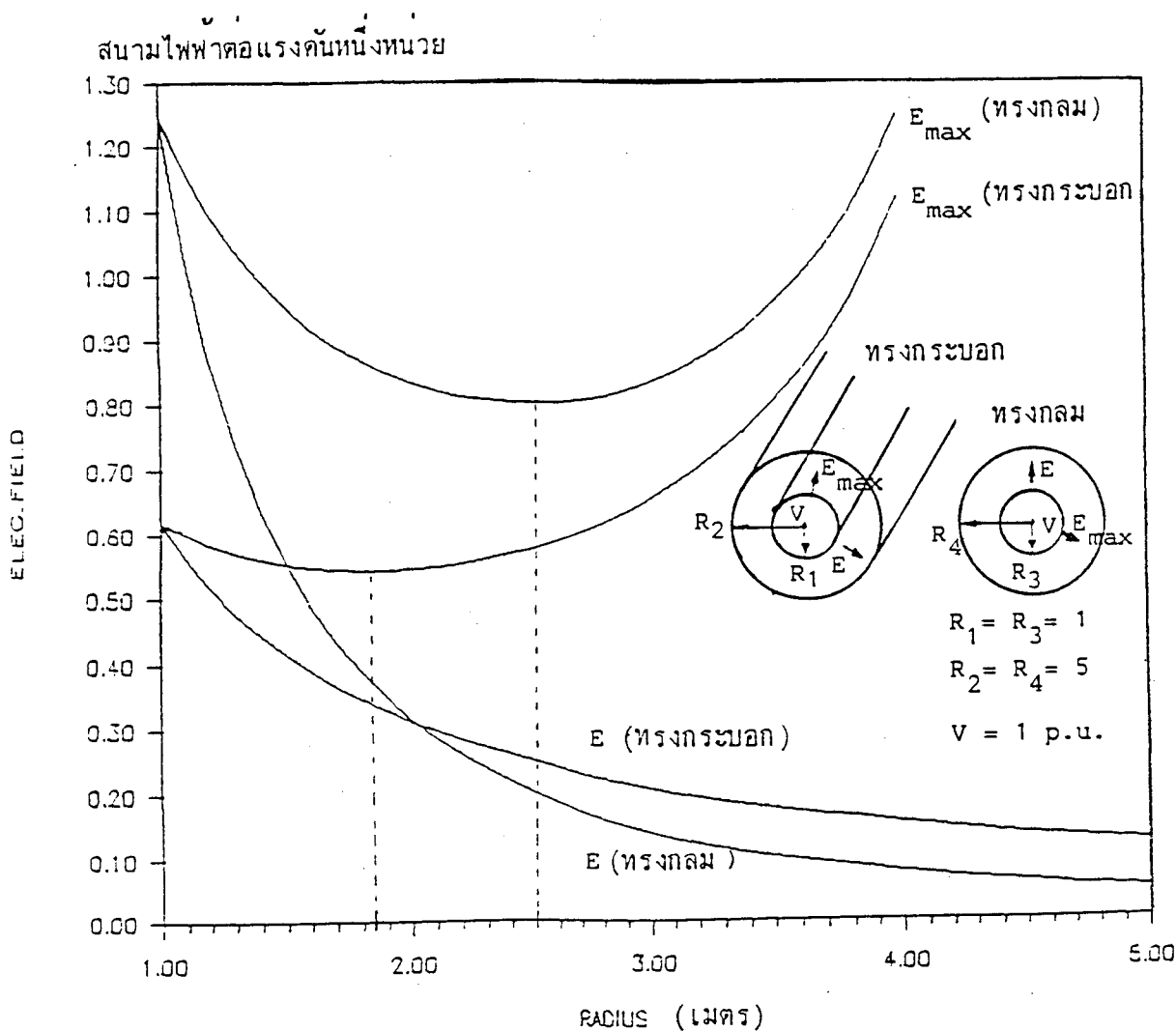
$$\text{จากสมการที่ (2.25)} \quad R_2 / R_1 = e$$

$$\eta = \frac{1}{e-1} = 0.58 \quad (2.27)$$

กรณีทรงกลม : ในทำนองเดียวกันจะได้

$$\eta = R_3/R_4 \tag{2.28}$$

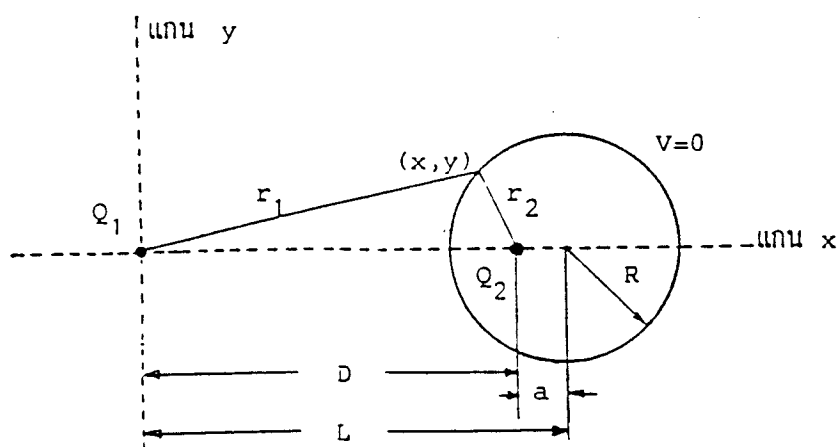
กราฟของสนามไฟฟ้าของทรงกระบอกซ้อนและทรงกลมซ้อนดังสมการที่ (2.17) , (2.18) และค่า E_{max} ตามสมการที่ (2.22) และ (2.23) ได้แสดงเป็นตัวอย่างดังรูปที่ 1.15 โดยกำหนดให้แรงดันเท่ากับ 1 หน่วย สำหรับเส้นกราฟ E (ทรงกระบอก) และ E (ทรงกลม) จะใช้ค่า $R_1 = R_3 = 1$ และ $R_3 = R_4 = 5$ แต่สำหรับ E_{max} ของทรงกระบอกและทรงกลม ได้กำหนดให้ R_3 และ R_4 เท่าเดิมและแปรค่า R_1 และ R_3 จาก 1 ไปจนถึง 4 ทำให้พบว่า E_{max} มีจุดต่ำสุดที่ค่ารัศมีดังสมการที่ (2.25) และ (2.26)



รูปที่ 2.8 กราฟสนามไฟฟ้าของทรงกระบอกซ้อนและทรงกลมซ้อนเป็นฟังก์ชันของรัศมี

2.5 สนามไฟฟ้าในช่องว่างระหว่างทรงกลม

ช่องว่างในแนวที่ต่อระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลม 2 ลูก ถูกนำมาใช้มากในการใช้วัดแรงดันสูงประเภทต่างๆ รวมทั้งใช้เป็นมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบค่าในการวัด การหาสนามไฟฟ้าในช่องว่างที่จะกล่าวต่อไปนี้จะใช้ประจุจินตภาพ (image charge) ช่วยในการวิเคราะห์ โดยไม่ต้องเฉลยสมการของ Laplace หรือ Poisson โดยตรง โดยใช้หลักการหาเส้นแรงดันสมศักย์ (equipotential line) ในขั้นแรกพิจารณาแรงดัน V ที่จุด (x, y) ใด ๆ บนเส้นรอบวงที่มีรัศมี R ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการมีประจุ Q_1 และ Q_2 วางอยู่ห่างกันเป็นระยะ D ดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สนามไฟฟ้าบนเส้นรอบวงเนื่องจาก Q_1 และ Q_2

$$V = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_1} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_2} \quad (2.29)$$

ถ้าให้ $V = 0$ และ r_2/r_1 เท่ากับค่าคงที่ k จึงได้

$$Q_2 = \frac{Q_1}{k} = -\frac{r_2}{r_1} = -\frac{(D-x)^2 + y^2}{x^2 + y^2} = -k \quad (2.30)$$

ถ้าจัดสมการใหม่เป็นสมการของวงกลมดังนี้

$$\left[x - \frac{D}{1-k^2} \right]^2 + y^2 = \left[\frac{kD}{1-k^2} \right]^2 \quad (2.31)$$

$$\text{รัศมี: } R = \frac{kD}{1-k^2} = \frac{-DQ_1Q_2}{Q_1^2 - Q_2^2}$$

$$\text{ระยะจากจุดตัดของแกน x และ y: } L = \frac{kD}{1-k^2} = \frac{DQ_1^2}{Q_1^2 - Q_2^2} = \frac{-Q_1R}{Q_2} \quad (2.32)$$

เครื่องหมายลบของค่า R และ L แสดงว่าค่าประจุ Q_1 และ Q_2 ต้องมีเครื่องหมายตรงข้ามกัน จุดศูนย์กลางของวงกลมรัศมี R อยู่ห่างจาก Q_2 เป็นระยะ a ซึ่งเท่ากับ $L-D$ เมื่อแทนค่า L จากสมการที่ (2.32) จะได้

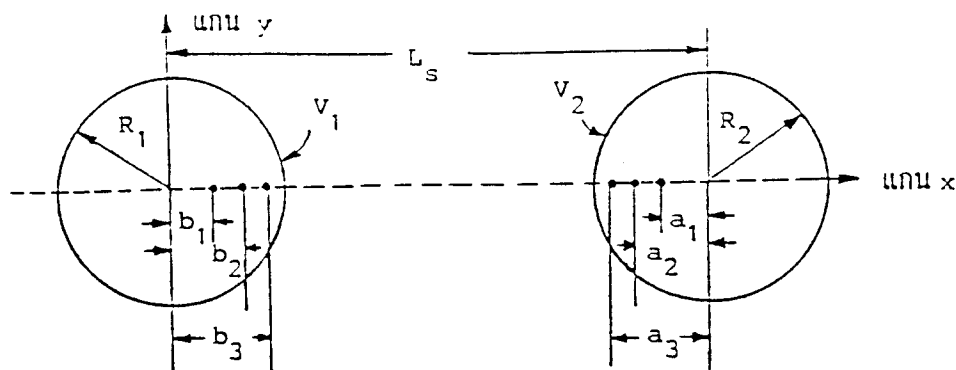
$$a = \frac{-Q_2R}{Q_1} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.32) และ (2.33) สามารถหา Q_2 ในเทอมของ Q_1 และระยะต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

$$Q_2 = -Q_1 \frac{R}{L} \quad (2.34)$$

$$a = \frac{R^2}{L} \text{ และ } Q_2 = -Q_1 \frac{a}{R} \quad (2.35)$$

จากการวิเคราะห์นี้ สรุปได้ว่าเส้นรอบวงของวงกลมมีรัศมี R มีจุดศูนย์กลางห่างจากตำแหน่ง Q_1 เป็นระยะ L จะเป็นเส้นแรงดันสมศักย์ที่มีแรงดันเท่ากับศูนย์ได้ ถ้านำประจุชนิดตรงข้าม Q_2 มีขนาดดังสมการที่ (2.34) ไปวางไว้ภายในวงกลมห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากับ a และโดยหลักการนี้สามารถกำหนดระบบในการวางประจุเพื่อให้ผลแทนการมีอิเล็กโตรดทรงกลมที่วางไว้ห่างกันเป็นระยะ L_s และมีแรงดันเท่ากับ V_1 และ V_2 ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งจะนำมาเป็น ตัวอย่างในการวิเคราะห์คำนวณ



รูปที่ 2.9 ช่องว่างระหว่างทรงกลม

การหาแรงดันและสนามไฟฟ้าในแนวต่อจุดศูนย์กลางระหว่างทรงกลมโดยอาศัยหลักการสร้างประจุจินตภาพ กระทำได้โดยการสร้างประจุให้วางอยู่ที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อให้ผิวทรงกลมมีแรงดันเป็นศูนย์ แล้วนำผลรวมของประจุมหาวิเคราะห์หาสนามไฟฟ้าต่อไป ดังขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 จากรูปที่ 2.9 เริ่มคิดเฉพาะอิเล็กโตรดทรงกลมด้านขวามือที่มีรัศมี R_2 และมีแรงดัน V_2 โดยให้สมมุติว่ามีประจุ Q_2 อยู่ที่จุดศูนย์กลางของทรงกลม และทำให้เกิดแรงดัน V_2 ที่ผิวทรงกลมนั้น ประจุจินตภาพ Q_2 มีสมการสัมพันธ์กับ V_2 ดังนี้

$$Q_2 = 4\pi\epsilon_2 V_2 R_2 \quad (2.36)$$

ขั้นที่ 2 จากขั้นที่ 1 ได้ประจุ Q_2 ที่ให้ผลเป็นแรงดัน V_2 ที่ผิวทรงกลมด้านขวามือแล้วต่อไปพิจารณาถึงอิเล็กโตรดทรงกลม รัศมี R_1 และยังไม่คำนึงถึงแรงดัน V_1 ที่อยู่ด้านซ้ายมือ ดังในรูปที่ 2.9 ถ้าจะให้ผิวทรงกลมเป็นเพียงผิวสมคักย์มีค่าแรงดันเป็นศูนย์ เฉพาะจากผลของการมีประจุ Q_2 และการได้เพิ่มประจุ Q_{b1} ตามหลักการของสมการที่ (2.34) และ (2.35) การเพิ่มประจุ Q_{b1} นี้ต้องวางไว้ห่างจากจุดศูนย์กลางทรงกลม R_1 เป็นระยะ b_1 ไปทางขวามือ และมีสูตรคำนวณได้ตามสมการที่ (2.34) และ (2.35) ดังต่อไปนี้

$$Q_{b1} = \frac{-Q_2 R_1}{L_s} = \frac{-(4\pi\epsilon_2 V_2) R_1 R_2}{L_s} \quad (2.37)$$

$$b_1 = \frac{R_1^2}{L_S} \quad (2.38)$$

แต่การเพิ่มประจุ Q_{b1} นี้ จะทำให้ผิวทรงกลม R_2 มีแรงดันต่างไปจากเดิม คือ V_2 ดังนั้นจึงต้องมีการเพิ่มประจุ Q_{a1} ที่ระยะ a_1 ห่างจากจุดศูนย์กลางของทรงกลม R_2 เพื่อหักล้างผลของการเพิ่ม Q_{b1} ให้ได้แรงดัน V_2 เช่นเดิม ค่า Q_{a1} และ a_1 หาได้โดยอาศัยสมการที่ (2.34) และ (2.35) ดังนี้

$$Q_{b1} = \frac{-Q_{b1} R_2}{(L_S - b_1)} = \frac{-(4\pi \epsilon V_2) R_1 R_2^2}{L_S (L_S - b_1)} \quad (2.39)$$

$$a_1 = \frac{R_2^2}{(L_S - b_1)} \quad (2.40)$$

แต่การเพิ่ม Q_{a1} ทำให้ผิวสมตักย์ที่ผิวทรงกลม R_1 เปลี่ยนแปลงไปจากศูนย์ จึงต้องเพิ่ม Q_{b2} ที่ระยะ b_2 เสมือนย้อนไปเป็นการเพิ่มประจุ Q_{b1} อีกเช่นนี้เรื่อย ๆ ไป การเพิ่มประจุควรดำเนินไปจนพบว่าค่าประจุที่เพิ่มมีค่าน้อยมากจนตัดผลในการเพิ่มออกได้ สุดท้ายของขั้นนี้ย่อมได้จำนวนประจุที่ทำให้ผิวทรงกลม R_2 มีแรงดัน V_2 และผิวทรงกลม R_1 มีแรงดันเป็นศูนย์

ขั้นที่ 3 ในทำนองเดียวกันในการหาประจุและระยะในขั้นที่ 1 และ 2 จะสามารถ หาประจุและระยะห่างอีกกลุ่มหนึ่ง โดยเริ่มจากประจุ Q_1 ที่ถูกสมมุติให้นำมาวางที่จุดศูนย์กลางของทรงกลม R_1 เพื่อให้แรงดันที่ผิวเป็น V_1 ทำนองเดียวกันกับขั้นที่ 1 และผิวทรงกลม R_2 เป็นผิวสมตักย์ที่มีแรงดันเป็นศูนย์ ในทำนองเดียวกันกับขั้นที่ 2

ขั้นที่ 4 โดยอาศัยหลักการทับซ้อน (superposition) ของประจุทั้ง 2 กลุ่มที่หาได้จากขั้นที่ 2 และ 3 ย่อมได้ผิวทรงกลม R_1 และ R_2 มีแรงดันเป็น V_1 และ V_2 ตามลำดับ ในตารางได้รวบรวมสูตรของประจุจินตภาพและระยะที่บอกตำแหน่งของประจุจากจุดศูนย์กลางของทรงกลมไว้ดังนั้นประจุจินตภาพรวมทั้งหมดในทรงกลม R_1 และ R_2 ซึ่งจะใช้สัญญลักษณ์ Q_{R1} และ Q_{R2} ตามลำดับ จะหาได้จากผลรวมทั้งหมดของคอลัมน์ประจุในแต่ละคอลัมน์

เมื่อทราบประจุจินตภาพแล้ว แรงดัน V ที่จุด (x,y,z) จุดหนึ่ง เนื่องจากประจุ Q อยู่ที่ตำแหน่ง (x', y', z') ใด ๆ สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

ถ้าให้ระยะห่างจากจุด (x,y,z) ไปยังจุด (x', y', z') เท่ากับ R ดังนั้น

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (2.41)$$

$$\text{และ } V(x,y,z) = \frac{\sum Q(x',y',z')}{4\pi \epsilon R} \quad (2.42)$$

ในที่นี้จะพิจารณาในช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดทรงกลม R_1 และ R_2 ในแนวเส้นต่อระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลม ซึ่งกำหนดให้เป็นแนวแกน x ซึ่งมีแต่เฉพาะค่า x เท่านั้น จึงหาค่าแรงดันที่ตำแหน่ง x ใด ๆ และสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งนั้นเนื่องจากประจุทั้งหมดได้ดังต่อไปนี้

$$V(x) = \frac{\sum Q(x')}{4\pi \epsilon (x-x')} \quad (2.43)$$

$$E(x) = \frac{\sum Q(x')}{4\pi \epsilon (x-x')^2} \quad (2.44)$$

สนามไฟฟ้า E ดังสมการ (2.44) เป็นผลรวมทางพีชคณิตของสนามไฟฟ้าและค่า Q มีทั้งค่าบวกและลบ ดังจะได้แสดงในตัวอย่างการคำนวณต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 3 อากาศถูกนำมาใช้เป็นฉนวนระหว่างอิเล็กโตรดทรงกลม ดังในรูปที่ 1.17 ถ้ากำหนดให้อากาศเริ่มเกิดการเสียดสภาพฉนวน (breakdown) ที่ค่าสนามไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ต่อ ซม. และให้ระยะ $R_1 = R_2 = 6.25$ ซม., $L_s = 23.5$ ซม. จงคำนวณหาค่าแรงดัน V_1 ที่ทำให้อากาศเสียดสภาพฉนวน สมมุติให้ทรงกลม R_2 ต่อลงดินทำให้ $V_2 = 0$

วิธีทำ การคำนวณจะกระทำได้โดยใช้สูตรในตาราง เฉพาะครึ่งหนึ่ง เนื่องจาก $V_2 = 0$ ในที่นี้ กำหนดให้ $K = 4\epsilon_0\pi V_1$

ทรงกลม R_1		ทรงกลม R_2	
ระยะ (เมตร)	ประจุ (คูลอมบ์)	ระยะ (เมตร)	ประจุ (คูลอมบ์)
-	$Q_1 = 0.0625 K$	$a_1 = 0.01662$	$Q_{a1} = -0.01662 K$
$b_1 = 0.01789$	$Q_{b1} = 0.00476 K$	$a_2 = 0.01799$	$Q_{a2} = -0.00137 K$
$b_2 = 0.01800$	$Q_{b2} = 0.00039 K$	$a_3 = 0.01800$	$Q_{a3} = -0.00011 K$

ให้ $E(x) =$ สนามไฟฟ้าที่ระยะ x ที่วัดระยะจากจุดศูนย์กลางของทรงกลม R_1

$$E(x) = \frac{K}{4\pi \epsilon_0} \left[\frac{0.0625}{x^2} + \frac{0.00476}{(x - 0.01789)^2} + \frac{0.00039}{(x - 0.018)^2} + \dots \right. \\ \left. - \frac{(-0.01662)}{(0.235 - 0.0162 - x)^2} - \frac{-(0.00137)}{(0.235 - 0.01799 - x)^2} - \frac{-(0.00011)}{(0.235 - 0.018 - x)^2} \right] \quad (2.46)$$

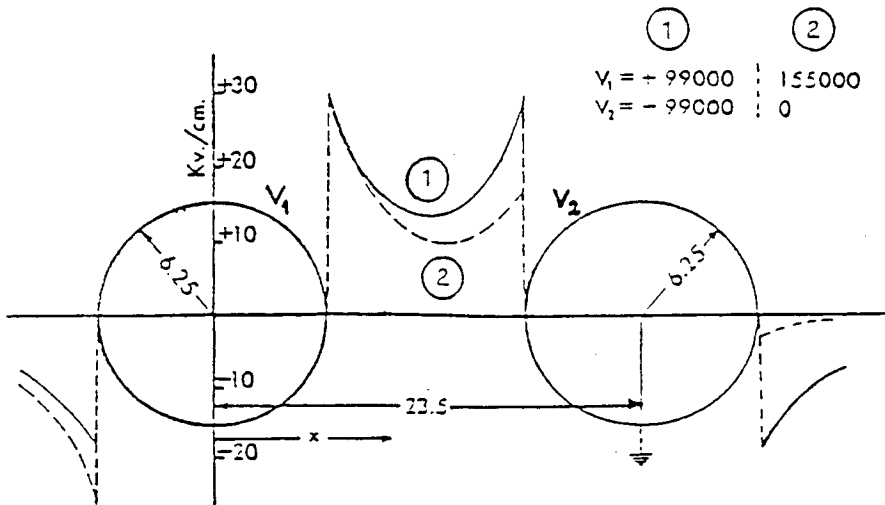
อากาศจะเสียดภาพฉับพลันเมื่อสนามไฟฟ้า E_{max} ถึงค่า 30 กิโลโวลต์ ต่อ ซม.สนามไฟฟ้ามีค่าเป็น E_{max} ที่ผิวทรงกลม คือ $x = 0.0625$ ม. ดังนั้นเมื่อนำค่า E_{max} และ x ไปแทนค่า จะได้

$$E_{max} = \frac{K}{4\pi \epsilon_0} [19.335]$$

เมื่อแทนค่า K จึงได้ $E_{max} = 19.335 V_1 = 30 \times 100$ กิโลโวลต์ต่อเมตร

$$V_1 = 155.16 \text{ กิโลโวลต์}$$

การคำนวณตามตัวอย่างที่ 3 สามารถกระทำซ้ำๆกัน เพื่อนำผลไปเขียนกราฟได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 นี้ ซึ่งเป็นกราฟของสนามไฟฟ้าบนแนวเส้นต่อจุดศูนย์กลางของทรงกลม และพบว่าสำหรับกราฟเส้นที่ 1 E_{max} อยู่ที่ผิวอิเล็กทรอนิกส์ด้านในทั้งสองลูก แต่สำหรับกราฟเส้นที่ 2 อยู่ที่ผิวด้านขวาสุดของทรงกลมซ้าย



รูปที่ 2.10 กราฟสนามไฟฟ้าบนเส้นต่อระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลม

หน่วยที่ 3

ฉนวนไฟฟ้า

ฉนวนไฟฟ้าที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแรงสูง แบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. ฉนวนไฟฟ้าก๊าซ
2. ฉนวนไฟฟ้าของเหลว
3. ฉนวนไฟฟ้าของแข็ง

3.1 ฉนวนไฟฟ้าก๊าซ

อากาศหรือก๊าซดังกล่าวอย่างในตารางที่ 3.1 เป็นฉนวนไฟฟ้าที่นำมาใช้ในงานไฟฟ้าแรงสูง อาจนำมาใช้ร่วมกับฉนวนชนิดของเหลวหรือของแข็ง ก๊าซสามารถนำมาใช้เป็นฉนวนที่ความดันระดับต่าง ๆ และสูญญากาศก็สามารถนำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้เช่นกัน เช่น นำมาใช้ในเบรกเกอร์

ตารางที่ 3.1 ก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่นำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า [7]

ก๊าซ	ความทนต่อสนามไฟฟ้าที่ ยบกับของอากาศ(เท่า)	อุณหภูมิที่เปลี่ยนสถานะ เป็นของเหลว °C
Hydrogen , H ₂	0.6	-
Nitrogen , N ₂	1.0	- 210
Air	1.0	ประมาณ - 125
Sulphur hexafluoride , SF ₆	2.5	- 62
Freon (Dichloro difluoro methane) , CCl ₂ F ₂	2.5	- 30

ฉนวนไฟฟ้าก๊าซควรมีคุณสมบัติทั่วไป ได้แก่ มีความทนต่อสนามไฟฟ้าสูง ราคาไม่แพง เปลี่ยนเป็นสถานะของเหลวที่อุณหภูมิที่นำมาใช้งานบางกรณีฉนวนก๊าซต้องเป็นตัวระบายความร้อนที่ดีด้วย ก๊าซที่ใช้ไม่ควรไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับสารชนิดอื่น ๆ และทนต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของก๊าซในขณะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionisation) หรือขณะเกิดการปล่อยประจุ (discharge)

เมื่อป้อนแรงดันสูงให้แก่ขั้วอิเล็กโทรดก๊าซอาจเกิดการไอออนหรือเปลี่ยนไปเป็นตัวนำไฟฟ้า การปล่อยประจุ (discharge) จำแนกออกได้เป็น 2 ชนิด คือ การปล่อยประจุบางส่วน (partial discharge) เช่น การเกิดโคโรนาในบริเวณที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง และการปล่อยประจุทำลาย (disruptive discharge) ทำให้ก๊าซเสียสภาพฉนวน (break-down) กลไกในการเสียสภาพฉนวนของก๊าซมี 2 แบบ คือ แบบทาวน์เซนต์ (Townsend mechanism) และแบบสตรีมเมอร์ (Streamer mechanism) องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อกลไกการเสียสภาพฉนวน ได้แก่ ขนาดและรูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้าและเวลาที่ป้อนแรงดันชนิดของวัสดุและรูปลักษณะของอิเล็กโทรด ความดัน อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละออง รวมทั้งคุณสมบัติของก๊าซในด้านฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ก๊าซจำแนกออกได้เป็นก๊าซไฟฟ้าบวก (electropositive gas) และก๊าซไฟฟ้าลบ (electronegative gas) ก๊าซไฟฟ้าลบมีความแตกต่างที่เด่นชัดจากก๊าซไฟฟ้าบวกคือ การขาดหนึ่งหรือสองอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนอกสุดของอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซซึ่งทำให้มันต้องการรับอิเล็กตรอนอิสระจากภายนอกเพิ่มขึ้น เพื่อทำให้อะตอม หรือ โมเลกุลนั้นเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบ ตัวอย่างได้แก่ กลุ่มฮาโลเจนคือ F, Cl, Br, และ Astatine (At) ในกลุ่มนี้ขาดอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกหนึ่งตัว พวกที่ขาดอิเล็กตรอนสองตัว ได้แก่ O, S และ Se พลังงานที่อะตอมต้องคายออกมา ในการรับอิเล็กตรอนอิสระหนึ่งตัวนี้ เรียกว่า electron affinity แต่การสร้างอนุภาคประจุไฟฟ้าลบ จะช่วยลดจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในก๊าซชนิดนั้น อิเล็กตรอนอิสระภายในก๊าซที่อยู่ในสนามไฟฟ้า เป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดการแตกตัวของอะตอมและโมเลกุลที่เป็นกลางโดยการชน และทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอน และเกิดอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน ที่อาจนำไปสู่การเกิดเบรกควานี้ได้ ดังนั้นก๊าซไฟฟ้าลบ เช่น SF₆, CCl₂F₂ จึงเป็นฉนวนที่มีความทนต่อการเกิดเบรกควานี้ได้ดี

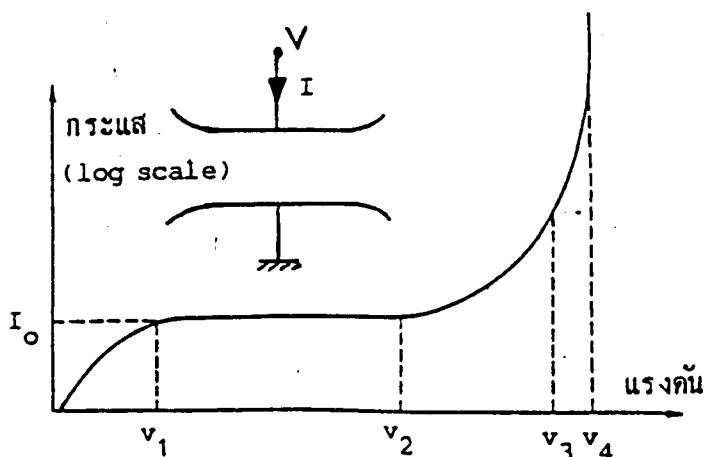
สัมประสิทธิ์ของการเกิดไอออนและอิเล็กตรอนอิสระโดยการชนกัน

3.1.1 TOWNSEND FIRST IONISATION COEFFICIENT (α)

การศึกษาครั้งแรกเกี่ยวกับกระแสที่ไหลผ่านก๊าซระหว่างอิเล็กโทรดระนาบที่ขนานกัน โดยให้กระแสเป็นฟังก์ชันของแรงดันที่ป้อนให้แก่ อิเล็กโทรดคู่หนึ่งของทาวน์เซนต์ (Townsend)[13]พบว่า กระแสในขณะเริ่มคั้นป้อนแรงดันต่ำ ๆ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดัน ดังรูปที่ 3.1 เมื่อแรงดันเพิ่มถึงค่า V_1 กระแสจะมีค่าเท่ากับ I_0 และในช่วงจากค่า V_1 ถึง V_2 กระแสยังคงเท่ากับ I_0 ซึ่งเป็นกระแสอิ่มตัว ที่อาจเกิดจากรังสีอุลตราไวโอเลตตกกระทบผิวแคโทดแล้วให้กระแสอิเล็กตรอนออกมาอย่างสม่ำเสมอ ต่อมาการเพิ่มแรงดันมากยิ่งขึ้นในช่วง V_2 ถึง V_3 กระแสจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเอกซ์โป เนนเชียล กระแสที่เพิ่มขึ้นนี้ทาวน์เซนต์ได้พบจากการทดลองว่าเป็นผลที่เกิดจากอิเล็กตรอนอิสระจากแคโทดวิ่งชนกับโมเลกุลและอะตอมที่เป็นกลาง ในระหว่างการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไปยังแอโนด แล้วทำให้เกิดการแตกตัวให้อิออนและอิเล็กตรอนอิสระเป็นจำนวนมากในช่วงถัดไปคือช่วง V_3 ถึง V_4 ปริมาณกระแสที่วัดได้ในวงจรภายนอกจะเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ซึ่งมีผลมาจากการเกิดอิเล็กตรอนอิสระ

ได้ในวงจรรายนอกจะเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย ซึ่งมีผลมาจากการเกิดอิเล็กตรอนอิสระ

เพิ่มขึ้นที่ผิวแคโทดเนื่องจากประจุบวกในก๊าซวิ่งไปชนผิวแคโทด การเพิ่มแรงดันสูงกว่า V_4 ขึ้นไป ก๊าซจะเปลี่ยนจากสภาพการเป็นฉนวนไปเป็นตัวนำ ซึ่งเป็นการเกิดการเสียหายฉับพลันของฉนวน

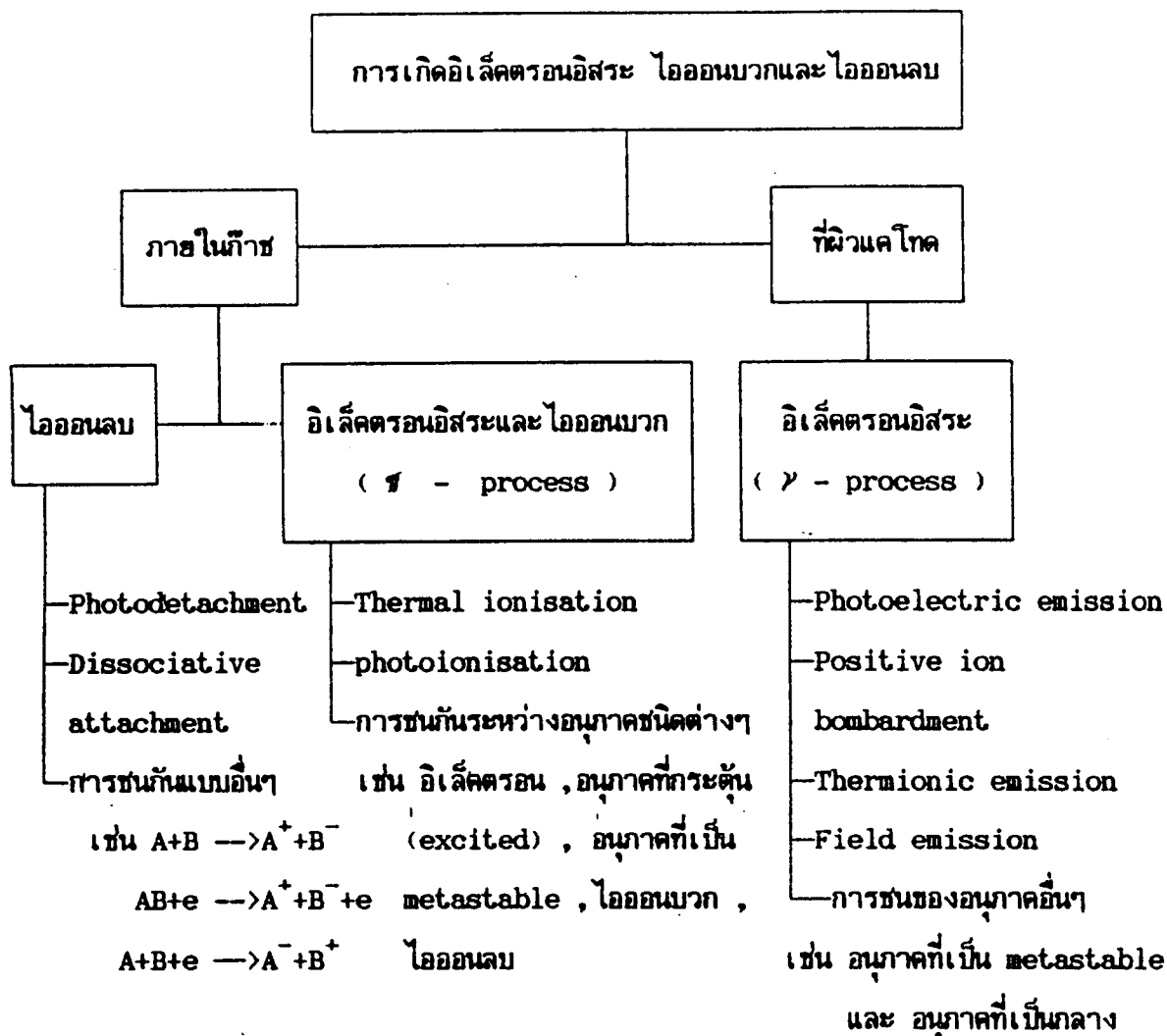


รูปที่ 3.1 กราฟของกระแสและแรงดันของก๊าซก่อนเกิดการเสียหายฉับพลัน

3.1.2 กลไกการเสียหายฉับพลัน (Breakdown Mechanism)

ก๊าซที่อยู่ในสนามไฟฟ้ามีการแตกตัวได้อิออนบวก อิเล็กตรอนอิสระ และเกิดการ รวมตัวของอนุภาคได้อิออน ความชบวนการต่าง ๆ ที่อธิบายไว้แล้ว จึงสรุปได้เป็นแผนผังทั้งหมดของชบวนการต่าง ๆ ดังในรูปที่ 3.2

การเสียหายฉับพลันจำแนกออกได้เป็นประเภทที่เกิดขึ้นรวดเร็วมาก ในช่วงเวลาเป็นไมโครวินาที กับอีกประเภทเกิดขึ้นได้ในเวลาที่นานกว่าจึงแบ่งออกเป็น แบบทาวนด์เซนส์ (Townsend mechanism) และแบบสตรีมเมอร์ (Streamer mechanism)

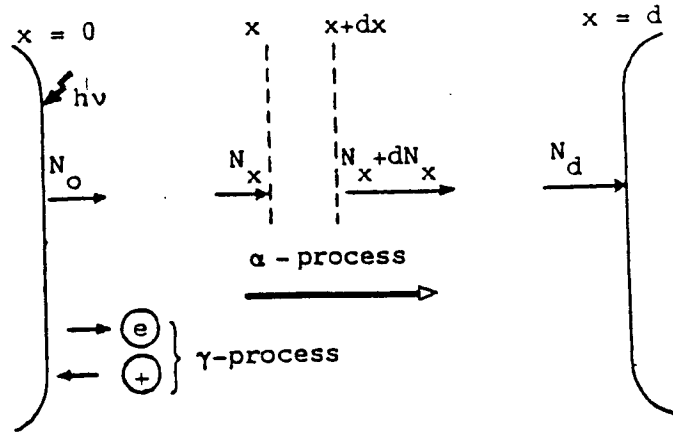


รูปที่ 3.2 แผนผังขบวนการเกิดไอออนลบ ไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระ

3.1.3 กลไกการเสียดสภาพฉับพลันแบบทาวน์เซนด์

กลไกนี้ใช้พิจารณาในกรณีของก๊าซอยู่ในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ และความดันของก๊าซไม่สูงมาก เช่น ที่ความดันบรรยากาศ จากรูปที่ 3.3 ถ้าเริ่มพิจารณาการเกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้นในก๊าซเป็นจำนวน N_0 โดยเกิดจากพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ที่ตกกระทบผิวแคโทด และโมเลกุล ของก๊าซที่อยู่ใกล้ ๆ กับแคโทด แล้วก่อให้เกิดการแตกตัวขึ้น N_0 จึงเป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอและเคลื่อนที่ค่อนข้างรวดเร็วไปในทิศทางทางกับทิศทางสนามไฟฟ้าไปยังแอโนด N_0 นี้ทำให้เกิดกระแส i_0 ในรูปที่ 3.1 เมื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้น อิเล็กตรอนอิสระ N_0 ที่ระยะ $x = 0$ ยิ่งถูกเร่งความเร็วในสนามไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการชนกับโมเลกุลหรืออนุภาคที่เป็นกลางอื่น ๆ แล้วทำให้เกิดไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระได้มากขึ้น ซึ่งเป็น α -process จากรูปที่ 3.3 ถ้าพิจารณาจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้น (dN_x) จากอิเล็กตรอนจำนวน N_x ที่ระยะ x เคลื่อนที่ไปถึง $x + dx$ จากสมการต่อไปนี้จะสามารถเขียนสมการของ dN_x ได้ดังต่อไปนี้

$$dN_x = N_x(a-\eta)dx \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.3 การเกิดขบวนการ α และ ในกลไกแบบทาวน์เชนด์

ถ้าพิจารณาการอินทิเกรตเพื่อหาค่า N_x หรือจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่ระยะ x ใดๆ และให้ $(a-\gamma)$ ไม่ขึ้นอยู่กักระยะ x จึงได้

$$\int_{N_x}^{N_x} (1/N_x) dN_x = \int_0^X (\alpha - \eta) dx = (\alpha - \eta)X \quad (3.2)$$

$$N_x = N_0 \exp\left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right] = N_0 \exp[(\alpha - \eta)x] \quad (3.3)$$

ถ้าให้ K คือจำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น ภายในก๊าซต่อหนึ่งอิเล็กตรอนในจำนวน N_0 ที่ได้เคลื่อนที่ไปถึงแอโนดแล้ว และ K ย่อมเท่ากับจำนวนครั้งของการชนที่ก่อให้เกิดการแตกประจุ หรือจำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งอิเล็กตรอน นั่นคือ

$$K = \int_0^d \frac{N_x}{N_0} \cdot \alpha dx \quad (3.4)$$

$$\text{เมื่อแทนค่า } N : K = \frac{\alpha}{\alpha - \eta} \{ \exp[(\alpha - \eta)d] - 1 \} \quad (3.5)$$

ใน α -process ครั้งที่หนึ่ง จำนวนอิเล็กตรอนอิสระเริ่มต้นที่แคโทด N_0 ตัว เมื่อได้เคลื่อนที่ไปถึงแอโนดจะเกิดจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นอีก KN_0 ตัว เท่ากับจำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นในก๊าซ จำนวนอิเล็กตรอนทั้งหมดที่ชนแอโนดจึงเท่ากับ $N_0 + KN_0$ ตัว และไอออนบวก KN_0 ตัว ก็วิ่งชนแคโทด จึงให้อิเล็กตรอนอิสระในขบวนการที่เรียกว่า γ -process เป็นจำนวน γKN_0 ตัว และอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้จะถูกเร่งความเร็วในการวิ่งไปยังแอโนดอีก ทำให้เกิด α -process เป็นครั้งที่สอง และได้อิเล็กตรอนอิสระที่เพิ่มขึ้นอีกเท่ากับ $K(\gamma KN_0)$ ซึ่งเท่ากับ จำนวนไอออนบวกที่เกิดขึ้นใหม่อีกการเกิด γ -process เป็นครั้งที่หนึ่งและการเกิด α -process เป็นครั้งที่สองนี้ได้อิเล็กตรอนอิสระที่ชนแอโนดอีกเท่ากับ $\gamma KN_0 + K(\gamma KN_0)$ หรือ $\gamma K(N_0 + KN_0)$ ทำนองเดียวกันนี้ ในการเกิด γ -process และ α -process ครั้งถัดไปจะได้จำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่แอโนดอีกเท่ากับ $(\gamma K)^2(N_0 + KN_0)$ เป็นดังนี้เรื่อย ๆ ดังในตารางที่ 3.2

ถ้าให้ N เป็นจำนวนอิเล็กตรอนอิสระทั้งหมดที่เกิดจากขบวนการ α และ U ต่อหน่วยเวลาใด ๆ N จึงเท่ากับผลรวมของคอลัมน์สุดท้ายในตารางที่ 3.2 นั่นคือ

$$N = N_0(1+K) [1 + \gamma K + (\gamma K)^2 + (\gamma K)^3 + \dots] \quad (3.6)$$

ถ้าค่า $\gamma K > 1$ ในสมการที่ (3.6) N ย่อมเข้าสู่อนันต์ พิจารณาต่อไปมิได้ แต่ถ้า $K < 1$ สมการที่ (3.6) สามารถเขียนเป็นสูตรจากอนุกรมเรขาคณิตได้ดังนี้

$$K < 1 : \quad N = \frac{N_0(1+K)}{(1-\gamma K)} \quad (3.7)$$

ตารางที่ 3.2 จำนวนอิเล็กตรอนอิสระในการเกิดการเสียหายยับยั้งแบบทาวแซนด์

ที่แคโทด	จำนวนอิเล็กตรอนอิสระ ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านก๊าซ (เท่ากับจำนวนไอออนบวก)	ที่แอโนด
N_0	KN_0	$N_0 + KN_0$
γKN_0	$\gamma K^2 N_0$	$\gamma K(N_0 + KN_0)$
$\gamma^2 K^2 N_0$	$\gamma^2 K^3 N_0$	$(\gamma K)^2(N_0 + KN_0)$
$\gamma^3 K^3 N_0$	$\gamma^3 K^4 N_0$	$(\gamma K)^3(N_0 + KN_0)$

เมื่อคูณค่า N ด้วยประจุของอิเล็กตรอนจึงได้ค่ากระแส (I) ของอิเล็กตรอน ซึ่งวัดได้ในวงจรไฟฟ้าที่ต่อกับอิเล็กโตรด ดังนั้นเมื่อแทนค่า K และให้ I_0 เป็นกระแสของอิเล็กตรอนจำนวน N_0 ซึ่งเกิดขึ้นในก๊าซ สมการที่ (3.7) จึงสามารถเปลี่ยนไปเป็นสมการของกระแส ดังนี้

$$I = \frac{I_0 \left[1 + \frac{\alpha}{\alpha - \eta} (e^{(\alpha - \eta)d} - 1) \right]}{1 - \frac{\alpha \gamma}{\alpha - \eta} (e^{(\alpha - \eta)d} - 1)} \quad (3.8)$$

ในการเกิดเสถียรภาพฉับพลันก๊าซจะกลายเป็นตัวนำ กระแสจะมีค่าสูงมากซึ่งหมายถึงตัวส่วนของสมการที่ (3.7) และ (3.8) มีค่าโดยประมาณเท่ากับ 0 จึงได้สมการที่เรียกว่า Townsend breakdown criterion ดังนี้

$$\gamma K = 1 \quad (3.9)$$

$$\frac{\alpha \gamma}{\alpha - \eta} (e^{(\alpha - \eta)d} - 1) = 1 \quad (3.10)$$

สมการที่ (3.9) หรือ (3.10) เป็นสมการที่นำไปคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและแรงดันที่มีการเสถียรภาพฉับพลันหรือค่าที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ได้ในกรณีที่ $(\alpha - \eta)$ แปรตามค่า x สมการที่ (3.10) จะอยู่ในรูปของอินทิเกรชันดังต่อไปนี้

$$\gamma \int_0^d \exp \int_0^x [(\alpha - \eta) dx] dx = 1 \quad (3.11)$$

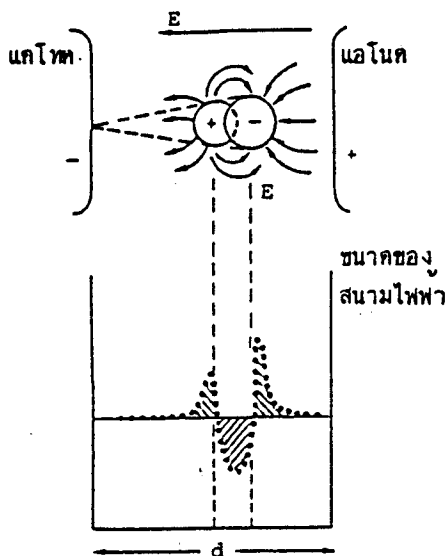
3.1.4 กลไกการเสถียรภาพฉับพลันแบบสตรีมเมอร์

การเกิดอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนหลาย ๆ กลุ่มและการเกิด γ -process ต้องใช้เวลานาน การเสถียรภาพฉับพลันของฉนวนในเวลาสั้น ๆ เช่น ประมาณหนึ่งไมโครวินาที หรือน้อยกว่าจึงไม่สามารถนำ γ -process มาใช้อธิบายได้และจำเป็นต้องพิจารณาถึงรายละเอียดที่ไม่ได้นำมาพิจารณาในกลไกแบบทาวน์เชนด์ ได้แก่

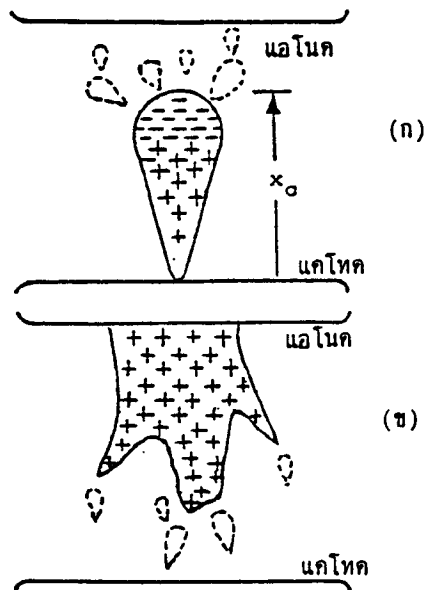
- ก. ค่า γ และ ไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับระยะห่างจากแคโทดและสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ
- ข. สนามไฟฟ้าของกลุ่มอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าที่ทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดไม่สม่ำเสมอ
- ค. แรงดันที่มิถอน เช่น อิมพัลส์ ซึ่งทำให้สนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

กลไกการเกิดการเสถียรภาพฉับพลันแบบสตรึมเมอร์ ระยะเวลาสั้นของอิเล็กตรอนเพียงกลุ่มเดียว ซึ่งมีจุดเริ่มต้นจากอิเล็กตรอนอิสระเพียงตัวเดียวที่ผิวแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนอิสระนี้วิ่งไปในสนามไฟฟ้า (E) ก็จะทำให้เกิดกลุ่มของอนุภาค ประจุไฟฟ้าบวกและลบขึ้นภายในระยะเวลาสั้นของอิเล็กตรอน ดังในรูปที่ 3.4 อิเล็กตรอนส่วนมากได้วิ่งไปถึงแอโนดหมดแล้วจึงมิได้แสดงในรูป อนุภาคในระยะเวลาสั้นนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าบริเวณรอบ ๆ ระยะเวลาสั้น สนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดที่บริเวณขีดส่วนตัวเมื่อเทียบกับสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ซึ่งมีค่าเท่ากับแรงดันระหว่างอิเล็กโทรด (V)หารด้วยระยะช่องว่าง (d)

กลไกการเสถียรภาพฉับพลันแบบสตรึมเมอร์ กำหนดขึ้นตามปรากฏการณ์ที่ได้จากผลการทดลอง โดยพบว่าในการเกิดระยะเวลาสั้นของอิเล็กตรอนขึ้น และมีความยาวถึง x_c ดังในรูปที่ 3.5 (ก) จำนวนอนุภาค ภายในระยะเวลาสั้นอาจสะสมไว้ถึงจำนวนประมาณ 10^8 ตัว ซึ่งเป็น ปริมาณที่มาก จนสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าสูง และระยะเวลาสั้นถูกเปลี่ยนสภาพไปเป็นทางนำไฟฟ้าหรือพลาสมาซึ่งเรียกว่าสตรึมเมอร์ การก่อตัวของสตรึมเมอร์นี้อาจแยกออกได้เป็นการเกิดสตรึมเมอร์ไปทางแอโนด และการเกิดสตรึมเมอร์ไปทางแคโทด ดังในรูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) ตามลำดับ การเกิดสตรึมเมอร์ในช่วงแรก ดังรูปที่ 3.5 (ก) จะมีการเกิดไอออนแบบโฟโต (photoionisation) ที่บริเวณรอบ ๆ ช่วงหัวของระยะเวลาสั้น และมีการคายพลังงานโฟตอนเกิดขึ้นด้วย จึงทำให้เกิดระยะเวลาสั้นย่อยของอิเล็กตรอนขึ้นโดยรอบ ในเวลาต่อมาอนุภาคประจุไฟฟ้าบวกที่เคลื่อนตัวได้ช้ากว่าอิเล็กตรอน และยังคงอยู่ในก๊าซดังในรูปที่ 3.5 (ข) จะทำให้สนามไฟฟ้ายังเปลี่ยนแปลงไป ผลเช่นนี้เรียกกันว่า space charge effect ซึ่งต่อมาจะเกิดระยะเวลาสั้นย่อยขึ้นทางด้านแคโทด และอาจทำให้เกิดการเสถียรภาพฉับพลันในที่สุด



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้า เนื่องจากกลุ่มอนุภาคประจุไฟฟ้า ในระยะเวลาสั้นของอิเล็กตรอน



รูปที่ 3.5 (ก) การเกิดสตรึมเมอร์ไปทางแอโนด
(ข) การเกิดสตรึมเมอร์ไปทางแคโทด

การวิเคราะห์คำนวณกลไกนี้เป็นเรื่องค่อนข้างยาก เนื่องจากการเสถียรภาพฉับพลันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นขบวนการที่ซับซ้อนยิ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการเกิดอะวาลานซ์ย่อยของการเกิดไอออนแบบโฟโต อย่างไรก็ตามได้มีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Raether และ Meek [17] เสนอโมเดลไว้ว่า การเสถียรภาพฉับพลันตามกลไกแบบสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นได้เมื่ออะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนในก๊าซมีความยาวเท่ากับความยาววิกฤต (critical length, x_c) และมีประจุค้าง (space charge) ที่ทำให้สนามไฟฟ้าของอนุภาค (E_f) ในแนวรัศมีรอบ ๆ หัวของอะวาลานซ์ ดังในรูปที่ 3.4 มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอระหว่างอิเล็กโทรด (E) ทำให้อะวาลานซ์เปลี่ยนไปเป็นสตรีมเมอร์ Meek ได้เขียนสูตรคำนวณค่า E_f สำหรับอากาศ ($\eta=0$) ดังต่อไปนี้

$$E_f = 5.3 \times 10^{-7} \times \frac{\alpha \exp(\alpha x_c)}{\sqrt{x_c/p}} \text{ โวลต์/ซม} \quad (3.12)$$

เมื่อ x_c เป็นความยาวของอะวาลานซ์ (ซม.)

p เป็นความดันของก๊าซ (Torr)

α เป็น Townsend first ionisation (ซม.⁻¹)

ถ้าป้อนแรงดันต่ำสุดที่ทำให้เกิดการเสถียรภาพฉับพลันได้อะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนควรมีความยาวมากที่สุด จึงเท่ากับระยะระหว่างอิเล็กโทรด (d) ดังนั้นเมื่อแทนค่า $E_f = E$, $x_c = d$ ลงในสมการที่ (3.12) และจัดรูปใหม่

$$\alpha e^d = \frac{10^7}{5.3} \times E \sqrt{\frac{d}{p}}$$

เมื่อคูณด้วย $1/p$ และใส่ \ln จึงได้

$$\alpha d + \ln \frac{\alpha}{p} = 14.45 + \ln \frac{E}{p} + \frac{1}{2} \ln \frac{d}{p} \quad (3.13)$$

Meek ได้ทำการคำนวณแรงดันเสถียรภาพฉับพลัน (V_b) ของอากาศตามสมการที่ (3.13) และนำไปเปรียบเทียบกับผลของการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ค่า V_b จากการทดลองแตกต่างกันจากผลการคำนวณบ้าง เนื่องจากสมการที่ (3.13) เขียนขึ้นโดยการประมาณ

ตารางที่ 3.3 การเปรียบเทียบผลการคำนวณตามโมเดลของ Meek ในการการเสีสภาพฉับพลันแบบสตรีมเมอร์กับผลการทดลอง

ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด (d)	E/p V/cm Torr	αd	V_b (kV)	
			คำนวณ	การทดลอง
0.1	68.4	15.7	5.19	4.6
0.5	48.1	17.7	18.25	17.1
1.0	42.4	18.6	32.20	31.6
2.5	37.0	19.7	70.50	73.0
10.0	32.8	21.5	249.0	265.0
20.0	31.2	22.4	474.0	510.0

ในกรณีที่ป้อนแรงดันสูง ๆ จนวนเกิดการเสีสภาพฉับพลันก่อนที่อะวาลานซ์มีความยาวแอโนด ดังนั้นสมการที่ (3.12) จึงมี $x_c < d$ Raether ได้เขียนสมการของ streamer breakdown criterion ในรูปแบบง่าย ๆ ดังนี้

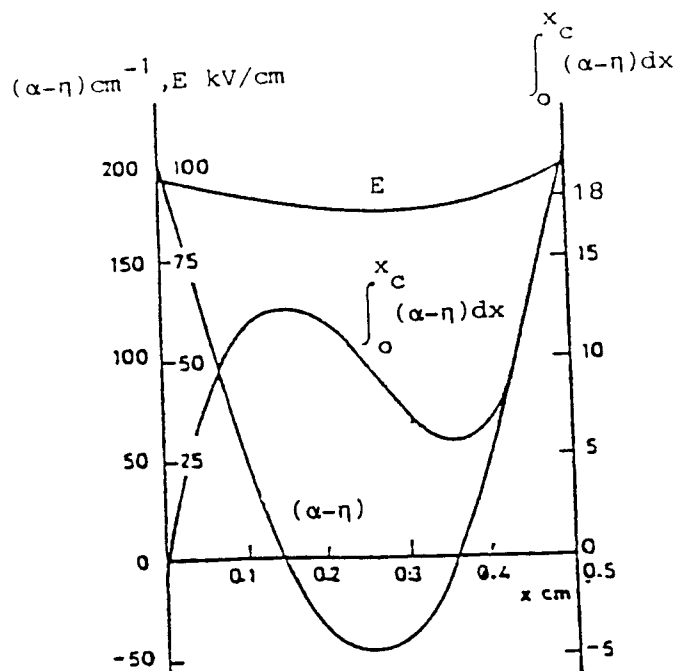
$$\alpha x_c = 17.7 + \ln x_c \quad (3.14)$$

สมการที่ (3.12) ถึง (3.14) นำมาใช้วิเคราะห์การเกิดการเสีสภาพฉับพลันได้ดีในกรณีของก๊าซไฟฟ้าบวก และในกรณีสนามไฟฟ้ายังค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ในกรณีของก๊าซไฟฟ้าลบ เช่น SF₆ ค่า $(\alpha - \eta)$ แปรไปตามระยะ x ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 3.6 จากสมการที่ (3.2) สามารถคำนวณอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการชนของอิเล็กตรอน Pedersen [18] ได้รวบรวมและเขียนสมการกลไกของ streamer breakdown criterion ขึ้นอีกแบบหนึ่งซึ่งมีรูปทั่วไปดังนี้

$$\exp \int_0^{x_c} [(\alpha - \eta) dx] = N_c \quad (3.15)$$

หรือ

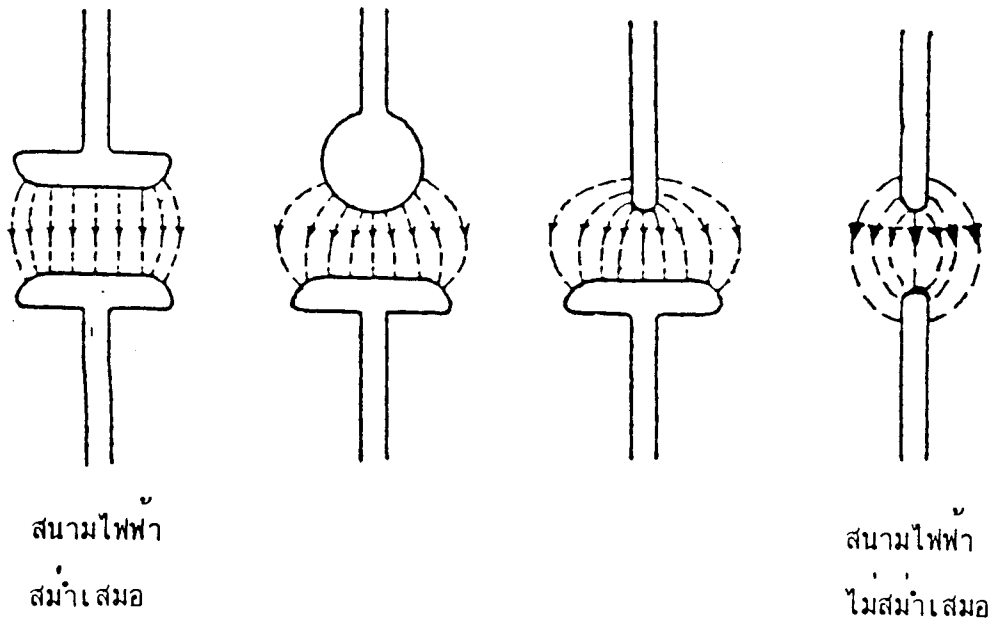
$$\int_0^{x_c} (\alpha - \eta) dx = \ln N_c \quad (3.16)$$



รูปที่ 3.6 กราฟของ $(\alpha-\eta)$, $\int_0^{x_c} (\alpha-\eta) dx$ และสนามไฟฟ้า (E) ของก๊าซ SF₆

อิเล็กโตรดทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ซม. วางห่างกัน 0.5 ซม. และป้อนแรงดันที่ทำให้เกิดการเสียดภาพฉับพลัน ขนาด 45.2 kV N_c เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ $10^8 - 10^{10.5}$ ตัว [19] และ x_c อาจมีค่าน้อยกว่าระยะระหว่างอิเล็กโตรด เนื่องจากมีการเกิดไอออนแบบโฟโตที่บริเวณหัวของอะวาลานซ์ แล้วนำไปสู่การเสียดภาพฉับพลันของฉนวน

ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับการเสียดภาพฉับพลัน จำเป็นต้องพิจารณาเป็นเบื้องต้นถึงชนิดของฉนวนก๊าซ ความดันของก๊าซและลักษณะรูปร่างของอิเล็กโตรด อิเล็กโตรดย่อมมีผลโดยตรงต่อความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.7 สนามไฟฟ้าจะมีความสม่ำเสมอมากในกรณีที่มีอิเล็กโตรดเป็นแบบระนาบทั้งคู่ และมีขอบมน แต่ความสม่ำเสมอจะลดลงเมื่ออิเล็กโตรด เปลี่ยนไปเป็นแบบแท่งดังนั้นผลของการคำนวณการเกิดเบรกควาร์อาจมีค่าแตกต่างจากการทดลองได้ เนื่องจากมิได้พิจารณาลักษณะสนามไฟฟ้าอย่างละเอียดเพื่อลดข้อขัดข้องในการคำนวณ



รูปที่ 3.7 ลักษณะและรูปร่างของอิเล็กโตรดที่มีผลต่อความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้า

3.1.5 การปล่อยประจุบางส่วน (PARTIAL DISCHARGE) และโคโรนา (CORONA)

ภายในฉนวนก๊าซ การปล่อยประจุบางส่วนเกิดขึ้นได้ในบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง การปล่อยประจุในลักษณะที่สามารถคงสภาพ (self-sustain) อยู่ได้นานตามเท่าที่มีแรงดันป้อนอยู่ และเกิดอยู่แต่เฉพาะบริเวณแคบ ๆ จะเรียกกันว่าโคโรนา การเกิดโคโรนาส่วนมากไม่สามารถนำไปสู่การเสียหายฉนวนได้ แต่การปล่อยประจุบางส่วนแบบคงสภาพนี้หากเกิดขึ้นในสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ และเมื่อเพิ่มแรงดันขึ้นจะนำไปสู่การเสียหายฉนวนได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากก๊าซในบริเวณที่มีการปล่อยประจุ เป็นตัวนำไฟฟ้า จึงเปรียบเสมือนการขยายตัวของ อิเล็กโตรดด้านหนึ่งออกไปหาอิเล็กโตรดอีกด้านหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีการปล่อยประจุไม่คงสภาพ (non-self-sustain) เช่น กรณีแรงดันเป็นอิมพัลส์ โคโรนามีความสำคัญต่อวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเกี่ยวกับกำลังสูญเสียของสายส่งแรงสูง

การคำนวณหาสนามไฟฟ้า (E_c) ซึ่งมีการเริ่มเกิดโคโรนา (corona inception field strength) มีอยู่หลากหลายวิธี และยังคงต้องใช้ผลการทดลองช่วยในการตรวจสอบขอยกตัวอย่างจากผลงานวิจัยค้นคว้าของ Zaengl และ Nyffenegger [20] ที่ได้วิเคราะห์หาสูตรในการคำนวณค่า E_c ของอากาศที่ใช้อิเล็กโตรดทรงกระบอกซ้อน โดยให้รัศมีทรงกระบอกใน (r) ผลลัพธ์คือสมการที่ (3.17) และกราฟดังรูปที่ 3.8

$$\frac{(E_c)^2}{\delta} - 2 \frac{E_c}{\delta} E_o \ln \left[\frac{E_c}{E_o \delta} \right] - E_o^2 = \frac{K}{\delta_{rc}} \quad (3.17)$$

$$\text{ในที่นี้ } K/C = 42 \text{ kV}^2/\text{cm}$$

$$E_0 = 24.36 \text{ kV/cm}$$

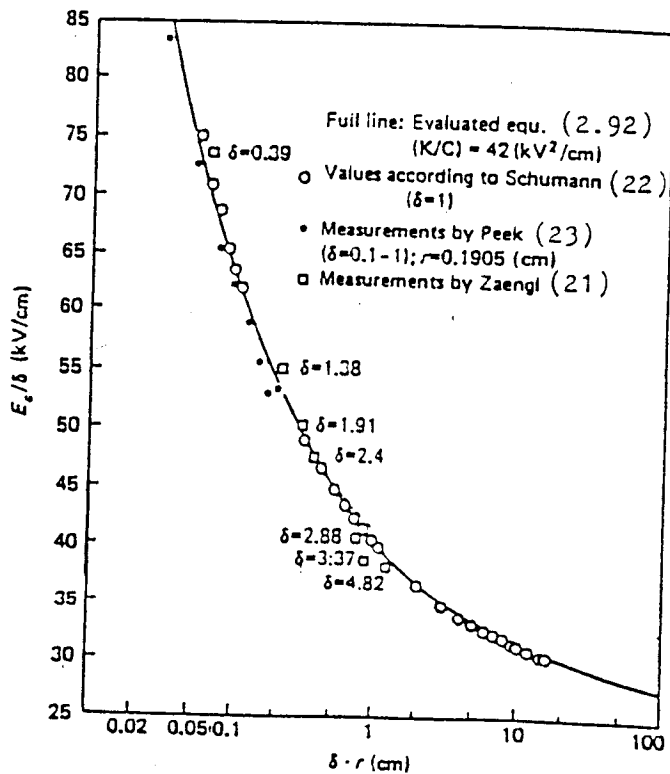
δ = relative air density หรือ correction factor

$$= \frac{p}{760} \cdot \frac{237+20}{237+t}; p \text{ หน่วย Torr. และ } t \text{ หน่วย } ^\circ\text{C}$$

r = รัศมีของทรงกระบอกใน หน่วย ซม.

E_c = สนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดโคโรนา

โคโรนาเกิดขึ้นในเวลาอันสั้น เมื่อเปรียบเทียบกับคาบเวลา 20 มิลลิวินาที หรือความถี่ 50 เฮิรตซ์ ดังนั้น โคโรนาที่เกิดจากแรงดันกระแสตรงและกระแสสลับจึงมีปรากฏการณ์ที่เหมือนกัน แต่โคโรนาที่เกิดด้านแอนโอดจะมีความแตกต่างจากที่เกิดด้านแคโทด ในการศึกษาการเกิดโคโรนาทั้งสองแบบได้เลือกใช้อิเล็กโตรดแบบแท่งกับระนาบ ซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอระหว่างอิเล็กโตรด และสนามไฟฟ้าที่อิเล็กโตรดแท่งมีค่าสูงกว่าที่อิเล็กโตรดระนาบ จึงเกิด โคโรนาขึ้นก่อนที่อิเล็กโตรดแท่ง

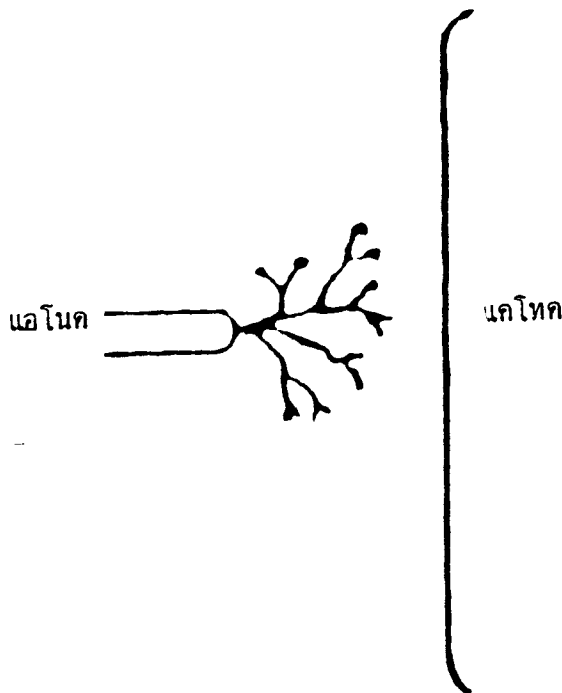


รูปที่ 3.8 สนามไฟฟ้าที่เริ่มเกิดการปล่อยประจุในอากาศ อิเล็กโตรดเป็นรูปทรงกระบอกซ้อน

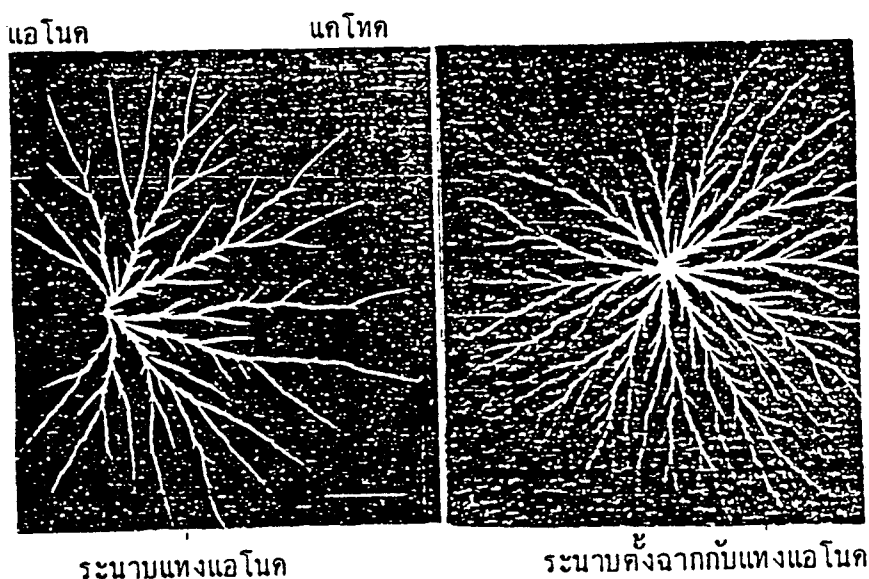
3.1.6 โครนาจากแอโนด (ANODE CORONA)

การศึกษาลักษณะการเกิดโครนาจากแอโนดกระทำโดยใช้คู่อิเล็กโตรดที่มีแอโนดเป็นอิเล็กโตรดแท่งและมีจุดปลายแหลม ส่วนแคโทดนั้นเป็นระนาบเรียบ ลักษณะเช่นนี้จะได้ความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงที่ปลายแอโนด แรงดันต่างชนิดมีผลต่อโครนาต่างกัน ปรากฏการณ์โครนาที่เกิดจากแรงดันอิมพัลส์แตกต่างที่ใช้แรงดันกระแสตรง หรือกระแสสลับที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์เพราะ กรณีใช้แรงดันอิมพัลส์จะไม่มีผลของการเกิดประจุอิสระในก๊าซระหว่างอิเล็กโตรด เนื่องจากเวลาที่เกิดโครนาล้นมาก

โครนาที่เกิดจากแรงดันอิมพัลส์ มีลักษณะของสตรีมเมอร์ ดังในรูปที่ 3.9 (ก) และ (ข) ถ้ายิ่งเพิ่มแรงดันอิมพัลส์ให้สูงยิ่งขึ้น แขนงของสตรีมเมอร์จะยิ่งมีจำนวนมากขึ้น รวมทั้งความเร็วของสตรีมเมอร์สูงขึ้นด้วย [22] เมื่อสตรีมเมอร์เคลื่อนที่ออกห่างจากแอโนดออกไปทางแคโทด ซึ่งเป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้ามีความเครียดลดลง ความเร็วของสตรีมเมอร์จะลดลง และมีข้อสังเกตว่าสตรีมเมอร์มีแขนงที่ไม่ตัดกันเลย



รูปที่ 3.9 (ก) ลักษณะการเกิดโครนาจากแอโนด

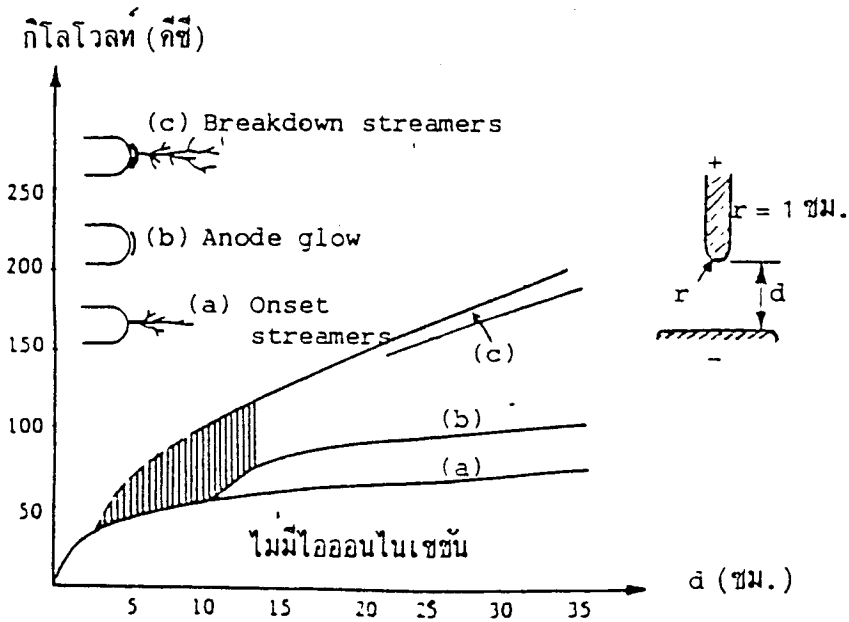


รูปที่ 3.9 (ข) ภาพของโคโรนาจากแอโนด

เมื่อเปลี่ยนแปลงแรงดันอิมพัลส์ให้เป็นแรงดันเอซี ที่ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์ หรือแรงดัน คีซีจะทำให้มีเวลาเพียงพอกแก่การเกิดไอออน และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าไปจากเดิม รูปที่ 3.10 เป็นผลที่ได้จากการทดลองในการศึกษาปรากฏการณ์ของโคโรนา ในการทดลองนี้ถ้าให้ระยะ $d = 25$ ซม. และให้เพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นทีละขั้น ๆ ได้สังเกตเห็นว่าในช่วงแรกจะไม่มีเกิดการเกิดโคโรนาให้เห็นจนกระทั่งเริ่มเข้าสู่ช่วง (a) ซึ่งมีแรงดันสูงเกินกว่า 70 กิโลโวลต์ ก็จะเริ่มเห็นประกายเรืองแสงได้ภายในห้องมืดเป็นเส้นฝอย ๆ และ แดกเป็นแขนง เรียกว่า onset streamers กระแสที่อ่านได้เป็นลักษณะของพัลส์ที่มีขนาดและความถี่ไม่คงที่ แต่ขนาดจะ สูงขึ้นเมื่อแรงดันยิ่งสูงขึ้น ถัดขึ้นไปในช่วง (b) ซึ่งมีแรงดันสูงกว่า 95 กิโลโวลต์ ไปจนถึงประมาณ 160 กิโลโวลต์ จะมีแสงเรืองขึ้นอย่างเห็นได้ชัดรอบ ๆ แอโนด เรียกว่า anode glow การเกิดเช่นนี้มีสาเหตุจากไอออนลบจำนวนมากที่เกิดจากขบวนการเกิดไอออนในอากาศมาถึงแอโนดอย่างต่อเนื่อง และขณะที่มันมารวมตัวอยู่ใกล้ ๆ แอโนดจะก่อให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าสูง และ ทำให้เกิด

การแตกประจุแบบโฟโต และเกิดการปล่อยพลังงานแสงออกมาแรงดันในช่วงนี้ก่อให้เกิดกระแส

ไหลในวงจรร้อยอย่างต่อเนื่อง แต่ยังไม่นำไปสู่การเกิดประกายข้าม ในช่วงแรงดันยิ่งสูงขึ้นอีกคือช่วง (c) ซึ่งแรงดันสูงกว่า 160 กิโลโวลท์ จะเกิดสตรีมเมอร์บน anode glow เรียกว่า breakdown streamer ซึ่งให้ประกายจ้า และได้ยินเสียงซ่า ๆ สตรีมเมอร์ยาวมากขึ้นและมีโอกาสที่จะนำไปสู่การเกิดประกายข้าม อัตราการเกิดสตรีมเมอร์ชนิดนี้อยู่ในช่วงประมาณ $10^3 - 10^4$ ครั้งต่อวินาที ในบริเวณที่ขีดด้วยเส้นลายในรูปที่ 3.10 เป็นช่วงที่ระยะ d สั้นเกินไป และมีโอกาสเกิดประกายข้ามได้ง่าย จึงไม่สามารถสังเกตเห็นโคโรนาได้

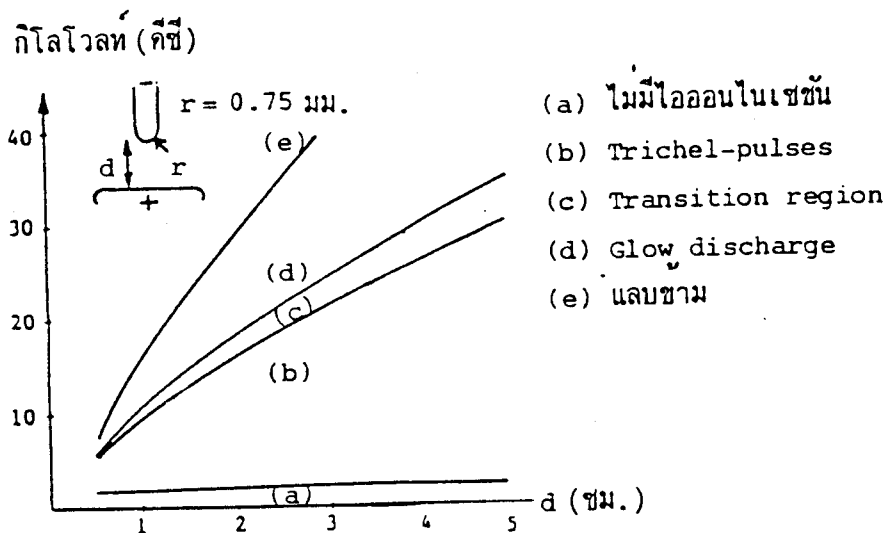


รูปที่ 3.10 โชนที่เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของโคโรนาจากแอโนด ในช่องว่างอากาศ

3.1.6 โคโรนาจากแคโทด (CATHODE CORONA)

ถ้าให้แท่งอิเล็กโทรดเป็นแคโทดบ้าง ดังในรูปที่ 3.11 โคโรนาที่เกิดที่แท่งอิเล็กโทรดจะแตกต่างไปจากหัวข้อที่แล้ว จากการทดลอง ได้พบว่า แรงดันที่ทำให้ช่วง (a) เริ่มเปลี่ยนไปเป็นช่วง (b) นั้น มีขนาดค่อนข้างคงที่ เมื่อให้ระยะ d เปลี่ยนไปแรงดันที่เริ่มเข้าสู่ช่วง (b) นี้ เรียกว่า onset หรือ inception voltage เพราะเริ่มเกิดโคโรนาขึ้น ในช่วง (b) มีการเกิดสตรีมเมอร์ ที่เรียกว่า Trichel

pulses และมีขนาดกระแสของพัลส์คงที่ ที่แรงดันคงที่และมีอัตราการเกิดต่อช่วงเวลาคงที่ด้วยคือประมาณ 2000 ไปถึง 10^6 พัลส์ต่อวินาที จากค่าแรงดันที่ต่ำสุดของช่วงนี้ไปจนถึงสูงที่สุดของช่วงนี้ อัตราการเกิดพัลส์ขึ้นกับขนาดของแรงดัน ความดันอากาศ และระยะช่องว่างอากาศ เมื่อลดความดันอากาศจะลดอัตราการเกิดพัลส์ ถ้าเพิ่มแรงดันขึ้นอีกเข้าสู่ช่วง (c) ซึ่งเป็นช่วงค่อนข้างแคบจะเป็นช่วงที่ไม่เห็นอะไรเด่นชัด ถ้าเพิ่มแรงดันอีกเล็กน้อยจากช่วง (c) เข้าสู่ช่วง (d) จะเกิด glow discharge และในกรณีที่ความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ปลายแท่งอิเล็กโทรดสูงมาก ก็จะเกิดสตรีมเมอร์ให้เห็น มีลักษณะคล้าย ๆ กับขนนกบาง ๆ และแตกแขนงเพียงเล็กน้อยบน glow เรียกว่า สตรีมเมอร์ลบ (negative streamer หรือ feather-like streamer) หากเพิ่มแรงดันขึ้นอีกก็จะเกิดประกายข้าม



รูปที่ 3.11 โชนที่เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของโคโรนาจากแคโทดในช่องว่างอากาศ

การเกิดโคโรนาจากแรงดันเอซีที่ความถี่ต่ำ เช่น 50 เฮิรตซ์ มีลักษณะคล้ายกันกับโคโรนาที่เกิดจากแรงดันดีซี ดังได้กล่าวมาแล้ว รูปที่ 3.12 เป็นภาพแสดงการเกิดโคโรนาจากแรงดันเอซี ซึ่งได้แสดงระดับแรงดันช่วงต่าง ๆ ที่เกิดโคโรนา และแสดงกระแสพัลส์ของโคโรนาด้วย การเกิดประกายข้ามพบว่าเกิดขึ้นก่อนที่ชีกบวกรูปคลื่นแรงดันเอซี ซึ่งเป็นข้อสรุปโดยทั่วไปว่า การเกิดการเสียดสภาพฉนวนในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ จะเกิดขึ้นในชีกบวกรได้ง่ายกว่า

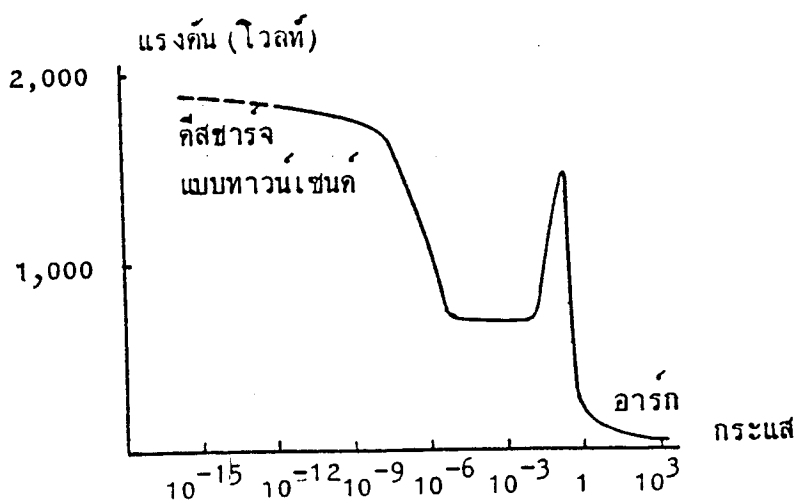
3.1.7 อาร์กไฟฟ้า (ARCS) และพลาสมา (PLASMA)

ชนิดของอาร์กไฟฟ้า

อาร์กไฟฟ้าย่างไปจากการปล่อยประจุ discharge ลักษณะเด่นของอาร์ก คือ

- ก. ความหนาแน่นของกระแสของอิเล็กโตรดสูง อาจสูงถึงช่วง 10^3 ถึง 10^7 แอมป์ต่อตาราง ซม. และคงสภาพอยู่ได้ครบเท่าที่มีแหล่งจ่ายกระแส
- ข. ปริมาณกระแสส่วนใหญ่เป็นปริมาณอิเล็กตรอนที่มาจากแคโทดและเป็นส่วนน้อยที่มาจากไอออนในก๊าซ และกรณีที่มีปริมาณไอออนบวกและอิเล็กตรอน (รวมไอออนลบ) เท่า ๆ กัน เรียกว่าพลาสมา
- ค. ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโตรดค่อนข้างต่ำกว่าของกรณีการปล่อยประจุ โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 10 ถึง 50 โวลต์
- ง. อาร์กไฟฟ้ามีอุณหภูมิสูงและโดยทั่วไปสูงถึง $1,000^\circ\text{K}$

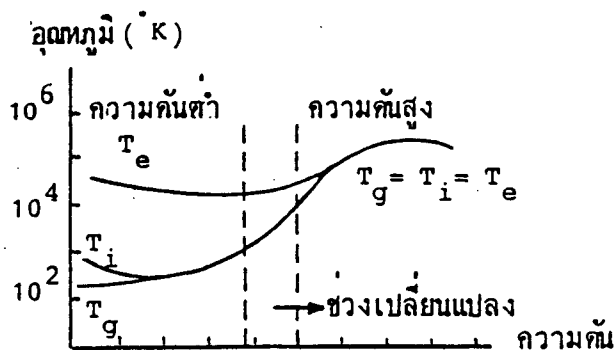
การเปรียบเทียบกระแสและแรงดันในการปล่อยประจุและอาร์กไฟฟ้าได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.13 การศึกษาเกี่ยวกับอาร์กไฟฟ้ามักมีส่วนเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์จำพวกเบรกเกอร์, สวิตช์ และ แหล่งให้กำเนิดแสงในเครื่องฉายภาพยนตร์ อาร์กไฟฟ้านำมาใช้ในการเชื่อมและตัดโลหะและยังทำให้เกิดพลาสมาอุณหภูมิที่นำมาผลิตกระแสไฟฟ้าในขบวนการ MHD (magneto-hydro dynamic) และขบวนการฟิวชัน



รูปที่ 3.13 การเปรียบเทียบแรงดันและกระแสในการปล่อยประจุ (discharge) และอาร์กไฟฟ้า

อาร์กไฟฟ้าเริ่มเกิดขึ้นได้ถึง 3 วิธี คือ แบบหนึ่งเกิดต่อเนื่องมาจากการปล่อยประจุ (discharge) ที่เกิดขึ้นก่อน แบบที่สองเป็นแบบที่เกิดหลังจากการปล่อยประจุหยุดแล้ว แต่แรงดันที่ป้อนอยู่อาจทำให้เกิดอาร์กติดตามมาได้ แบบที่สามเป็นการเกิดอาร์กเนื่องจากการดึงผิวสัมผัส เช่น ในเบรกเกอร์ให้แยกจากกัน จึงทำให้เกิดอาร์กแทรกขึ้น

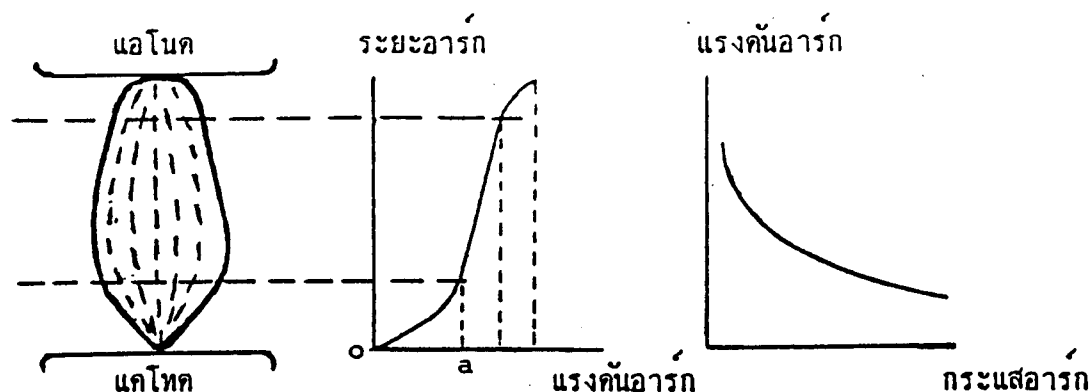
อาร์กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็นกรณีอาร์กที่ความดันสูงและที่ความดันต่ำ ซึ่งมีข้อแตกต่างกันเกี่ยวกับอุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) ของไอออน (T_i) และของก๊าซ (T_g) อาร์กที่ความดันต่ำจะมีอุณหภูมิของอิเล็กตรอนสูงกว่าของไอออนและของก๊าซ แต่ที่ความดันสูง อุณหภูมิของอนุภาคต่าง ๆ และก๊าซเท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 อุณหภูมิของอนุภาค (T_i , T_e) และของก๊าซ (T_g) ในอาร์กไฟฟ้า

กลไกการเกิดอาร์กและลักษณะของอาร์ก

ลักษณะทั่วไปของอาร์กที่เชื่อมต่อบริเวณอิเล็กโทรดคล้ายกับพู่กันระบายสี ดังแสดงในรูปที่ 2.28 ในแนวคอลัมน์ของอาร์กมีการกระจายความต่างศักย์ต่างกัน กล่าวคือ บริเวณที่ใกล้แคโทดจะมีความต่างศักย์ (ช่วง oa) สูงกว่าบริเวณอื่น ๆ แรงดันของอาร์กจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณกระแสอาร์ก ความหนาแน่นของกระแสอาร์กมีค่าสูงที่บริเวณใกล้กับอิเล็กโทรด ลักษณะของอาร์กแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ 2 ส่วนอยู่ติดกับอิเล็กโทรด ลักษณะของมันขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโทรด และอีกส่วนอยู่ถัดเข้ามาในช่วงกลาง ๆ ของอาร์กซึ่งไม่ขึ้นกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ผิวอิเล็กโทรด อาร์กแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 ลักษณะของอาร์กไฟฟ้า

ส่วนแรกคืออาร์กในส่วนที่อยู่ติดกับแคโทดเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนสถานะของผิวแคโทดไปเป็นพลาสมา ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าในก๊าซ จุดบนผิวแคโทดที่ทำให้เกิดอาร์ก เรียกว่า cathodic spot จุดนี้จะเคลื่อนที่ได้บนผิวแคโทด และบางครั้งก็ได้สังเกตเห็นว่าการเคลื่อนที่ไม่เป็นไปตามกฎของแอมแปร์ ซึ่งเรียกว่า retrograde motion ผิวแคโทดระเหยไปเป็นพลาสมาได้ที่อุณหภูมิสูงและต่ำ แคโทดจึงอาจเป็น cold cathode หรือ thermionic cathode ข้อแตกต่างที่สำคัญของแคโทด 2 ประเภทนี้ ได้แก่

- ก. อุณหภูมิ ถ้าสูงกว่า $3,500^{\circ}\text{K}$ เป็น thermionic cathode
- ข. ปริมาณความหนาแน่นของกระแส แบบ cold cathode จะมีความหนาแน่นสูงกว่า คือ ตั้งแต่ 10^6 แอมป์ต่อตาราง ซม. ขึ้นไป แต่แบบ thermionic cathode มีความหนาแน่นของกระแสต่ำกว่า 10^4 แอมป์ต่อตาราง ซม.
- ค. การเคลื่อนที่บนผิวแคโทดแบบ cold cathode จะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า
- ง. การเกิดความดันไอบนผิวแคโทดที่เพิ่มขึ้นจากความดันของก๊าซพบแต่เฉพาะแบบ cold cathode

กระแสของอาร์กที่บริเวณแคโทดมาจากการก่อตัวของอิเล็กตรอน และ ไอออนบวก โดยเกิดจากกลไกที่ผสมผสานกัน ได้แก่ field emission, thermionic emission การชนกันของไอออนที่ก่อให้เกิดการแตกตัว รวมทั้งการนำไฟฟ้าของโลหะในสภาพที่เป็นก๊าซ ผิวแคโทดจะสีกหรือไปในการเกิดอาร์ก

ส่วนที่สอง คือ อาร์กที่บริเวณกลาง ๆ ห่างออกมาจากแคโทดและแอโนด ซึ่งเป็น พลาสมาและเรียกว่า positive column ซึ่งมีค่าสนามไฟฟ้าต่ำและสม่ำเสมอ อาร์กส่วนนี้มีพื้นที่ภาคตัดขวางค่อนข้างคงที่ภายในคอลัมน์นี้มีการเกิดไอออนและอิเล็กตรอนจากการชนกันของ อนุภาคเป็นจำนวนมาก ถ้าความหนา

แน่นของกระแสและความดันไม่สูงมากลักษณะของ positive column ของอาร์กคล้ายกับของ glow discharge การชนกันของอนุภาคเกิดขึ้นบ่อย จึงอยู่ในสภาวะสมดุลย์ อุณหภูมิของก๊าซและไอออนจึงมีค่าใกล้เคียงกัน

ส่วนที่สามของอาร์ก คือ ส่วนที่ใกล้กับแอโนด เป็นส่วนที่รวบรวมอิเล็กตรอนจากพลาสมาเพื่อเข้าสู่แอโนด และ ขับไล่ไอออนบวกออกไป ไอออนลบเกิดขึ้นได้ในบริเวณนี้ ความเครียดสนามไฟฟ้าจึงเพิ่มขึ้น และทำให้แรงดันตกคร่อมส่วนที่สามนี้สูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.15 บริเวณแอโนดที่สัมผัสกับอาร์กเรียกว่า anode spot จะมีการระเหยของอิเล็กโทรดและความหนาแน่นของรกอัดตัวของอิเล็กตรอน และ ไอออนบวกกับของ positive column

ความร้อนสูงที่เกิดขึ้นภายในพลาสมาของอาร์ก อาจถูกถ่ายเทออกไปภายนอกอาร์ก หรือถ่ายเทอยู่ภายในก๊าซซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติในการนำความร้อนของก๊าซและเป็นไปตามหลักของการแพร่ (diffusion) และ การพาความร้อน (convection) นอกจากปรากฏการณ์ทางความร้อนและแม่เหล็ก อาร์กไฟฟ้ายังทำให้เกิดการสึกหรอของอิเล็กโทรด โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณ cathode spot ความรุนแรงของการสึกหรอขึ้นอยู่กับชนิดของอิเล็กโทรด ปริมาณกระแสความดันของก๊าซ และการสมดุลย์ของพลัง งานที่ผิวอิเล็กโทรด

อาร์กไฟฟ้าในสุญญากาศ

อาร์กที่เกิดในสุญญากาศแตกต่างไปจากอาร์กชนิดอื่น ทั้งที่ความดันสูงและความดันต่ำกล่าวคือ อนุภาคและอิเล็กตรอนของอาร์กมาจากอิเล็กโทรดเท่านั้น แต่อาร์กที่มีปริมาณกระแสสูงเกิน 10 กิโลแอมป์ จะมีลักษณะคล้ายอาร์กภายในก๊าซภายใต้ความดันสูง

การเกิดอาร์กในสุญญากาศอาจมาจากการดึงให้ผิวสัมผัสของอิเล็กโทรดแยกออกจากกันหรือการจุดอาร์กโดยอาศัยการป้อนกระแสลิมพัลส์จากวงจรทริกเกอร์หรือการยิงผิวอิเล็กโทรดด้วยแสงเลเซอร์

อาร์กในสุญญากาศคงสภาพอยู่ได้ต่อเนื่อง มีการระเหยของอิเล็กโทรดอย่างต่อเนื่อง แรงดันคร่อมอาร์กจึงมีค่าค่อนข้างต่ำ ลักษณะของอาร์กสามารถแบ่งออกได้ตามปริมาณของ กระแสได้แก่

ก. Diffuse vacuum arc มีปริมาณกระแสไม่เกินกิโลแอมป์ มี cathode spot ที่สามารถเคลื่อนที่ไปบนผิวแคโทด อาจมีความเร็วสูงถึง 10 เมตรต่อวินาที ความต่อเนื่องในการเกิดอาร์กชนิดนี้ขึ้นกับอัตราการระเหยของแคโทดและขึ้นกับคุณสมบัติในการนำความร้อนด้วยแคโทดที่นำความร้อนได้ดีจะมีอาร์กที่ไม่ค่อยสม่ำเสมอหรือต่อเนื่อง

ข. Constricted vacuum arc เป็นอาร์กที่มีปริมาณกระแสสูงมาก ทำให้อิเล็กโตรดกลายไอลได้มากและอาร์กไม่เคลื่อนไปมาอย่างชนิดแรกในข้อ ก แต่มีลักษณะที่ขึ้นอยู่กับสภาวะทางพลังงาน ความร้อนที่อิเล็กโตรด แรงดันคว่อมอาร์กจะเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของอิเล็กโตรด ถ้าขั้วอาร์กให้ไปอยู่ที่อิเล็กโตรดส่วนที่เย็นกว่าเดิม แรงดันคว่อมอาร์กจะเพิ่มขึ้น

32 ฉนวนไฟฟ้าของเหลว

3.2.1 กลไกการเสียหายฉนวนฉนวน (BREAKDOWN MECHANISM) ในฉนวนของเหลว

กลไกการเสียหายฉนวนฉนวนในฉนวนของเหลว จำแนกออกได้เป็นกลไกในฉนวนที่ บริสุทธิ์กับที่ไม่บริสุทธิ์มีสารผสม ฉนวนของเหลวที่ใช้กันโดยทั่วไปมักเป็นชนิดที่ไม่บริสุทธิ์ และอาจมีสิ่งเจือปนด้วยเนื่องมาจากขบวนการผลิตที่ไม่สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ร้อยเปอร์เซ็นต์หรือถ้าทำได้ก็มีราคาแพง และอาจมีการเติมสารเคมีบางชนิดลงไปเพื่อทำให้ฉนวนมีคุณสมบัติเหมาะสมยิ่งขึ้น เช่น ช่วยลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันช่วยลดความหนืด

กลไกการเสียหายฉนวนฉนวนในฉนวนที่บริสุทธิ์ มีหลักการแบบเดียวกันกับกรณีของก๊าซ ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์เกิดจากการชนกันของอนุภาค และของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนเริ่มแรกมาจากแคโทด ตามกลไกของ field emission หรือ thermionic emission ฉนวนของเหลวบริสุทธิ์มีความทนต่อการเสียหายฉนวนฉนวน ตารางที่ 3.4 แสดงความเครียดของสนามไฟฟ้าเสียหายฉนวนฉนวนของฉนวนของเหลวบางชนิด

ตารางที่ 3.4 สนามไฟฟ้าเสียหายฉนวนฉนวนของฉนวนของเหลว

ของเหลวบริสุทธิ์	สนามไฟฟ้า (MV/cm)
ไนโตรเจนเหลว	1.6 - 1.88
อีออกซิเจนเหลว	2.4
Hexane	1.1 - 1.3
Benzene	1.1
Silicone	1.0 - 1.2
น้ำมันหม้อแปลงบริสุทธิ์	1.0 - 1.4

กลไกการเสียหายฉนวนฉนวนในฉนวนที่ไม่บริสุทธิ์แตกต่างไปจากกรณีของฉนวนที่บริสุทธิ์ที่กล่าวมาแล้วในฉนวนที่ไม่บริสุทธิ์และมีสิ่งเจือปนต่าง ๆ ได้แก่ ฟองก๊าซหรืออากาศ อนุภาคอื่น ๆ ที่ลอยปะปนอยู่ เช่น เซลลูโลสของเยื่อไม้ รวมทั้งความชื้นช่วยลดความทนต่อแรงดัน

การปล่อยประจุภายในยังทำให้เกิดการสลายตัวของฉนวนกลายเป็นฟองก๊าซ และองค์ประกอบอื่น ๆ ที่ทำให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ยิ่งขึ้นก๊าซที่เกิดบางชนิดอาจขยายตัวและทำให้มีความดันสูง อันเป็นสาเหตุของการระเบิดของอุปกรณ์นั้นได้กลไกการเสียหายฉนวนในฉนวนชนิดที่ไม่บริสุทธิ์ สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

- ก. กลไกการเสียหายฉนวนเนื่องจากอนุภาคเจือปน (Suspended Particle Mechanism)
- ข. กลไกการเสียหายฉนวนเนื่องจากโพรง หรือฟอง (Cavity and Bubble Mechanism)
- ค. กลไกเบรคความเครียดเนื่องจากปริมาตรส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง (Stressed Volume Mechanism)

3.2.2 กลไกการเสียหายฉนวนเนื่องจากอนุภาคเจือปน

อนุภาคเจือปนเป็นสารของแข็งปะปนอยู่ในฉนวนของเหลว อาจเป็นเส้นใยของกระดาษ ขุบน้ำมันหรือฝุ่นละออง ถ้าสมมุติให้อนุภาคเจือปนเป็นทรงกลมที่มีรัศมี r และให้เพอร์มิตติวิตีของฉนวนของเหลวและอนุภาคเจือปน เท่ากับ ϵ_1 และ ϵ_s ตามลำดับ ในสนามไฟฟ้า E อนุภาคจะถูกจัดเรียงให้เกิดขั้วไฟฟ้าซึ่งเรียกว่า polarization จึงเกิดแรงกระทำขึ้นบนอนุภาค สมการของแรง (F) เป็นดังนี้ [6]

$$F = r^3 \cdot \frac{\epsilon_s - \epsilon_1}{\epsilon_s + 2\epsilon_1} \cdot E \cdot \text{grad } E \quad (3.18)$$

ถ้าอนุภาคมี $\epsilon_s > \epsilon_1$ แรงจะมีทิศทางไปยังบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าเครียดกว่า แต่กรณีที่ $\epsilon_s < \epsilon_1$ แรงจะมีทิศทางกันข้าม กรณีที่อนุภาคมีค่า $\epsilon_s \gg \epsilon_1$, F จะมีค่าเข้าใกล้ $r^3 E \cdot \text{grad } E$ และทำให้อนุภาคเคลื่อนเข้าสู่บริเวณที่มีสนามไฟฟ้าเครียดที่สูงกว่า

ในกรณีของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ เกรเดียนของ E เป็นศูนย์ ทำให้แรงกระทำบนอนุภาคเจือปนเป็นศูนย์ด้วย ดังนั้น อนุภาคที่เคลื่อนเข้าสู่บริเวณสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอจึงหยุดนิ่งถ้าอนุภาคเจือปนมีเพอร์มิตติวิตีมากกว่าฉนวนชนิดของเหลว จะทำให้ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าสูงขึ้นที่บริเวณผิวของอนุภาคเหล่านั้น และช่วยให้อนุภาคอื่น ๆ ถูกดึงดูดให้เข้ามาเรียงต่อ ๆ กันเพิ่มขึ้นในทิศของสนามไฟฟ้า จึงทำให้สนามไฟฟ้าของฉนวนในส่วนหัวท้ายของแถวของอนุภาคที่เรียงตัวกันมีความเครียดสูงขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุที่นำไปสู่การเสียหายฉนวน ดังนั้นความหนาแน่นของอนุภาคเจือปนจึงมีบทบาทในการเสียหายฉนวน การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคเจือปนไปในทิศทางที่สนามไฟฟ้า มีความเครียดสูงกว่าของกลุ่มอนุภาคที่รวมกันอยู่เดิม สามารถนำมากำหนดเงื่อนไขของกลไกดังนี้

$$r^3 [E^2(x) - E_m^2] = 2kT \quad (3.19)$$

$$r^3 [E^2(x) - E_m^2] = 2 kT \quad (3.19)$$

r เป็นรัศมีของอนุภาค (ซม.)

$E(x)$ เป็นสนามไฟฟ้าที่ระยะ x ห่างไปจากจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ไปในแนวสนามไฟฟ้าเฉลี่ย E_m (กิโลโวลต์ต่อ ซม.)

k คือ Boltzmann's constant (จูลต่อเคลวิน)

T เป็น อุณหภูมิสมบูรณ์ (เคลวิน)

ถ้าหากค่าทางซ้ายมือของสมการที่ (3.19) สูงกว่าหรือเท่ากับทางขวามือ อนุภาคของสิ่งเจือปนสามารถนำไปสู่การเสียดสภาพฉับพลัน ถ้าหากอนุภาคเจือปนไปเกาะติดกับผิวอิเล็กโทรดทำให้ขรุขระ และเกิดจุดที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง เป็นเวลานาน ๆ เวื่อนไขการเสียดสภาพฉับพลันจะเปลี่ยนไปเป็นดังนี้

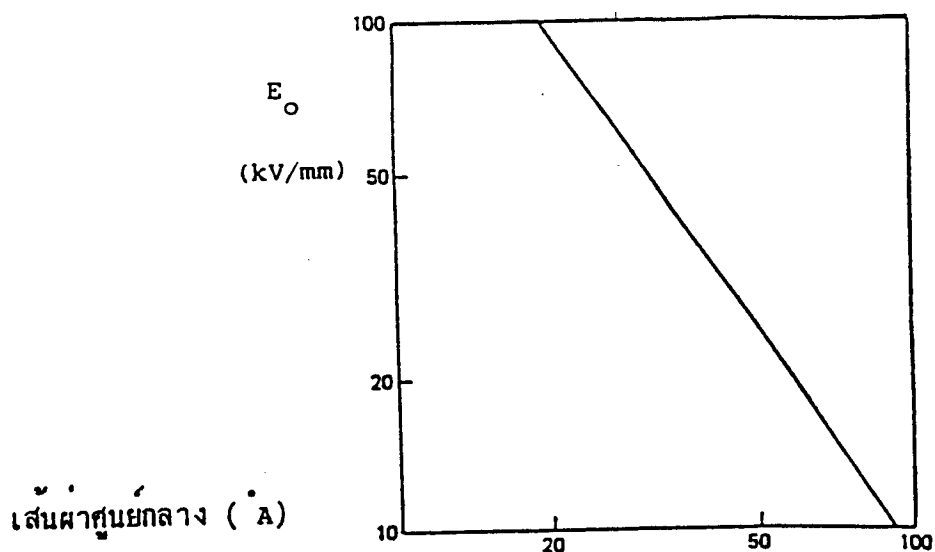
$$\frac{\epsilon_s - \epsilon_l}{\epsilon_s + 2\epsilon_l} \cdot r^2 E_0^2 = 1 kT \quad (3.20)$$

ϵ_s และ ϵ_l เป็นค่าเพอร์มิติวิตีของอนุภาคเจือปนและฉนวนชนิดของเหลวตามลำดับ

E_0 เป็นค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดการเสียดสภาพฉับพลัน

r, k และ T เช่นเดียวกับในสมการที่ (3.19)

การใช้สมการที่ (3.20) เพื่อหาค่าสนามไฟฟ้า E_0 สำหรับขนาดของอนุภาคเจือปนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึงค่าประมาณ 100 \AA ที่อุณหภูมิ 300 องศาเคลวิน และสมมุติ $\epsilon_s \gg \epsilon_l$ จะได้ผลลัพธ์ดังในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 สนามไฟฟ้าเสถียรภาพฉับพลันของฉนวนชนิดของเหลวเป็นฟังก์ชันของเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคสิ่งเจือปนที่อุณหภูมิ 300°K

3.2.3 กลไกการเสถียรภาพฉับพลันเนื่องจากโพรงหรือฟองก๊าซ

ในฉนวนของเหลวที่มีฟองก๊าซหรือโพรงอาจเกิดขึ้นจากสาเหตุต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ฉนวนมีคุณภาพต่ำหรือเสื่อมคุณภาพ
- รอยขรุขระหรือร่องที่ผิวอิเล็กโตรดเก็บกักโพรงไว้ขณะเดิมฉนวน
- ปฏิกิริยาเคมีภายในเนื้อฉนวน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ความดันการชนกันของไอออนและอิเล็กตรอน ทำให้ของเหลวสลายตัวให้ก๊าซ
- การระเหยของฉนวนเนื่องจากการปล่อยประจุบางส่วน (partial discharge)

วิศวกรชื่อ Kao [27] ได้เขียนสมการของสนามไฟฟ้าเสถียรภาพฉับพลัน E_0 ไว้ดังนี้

$$E_0 = \frac{1}{\epsilon_1 - \epsilon_g} 2\pi\sigma \frac{(2\epsilon_1 + \epsilon_g)}{r} \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{V-1^{1/2}}{2rE_0}} \quad (3.21)$$

ϵ_1 และ ϵ_g เป็นเพอร์มิติวิตีของฉนวนชนิดของเหลวและของฟองก๊าซตามลำดับ
 r เป็นรัศมีของฟองก๊าซ ซึ่งสมมติให้เป็นทรงกลม

V_g เป็นแรงดันคร่อมฟองก๊าซ

s เป็น surface tension ของฉนวนชนิดของเหลว

จากสมการที่ (3.4) นี้พบว่าสนามไฟฟ้าเบรกควานมีค่าสูงหรือไม่ ขึ้นอยู่กับขนาดของฟองก๊าซซึ่งมีผลเกี่ยวเนื่องกับอุณหภูมิและความดันภายนอกด้วย

3.1.3 กลไกการเสถียรภาพดับพลาสมาเนื่องจากปริมาณส่วนที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง

กลไกการเสถียรภาพดับพลาสมาที่มีผลมาจากปริมาณของฉนวน ที่อยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูงที่สุด (E_{max}) ถึงบริเวณที่สนามไฟฟ้า 90 เปอร์เซ็นต์ของ E_{max} พบว่าแรงดันเสถียรภาพดับพลาสมาเป็นสัดส่วนกลับกับปริมาณในส่วนนี้ ในกรณีฉนวนมีฟองก๊าซและอนุภาคเจือปนรวมอยู่ด้วย แรงดันนี้จะยิ่งต่ำลงไปอีก

เมื่อฉนวนของเหลวที่มีความบริสุทธิ์สูงได้รับแรงดันสูง อาจมีประจุไฟฟ้าหลุดออกมาจากผิวอิเล็กโทรด และทำให้เกิดอนุภาคประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่อยู่ในของเหลวอันเป็นสาเหตุของการนำไฟฟ้าแบบมีพาหะนำพาไป (electroconvection) อนุภาคประจุไฟฟ้าเหล่านี้ในสนามไฟฟ้ายังทำให้เกิดกระแสไหลวนอยู่ภายในของเหลวซึ่งเรียกว่า eddy motion ด้วยการไหลของอนุภาคนี้ช่วยทำให้เนื้อฉนวนเองไหลเวียนด้วย ทำให้เกิด electro-hydrodynamic instability หมายถึงเนื้อฉนวนไหลวน และ มีการพาประจุวนไปด้วย ทำให้ฉนวนขาดการมีเสถียรภาพในการวิเคราะห์อย่างง่าย แรงดันเสถียรภาพดับพลาสมา kV_b สัมพันธ์กับช่องว่าง (d) ระหว่างอิเล็กโทรด ดังนี้

$$V_b = K d^n \quad (3.22)$$

เมื่อ K และ n เป็นค่าคงที่

ตัวอย่าง น้ำมันหม้อแปลงได้รับการทดสอบการเสถียรภาพดับพลาสมาที่มีผลดังต่อไปนี้

ช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรด (มม.)	4	6	10	12
แรงดันเสถียรภาพดับพลาสมา (กิโลโวลต์)	90	140	210	255

3.2.4 ฉนวนน้ำมันและกระดาษชุบน้ำมัน

น้ำมันที่เป็นที่นิยมใช้เป็นฉนวนไฟฟ้า มาจากการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมและได้เติมสารเคมีลงไปเพื่อช่วยลดอัตราเร็วในการทำปฏิกิริยาเคมี โดยที่คุณภาพของน้ำมัน ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมัน และกรรมวิธีในการกลั่นน้ำมันเสื่อมคุณภาพ เมื่อนำมาใช้งานเป็นเวลานานพอสมควร การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติตามอายุการใช้งานและเนื่องจากความเครียดต่าง ๆ เช่น ทางเคมี และทางไฟฟ้า เรียกว่า aging ซึ่งทำให้น้ำมันมีตะกอน ระบายความร้อนได้น้อยลง และอาจมีสารเจือปนเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมี มีผลให้ความทนต่อการเสียดสภาพฉนวนลดลง นอกจากนี้มันถูกนำมาใช้เป็นฉนวนโดยตรง น้ำมันยังสามารถนำมาใช้ชุบกระดาษ เพื่อขจัดช่องว่างหรือรูพรุน ๆ ที่เป็นสาเหตุของการเกิดการปล่อยประจุบางส่วน ขบวนการชุบน้ำมันของกระดาษ เรียกว่า impregnation กรรมวิธีเป็นดังนี้

- ก. ขจัดก๊าซและความชื้นภายในกระดาษด้วยการใช้ความร้อนและสุญญากาศ
- ข. ปล่อยน้ำมันที่ปราศจากก๊าซและมีความชื้นต่ำมากเข้าไปชุบกระดาษ

ในกรรมวิธีนี้จะทำให้ก๊าซและความชื้นที่หลงเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยในกระดาษกระจายเข้ามาอยู่ในน้ำมันเพื่อให้ปริมาณของก๊าซและความชื้นอยู่ในสถานะสมดุลย์กัน

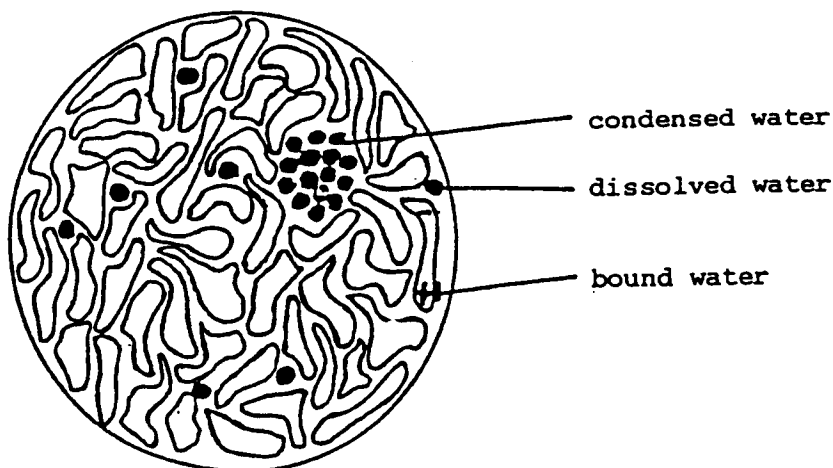
3.2.5 ความชื้นในกระดาษและน้ำมัน

ความชื้นในเนื้อฉนวนที่ได้รับการป้อนแรงดัน จะทำให้อนวนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เกิด aging และเกิด dielectric loss ซึ่งทำให้อนวนเสียดสภาพได้เนื่องจากความร้อน ความชื้นอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าและเคมีที่แยกน้ำ เป็น H_2 และ O_2 เกิดฟองก๊าซที่ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วน (partial discharge) ภายในฉนวนซึ่งเป็นสาเหตุในการเสียดสภาพฉนวน ความชื้นในฉนวนต้องถูกจัดออกไปให้ได้มากที่สุดก่อนนำฉนวนมาใช้งาน และป้องกันมิให้เข้าไปในเนื้อฉนวน

การป้องกันความชื้นจากอากาศภายนอกเข้าไปในน้ำมันและกระดาษชุบน้ำมันอาจกระทำได้โดยมิให้อนวนทั้งสองชนิดสัมผัสกับอากาศได้โดยตรง การสัมผัสกับอากาศภายนอกโดยผ่าน silicagel หรือ desiccator จะช่วยลดความชื้นได้ หากกระดาษชุบน้ำมันและน้ำมันอยู่ใน ภาชนะปิดมิดชิด ความชื้นจากภายนอกย่อมเข้าไปไม่ได้ แต่ต้องมีวิธีแก้ปัญหาการขยายตัวของฉนวนเมื่อได้รับความร้อนด้วย

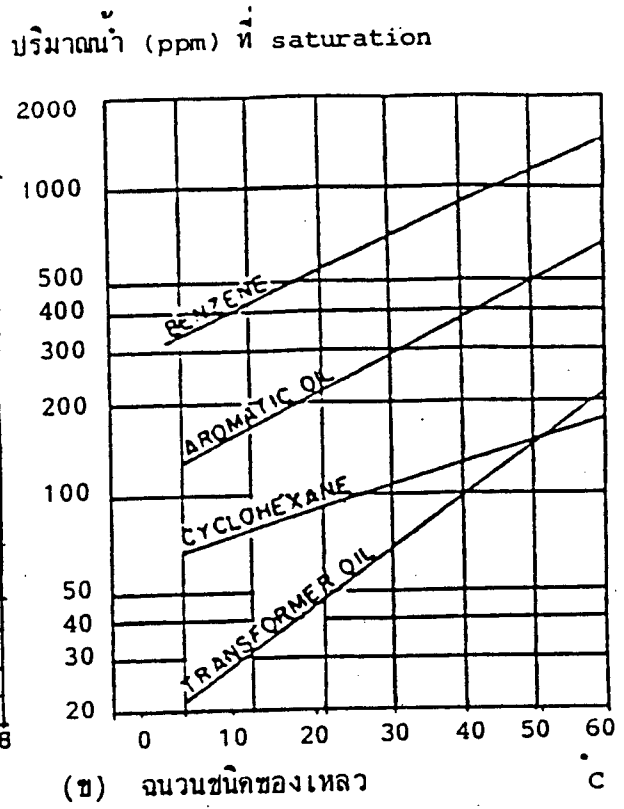
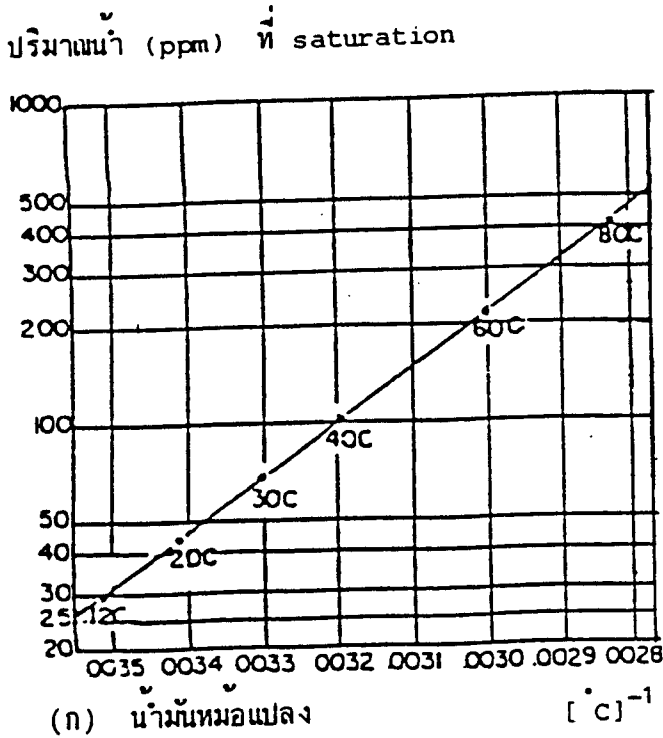
ความชื้นของน้ำมันเกิดจากน้ำเข้าไปอยู่ในน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 3.17 มีได้ 3 แบบคือ

1. Dissolved water เป็นการแทรกตัวของโมเลกุลของน้ำอยู่โดยทั่วไป
2. Condensed water เป็นหยดน้ำที่รวมตัวเป็นกลุ่มแยกจากน้ำมัน
3. Bound water เป็นการเกาะตัวของโมเลกุลของน้ำกับกลุ่มโมเลกุลของน้ำมัน จากการกลั่นน้ำมันไม่ดีพอเพียง หรือเกิดจากปฏิกิริยาในขบวนการ aging



รูปที่ 3.17 แสดงให้เห็นถึงน้ำที่เข้าไปอยู่ในน้ำมันแบบต่าง ๆ

กรณี dissolved water ปริมาณน้ำที่มากที่สุดที่เข้าไปอยู่ในน้ำมัน เรียกว่าการ อิ่มตัว (saturation) สภาวะอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิของน้ำมัน ดังแสดงในรูปที่ 3.18 (ก) ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 3.18 (ข) แสดงปริมาณน้ำที่สภาวะอิ่มตัวของของเหลวหลายชนิด เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำในน้ำมัน มีหน่วยวัดเป็น ppm (parts per million) ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนของน้ำหนักน้ำต่อน้ำหนักของน้ำมัน คูณด้วยจำนวนเลขหลักล้าน ยกตัวอย่างเช่นน้ำมัน 1 ตัน (1 ล้านกรัม) มีน้ำอยู่ภายใน 10 กรัม ดังนั้นปริมาณความชื้นในน้ำมันจึงเป็น 10 ppm ความชื้นในอากาศมีหน่วยเป็นน้ำหนักน้ำต่อปริมาตรของอากาศ เช่น กรัม/ลูกบาศก์เมตร ความชื้นในกระดาษมีหน่วยวัดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เช่น ความชื้น 10 % หมายถึง น้ำมี ปริมาณ 10 กรัมต่อกระดาษ 100 กรัม นอกจากความชื้นสัมบูรณ์ที่ได้กล่าวแล้ว ยังมีหน่วยวัดความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งหมายถึงอัตราส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำต่อปริมาณน้ำที่สภาวะอิ่มตัว



รูปที่ 3.18 ปริมาณน้ำที่อิ่มตัวในน้ำมันหม้อแปลงและของเหลวอื่น ๆ

น้ำมันที่นำมาใช้งานมักอยู่ในสภาวะสัมผัสกับอากาศหรือก๊าซและมีกระดาศซุบน้ำมันอยู่ในน้ำมันด้วย ปริมาณความชื้นในน้ำมันในก๊าซ และ ในกระดาศซุบน้ำมันขณะมีความสมดุลกันทางความชื้นที่อุณหภูมิคงที่จะไม่มีการถ่ายเทความชื้น แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จะเกิดการถ่ายเทความชื้นและไปสู่จุดสมดุลทางความชื้นจุดใหม่ ขณะสมดุลย์ความชื้นสัมพัทธ์ในน้ำมัน ในก๊าซหรืออากาศและในกระดาศซุบน้ำมันย่อมเท่ากัน อุณหภูมิของน้ำมันเป็นอุณหภูมิขณะสมดุลย์

3.2.6 การพิจารณาเลือกและตรวจสอบฉนวนไฟฟ้าชนิดของเหลว

การเลือกคุณสมบัติของฉนวนไฟฟ้าควรเป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน IEC หรือเทียบเท่าและควรผ่านการทดสอบตามวิธีมาตรฐานก่อนการใช้งาน ตัวอย่างมาตรฐาน ได้แก่

- IEC Publication 296, 296A เกี่ยวกับข้อกำหนดของฉนวน
- IEC Publication 475 เกี่ยวกับวิธีเก็บตัวอย่างฉนวน
- IEC Publication 422 เกี่ยวกับการบำรุงรักษาฉนวนในการใช้งาน

หม้อแปลงที่ใช้งานควรได้รับการตรวจสอบน้ำมันเป็นระยะ ๆ ดังนี้

ขนาด 500 kVA ขึ้นไป	การตรวจสอบ
ในระบบไม่เกิน 36 kV ในระบบ 45-245 kV	ทุก ๆ 3 ปี ทดสอบความทนต่อเสียดสภาพฉนวน ครั้งที่ 1 ทดสอบความทนต่อการเสียดสภาพฉนวน หลังติดตั้ง และก่อนป้อนแรงดัน ครั้งที่ 2 ทดสอบแบบครั้งแรกหลังจากใช้งาน 1 ปี ครั้งต่อ ๆ ไป ทุก ๆ 2 ปี ทดสอบแบบครั้งแรก, ค่าความเป็นกลาง, สีและลักษณะที่มองเห็น
ในระบบสูงกว่า 245 kV หรือหม้อแปลงมีความสำคัญมาก	ครั้งที่ 1 ทดสอบความทนต่อการเสียดสภาพฉนวนหลังติดตั้ง ครั้งที่ 2 ทดสอบปริมาณก๊าซ ภายใน 2 วัน หลังจากติดตั้งและ ป้อนแรงดัน ครั้งถัดไป ทดสอบแบบครั้งแรก, ค่าความเป็นกลาง สี และลักษณะ ที่มองเห็นทุก ๆ ปี หรือเมื่อจ่ายโหลดเต็มพิกัดเป็นเวลานาน

ฉนวนน้ำมันของหม้อแปลงขนาดใหญ่และมีความสำคัญสูง ควรได้รับการตรวจสอบในด้านต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.5

หัวข้อในการทดสอบ	ข้อมูลที่ได้รับ
1. แรงดันเสียดสภาพฉนวน	ทราบระดับความทนต่อการเสียดสภาพฉนวน และอาจมีความชื้น และอนุภาคเจือปนเป็นสาเหตุ
2. ปริมาณความชื้น	สภาพน้ำในน้ำมันและกระดาษ
3. ค่าความเป็นกลาง	ทราบสภาพความเป็นกรด-ด่าง ในน้ำมันเกี่ยวข้องกับaging
4. สีและลักษณะที่มองเห็น	ทราบความขุ่นและสิ่งเจือปน การเกิดหยดน้ำ ตะกอนเกี่ยวข้องกับ aging
5. cracking test	การฟังเสียงน้ำมันอุ่นร้อน ถ้ามีน้ำอยู่ด้วยจะได้ยินเสียงการแตกกระ เด็นของน้ำ ทำให้ทราบว่าในน้ำมันที่เป็นหยดน้ำ
6. ปริมาณก๊าซ	ทราบตำแหน่ง ลักษณะในการเกิดสิ่งผิดปกติในฉนวน

ตารางที่ 3.5(ต่อ) หัวข้อในการทดสอบฉนวนน้ำมันและข้อมูลที่ได้รับ

หัวข้อในการทดสอบ	ข้อมูลที่ได้รับ
7. วิเคราะห์หาส่วนประกอบ	ทราบถึง oxidation stability ปริมาณของสารผสม (inhibitor content) และตะกอน
8. tan δ	ทราบถึงกำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก เกี่ยวข้องกับการเกิดเบรกดาวน์ เนื่องจากความร้อนสะสม
9. ความต้านทานจำเพาะ	คล้ายข้อ 8
10. ความหนืด	เกี่ยวกับคุณสมบัติในการระบายความร้อน
11. จุดสันคาบ	ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของน้ำมัน

น้ำมันหม้อแปลงที่หามาจากน้ำมันดิบ อาจประสบปัญหาในด้านความปลอดภัยในด้านการติดไฟได้ จึงได้มีการผลิตฉนวนอื่นแทน ฉนวนของเหลวชนิดอื่น ๆ ได้แก่ PCB (Polychlorinated biphenyls) ซึ่งมีชื่อที่รู้จักกันคือ Askarels และน้ำมันซิลิโคน เป็นต้น

PCB เป็นฉนวนที่ติดไฟได้ยาก มีค่าเพอร์มิทีวิตีสัมพัทธ์ประมาณ 4 - 6 จึงเหมาะกับการใช้เป็นไดอิเล็กตริกในตัวเก็บประจุได้ดีด้วย แต่ PCB มีข้อเสียได้ เช่น ทำให้เกิดก๊าซไฮโดรคลอริกในกรณีที่เกิดการปล่อยประจุ ยาง และโพลีเมอร์บางชนิดละลายใน PCB มันเป็นสารที่คงทนและทำให้เกิดมลภาวะ

3.3 ฉนวนไฟฟ้าของแข็ง

ฉนวนไฟฟ้าของแข็งเป็นไดอิเล็กตริกที่แตกต่างจากไดอิเล็กตริกในอุปกรณ์ เช่น ตัวเก็บประจุ ซึ่งต้องการให้เพอร์มิติวิตีมีค่าสูง ๆ เพื่อเพิ่มค่าฟารัดต่อปริมาตรของไดอิเล็กตริก ไดอิเล็กตริกมีตัวกำหนดคุณสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ 4 อย่าง คือ

- ก. เพอร์มิติวิตีหรือค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
- ข. กำลังสูญเสียของไดอิเล็กตริก หรือค่า $\tan \delta$
- ค. ความต้านทานจำเพาะ
- ง. ความคงทนต่อแรงดันเสียหายฉับพลัน (breakdown voltage)

ในบทนี้อธิบายถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวน การเสียหายฉับพลัน โมเดลการเกิดการปล่อยประจุบางส่วนในเนื้อฉนวน ฉนวนของแข็งชนิดต่าง ๆ และข้อกำหนดต่าง ๆ ในการนำมาใช้ในงานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

3.3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนไฟฟ้าของแข็ง

เพอร์มิติวิตีและการแยกขั้ว (POLARIZATION)

ไดอิเล็กตริกทั้งของแข็งและของเหลวมีเพอร์มิติวิตีสูงกว่าเพอร์มิติวิตีของสุญญากาศ ดังนั้นอัตราส่วนของเพอร์มิติวิตีของไดอิเล็กตริกต่อของสุญญากาศหรือเพอร์มิติวิตีสัมพัทธ์ (ϵ_r) จึงมากกว่า 1 เสมอ พิจารณาตัวอย่าง ในกรณีของอิเล็กโตรดระนาบคู่หนึ่งวางขนานกัน ถ้าระหว่างแผ่นอิเล็กโตรดมีสุญญากาศ การป้อนแรงดัน V โวลต์ ระหว่างอิเล็กโตรด จะมีสนามไฟฟ้าและทำให้เกิดประจุที่แผ่นอิเล็กโตรดเป็น $+Q$ และ $-Q$ คูლობ์ต่อหน่วยพื้นที่ เมื่อนำเอาไดอิเล็กตริกเข้ามาแทนสุญญากาศ ไดอิเล็กตริกจะตอบสนองการมีสนามไฟฟ้าด้วย โดยจัดเรียงตัวให้เกิดประจุของโมเลกุลแยกกัน ประจุบวกถูกดูดโดยแรงคูლობ์ไปทางแคโทดและประจุลบหรืออิเล็กตรอนถูกดูดไปทางแอโนดซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มปริมาณประจุต่อหน่วยพื้นที่บนแผ่นอิเล็กโตรดให้สูงกว่าค่า Q ในกรณีสุญญากาศ สมมติให้ประจุที่เพิ่มขึ้นนี้มีค่าเป็น P คูლობ์ต่อหน่วยพื้นที่ ประจุที่เพิ่มขึ้นจากเดิมนี้นี้เป็น bound charge ซึ่งเกิดขึ้นแต่เฉพาะในกรณีไดอิเล็กตริก ผลเช่นนี้เรียกว่า polarization การมีประจุเพิ่มขึ้นนี้ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นค่าเพอร์มิติวิตีสัมพัทธ์ไดอิเล็กตริกซึ่งเท่า คราส่วนของค่าความจุไฟฟ้าในไดอิเล็กตริก (C) ต่อค่าความจุไฟฟ้าในสุญญากาศ (C_0) จึงเป็นดังนี้

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{Q+P}{Q} \quad (3.23)$$

เนื่องจากทิศสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับพื้นที่ ดังนั้น Q และ P จึงเป็นปริมาณ electric displacement ($D = \epsilon E$) ในกรณีตัวอย่างนี้ ปริมาณ Q จึงเท่ากับ $\epsilon_0 E$ จึงนำไปแทนค่าในสมการที่ (3.23)

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_0 E + P}{\epsilon_0 E} \quad (3.24)$$

$$\epsilon_r \epsilon_0 E = \epsilon_0 E + P \quad (3.25)$$

$$P = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 E \quad (3.26)$$

เนื่องจาก $\epsilon_r \epsilon_0 E$ เป็นปริมาณ D ของไดอิเล็กตริก ดังนั้นสมการที่ (3.26) จึงจัดให้เป็นรูปของ D ได้ดังนี้

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (3.27)$$

สมการที่ (3.27) นี้เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณ electric displacement density กับสนามไฟฟ้าในไดอิเล็กตริก ลักษณะไฟฟ้าของ D เริ่มและสิ้นสุดที่ ประจุอิสระเสมอ ในตัวอย่างนี้ประจุบวกลบต่อเรียงกันตลอดไปในเนื้อไดอิเล็กตริก และต่อกับประจุอิสระบนอิเล็กโทรดอย่างต่อเนื่องได้ รอยต่อจึงไม่มีผลต่อปริมาณ D แต่สนามไฟฟ้าที่รอยต่อย่อมไม่เท่ากันเพราะความแตกต่างของ polarization ในไดอิเล็กตริกและอิเล็กโทรด

การแยกขั้วที่ได้กล่าวมาแล้ว เป็นการมองภาพรวมทั้งหมดของเนื้อฉนวน ถ้ามองในระดับของโมเลกุล สนามไฟฟ้าในไดอิเล็กตริกทำให้เกิดการแยกขั้วเป็นประจุบวกและลบ ค่าผลคูณประจุตรงข้ามที่ถูกแยกออกจากกันกับระยะห่าง เรียกว่า dipole moment ของโมเลกุล ปริมาณของมันขึ้นอยู่กับขนาดของสนามไฟฟ้า ดังนั้นถ้าไดอิเล็กตริกมีจำนวนโมเลกุลต่อปริมาตรเท่ากับ N_0 และ polarization (P) หน่วยเป็นคูอมบ์ต่อหน่วยพื้นที่ จึงเป็นดังนี้

$$P = N_0 \alpha E_1 \quad (3.28)$$

α polarizability ของโมเลกุล มีหน่วยเป็น $F.m^2$

E_1 เป็นสนามไฟฟ้าที่โมเลกุล (local field) เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าให้แก่ไดอิเล็กตริก

ค่า αE_1 เป็น dipole moment ของโมเลกุล

P เป็น polarization หน่วยเป็น คูอมบ์ต่อตารางเมตร (Cm^{-2})

จำแนกออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. Electronic polarization เกิดจากสนามไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนและนิวเคลียสของอะตอมย้ายไปอยู่ในตำแหน่งในแนวสนามไฟฟ้าในเวลาใด ๆ มากขึ้น แต่เนื่องจากประจุของนิวเคลียสประมาณ 1.6×10^{-19} C และระยะรัศมีของอะตอมประมาณ 10^{-10} เมตร dipole moment จึงประมาณ 1.6×10^{-29} C.m ถ้าค่า α ของไดอิเล็กตริก ประมาณ 4×10^{-40} F.m² , E_1 ของโมเลกุลจึงมีค่าประมาณ 0.8×10^{11} V.m⁻¹ ซึ่งมักมีค่าสูงกว่า สนามไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ไดอิเล็กตริกโดยทั่วไป

2. Atomic polarization เกิดจากสนามไฟฟ้าทำให้การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลหรือกลุ่มโมเลกุล โยกย้ายไปอยู่ในแนวของสนามไฟฟ้า

3. Dipole orientation polarization เป็นกรณีของไดอิเล็กตริกชนิดโพลาร์ซึ่งมี dipole moment ถาวรอยู่แล้ว การป้อนสนามไฟฟ้าจึงทำให้เกิด polarization ขึ้นได้เป็นจำนวนมาก

4. Interfacial polarization เป็นการแยกชั้นที่เกิดการมีไอออนแทรกตัวอยู่แล้ว ซึ่งอาจมาจากการเติมสารที่มีไอออนลงไป เมื่อมีสนามไฟฟ้าไอออนที่ตรงรอยต่อของไดอิเล็กตริกกับสารเดิมจึงเกิดการแยกชั้น

ไดอิเล็กตริกชนิดต่าง ๆ มีการแยกชั้นได้หลายชนิด ที่ความถี่ต่างกัน ทำให้เพอร์มิวิตี และค่า P แปรตามค่าความถี่

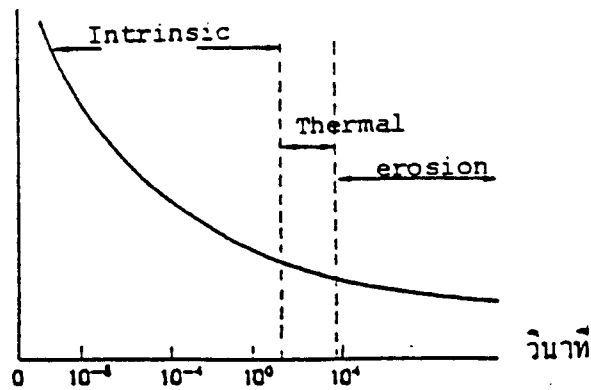
3.3.2 การเสถียรภาพฉนวนของฉนวนของแข็ง

ในระบบไฟฟ้าแรงสูงฉนวนของแข็งทำหน้าที่ทั้งการเป็นฉนวนและเป็นสิ่งค้ำจุดโครงสร้าง ภายภาพของระบบ เนื้อฉนวนที่บริสุทธิ์มีความทนต่อการเสถียรภาพฉนวนสูง ยกตัวอย่างเช่น ไมกามีความทนสูงถึง 75 เมกกะโวลต์ต่อเมตร แต่ในทางปฏิบัติ ฉนวนมีความบริสุทธิ์ไม่ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ และอาจมีสารเจือปนปะปนอยู่ในเนื้อฉนวนเป็นจุดเล็กๆ มีโพรงอากาศหรือมีรอยแยกขนาดเล็กมากเช่น ที่บริเวณผิวสัมผัสกับอิเล็กโตรด โดยมีสาเหตุจากกรรมวิธีการผลิตหรือความเสื่อมตามอายุการใช้งาน ฉนวนที่ไม่บริสุทธิ์มีความทนต่อการเสถียรภาพฉนวนต่ำกว่าฉนวนบริสุทธิ์ เนื่องจากการเกิดการปลดปล่อยประจุบางส่วนภายในจุดที่มีสารเจือปนหรือโพรง แล้วค่อยขยายความเสื่อมสภาพมากขึ้น กลไกที่ทำให้ฉนวนของแข็งเสถียรภาพฉนวนอาจจำแนกตามลักษณะของการเกิดเป็น 5 ประเภท คือ

- ก. การเสถียรภาพฉนวนที่เป็น intrinsic
- ข. การเสถียรภาพฉนวนทางกลไฟฟ้า (electromechanical)
- ค. การเสถียรภาพฉนวนที่เป็น progressive หรือ treeing
- ง. การเสถียรภาพฉนวนเนื่องจากความร้อน (thermal)
- จ. การเสถียรภาพฉนวนเนื่องจากการเสื่อมสภาพ (erosion)

การเสถียรภาพฉนวนทั้ง 5 ประเภทขึ้นอยู่กับเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.18
ความทนต่อการเสถียรภาพฉนวน

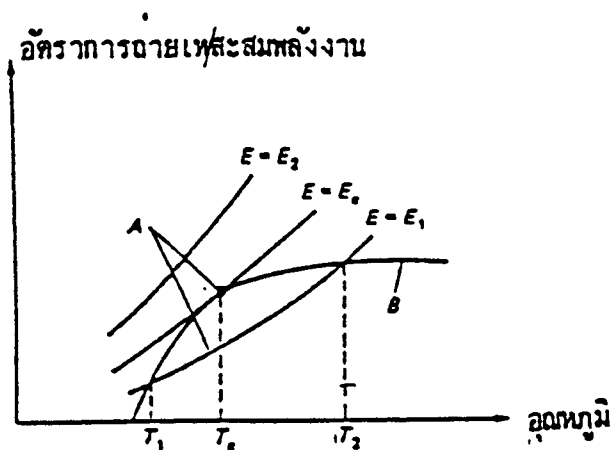
ความทนต่อการเสียหายฉับพลัน



รูปที่ 3.18 ความทนต่อการเสียหายฉับพลันของฉนวนของแข็งที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

ก. การเสียหายฉับพลันที่เป็น INTRINSIC

การเสียหายฉับพลันที่เป็น intrinsic breakdown เกิดขึ้นในเวลาสั้นมาก การเสียหายของฉนวนเช่นนี้ เกิดจากอิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากการป้อนสนามไฟฟ้าสูงจนสามารถ ข้าม energy gap ของโมเลกุล ไปยัง conduction band ทำให้ฉนวนเสียหาย เปลี่ยนเป็นตัวนำไฟฟ้า สนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันคร่อมฉนวนต้องมีค่าสูงมากจึงจะทำให้เกิดการเสียหายฉับพลันประเภทนี้ได้ อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ถ้าอิเล็กตรอนจำนวนมากสะสมพลังงาน ความร้อนเพิ่มขึ้น แล้วไม่สามารถถ่ายเทออกไปจากโมเลกุลได้พอเพียง ฉนวนจะเกิดการเสียหายฉับพลัน รูปที่ 3.19 แสดงอัตราการสะสมพลังงานความร้อน (เส้น A) และอัตราการถ่ายเท (เส้น B) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ถ้าสนามไฟฟ้า (E) มีค่าเกินค่าวิกฤต (E_c) ขึ้นไป อัตราการสะสมพลังงานสูงกว่าอัตราการถ่ายเท ทำให้เกิดการเสียหายฉับพลันขึ้น



รูปที่ 3.19 อัตราการสะสมพลังงาน (เส้น A) และอัตราการถ่ายเทพลังงาน (เส้น B) ของอิเล็กตรอน

นอกจากการเสียดสภาพฉับพลัน เนื่องจากอิเล็กตรอนในเนื้อฉนวนได้รับพลังงานสูงการเสียดสภาพแบบ intrinsic อาจเกิดขึ้นได้จากอะวาลานซ์ของอิเล็กตรอนที่เกิดจากอิเล็กตรอนตัวหนึ่งจากแลโทดวิ่งผ่านไปเนื้อฉนวน โดยได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นจากสนามไฟฟ้า จึงทำให้เกิดการแตกตัวเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนขึ้นเช่นเดียวกับกรณีของการเสียดสภาพฉับพลันในก๊าซ อิเล็กตรอนที่ชนโมเลกุลเพื่อก่อให้เกิดการแตกตัวนั้นต้องสะสมพลังงานได้สูงถึง lattice ionization energy การเสียดสภาพฉับพลันนี้เรียกว่า streamer breakdown เช่นเดียวกับในก๊าซ

ข. การเสียดสภาพฉับพลันทางกลไฟฟ้า

ฉนวนในสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงจะมีผลของแรงที่เรียกว่า electrostatic compressive force ซึ่งอาจทำให้ฉนวนที่อ่อนตัวได้บางชนิดยุบตัวและเกิดการเสียดสภาพฉับพลันได้ Stark และ Garon [30] ได้เขียนสมการของ compressive stress เนื่องจากแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างประจุที่ผิวของอิเล็กโตรดที่เกิดจากความต่างศักย์ และทำให้ฉนวนหดตัวลงไปดังนี้

$$\epsilon_0 \epsilon_r \frac{V^2}{2d^2} = Y \ln \left[\frac{d_0}{d} \right] \quad (3.29)$$

ในสมการนี้ V เป็นแรงดัน (โวลต์), d_0 เป็นความหนาเดิมของฉนวน(เมตร), d เป็นความหนาหลังจากฉนวนถูกกดให้ยุบตัวและรักษารูปร่างในสภาพสมดุลย์ทางกลได้, Y เป็นค่า Young's modulus, ϵ_0 เป็นเพอร์มิติวิตีของสูญญากาศ และ ϵ_r เป็นเพอร์มิติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน จากสมการที่ (3.29) จัดให้เป็นสมการของแรงดัน

$$V^2 = d^2 * \frac{2Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} * \ln \left[\frac{d_0}{d} \right] \quad (3.30)$$

สมการที่ (3.30) มีค่า V สูงสุด ที่ค่า d เท่ากับ $d_0 \cdot e^{-0.5}$ หรือ $0.6 d_0$ กรณีที่ทำการเพิ่มค่า V ให้มากขึ้นอีก ฉนวนจะไม่สามารถรักษารูปร่างให้มีความหนาเป็น d แต่จะถูกกดจนยุบสลายไป ดังนั้นที่ d/d_0 เท่ากับ 0.6 ค่าความเครียดของสนามไฟฟ้า (E_b) ชนิดสม่ำเสมอที่ฉนวนยังรักษารูปร่างหลังการหดตัว จึงเป็นดังนี้

$$E_b = \frac{V}{d_0} = 0.6 * \frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (3.31)$$

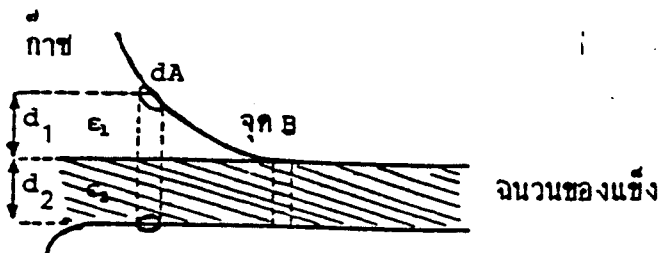
สมการที่ (3.31) นี้ถือว่าฉนวนนั้นมีค่า Y มีความยืดหยุ่นต่ำและหดตัวได้ค่อนข้างยาก

ค. การเสียดสภาพฉับพลันเนื่องจาก TREEING

ในทางปฏิบัติ ฉนวนของแข็งถูกนำมาใช้อยู่ในฉนวนก๊าซหรือของเหลว การเสียดสภาพฉับพลันมักเกิดขึ้นก่อนที่บริเวณรอยต่อในฉนวนที่เป็นก๊าซหรือของเหลว เพราะมีความหนาต่ำกว่า ในรูปที่ 3.20 เป็นตัวอย่างแสดงฉนวนของแข็งระหว่างอิเล็กโตรดมีรอยต่อกับฉนวนก๊าซที่อยู่ด้านซ้ายของจุด B ที่ตำแหน่งพื้นที่ dA สมมติให้มีสนามไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอและให้ปริมาตรทรงกระบอกที่มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ dA มีแรงดันคร่อมระยะ d_1 และ d_2 เท่ากับ V_1 และ V_2 ตามลำดับ แรงดันรวมเท่ากับ V การหาค่า V_1 กระทำได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} V &= V_1 + V_2 \\ &= E_1 d_1 + E_2 d_2 \\ &= \frac{D d_1}{\epsilon_1} + \frac{D d_2}{\epsilon_2} \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} D &= \text{electric displacement} \\ &= \frac{V}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}} = \frac{V}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2}} \end{aligned}$$



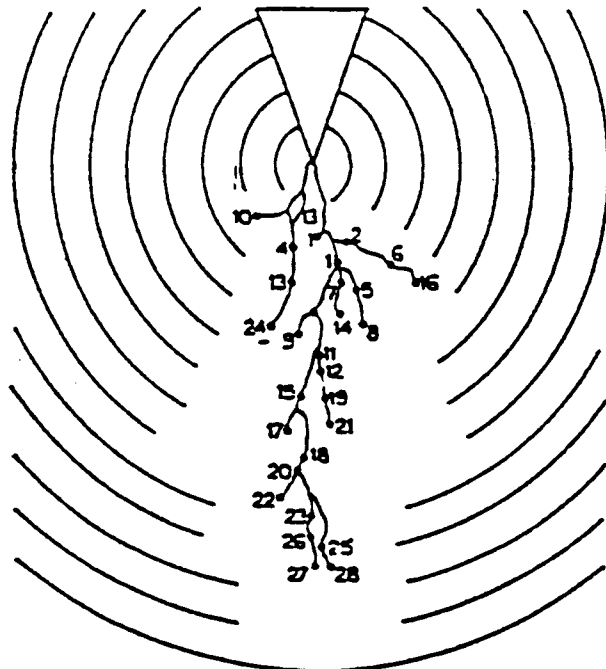
รูปที่ 3.20 รอยต่อของฉนวนของแข็งและก๊าซ

$$\text{ดังนั้น } V_1 = \frac{D d_1}{\epsilon_1} = \frac{V d_1}{d_1 + \frac{\epsilon_1 d_2}{\epsilon_2}} \quad (3.33)$$

จากสมการที่ (3.33) เมื่อระยะ d_1 สั้นลง กล่าวคือเข้าใกล้กับจุด B มากขึ้น ค่า V_1/d_1 หรือความเครียดของสนามไฟฟ้ายิ่งสูงขึ้นและสูงสุดที่จุด B ซึ่งเท่ากับ $V(\epsilon_1/\epsilon_2 \cdot d_2)^{-1}$ โดยทั่วไป ϵ_2 ของฉนวนของแข็งมีค่ามากกว่า ϵ_1 ของก๊าซหรือของเหลว จึงเป็นผลให้เกิดการคายประจุบางส่วนในฉนวนก๊าซหรือของเหลว ϵ_1 และที่บริเวณผิวของฉนวนของแข็งใกล้ ๆ จุด B ออกไป ต่อมาที่ปลาย

การเกิดการคายประจุบางส่วนนี้จะเกิดการคายประจุบางส่วนต่อออกไปอีกและ แทรกเข้าไปในเนื้อ ฉนวนของแข็งที่แตกเป็นขอกเล็ก ๆ จึงมีลักษณะเติบโตคล้ายกับกิ่งไม้ (treeing) ซึ่งเป็นขบวนการที่ ค่อย ๆ เกิดเพิ่มขึ้นทีละเล็กทีละน้อยจนอาจทำให้เกิดการเสียดสภาพฉนวนได้ในที่สุด

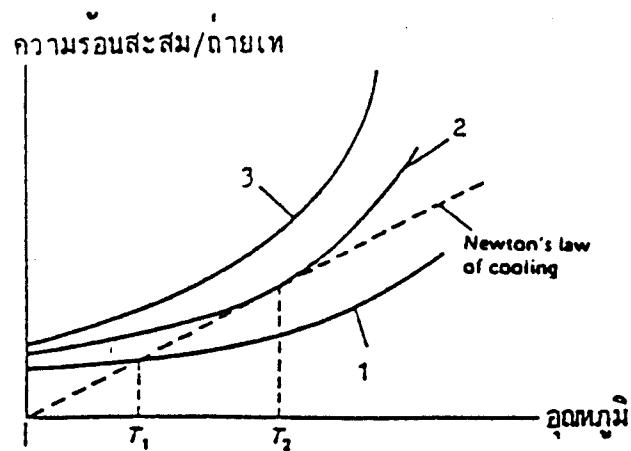
รูปที่ 3.20 แสดงการเกิด treeing ใน polymethyl methacrylate จากจุดปลายแหลมของอิเล็ก ท्रोด ตัวเลขบนรูปเป็นจุดปลายของ treeing ที่บอกถึงลำดับการเติบโตของการคายประจุเมื่อป้อนแรง ดันอิมพัลส์ โดยนับจากเลข 1 ทุก ๆ ครั้งที่ป้อนแรงดัน จะนำฉนวนมาตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อ หาลักษณะของ treeing ที่เกิดขึ้น บางอิมพัลส์อาจไม่เกิดการคายประจุจึงไม่มีแขนงเพิ่มขึ้น ลักษณะการ เกิด treeing นี้ อาจเกิดขึ้นที่จุดใด ๆ ในเนื้อฉนวนของแข็งที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงได้เช่นกัน



รูปที่ 3.21 การเกิด treeing ใน polymethyl methacrylate จากปลายอิเล็กโทรด

ง. การเสียดสภาพฉนวนเนื่องจากความร้อน (THERMAL BREAKDOWN)

การป้อนแรงดันคร่อมฉนวนจะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านขนาดค่า ๆ และเกิดกำลังสูญเสีย ใดอิเล็กทริก (dielectric loss) เป็นผลให้เนื้อฉนวนร้อน ในกรณีที่ความร้อนที่เกิดขึ้นในฉนวนถ่ายเท ออกสู่ภายนอกไม่หมดความร้อนจะถูกสะสมมากขึ้น ๆ ในฉนวน จนกระทั่งเกิดการเสียดสภาพขึ้น ลักษณะดังกล่าวแสดงได้โดยอาศัยรูปที่ 3.22 กราฟเส้นประแสดงการถ่ายเทความร้อนตามกฎของ การระบายความร้อนของนิวตัน ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการป้อนแรงดันขนาดต่าง ๆ มีกราฟเป็นเส้น โค้งขึ้น ได้แก่เส้นที่ 1 , 2 และ 3 ความร้อนที่เกิดขึ้นมาจากกำลังสูญเสียในฉนวนซึ่งขึ้นกับขนาดของ สนามไฟฟ้า ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นตามเส้นที่ 1 จะถ่ายเทออกไปได้หมด จึงมีจุดเสียดสภาพอยู่ที่ อุณหภูมิ T_1 ทำนองเดียวกันความร้อนตามเส้นที่ 2 จะถ่ายเทออกไปได้อย่างสมดุลย์พอดี ที่อุณหภูมิ T_2 แต่สำหรับความร้อนที่เกิดขึ้นตามเส้นที่ 3 จะไม่สามารถถ่ายเทออกไปได้หมดจึงเกิดความร้อน สะสมเพิ่มขึ้นในเนื้อฉนวน



รูปที่ 3.22 เสถียรภาพทางความร้อนในฉนวนของแข็ง

วิธีการหาสมการของกลไกการเสียดภาพฉนวนสามารถพิจารณาจากฉนวนรูปลูกบาศก์ดังในรูปที่ 3.22 สมมุติให้ความร้อนไหลถ่ายเทไปในทิศทางเดียว เช่นกรณีความร้อนที่เกิดขึ้นที่ระนาบตรงกึ่งกลางของแผ่นฉนวนขนาดหนา y ย่อมมีความร้อนไหลไปยังผิวซีกบน หรือซีกล่างของระนาบกึ่งกลาง ในรูปนี้ฉนวนรูปลูกบาศก์มีความร้อนไหลไปในทิศทางของ x ผ่านพื้นที่ภาคตัดขวาง dA ความยาวเมตร และสมมุติให้อิเล็กโตรดเป็นฉนวนนำความร้อนที่ดี

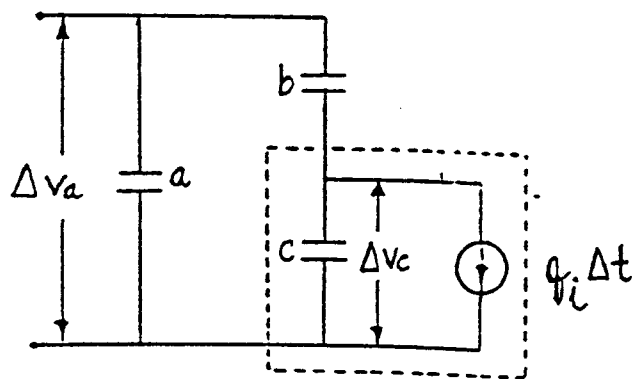
จ. การเสียดภาพฉนวนเนื่องจากโพรงในเนื้อฉนวนและการเสื่อมสภาพ

ในทางปฏิบัติฉนวนไฟฟ้าของแข็งที่ผลิตขึ้นอาจมีโพรงหรือช่องว่างในเนื้อฉนวนโพรงอาจเป็นสารไดอิเล็กทริกชนิดอื่น เช่น เป็นโพรงก๊าซซึ่งมีความทนต่อการเสียดภาพฉนวนต่ำกว่าฉนวนของแข็ง โพรงยังอาจเกิดขึ้นที่ขอบฉนวนของแข็งที่ติดกับผิวอิเล็กโตรด เช่น ในบริเวณที่มีรอยแยกระหว่างผิว เมื่อป้อนแรงดันสูงคร่อมฉนวน โดยที่ฉนวนยังทนต่อแรงดันได้ แต่อาจมีการเกิดการคายประจุบางส่วนขึ้นภายในโพรงหรือช่องว่างนั้นอาจเกิดในเวลาสั้น ๆ เป็นไมโครวินาทีและอาจเกิดซ้ำกันหลาย ๆ ครั้ง ถ้าแรงดันเป็นชนิดกระแสสลับ การคายประจุบางส่วนนี้จะทำให้ฉนวนของแข็งรอบ ๆ บริเวณที่มีโพรงชำรุดและเสื่อมสภาพจึงอาจเป็นสาเหตุการเสียดภาพฉนวนของฉนวนของแข็งในเวลาต่อมา การเสื่อมสภาพเช่นนี้อาจมีสาเหตุ 2 ประการ คือ

ก. การเกิดไอออน และอิเล็กตรอนวิ่งชนรอบผิวของโพรง ทำให้เกิดความร้อนสูงพอที่จะทำให้ฉนวนชำรุด หรือเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้ฉนวนเสื่อมสภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารฉนวนจำพวกอินทรีย์ เช่น พลาสติก

ข. การคายประจุบางส่วนทำให้เกิดการแผ่รังสี เช่น อุลตราไวโอเล็ต ซึ่งช่วยเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพยิ่งขึ้น

การคายประจุบางส่วนในโพรงอาจเกิดขึ้นในลักษณะเป็นประกายในโพรง (sparkover) หรือเป็นการวาบไฟตามผิว (flashover) ที่ผิวของโพรง การคายประจุบางส่วนภายในโพรงที่รุนแรง อาจได้ยินเสียง ประจุที่มีการถ่ายเทเกิดขึ้นในโพรงสามารถวัดได้จากปริมาณการไหลของประจุภายนอกเข้าไปในโพรง และในการวิเคราะห์การคายประจุจึงสมมุติให้ฉนวนมีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมและมีอิเล็กโตรดอยู่ด้านบนและด้านล่าง และมีวงจรมุมของควมจุไฟฟ้าดังรูปที่ 3.23 (ข) ซึ่งประกอบด้วยโพรงก๊าซที่มีความจุไฟฟ้า c และฉนวนที่อยู่ในแนวตั้งด้านบนและด้านล่างของโพรงพอดี มีความจุไฟฟ้า b และต่ออนุกรมกับ c พื้นที่หน้าตัดของ b และ c จึงเท่ากับเนื้อฉนวนทั้งหมดมีความจุไฟฟ้า a นำฉนวนต่อเป็นวงจรเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสสลับที่มีอิมพีแดนซ์ Z_i และจ่ายแรงดัน $v(t)$ เป็นรูปคลื่นไซน์ เมื่อเพิ่มขนาดแรงดันขึ้นจนทำให้เกิดการคายประจุขึ้นในโพรงก๊าซ โดยมีแรงดันคร่อม c เท่ากับ V_{i0} เมื่อการคายประจุเกิดขึ้นแล้ว แรงดันลดลงทันทีที่เป็น V_{r0} การถ่ายเทประจุภายในโพรงที่เกิดขึ้นให้เท่ากับ q_i ในลักษณะเช่นนี้ V_{i0} เรียกว่า ignition voltage และแรงดันคร่อมโพรง (c) หลังการคายประจุเรียกว่า remanent voltage (V_{r0}) ในการวิเคราะห์ พิจารณาให้ $c \gg b$ และ $a \gg b$ เนื่องจากโพรงมีความกว้างของโพรงน้อยเมื่อเทียบกับ b และปริมาตรของ b น้อยกว่า a มาก



รูปที่ 3.23 วงจรสมมุติของฉนวนที่มีโพรงก๊าซ

3.3.3 อายุการใช้งานของฉนวนของแข็ง

ความทนต่อการเสียดสภาพฉนวนของแข็งขึ้นอยู่กัเวลาของการใช้งานน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนของแข็งและของเหลว เนื่องจากความคงทนของฉนวนของแข็งและของเหลวมีค่าต่ำลงเมื่อมีอายุการใช้งานนาน ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจำพวกฉนวนของแข็งที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น พลาสติก พีวีซี โพลีเอทิลีน ยาง การเสื่อมสภาพในขณะใช้งานตามอายุนี้ เรียกว่า aging การเสื่อม

สภาพมีผลมาจากอุณหภูมิ อัตราเร็วในการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ความเครียดทางกลและทางไฟฟ้า การคายประจุบางส่วน ผุนละอองที่สร้างความเครียดของสนามไฟฟ้าเฉพาะจุดและสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ดังนั้นฉนวนของแข็งจึงต้องมีข้อกำหนดและข้อวิเคราะห้เกี่ยวกับอายุการใช้งานของฉนวน เช่น การกำหนดอายุฉนวนเป็น 30 ปี ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์ได้จริงในทางปฏิบัติ การทดสอบต้องใช้เวลา น้อยกว่านี้จึงเป็นการทดสอบที่มีการเร่งอายุ (accelerated life tests) การทดสอบเช่นนี้จำเป็นต้องเพิ่มค่าความเครียดให้สูงกว่าสภาพในการใช้งานและวิเคราะห์หาผลที่สามารถประเมินย้อนกลับไปเป็นสภาพในการใช้งานจริง รวมทั้งต้องพิจารณาผลกระทบที่ด้านอื่น ๆ ที่อาจเกิดขึ้นจากการเพิ่มความเครียด

ในการใช้งานฉนวนจำพวกสารอินทรีย์ที่ได้รับความเครียดของสนามไฟฟ้าสูง ผิวของฉนวนอาจชำรุด เนื่องจากการเกิด tracking ซึ่งเป็นรอยคล้ำสีดำ ๆ บนผิวที่เกิดจากมีคาร์บอนไปฉาบที่ผิว เนื่องจากในตอนแรกผิวฉนวนมีความสกปรกจากไอน้ำและมีฝุ่นละอองมาเกาะที่ผิว ในขณะที่ความชื้นในอากาศสูงขึ้นจะเกิดการนำไฟฟ้าและเกิดความร้อนจนไหม้เกรียมกลายเป็นบริเวณที่เรียกว่า dry-band ลักษณะเช่นนี้ทำให้ผิวฉนวนเสื่อมสภาพ และเป็นอุปสรรคในการนำฉนวนจำพวกสารอินทรีย์ ไปใช้งานในสภาพนอกอาคารหรือในที่โล่ง

3.3.4 ฉนวนของแข็งในงานไฟฟ้าแรงสูง

ฉนวนของแข็งมีคุณลักษณะในการเป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูงแตกต่างกัน เนื่องจากการเกิดการคายประจุบางส่วนภายใน เช่น ไมก้า แก้ว ปอร์ซเลนที่ใช้ทำลูกถ้วยไฟฟ้า และเซรามิกส์ชนิดต่าง ๆ มีเนื้อละเอียดเรียบมัน ทำให้เกิดการคายประจุบางส่วนได้ยากกว่ากระดาษยางโพลีเอทิลีน พีวีซี และสารเคลือบชนิดต่าง ๆ ในงานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นต้องใช้ฉนวนของแข็งมาก ทั้งภายในอุปกรณ์ และภายนอกอุปกรณ์ภายในระบบ เช่น ฉนวนหุ้มสาย แผ่นกั้นขดลวด ฉนวนรองบัสบาร์ ฉนวนลูกถ้วยไฟฟ้า เป็นต้น ฉนวนไฟฟ้าสามารถแบ่งแยกเป็นชนิดใช้ภายนอกอาคารซึ่งเปียกชื้นและมีแสงแดด และชนิดใช้ภายในอาคาร ฉนวนที่ทำมาจากสารอินทรีย์ เช่น พลาสติก มีคุณสมบัติที่ไม่เหมาะสมต่อสภาพการใช้งานภายนอก การเลือกใช้ฉนวนให้เหมาะสม ควรได้คำนึงถึงกำลังสูญเสียหรือค่า $\tan \delta$ ต่ำ ไม่ติดไฟง่าย กรณีติดไฟต้องไม่ให้ก๊าซพิษ และ ราคาที่เหมาะสมต่อการใช้งานด้วย

ไมก้า (MICA) แก้วและปอร์ซเลน (PORCELAIN)

ไมก้าเป็นแร่ผลึกซิลิเกตที่มีส่วนประกอบของอะลูมินาและโปแตช เช่น muscovite, phlogopite, fibrolite และ lipidolite เป็นวัสดุที่เปราะแต่สามารถนำมาใช้ในลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ ติดอยู่บนแผ่นเทพพลาสติกหรือกระดาษ ตัวอย่างการใช้งานได้แก่การใช้เป็นฉนวนของขดลวดในเครื่องกลไฟฟ้าขนาดใหญ่ ซึ่งต้องใช้แรงดันที่อาจสูงถึง 18 กิโลโวลท์

แก้วเป็นสารอนินทรีย์ที่มีส่วนประกอบเคมีเป็น SiO_2 แก้วที่มีส่วนผสมของ alkaline เมื่อนำไปทำฉนวนจะมีความนำไฟฟ้าที่ผิวสูงชันกว่าแก้วที่บริสุทธิ์ ดังนั้นแก้วที่มี alkaline สูงจึงไม่เหมาะในการนำไปใช้ในกรณีแรงดันกระแสตรง และ มีการขยายตัวและหดตัว เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้มากกว่าปอร์ซเลนในการนำไปใช้งาน แก้วต้องผ่านกรรมวิธี hardening โดยให้แก้วผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ถ้าแก้วยังบริสุทธิ์ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 780 องศาเซลเซียส แล้วให้เป่าลมเย็นผ่านผิวแก้ว ซึ่งจะทำให้ผิวแก้วแข็งตัวเร็วกว่าภายใน ซึ่งทำให้แก้วอยู่ในสภาพพร้อมแรงกดจากภายนอกและเนื้อภายในซึ่งเป็นซ้ำกว่าอยู่ในสภาพพร้อมแรงดึงแก้ว จึงมีคุณสมบัติรับแรงกระแทกได้มากขึ้น

ฉนวนไฟฟ้าปอร์ซเลน (porcelain) เป็นวัสดุเซรามิกส์ที่มีส่วนผสมของดิน(clay)ซิลิกาหรือ ควอทซ์และเฟลสปาร์ อย่างละประมาณ 40-60, 20-40 และ 25-35 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้ขึ้นกับแหล่งวัตถุดิบนั้น ๆ ดินทำให้ปอร์ซเลนมีความทนต่อความร้อนฉับพลัน ซิลิกาทำให้คุณสมบัติทางกลสูง และเฟลสปาร์ช่วยให้ความทนต่อแรงดันเสียดสภาพฉับพลันสูง กรณีต้องการความทนต่อแรงกลสูง ๆ มักใช้ซอร์ลูมินาแทนผงซิลิกาบางส่วนหรือทั้งหมด ปอร์ซเลนได้จากการเผาในเตาที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,000 องศาเซลเซียส จนได้เนื้อดินที่สุกและเกาะยึดกันแน่นไม่ดูดซับน้ำ เนื้อปอร์ซเลนยังไม่หลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันอย่างแก้ว ผิวของปอร์ซเลนที่นำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าแรงสูง จึงได้รับการเผาเคลือบให้มันวาวด้วยน้ำประสาน ขบวนการเคลือบนี้เรียกว่า glazing น้ำประสานประกอบด้วยสารแก้วที่ผสมอ็อกไซด์ เช่น BaO , ZnO , CaO การเคลือบผิวยังช่วยให้ฉนวนปอร์ซเลนมีความทนต่อแรงกลสูงขึ้นด้วย

ฉนวนแก้วและปอร์ซเลน ซึ่งเป็นฉนวนอนินทรีย์ นิยมนำมาใช้เป็นฉนวนนอกอาคารซึ่งสามารถทนต่อสภาพอากาศทั้งเปียกชื้นและมีแสงแดดได้ดี และ มีความแข็งแรง มีอายุการใช้งานนานกว่าฉนวนอินทรีย์ เช่น พลาสติก จึงสามารถนำมาทำฉนวนค้ำจุนรับน้ำหนักได้สูง เช่น ช่วงละ 3 เมตร อย่างไรก็ตามฉนวนทั้งสองชนิดนี้มีข้อเสียบางประการ ได้แก่ เปราะ แตกได้เมื่อได้อยู่ในสถานะรับความร้อนและเย็นอย่างรวดเร็ว และการประสานต่อกันเช่นลูกถ้วยไฟฟ้าต้องอาศัยฝากรอบและหมุดโลหะช่วยยึดต่อกัน

กระดาษชุบน้ำมัน (OIL IMPREGNATED PAPER)

กระดาษเป็นฉนวนที่นำมาใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงหลายชนิด เนื่องจากกระดาษมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี ทนต่อแรงดันเสียดสภาพฉับพลันได้ถึงประมาณ 10-15 kV/mm มีค่าเพอร์มิติวิตีสัมพัทธ์ประมาณ 4-5 ค่า $\tan \delta$ ประมาณ 0.06 และมีค่า specific surface resistivity ประมาณ 10^{10} ohm.cm และ specific volume resistivity ประมาณ 10^{12} ohm.cm คุณสมบัติทางกลและการทนต่อความร้อนดี เมื่อเทียบกับราคาของฉนวน กระดาษสามารถ พับงอขึ้นรูปได้ง่าย เช่นเดียวกับไม้แผ่นที่

นำมาใช้ทำฉนวน ก็สามารถตัดให้เป็นรูปทรงที่ต้องการได้ กระดาษและไม่มีข้อเสียในแง่การดูแลความชื้น จากอากาศหรือของเหลวที่ชื้นกว่า ดังนั้นกระดาษและไม้จึงต้องนำไปชุบน้ำมันที่ปราศจากความชื้น หรือ จุ่มในน้ำมันตลอดเวลา การผลิตฉนวนประเภทนี้จึงค่อนข้างยุ่งยาก เบื้อง่าย ฉนวนกระดาษจึงเริ่มถูก ทดแทนด้วยวัสดุประเภทโพลีเมอร์ในระดับแรงดันที่ต่ำกว่า 100 kV กระดาษไม่นิยมใช้ที่ระดับแรงดัน สูงกว่า 500 kV เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากกำลังสูญเสียในเนื้อฉนวน อุปกรณ์ที่ยังคงใช้กระดาษ ได้แก่ เคเบิล ตัวเก็บประจุหม้อแปลงบushing ซึ่งใช้เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์แรงสูงกับสายไฟแรง สูงแบบต่าง ๆ

ยาง

ยาง เป็นวัสดุอินทรีย์ที่ผลิตจากวัสดุธรรมชาติ หรือเป็นวัสดุสังเคราะห์ขึ้นเป็นสารโพลี เมอร์ ที่มีคาร์บอนเป็นโซ่หลักมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ทนแรงดันได้ประมาณ 50 ถึง 390 kV/cm โดยขึ้นอยู่กับส่วนผสมของยาง ยางที่นำมาใช้ ได้แก่ ยางธรรมชาติ , synthetic polyisoprene , silicone rubber , styrene butadiene rubber เป็นต้น ยางมี คุณสมบัติเหนียว ยืดหยุ่นได้มาก แต่ดูด ชื้นน้ำได้มากถึงประมาณ 4-5 % จึงเหมาะนำมาใช้ในกรณีเป็นฉนวนหุ้มภายนอก ในการฝังดิน อยู่ใต้ น้ำ หรือที่มีสารเคมีกัดกร่อนบางชนิด แต่สารเคมีที่เป็นกรดเป็นด่างที่เข้มข้นและก๊าซไอโซน ทำให้ยาง เสื่อมสภาพได้เร็วขึ้น การใช้ยางเป็นฉนวนจึงมีขอบเขตที่จำกัดในงานไฟฟ้าแรงสูง ยางมีคุณสมบัติทน ต่อความร้อนในช่วงใช้งานได้ประมาณ 50 ถึง 120 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง ยาง ธรรมชาติและยางสังเคราะห์ styrene butadiene rubber มีช่วงใช้งาน -50 ถึง 82 องศาเซลเซียส ยางซิลิโคนมีช่วงใช้งาน -115 ถึง 315 องศาเซลเซียส มีความยืดหยุ่นน้อยกว่าและรับแรงดึงได้ ต่ำกว่า

ฉนวนพลาสติกชนิด THERMOPLASTIC

โพลีเมอร์เป็นสารที่มีโมเลกุลเกาะกันเป็นลักษณะเป็นแนวคล้ายกับลูกโซ่ที่นำมาใช้ในอุ ตสาหกรรม ได้แก่ พลาสติก และ elastomer หรือจำพวกยาง พลาสติกแยกออกได้เป็น thermoplastic และ thermosetting plastic พลาสติกเป็นสารสังเคราะห์ที่ขึ้นรูปได้โดยใช้แบบหล่อแบบต่าง ๆ หรือใช้ กรรมวิธี extrusion

Thermoplastics ต้องใช้ความร้อนในการขึ้นรูปทรง และภายหลังได้เย็นตัวลงแล้วจะยัง คงรักษารูปทรงได้ลักษณะการขึ้นรูปนี้สามารถกระทำซ้ำแล้วซ้ำอีก โดยยังคงมีคุณสมบัติเหมือนเดิม โครงสร้างทางเคมีทั่วไปมีคาร์บอนเกาะกันค่อนข้างยาว และอาจมีอะตอมของ N, O , และ S มาเกาะ ร่วมอยู่ด้วย แนวโซ่แต่ละแนวนี้มาเกาะเข้าด้วยกันเป็นเนื้อสาร ด้วย secondary bond

การสังเคราะห์สร้างพลาสติก เป็นปฏิกิริยาเคมีที่สร้างแนวโซ่โมเลกุลของโพลีเมอร์ แต่ละ แนวโซ่จึงมีหน่วยโมเลกุลกลุ่มเล็กๆ ที่เรียกว่า monomer มาเกาะเข้าด้วยกันด้วย covalent bond ปฏิกิริยาที่เกิดลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า chain-growth polymerization

ETHYLENE

เอทีลีน (ethylene) มีโมเลกุลเป็น C_2H_4 ซึ่งมี double covalent bond ระหว่างอะตอมของคาร์บอน (C) และมี 4 single covalent bond ระหว่างอะตอมของ C และ H อื่นๆ เป็นโครงสร้างพื้นฐานของพลาสติกหลาย ๆ ชนิดที่นำมาใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าในลักษณะต่าง ๆ พลาสติกชนิดต่าง ๆ ได้แก่ โพลีเอทีลีน (polyethylene) , พีวีซี (polyvinyl chloride), polypropylene, polystyrene, polyacrylonitrile, styreneacrylo nitrile , ABS (acrylonitrile , butadiene and styrene) , fluoroplastic, polyamide (nylon), polycarbonate เป็นต้น

PVC (POLYVINYL CHLORIDE) และพลาสติกชนิดอื่น ๆ

การแทนที่อะตอมของไฮโดรเจนใน monomer ของเอทีลีนด้วยคลอรีน (Cl) จะได้ PVC ซึ่งนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจาก PVC มีคุณสมบัติผสมกับสารอื่นได้โดยง่าย เช่น plasticizers ซึ่งเป็นสารเคมีจำพวก esters ที่ช่วยเพิ่มความทนต่อแรงดัน และ heat stabilize ซึ่งเป็นสารเคมีจำพวกสังกะสี , ดีบุก , ตะกั่ว , barium-cadmium, calcium ซึ่งช่วยให้ PVC ยืดทนความร้อน , สารหล่อลื่น , สี , และ fillrs ซึ่งเป็นสารผสมจำพวก calcium carbonate ที่ช่วยเพิ่มเนื้อสารเพื่อลดต้นทุนในการผลิต สารผสมทำให้ PVC มี คุณสมบัติอ่อนตัวง่ายและเหมาะแก่การใช้เป็นฉนวนหุ้มสายไฟฟ้าชนิดอ่อน หรืออาจทำให้ PVC แข็งเพื่อใช้ทำท่อไฟฟ้าได้ เป็นต้น

สารพลาสติก เช่น โพลีเอทีลีน (PE) ถูกสร้างให้มี secondary band จำนวนมาก ซึ่งเรียกว่า cross link จะทำพลาสติกไม่หลอมตัวที่อุณหภูมิสูง แต่จะมีลักษณะอ่อนตัวเท่านั้น ถ้าอุณหภูมิยิ่งสูงก็จะลุกไหม้แปรสภาพไป สารชนิดนี้เรียกว่า PEX (cross-linked polyethylene) หรือ XLPE

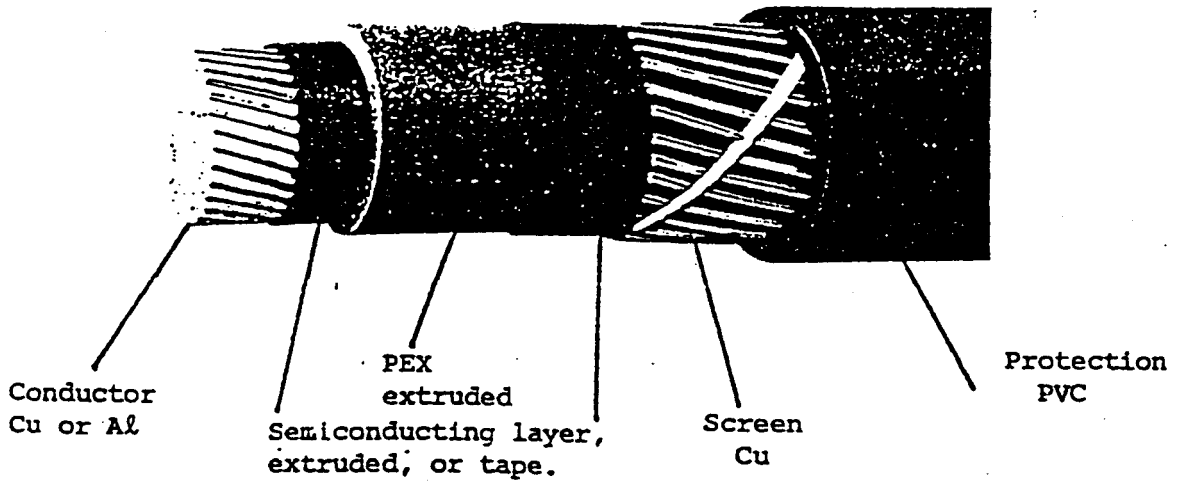
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ THERMOPLASTIC

สาร thermoplastic ถูกนำมาใช้เป็นฉนวนของสายเคเบิลแรงสูง และสายไฟฟ้า ได้แก่ พลาสติก PVC , PE และ PEX เป็นต้น ข้อแตกต่างด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้าและที่ใช้งานแสดงอยู่ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ THERMOPLA

พลาสติก	relative permittivity	resistivity (ohm.cm)	thermal resistivity ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$)	ความทนแรงดัน (kV/mm)	$\tan \delta$	อุณหภูมิใช้งาน ($^{\circ}\text{C}$)
PVC	3.8-6	10^{14}	700	11-12	0.012-0.15	60
PE (ปกติ)	2.3	10^{16}	400	19-20	2×10^{-4}	90
PE (ผ่านรังสีแกมมา)	-	-	-	70-100	5×10^{-4}	-
PEX	2.3	10^{16}	400	20-40	4×10^{-4}	90
POLYESTER	3-7	$10^{13}-10^{15}$	-	25-45	0.003-0.03	-
POLYSTYRENE	2.5	10^{19}	-	20-35	0.002	-
Nylon	4-14	$10^{12}-10^{15}$	-	15-20	0.014-0.13	3-300
FLUOROCARBON						
polytetrafluoroethylene (PTFE)	2	10^{18}	-	20	0.0002	300
polychlorotrifluoroethylene (PCTFE)	2.3-2.8	1.2×10^{18}	-	21	0.0012-0.0036	150

ตารางที่ 3.6 เป็นข้อมูลสำหรับเลือกพลาสติกเพื่อใช้งานด้านไฟฟ้าแรงสูง เช่น การเลือกฉนวนของสาย นอกจากนี้ข้อมูลเหล่านี้แล้ว อาจจำเป็นต้องทราบคุณสมบัติเฉพาะอื่น ๆ ได้แก่ ความทนต่อก๊าซโอโซน ความร้อน โคโรนา ความเหนียว ความยืดหยุ่น เป็นต้น เพื่อให้ได้พลาสติกที่เหมาะสมกับงานนั้นๆ ฉนวนพลาสติกต้องปราศจากโพรงอากาศในเนื้อฉนวนและควรมีกำลังสูญเสียต่ำ พีวีซี มีค่ากำลังสูญเสียค่อนข้างสูงและเสี่ยงต่อการเสียดสภาพฉนวน เนื่องจากแรงดันจึงนิยมใช้ในระบบที่มีแรงดันต่ำกว่า 11 กิโลโวลต์ ที่แรงดันสูงกว่านี้อาจใช้ PEX เป็นฉนวนรูปที่ 3.25 แสดงตัวอย่างสายเคเบิลที่ใช้ฉนวน PEX และมีฉนวนป้องกันภายนอกเป็น PVC



รูปที่ 3.25 ตัวอย่างฉนวนพลาสติกของสายเคเบิลแรงสูง

พลาสติกชนิด THERMOSETTING

พลาสติกชนิด THERMOSETTING เกิดขึ้นจากการสร้างโพลีเมอร์ในสภาวะความดันสูง ทำให้โพลีเมอร์ไม่เป็นแนวเส้นตรงอย่างเดียว แต่เกิดเป็นลักษณะของ cross - link ดังรูปที่ 3.24 และมีแนวเป็น 3 มิติ ถ้ามี cross-link จำนวนมาก จะทำให้เกิดพลาสติกที่แข็งเป็น resin เมื่อได้รับความร้อนอีกจะไม่หลอมตัว รูปทรงจึงคงสภาพ

Epoxy resin เป็น thermosetting ชนิดหนึ่งที่หล่อขึ้นรูปโดยใช้สารผสมชนิด อีนทรีรี่ สารผสมนี้ทำให้เกิดการหดตัวและเกิดความร้อนขณะบ่มให้แข็งตัว epoxy ชนิดหล่อนี้ นำมาใช้เป็น bushing หรือ ขั้วต่อสายแรงสูงกับหม้อแปลงไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ หรือใช้เป็นฉนวนหุ้มขดลวดหม้อแปลงชนิดแห้ง เป็นต้น

Polyester เป็น thermosetting อีกชนิดหนึ่งที่แยกเป็นประเภทอิมตัว และไม่อิมตัว นำมาใช้ผสมกับใยแก้วและทำเป็นแผ่นบาง ๆ ประเภทอิมตัวใช้ทำแผ่นไฟเบอร์และฟิล์มที่ใช้หุ้มสายไฟ ประเภทไม่อิมตัวใช้ทำเป็นแผ่นหนาผสมใยแก้ว เช่น ทำแผ่นคั่นระหว่างขดลวดในหม้อแปลง

นอกจาก epoxy และ polyester การใช้สารผสมชนิดอื่น ๆ และใช้ร่วมกับใยแก้ว กระดาษหรือวัสดุอื่น ทำให้ได้ thermosetting ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมกับความต้องการและสามารถยึดติดกับโลหะได้ดี ตัวอย่างคุณสมบัติของ thermosetting บางชนิดแสดงอยู่ในตาราง 3.7

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของ thermosetting

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติของ thermosetting	epoxy ผสม silicon	phenolic resin ติดกับ กระจก	epoxy ผสม แผ่นใยแก้ว	polyester ชนิดผง
ความถ่วงจำเพาะ	1.8	1.35	1.7	1.8
permittivity	4.0	5.2	4.0	5.7
ความทนแรงดันไฟฟ้า	18.0	15.0	14.0	10.0
thermal conduc tivity (W/mK)				
การดูดความชื้นใน 24 ชั่วโมง	0.65 0.04	0.21 2.7	0.65 0.1	0.85 0.025

หน่วยที่ 4

การผลิตไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์และการวัด

การผลิตไฟฟ้าแรงสูงเพื่อใช้ทดสอบวัสดุและอุปกรณ์ฉนวนไฟฟ้าแรงสูง แบ่งการผลิต ออกเป็น

1. แรงดันกระแสสลับ
2. แรงดันกระแสตรง
3. แรงดันอิมพัลส์

4.1 การผลิตแรงดันสูงกระแสสลับ

ในการทดสอบฉนวน การผลิตแรงดันสูงกระแสสลับใช้หม้อแปลงทดสอบมีลักษณะเฉพาะเป็นชนิด 1 เฟส ผลิตแรงดันสูงเทียบกับกราวด์ ขนาดแรงดันทดสอบตามมาตรฐาน IEC ฉบับที่ 602-1973ได้ กำหนดให้เป็นค่าแรงดันจุดยอดหารด้วย $\sqrt{2}$

แรงดันสูงกระแสสลับที่ใช้ในงานทดสอบฉนวน จำแนกออกเป็นชนิดความถี่กำลังเช่น 50 Hz และความถี่สูง เช่น 100 KHz แรงดันสูงที่ความถี่สูง นำไปใช้ทดสอบฉนวน ในสภาพที่ต้องการหลีกเลี่ยงสภาวะแม่เหล็กอิ่มตัว และนำไปสร้างไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

การสร้างแรงดันสูงกระแสสลับมี 2 วิธีคือ

1. การใช้หม้อแปลง
2. การใช้วงจรเรโซแนนท์

การกำหนดขนาดพิกัด KVA ที่ใช้ทดสอบฉนวน

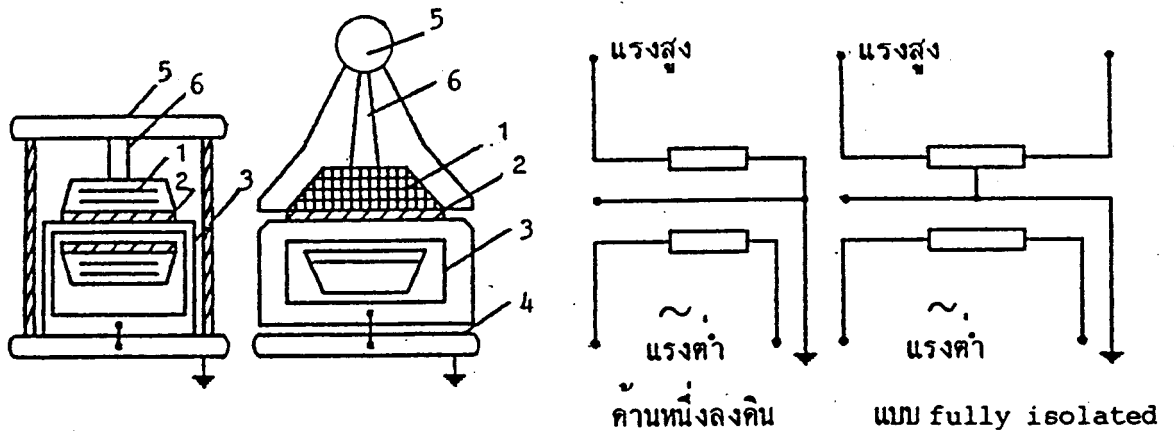
วงจรทดสอบฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแหล่งจ่ายแรงดันต่อกับโหลดตัวเก็บประจุที่มีกำลังสูญเสีย้น้อยมาก ถ้าให้ค่าความจุไฟฟ้าของฉนวนที่นำมาทดสอบเท่ากับ C_t และให้แรงดันคร่อมฉนวนมีความถี่ f เท่ากับ V ขนาดพิกัดกำลัง P ในหน่วย KVA ดังนี้

$$P \geq V^2 2\pi f C_t \quad (4.1)$$

แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าความจุไฟฟ้าของเครื่องวัด บุษชิงหรือข้าวตอกในวงจร ฉะนั้นจึงควรให้ค่าเพิ่มขึ้นอีกเป็น 2 เท่าของค่าจากสมการ

4.1.1 หม้อแปลงทดสอบ

หม้อแปลงทดสอบมีลักษณะคล้ายหม้อแปลงเฟสเดียว มีลักษณะดังรูป 4.1 นิยมใช้แรงดันสูงไม่เกิน 100 KV



(ก) โครงสร้างหม้อแปลงทดสอบ

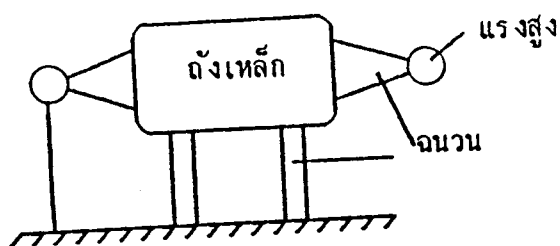
- 1. ขดลวดแรงสูง
- 2. ขดลวดแรงต่ำ
- 3. แกนเหล็ก

(ข) วงจรหม้อแปลงทดสอบ

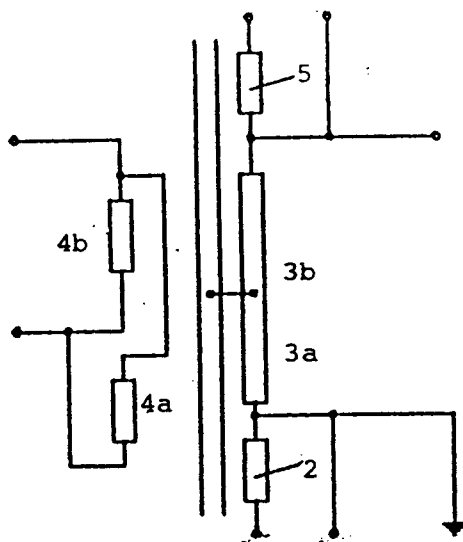
- 4. ฐาน
- 5. ขั้วต่อสาย
- 6. ฉนวน

รูปที่ 4.1 หม้อแปลงทดสอบ

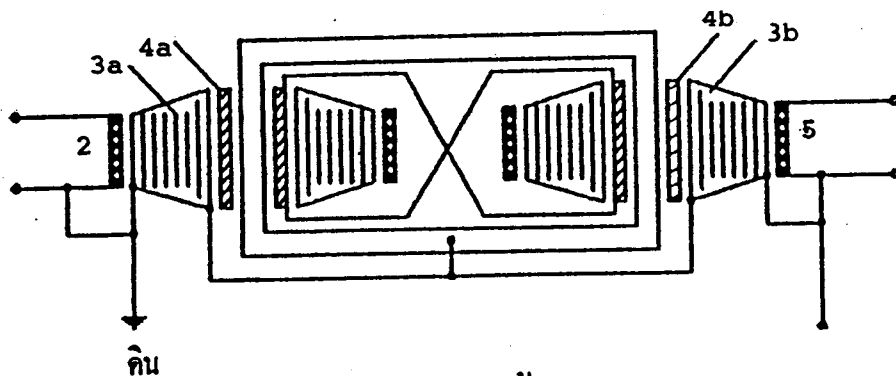
ในกรณีที่ต้องการแรงดันสูงกว่า 100 KV การพันขดลวดของหม้อแปลงจะเป็นดังรูป 4.2 มีขดลวด 4 ชุด กำกับด้วยหมายเลข 2,3,4,5 พันอยู่บนแกนเหล็กเดียวกัน ในรูป 4.2 (ค) ขดลวดแรงสูงต่อกับแกนเหล็กทำให้แกนเหล็กมีแรงดันสูงด้วย แบ่งออกเป็น 3a และ 3b เพื่อลดความเครียดของขดลวดบางส่วน ขดลวด 4a และ 4b พันชิดแกนเหล็กมีหน้าที่ช่วยลดค่า Leakage Reactance ระหว่างขดลวดแรงสูง 3 และขดลวดแรงต่ำ 2 ขดลวดหมายเลข 5 ต่อกับขดลวด 3b เพื่อนำไปใช้เป็นขดปฐมภูมิให้หม้อแปลง Cascade



(ก) รูปลักษณะภายนอก



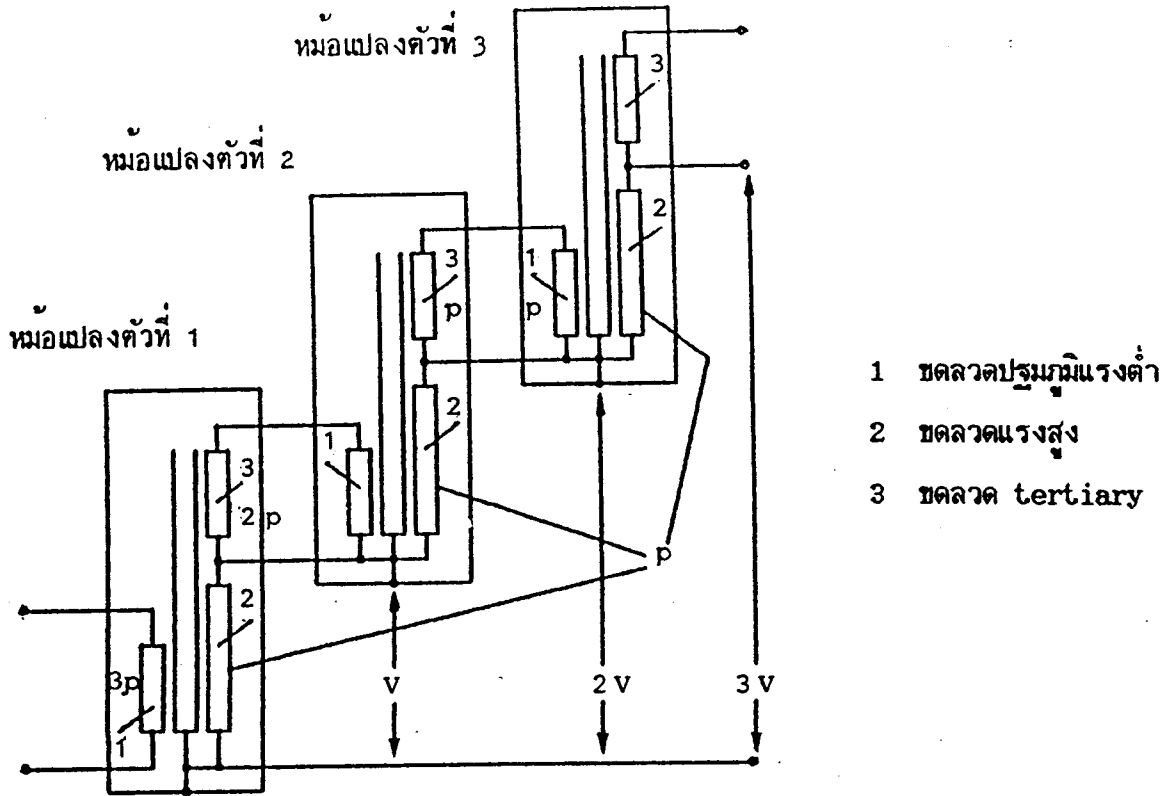
(ค) วงจรหม้อแปลง ดิน



(ข) โครงสร้างภายใน

รูป 4.2 หม้อแปลงทดสอบชนิดต่อแกนเหล็กกับจุดกึ่งกลางขดลวดแรงสูง

Cascade ของหม้อแปลงทดสอบ ปัจจุบันนิยมใช้ระดับแรงดันเกินกว่า 500 KV เพราะขยายระบบได้สะดวกและติดตั้งได้ง่ายยิ่งขึ้น จุดหลักสำคัญของการ Cascade คือ การหา วิธีป้องกันแรงดันต่ำให้แก่ขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงชุดถัดไป ดังรูป 4.3 ขดลวดหมายเลข 3 เป็นขดปฐมภูมิป้องกันแรงต่ำให้แก่หม้อแปลงแต่ละชุด ขดลวด 2 เป็นขดลวดแรงสูงที่ต่ออนุกรมกัน ถ้าหม้อแปลงแต่ละตัวมีลักษณะเหมือนกัน 3 ตัวต่อ Cascade กันจะได้แรงดันสูงเป็น 3 เท่าของแรงดันสูงของแต่ละตัว



รูปที่ 4.3 วงจร cascade ของหม้อแปลงทดสอบ

ข้อเสียของการต่อหม้อแปลงแบบ cascade คือ การมีกระแสไหลในขดลวดด้านปฐมภูมิของเป็น 3P หม้อแปลงแต่ละตัว ในรูป 4.3 ถ้ากำหนดให้กำลังเป็น P ต่อแรงดันด้านแรงสูงของหม้อแปลงเท่ากับ V หม้อแปลงตัวที่ 3 ต้องมีกำลังด้านเข้าเท่ากับ P ทำให้หม้อแปลงตัวที่ 2 ต้องใช้กำลังป้อนในขดลวด 3 เป็น P ด้วย เมื่อรวมกับกำลัง P ในขดลวด 2 เท่ากับ 2 P จึงทำให้กำลังด้านเข้าของหม้อแปลงตัวที่ 1

4.2 การผลิตแรงดันสูงกระแสตรง

แรงดันสูงกระแสตรง ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์หลายชนิด ได้แก่ เครื่องเร่งอนุภาค เอ็กซ์เรย์ เครื่องขจัดฝุ่น เครื่องพ่นสีชนิดใช้ไฟฟ้าสถิตย์ และโทรทัศน์ เป็นต้น ลักษณะทั่วไปของแรงดันกระแสตรงถูกกำหนดด้วย ชนิดของขั้ว (polarity) เป็นบวกหรือลบ ค่าเฉลี่ยเชิงเลขคณิต (\bar{V}) ค่ายอด (peak) และตัวประกอบความพลัว (ripple factor) ถ้าให้ T เป็นคาบเวลาของแรงดัน $v(t)$ และให้ $\bar{0V}$ เป็นค่าครึ่งหนึ่งของผลต่างของค่าแรงดันสูงสุด V_{max} และค่าแรงดันต่ำสุด V_{min} สมการของ \bar{V} และ ripple factor เป็นดังนี้

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (4.2)$$

$$\delta V = 0.5 (V_{\max} - V_{\min}) \quad (4.3)$$

$$\text{ripple factor} = \frac{\delta V}{V} \quad (4.4)$$

การผลิตแรงดันกระแสตรงมี 2 วิธีคือ วิธีที่ใช้การเรียงกระแส(rectification) และวิธีไฟฟ้าสถิตย์ สำหรับ

การแรงดันทดสอบชนิดแรงดันกระแสตรง นิยมผลิตขึ้นจากวิธีการเรียงกระแสและให้ ripple factor ไม่เกิน 5%

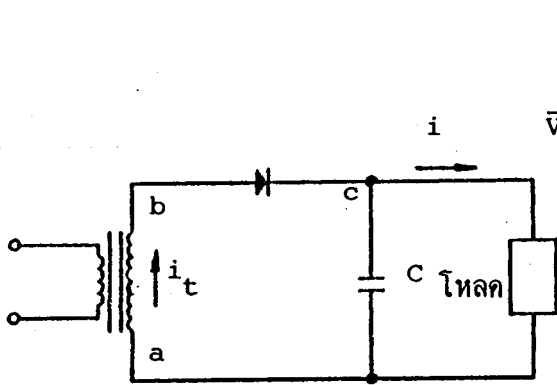
4.2.1 การผลิตแรงดันสูงกระแสตรงโดยใช้วงจรไดโอด

วงจรเรียงกระแสที่ใช้ผลิตแรงดันสูงกระแสตรงมีลักษณะเช่นเดียวกันกับที่ใช้ในวงจร อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก คือ วงจรไดโอดที่ใช้เรียงกระแสและวงจรกรองแรงดันให้เรียบขึ้น โดยใช้ตัวเก็บประจุอย่างเดี่ยวหรือใช้ร่วมกับตัวเหนี่ยวนำด้วยลักษณะวงจรเรียงกระแสที่อาจนำมาใช้ผลิตแรงดันสูง จากแบบที่ไม่ค่อยซับซ้อนขึ้นไป ได้แก่ วงจร half-wave rectifier และ biphase half-wave rectifier , วงจร multiplier แบบ Cockerott Walton และแบบใช้ร่วมกับหม้อแปลงคาสเคดชนิดอื่น ๆ ไดโอดที่นำมาใช้ในวงจรเรียงกระแส ต้องพิจารณาถึงชนิดของสารกึ่งตัวนำและค่า พิกัดของไดโอด ไดโอดชนิด Selenium เหมาะแก่การทำงานที่ไม่ต้องการขนาดกระแสต่อพื้นที่หน้าตัดของไดโอดสูง เพราะมีข้อดีในด้านไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่ ค่าความจุไฟฟ้าของ depletion layer สูงกว่าแบบอื่น ๆ จึงนำมาต่อคาสเคดเป็นชั้น ๆ โดยไม่ต้องมีตัวเก็บประจุเพื่อช่วยกระจายแรงดันคร่อมไดโอดแต่ละชั้นให้เท่า ๆ กันได้สูงถึง 600 กิโลโวลต์ แต่ถ้าสูงกว่าระดับนี้ ต้องใช้ voltage grading capacitor นอกจากไดโอดชนิดสารกึ่งตัวนำ ยังมีไดโอดรุ่นก่อนที่เป็นหลอดสูญญากาศ ซึ่งต้องใช้ขั้วลวดให้ความร้อนด้วย หลอดไดโอดชนิดนี้ยังมีที่ใช้ใน อุปกรณ์บางชนิด เช่น เอ็กซ์เรย์ซึ่งสามารถใช้เป็น หลอดเอ็กซ์เรย์ได้ด้วย

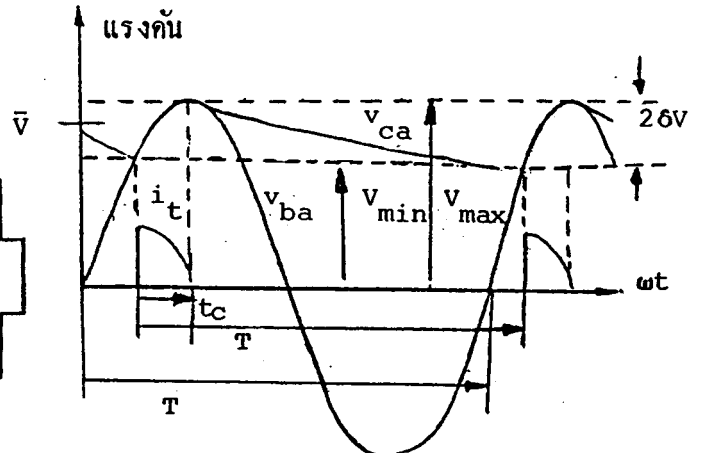
หลักการการทำงานของวงจรเรียงกระแส และทำให้เกิดแรงดันกระแสตรงจากแรงดัน กระแสสลับอาจพิจารณาได้จากวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่น ดังในรูปที่ 4.4 (ก) เริ่มพิจารณาในเวลาหนึ่งคาบ T ให้ความถี่ของแหล่งจ่ายแรงดันเป็น f และสมมุติว่า ไดโอดและหม้อแปลงมีค่าแรงดันตกคร่อมน้อยมาก เนื่องจากมีค่าอิมพีแดนซ์ภายในต่ำตัวเก็บประจุจึงได้รับการอัดประจุเต็มทีค่าแรงดัน V_{\max} และแรงดันด้านออกของหม้อแปลงระหว่างจุด a และ b เป็นแรงดันกระแสสลับมีค่าอยู่ระหว่าง $\pm V_{\max}$ ขึ้นอยู่กับเวลา ดังนั้น ไดโอดจะนำกระแสเพียงครึ่งคาบเวลา ถ้าโหลดมีค่าเป็นอนันต์ แรงดันคร่อม C จะมีค่าคงที่ ทำให้แรงดันคร่อมไดโอด (v_{cb}) มีค่าจากศูนย์ไปจนถึง $2V_{\max}$ ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า v_{ba} ขณะนั้น ๆ ไดโอดที่นำมาใช้ในในด้านไฟฟ้าแรงสูงจึงต้อง กำหนดให้ทนค่า peak reverse voltage ซึ่งเท่ากับ $2V_{\max}$ ในขณะที่ไดโอดไม่นำกระแส และ v_{ba} เท่ากับ $-V_{\max}$ แรงดันคร่อมไดโอดขณะไม่มีโหลด และ กำหนดให้จุด b

เป็นกราวนด์ของด้านแรงสูงจะ-สามารถใช้เป็นแรงดันสูงได้ เช่น ในกรณีของวงจรชนิด voltage doubler แต่แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C ก็สามารถใช้เป็นแรงดันสูงได้

$$v_{ba} = V_{\max} \sin \omega t, \quad \bar{V} = V_{\max} - 2\delta V$$



(ก) วงจร



(ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแส

รูปที่ 4.4 วงจรเรียงกระแสชนิดครึ่งคลื่นและตัวเก็บประจุ

ถ้าโหลดมีค่าไม่เป็นอนันต์ แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ C จะลดลง เนื่องจากการคายประจุไปยัง โหลด ดังในรูปที่ 4.4 (ข) กระแส i_c ไหลผ่านไดโอดไปอัดประจุให้ C เพิ่มเต็มทุก ๆ คาบเวลา T และ กระแส i_c ซึ่งขึ้นกับค่า δV ในการคำนวณหาค่า δV เพื่อหาค่า ripple อาจหาได้จากการคำนวณ ประจุ Q ที่ C ได้รับการอัดเพิ่มเต็มทุก ๆ คาบเวลาต้องเท่ากับประจุที่ C คายไปให้แก่โหลดทุก ๆ คาบ เวลา ในที่นี้สมมุติให้แรงดันคร่อมไดโอดมีค่าน้อยมากขณะมีการนำกระแส ดังนั้น

การอัดประจุทุก ๆ คาบเวลา T

$$Q = C(V_{\max} - V_{\min}) \quad (4.5)$$

การคายประจุทุก ๆ คาบเวลา T

$$Q = \int_0^T i \, dt = T I_{dc} \quad (4.6)$$

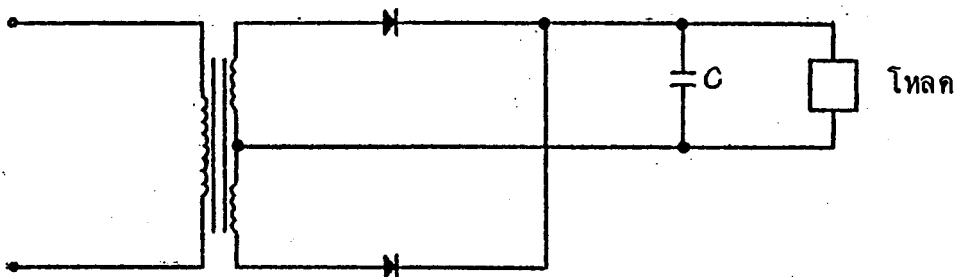
ในสมการที่ (4.6) I_{dc} เป็นกระแสเฉลี่ยผ่านโหลดหรือฉนวนทดสอบเมื่อแทนค่า $(V_{\max} - V_{\min})$ โดยใช้สมการที่ (4.5) และให้สมการที่ (4.5) เท่ากับสมการที่ (4.6) จึงได้

$$C(2\delta V) = T I_{dc}$$

$$\delta V = \frac{T I_{dc}}{2C} = \frac{1}{2fC} I_{dc} \quad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.4) พบว่า ripple factor เมื่อมีกระแสผ่านโหลดขึ้นกับค่าพารามิเตอร์ fC ในวงจรทดสอบด้วยแรงดันกระแสตรง จำเป็นต้องมีความต้านทานต่ออนุกรมกับโหลดด้วย เพื่อป้องกันมิให้กระแสไหลผ่านไดโอดสูงเกินพิกัดในขณะที่เกิดการเสียดังกล่าวขึ้นที่ฉนวน และทั้งนี้ต้องใช้อุปกรณ์ตัดวงจรที่จ่ายแรงดันจากต้นทางอย่างฉับพลันด้วย

วงจรกรองกระแสชนิดครึ่งคลื่นที่ได้กล่าวนี้ มีข้อเสียอีกประการหนึ่ง คือ การเกิดสภาวะแม่เหล็กอิ่มตัวใน ช่วงที่กระแสผ่านหม้อแปลงมีขนาดใกล้เคียงกับกระแสผ่านโหลดวิธีแก้กระทำได้โดยใช้วงจรที่เรียกว่า biphas half-wave rectifier ซึ่งมีการเพิ่มขดลวดหม้อแปลงอีกหนึ่งขด และไดโอดอีก 1 ขด ดังในรูปที่ 4.5 จึงมีไดโอด 2 ขด นำกระแสในแต่ละครึ่งคาบเวลาสลับกันทำให้ ripple factor ลดลงไปจากเดิมอีกครั้งหนึ่งอุปกรณ์ที่สำคัญในการนำวงจรในรูปที่ 4.5 มาใช้ คือการต่อลงดินที่จุดกึ่งกลางของด้านแรงสูงของหม้อแปลงจึงหันมาใช้วงจรชนิด voltage doubler หรือวงจร voltage multiplier แบบคาสเคด

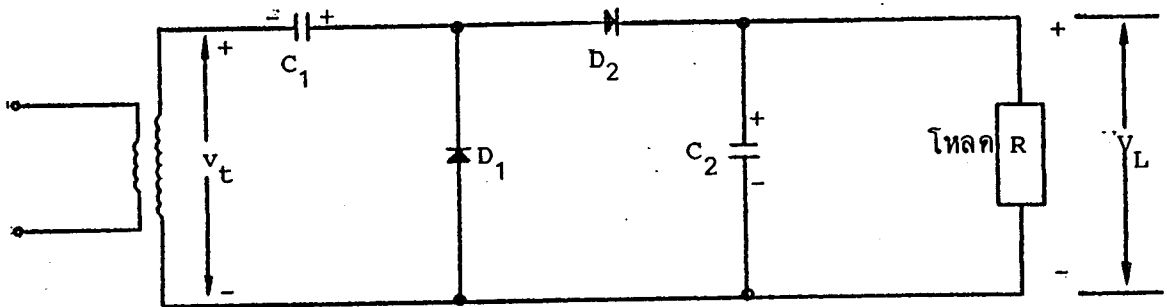


รูปที่ 4.5 วงจร biphas half-wave rectifier

นอกจากการใช้วงจรเรียงกระแสในการสร้างแรงดันสูงกระแสตรง ยังอาจเสริมการสร้างแรงดันกระแสตรงให้เรียบขึ้นโดยใช้ความถี่สูง การเพิ่มจำนวนเฟสและขนาด C ทั้งนี้ต้องพิจารณาแรงดันตกคร่อมไดโอดขณะนำกระแส และกระแสต้านโหลดอาจไม่เป็นเชิงเส้นกับแรงดันคร่อมโหลด ในการออกแบบอย่างละเอียด

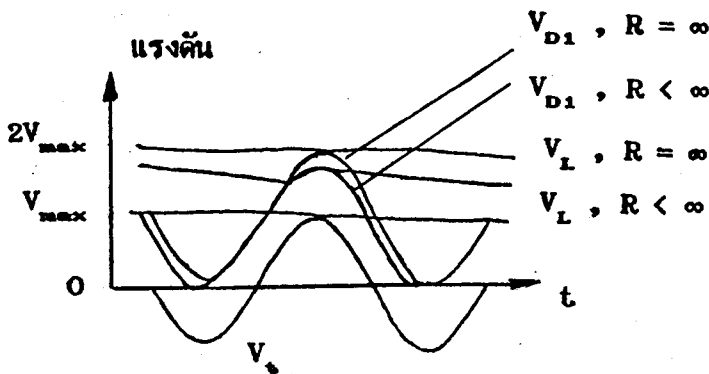
4.2.2 วงจรผลิตแรงดันสูงกระแสตรงแบบ VOLTAGE DOUBLER

วงจรที่นิยมใช้สร้างแรงดันสูงกระแสตรงคือวงจรของนักฟิสิกส์ชื่อ H. Greinacher ท่านได้สร้างขึ้นเมื่อประมาณปี พ.ศ.2463 และได้เรียกวงจรนี้ว่าวงจร Greinacher Doubler ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งประกอบด้วยไดโอดและตัวเก็บประจุอย่างละ 2 ชุด



ก) วงจร

รูปที่ 4.6 Greinacher doubler circuit



(ข) รูปคลื่นแรงดันในสถานะอยู่ตัว

รูปที่ 4.6 Greinacher doubler circuit

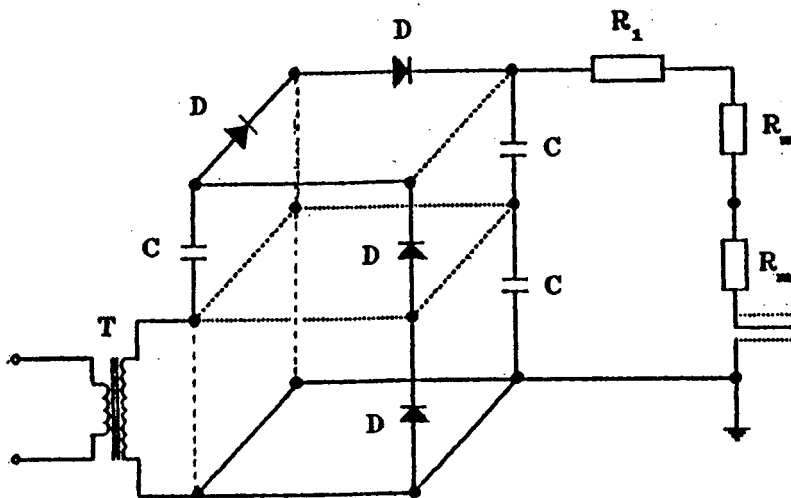
หลักการทํางานของวงจร อาจพิจารณาได้จากแรงดัน v_t ด้านออกของหม้อแปลง ในช่วงคลื่นลบ ทำให้ไดโอด D_1 นำกระแส และอัดประจุให้กับ C_1 และ C_2 ถ้าโหลด R มีค่าสูงเป็นอนันต์ แรงดันคร่อม C_2 จะมีค่าคงที่ และไดโอด D_2 อยู่ในสถานะไบแอสย้อนกลับไปทาง C_1 ทำให้ C_2 มีค่าแรงดันสูงขึ้นถึงค่าสูงสุดของแรงดันคร่อมไดโอด D_1 คือเท่ากับ $2V_{max}$ ของ v_t เพราะแรงดันคร่อม C_1 ที่สูงที่สุดจะเท่ากับ V_{max} ดังนั้น ในกรณีที่โหลดมีค่าเป็นอนันต์

$$V_L = 2V_{\max} \quad (4.8)$$

$$\text{ขณะโบลแอสย้อนกลับ } V_{D1} = V_{D2} = 2V_{\max} \quad (4.9)$$

รูปที่ 4.6 (ข) แสดงแรงดันคร่อมไดโอด D_1 ซึ่งเป็นเสมือนตัวจ่ายแรงดันอัดประจุให้ C_2 และแสดงแรงดันคร่อมโหลด ซึ่งเป็นแรงดันกระแสตรงที่ใช้ในการทดสอบ ทั้งในขณะโบลเป็นและไม่ใช่ค่าอนันต์ การวิเคราะห์ค่า ripple factor ยังคงใช้หลักเดียวกันกับ สมการที่ (4.4)

วงจรของ Greinacher เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากความไม่ยุ่งยากซับซ้อนของส่วนประกอบซึ่งสามารถทำให้เป็นหน่วยโครงสร้างใหญ่ ๆ ได้ ดังในรูปที่ 4.7 ซึ่งเป็นรูปการติดตั้งระบบทดสอบ



T หม้อแปลงแรงสูง

D ไดโอด

R_1 ความต้านทานจำกัดกระแส

R_m ความต้านทานเพื่อการวัด

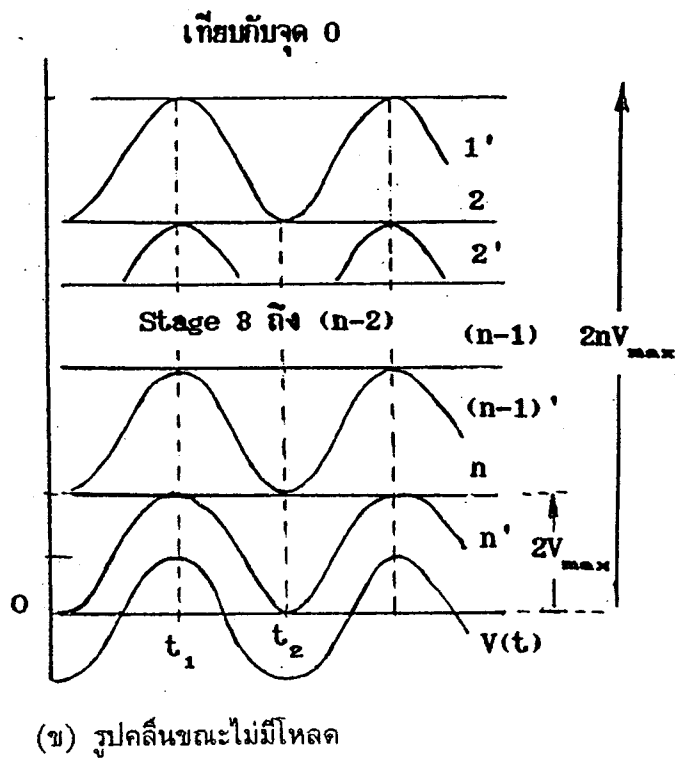
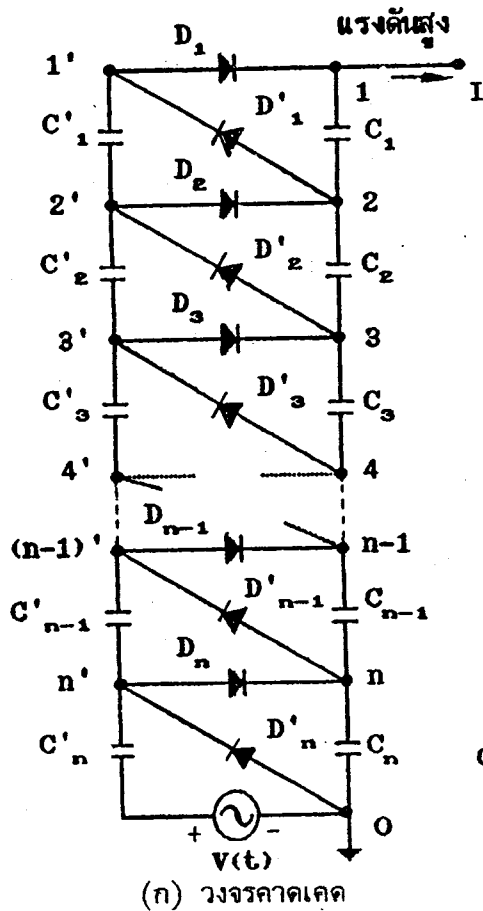
C ตัวเก็บประจุ

รูปที่ 4.7 ลักษณะการจัดวางวงจร Greinacher doubler circuit

4.2.3 วงจรผลิตแรงดันสูงกระแสตรงแบบ COCKCROFT WALTON

ในปี พ.ศ.2475 นักฟิสิกส์ 2 ท่านคือ Cockcroft และ Walton ได้สร้างวงจร อีกแบบ โดยอาศัย การต่อคาสเคดวงจรย่อยแบบ voltage doubler ลักษณะของวงจรดังในรูปที่ 4.6 ซึ่งหม้อแปลงแรงสูง แทนตัวแหล่งจ่ายแรงดัน $v(t)$ วงจรนี้เรียกว่า n-stage Cockcroft Walton ซึ่งให้แรงดันสูง $2n$ เท่า ของ ขนาดสูงสุดของแรงดัน $v(t)$ n คือ จำนวนชั้นของการต่อแบบคาสเคดของวงจร Greinacher doubler

การอธิบายหลักการทำงานของวงจร Cockcroft Walton ในกรณีมีอนแรงดัน $v(t)$ ซึ่งเป็นรูป คลื่นซายน์และมีค่าสูงสุดเท่ากับ V_{max} และด้านแรงสูงไม่มีโหลดจะเริ่มพิจารณาส่วนของวงจรล่างสุดซึ่ง ประกอบด้วย C_1, D_1 และแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วนนี้จึงเป็นวงจร half-wave rectifier C_1 ได้รับการ อัดประจุจนถึงค่า V_{max} เมื่อ $v(t)$ มีค่าลดลงถึงค่า $-V_{max}$



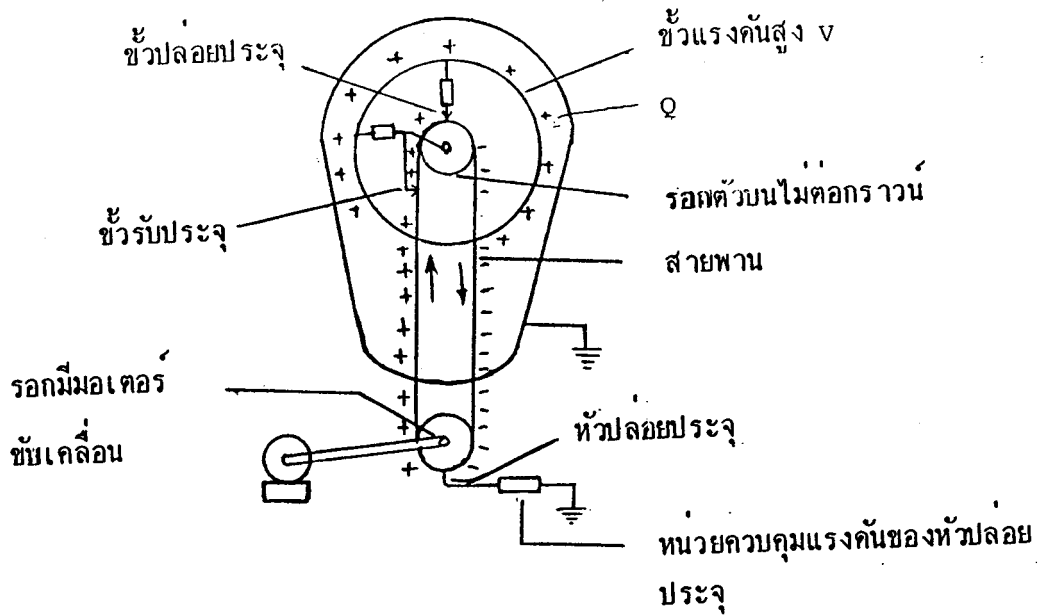
รูปที่ 4.8 วงจร n-stage Cockcroft Walton

เมื่อเทียบกับจุด 0 ถ้าสมมุติว่า C_n ยังไม่ได้รับการอัดประจุมาก่อน เมื่อ $v(t)$ เริ่มมีค่าสูงขึ้น จากรูปที่ 4.8 (ข) ถ้าแรงดันของทุกจุดอยู่ในสถานะอยู่ตัว สามารถสรุปในกรณีไม่มีโหลดได้ดังนี้ จาก $-V_{max}$ ไดโอด D_n เริ่มนำกระแสและอัดประจุให้แก่ C_n จนกระทั่งแรงดัน $v(t)$ ถึงค่า V_{max} เมื่อเทียบกับจุด 0 ทำให้แรงดันจุด n' และแรงดันคร่อม C_n เท่ากับ $2V_{max}$ พอดี และ D_n เริ่มหยุดนำกระแส วงจรชั้นที่ n จึงให้แรงดัน 2 เท่าของ V_m และเป็น voltage doubler แรงดันคร่อม C_n มีค่าคงที่ต่อไป แต่แรงดันจุด n' เทียบกับจุด 0 จะลดลง-เนื่องจาก $v(t)$ ลดลงจากค่า V_{max} แรงดันจุด n' จะมีค่าลดลงจากค่า $2V_{max}$ ไปเป็นศูนย์ และขณะที่แรงดันของจุด n' เป็นศูนย์ แรงดันของ $v(t)$ จะเป็น $-V_{max}$ และขณะเดียวกัน C_{n-1} ได้รับการอัดประจุผ่านไดโอด D_{n-1} ทำให้แรงดันคร่อม C_{n-1} เท่ากับ $2V_{max}$ ในช่วงเวลาถัดมาที่ $v(t)$ มีค่าเพิ่มจาก $-V_{max}$ ไปถึง V_{max} ไดโอด D_{n-1} จะนำกระแส ทำให้ C_{n-1} ได้รับการอัดประจุและเกิดแรงดันคร่อม C_{n-1} เท่ากับ $2V_{max}$ เช่นเดียวกันกับการอัดประจุ C_n ดังนั้น

- (ก) แรงดันที่จุด $1', 2', 3', \dots, n'$ มีค่าเปลี่ยนแปลงตามค่า $v(t)$
- (ข) แรงดันที่จุด $1, 2, 3, \dots, n$ มีค่าคงที่เมื่อเทียบกับจุด 0
- (ค) แรงดันคร่อมตัวเก็บประจุทุกตัวมีค่าคงที่เท่ากับ $2V_{max}$ ยกเว้นแรงดันคร่อม C_n ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ V_{max}
- (ง) แรงดันไบแอสย้อนกลับของไดโอดทุกตัวเท่ากับ $2V_{max}$
- (จ) แรงดันสูงด้านออกมีค่าสูงสุดเท่ากับ $2nV_{max}$

4.2.4 การผลิตแรงดันสูงกระแสตรงโดยใช้ไฟฟ้าสถิตย์

เครื่องผลิตแรงดันสูงไฟฟ้าสถิตย์ มีหลักการเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสะสมอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้า ในปี พ.ศ.2474 Van de Graff ได้ประดิษฐ์เครื่องผลิตแรงดันสูงโดยใช้สายพานในการถ่ายเทประจุ ซึ่งยังคงมีที่ใช้กันอยู่ในห้องวิจัยนิวเคลียร์ มีหลักการทำงานตามรูปที่ 4.9 ประจุถูกพ่นลงไปยังสายพานวนโดยใช้การเกิดโคโรนา แรงดันสร้าง โคโรนาอยู่ด้านล่างของรูปมีขนาดประมาณ 10 กิโลโวลต์สายพานที่ใช้มีความกว้างตามความเหมาะสมของขนาดเครื่อง และ เคลื่อนผ่านจุดสัมผัสด้วยความเร็วประมาณ 15-30 เมตรต่อวินาที นำประจุไปถ่ายเทให้แก่ขั้วรับประจุและไปเก็บไว้ที่ผิวของโลหะทรงกลมด้านบนและมีขั้วปล่อยประจุตรงข้ามให้ย้อนลงมาอีกด้าน



รูปที่ 4.9 เครื่องผลิตแรงดันสูงไฟฟ้าสถิตย์ แบบสายพาน

การวิเคราะห์หาขนาดแรงดันสูงและกระแสจ่ายโหลด ของเครื่อง Van de Graff กระทำได้ดังนี้

ให้แรงดันสูง V ที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลม

$$V = \frac{Q}{C} \tag{4.10}$$

Q เป็นประจุทั้งหมดที่ผิวของอิเล็กโทรด (คูลอมบ์)

C เป็นค่าความจุไฟฟ้าระหว่างผิวทรงกลมและกราวด์หรือตัวถัง (ฟารัด)

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = \frac{I}{C} \tag{4.11}$$

I เป็นกระแสไหลไปยังหัวแรงดันสูง

$$I = Dbs \tag{4.12}$$

D เป็นความหนาแน่นของประจุบนสายพาน (คูลอมบ์/ตารางเมตร)

b เป็นความกว้างของสายพาน (เมตร)

s เป็นความเร็วของสายพาน (เมตร/วินาที)

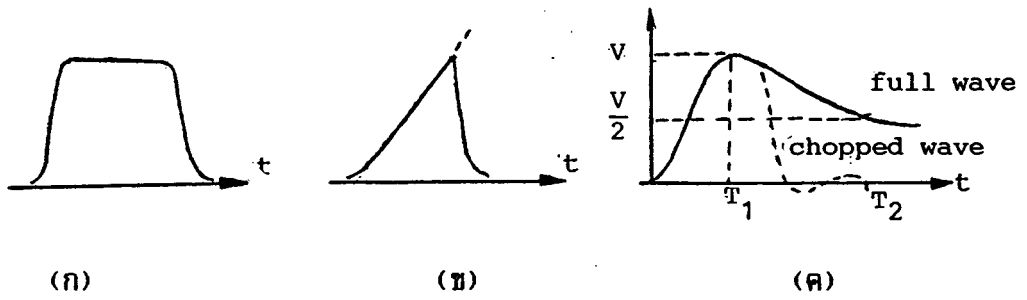
4.3 การผลิตแรงดันสูงอิมพัลส์

การทดสอบฉนวนด้วยแรงดันทรานเซียนท์ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องใช้แรงดันอิมพัลส์ที่ผลิตขึ้นได้
ได้แก่

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และ แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

(Lightning impulse and switching impulse voltage)

ลักษณะของแรงดันอิมพัลส์ จำแนกได้เป็น 3 ชนิด ดังแสดงในรูป 4.10 (ก) (ข) และ (ค)

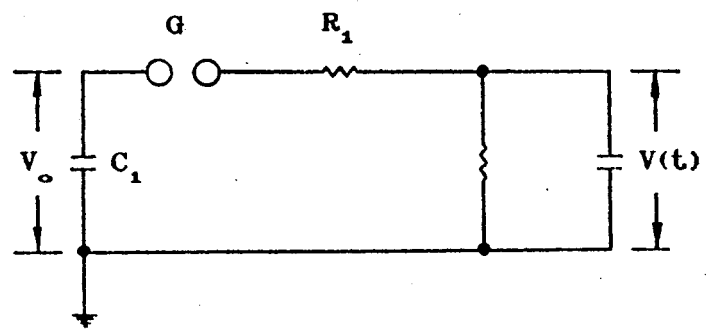


- (ก) รูปคลื่นสี่เหลี่ยมผืนผ้า (Rectangular impulse voltage)
- (ข) Wedge - shaped impulse Voltage
- (ค) Double exponential impulse voltage (T1/T2 us)

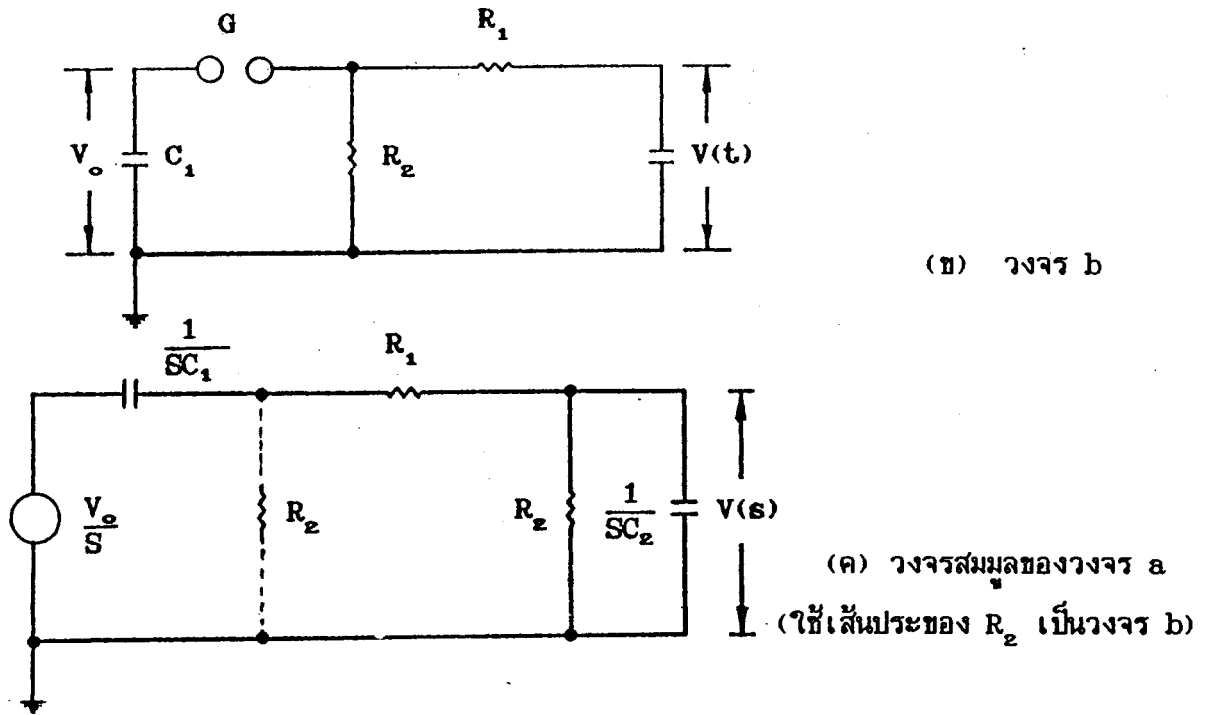
รูปที่ 4.10 ตัวอย่างแรงดันอิมพัลส์ชนิดต่างๆ

4.3.1 วงจรพื้นฐานที่ใช้ผลิตแรงดันสูงอิมพัลส์

มี 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) แตกต่างกันคือการต่อ R_1 และ R_2 ซึ่งทำให้สูตร
คำนวณ time constant ต่างกัน วงจรทั้งสองเป็น Single stage impulse ที่เป็นพื้นฐานของวงจรแบบ
multi stage



(ก) วงจร a



รูปที่ 4.11 Single-stage impulse generator

4.4 เทคนิคการวัดในระบบแรงดันสูง

การวัดแรงดันสูงชนิดกระแสตรงกระแสสลับ และอิมพัลส์เป็นเทคนิคเฉพาะ เนื่องจากระดับแรงดันสูงทำให้ต้องการฉนวนที่เพียงพอ และควบคุมผลของสนามไฟฟ้าโดยรอบไม่ให้มีผลต่อการวัด

การวัดแรงดันสูงได้แก่ การวัดค่าเฉลี่ยของแรงดันกระแสตรง

การวัดค่า RMS ของแรงดันกระแสสลับ การวัดค่ายอด (Peak) ของแรงดันกระแสสลับและแรงดันอิมพัลส์

การวัดค่าเหล่านี้ต้องใช้เครื่องวัดต่าง ๆ ได้แก่ ช่องว่างระหว่างอิเล็กโตรดทรงกลม (sphere Gap) โวลท์มิเตอร์แบบไฟฟ้าสถิตย์ตัวแบ่งแรงดันแบบความต้านทาน แบบตัวเก็บประจุ วงจรวัดแรงดันค่ายอดแบบ Ghubb - Fortescue หม้อแปลงแรงดันและกระแส

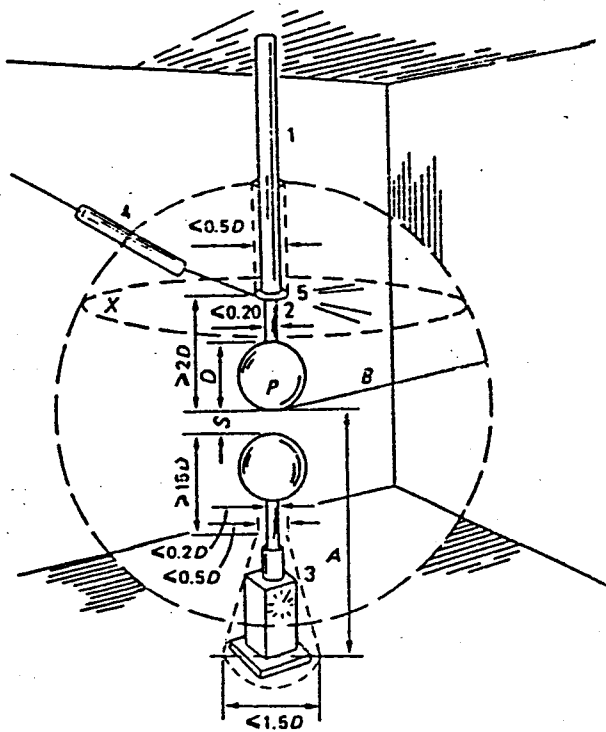
การวัดรูปคลื่นชนิดต่าง ๆ จำเป็นต้องใช้ CRO (cathode ray oscilloscope) นำไปใช้กับเครื่องวัดชนิดอื่นด้วย การเลือกใช้ CRO ต้องพิจารณาถึงความไวในการจับภาพของเครื่องด้วย แต่ไม่มีความไวต่อการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กที่เกิดจากการทดสอบแรงสูงด้วยการแก้ปัญหาโดยใช้ห้องชีลด์ซึ่งมีตาข่ายต่อลงดินล้อมรอบ และมีวงจรกรองคลื่นรบกวนจากแหล่งจ่ายแรงดันของ CRO ด้วย

การวัดในระบบแรงสูงมีสิ่งรบกวนเครื่องวัด 4 ประเภท

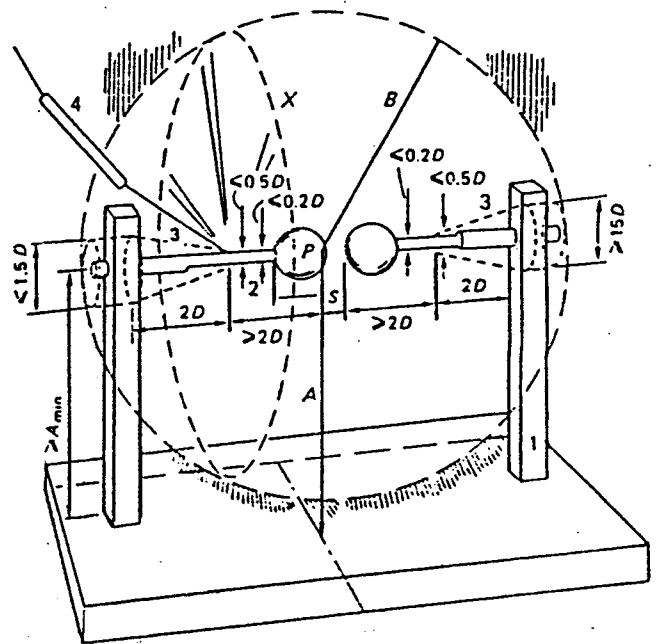
- ก) การเหนี่ยวนำทางสนามแม่เหล็ก เกิดจากสายที่มีกระแสไหลสูงอยู่ใกล้เครื่องวัด
- ข) การเหนี่ยวนำทางสนามไฟฟ้า เกิดจากมีสายอีเล็คโตรดที่มีแรงดันสูงอยู่ใกล้เคียง
- ค) การมีคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการเกิดประกายข้ามหรือเสียดสภาพฉนวน
- ง) การเกิดภาวะชั่วคราวในสายป้อนแรงดันในแก่เครื่องวัด

4.4.1 การวัดค่ายอดด้วยช่องประกาย

อากาศเป็นฉนวนที่คุณสมบัติเหมาะแก่การนำมาใช้วัดแรงดัน เนื่องจากสามารถเปลี่ยนสภาพจากการเป็นฉนวนไปเป็นตัวนำและเกิดอาร์คขึ้นเพียงชั่วคราว และกลับคืนสู่สภาพการเป็นฉนวนอีก จึงสามารถวัดค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเสียดสภาพฉนวนได้



(ก) การจัดวางในแนวตั้ง $D > 25$ ซม.



(ข) การจัดวางในแนวอน $D < 25$ ซม.

รูปที่ 4.12 เครื่องวัดแรงดันค่ายอด (peak) ชนิดที่เป็นช่องว่างประกายชนิดช่องว่างทรงกลม

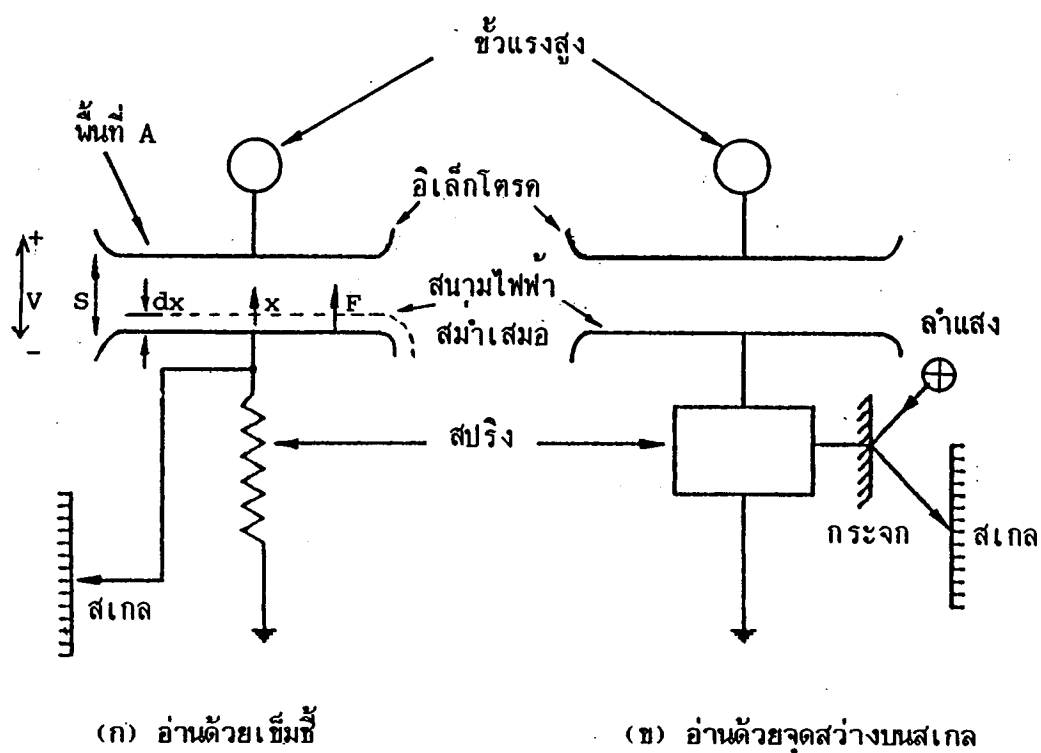
1. แท่งฉนวน
2. ขั้วของอิเล็กโตรดทรงกลม
3. เกลียวมุขตั้งระยะ
4. สายแรงสูงและความต้านทานต่ออนุกรม
5. วงแวนลดความเครียดสนามไฟฟ้า

A และ B เป็นระยะห่างจากจุด P ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่สุด
 X เป็นระนาบที่สายแรงสูงต้องอยู่เหนือหรือชิดไปทางซ้ายของระนาบ

4.4.2 โวลต์มิเตอร์ชนิดไฟฟ้าสถิตย์

โวลต์มิเตอร์ชนิดไฟฟ้าสถิตย์ ประกอบด้วย อิเล็กโตรดที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ในระหว่าง อิเล็กโตรด อิเล็กโตรดหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ใช้ระยะที่เคลื่อนที่ได้นี้ไปวัดค่าแรงดัน

หลักการการทำงานของโวลต์มิเตอร์ ใช้แรงดึงให้อิเล็กโตรดเคลื่อนที่ เนื่องจากไฟฟ้า ระหว่างอิเล็กโตรดเมื่อมีแรงดันที่ต้องการวัดป้อนให้แก่โวลต์มิเตอร์

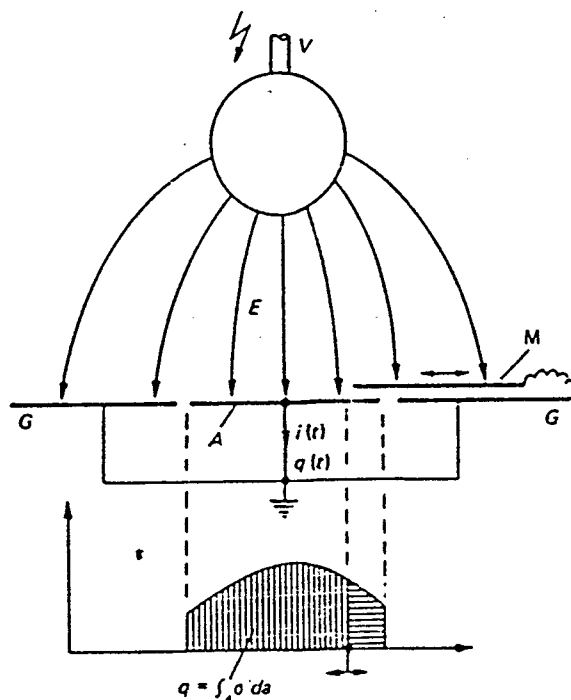


รูปที่ 4.13 โวลต์มิเตอร์ชนิดไฟฟ้าสถิตย์

4.4.3 เครื่องวัดชนิด GENERATING VOLTMETER

เครื่องวัดที่เรียกว่า generating voltmeter นี้ ยังมีชื่อเรียกอย่างอื่นอีก เช่น rotary voltmeter หรือ field mill สามารถใช้วัดแรงดัน ทั้งชนิดกระแสตรงและกระแสสลับ ที่ไม่ต้องการต่อสายเข้าโดยตรงกับ ด้านแรงสูง เพื่อไม่ให้เกิดการระไหลแตกด้านแรงสูง เครื่องวัดชนิดนี้เดิมใช้ในการวัดสนามไฟฟ้าในบรรยากาศ ที่มีขนาดเล็ก ๆ

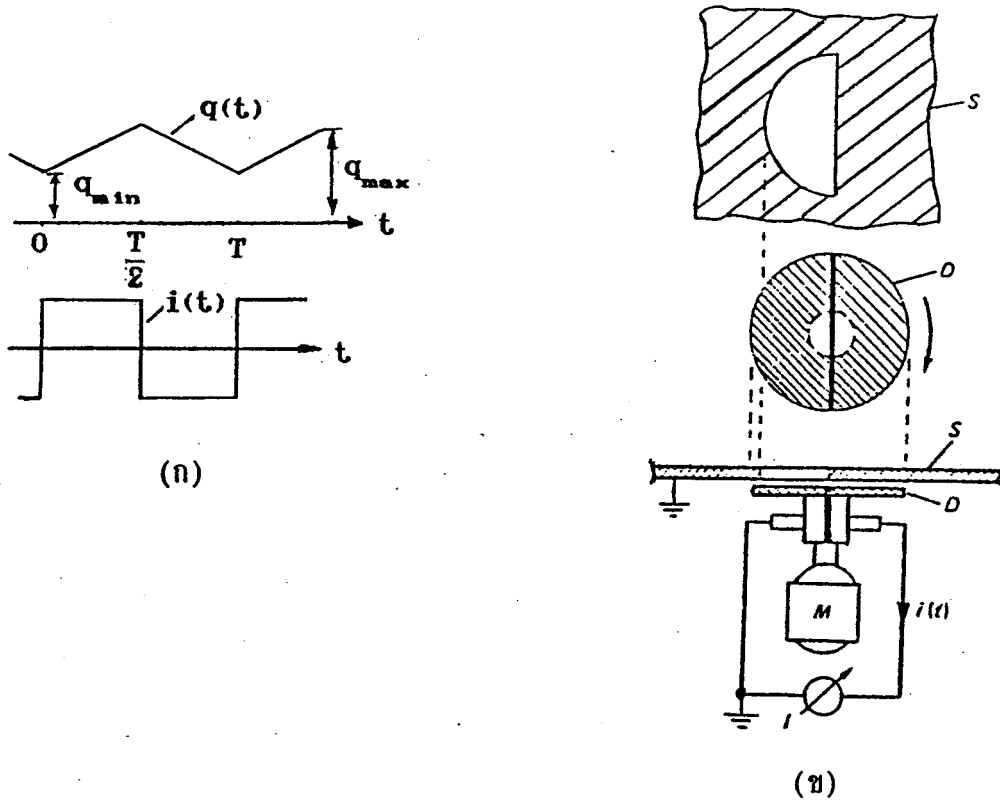
หลักการการทำงานใช้การเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าสถิตย์ ดังแสดงในรูป 4.14 อิเล็กโตรด G, A และ M ต่อถึงกันและต่อลงดิน อิเล็กโตรดทั้งหมดมีเส้นสนามไฟฟ้ามาบรรจบจึงมีประจุบนผิวและมีความหนาแน่นเป็น .. และเท่ากับ E เมื่อเป็น permittivity ของไดอิเล็กตริก อิเล็กโตรดถูกแยกออกเป็น 3 ส่วน เพื่อทำให้เกิดกระแสไหลขึ้น โดยการหมุนให้อิเล็กโตรด M ไป ทำให้เกิดความแตกต่างของประจุบนอิเล็กโตรด A จึงทำให้เกิดกระแสไปยังดิน ถ้าให้ประจุเปลี่ยนแปลงที่อิเล็กโตรด A



รูปที่ 4.14 หลักการทำงานของ GENERATING VOLTMETER

การทำให้เกิดประจุเปลี่ยนแปลงตามเวลา นิยมใช้การหมุนแผ่นอิเล็กโตรด M ซึ่งมีวิธีจัดให้อยู่ได้ แผ่นอิเล็กโตรดที่เจาะร่องไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 (ข) ถ้าครึ่งหนึ่งของแผ่นอิเล็กโตรด D มองเห็นผ่าน ร่องได้พอดี อีกครึ่งหนึ่งของแผ่น D ที่ถูกแยกออกจากกันด้วยฉนวนคั่นกลาง จะถูกบังด้วยแผ่น S จึงทำให้ประจุที่เปลี่ยนแปลงบนแผ่น D

ค่า I นี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามไฟฟ้าที่ต้องการวัด สนามไฟฟ้าที่คงที่หรือเป็นสนามไฟฟ้าชนิดมีความถี่ต่ำ จะสามารถวัดได้ด้วยวิธีนี้ ถ้ามอเตอร์หมุนได้เร็วพอเพียง กระแสได้จากการจัดกระแสให้เป็นกระแสตรงก่อนผ่านมิเตอร์วัดแบบขดลวดเคลื่อนที่ ในการวัดค่าแรงดัน

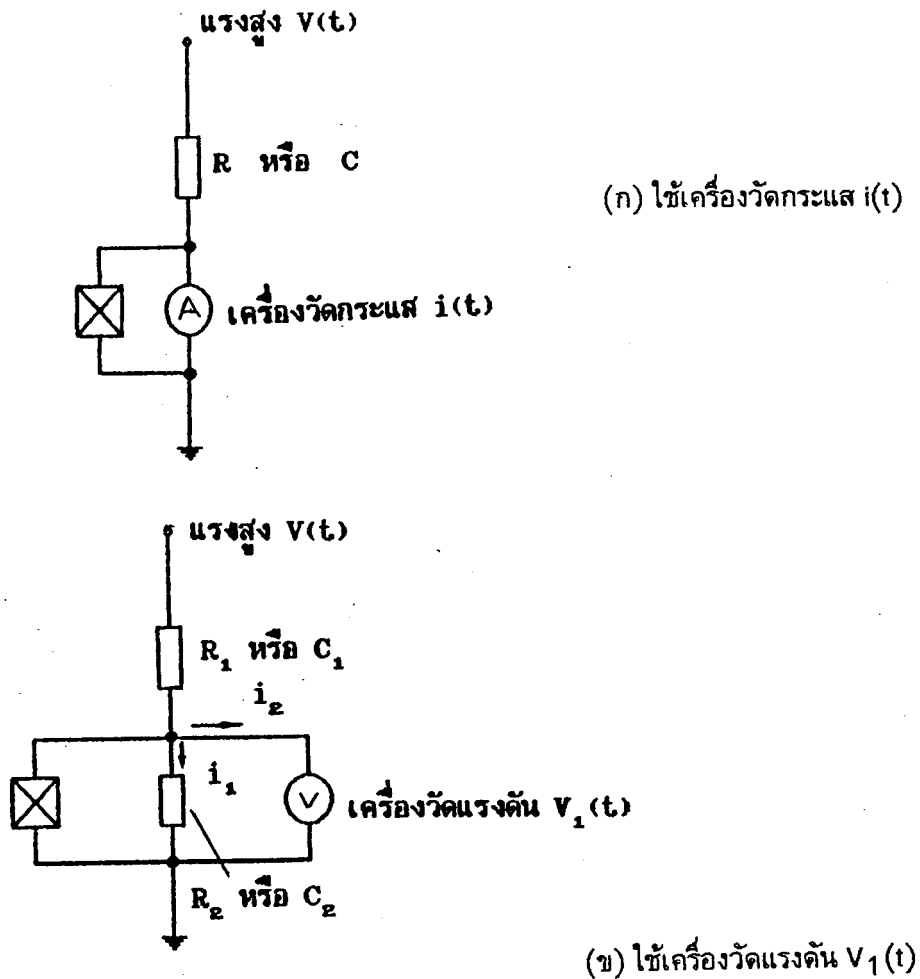


รูปที่ 4.15 . (ก) การเปลี่ยนแปลงของประจุบนแผ่น D
(ข) การผลิตกระแสโดยการหมุนแผ่น D

4.4.3 การวัดแรงดันสูงด้วยการต่ออิมพีแดนซ์กับแรงดันสูง

การต่ออิมพีแดนซ์ค่าสูง ๆ เข้ากับแรงดันสูง ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านอิมพีแดนซ์ที่ สามารถนำไปตรวจสอบและวัดค่าแรงดันได้ ดังในรูปที่ 4.16 อิมพีแดนซ์ที่นำมาใช้ ได้แก่ ความต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ตัวเหนี่ยวนำ (L) ไม่นิยมใช้เนื่องจากสร้างได้ยาก และมักมี stray capacitance สูง

เครื่องวัดที่ใช้อาจเป็นได้ทั้งชนิดขดลวดเคลื่อนที่หรือวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ชนิดตัวเลขหรือจอภาพก็ได้และ
ปัจจุบันมีวงจรที่สามารถอ่านข้อมูลเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง



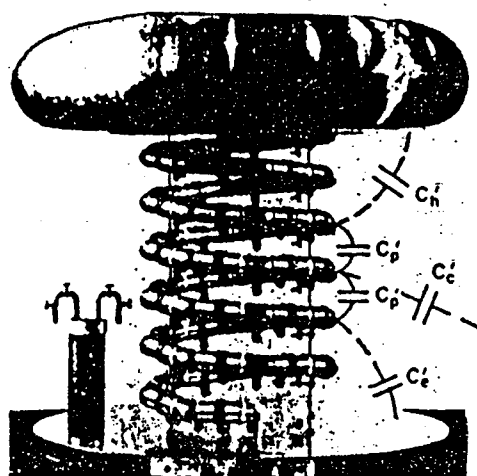
รูปที่ 4.16 การวัดแรงดันสูงด้วยการต่ออิมพีแดนซ์

4.4.4 การใช้ความต้านทางวัดแรงดัน

การใช้ความต้านทางต่ออนุกรมกับเครื่องวัดกระแส โดยใช้ค่า R สูง ๆ เพื่อให้ กระแสผ่าน R ต่ำ ไม่ทำให้เกิดความร้อนสูง และเป็นโหลดของแรงดันสูง ดังในรูปที่ 4.17. (ก) สามารถวัดค่าแรงดันได้ดังนี้

$$V(t) = R i(t)$$

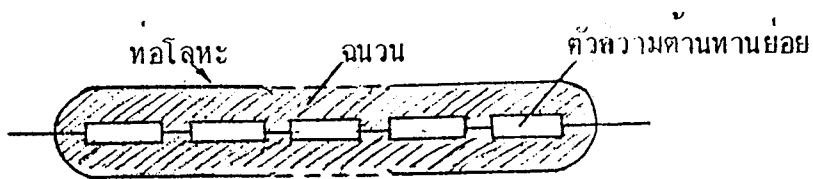
ความต้านทานอาจเลือกขนาด $1 \text{ M}\Omega / \text{kV}$ ขึ้นไป ซึ่งกระแสที่ผ่าน R ไม่ควรเกิน 1 mA และอาจใช้ลดความต้านทาน Ni-Cr alloy โดยพันให้ไว้ค่าเหนี่ยวนำ ชิดจำกัดการใช้ R คือ ค่า stray capacitance ซึ่งทำให้เกิดการกระจายของแรงดันตลอดแนวตั้งไม่สม่ำเสมอบางส่วนของ R จะมีความเครียดของแรงดันสูงกว่าและอาจเกิดการเสียหายฉับพลัน การวัดด้วยวิธีนี้ไม่ยุ่งยากซับซ้อน แต่ R มีค่าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและผลของ Stray capacitance จึงนิยมใช้ในการวัดแรงดันกระแสตรง



รูปที่ 4.17 ความต้านทาน 100 M , 100 kV ของ Park

โวลท์มิเตอร์ที่ใช้กระแสน้อยมากควรเป็นชนิดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีอิมพีแดนซ์สูงตัวความต้านทาน R_1 และ R_2 เป็นจำพวกฟิล์มออกไซด์ของโลหะหรือคาร์บอน ซึ่งจะมีความไวต่ออุณหภูมิมากกว่า Ni-Cr alloy แต่ราคาถูกกว่าและสามารถรับพลังงานได้มาก

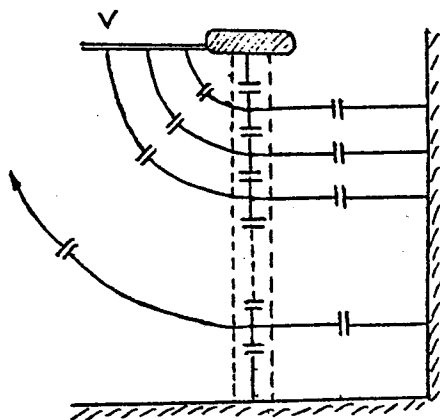
ผลกระทบของการมี stray capacitance นี้ จึงมีการใช้ซิลด์เป็นท่อโลหะสวมไว้ภายนอกและให้มีฉนวนตรงกลางทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของ R มากขึ้น เพื่อลดผลของความจุไฟฟ้า



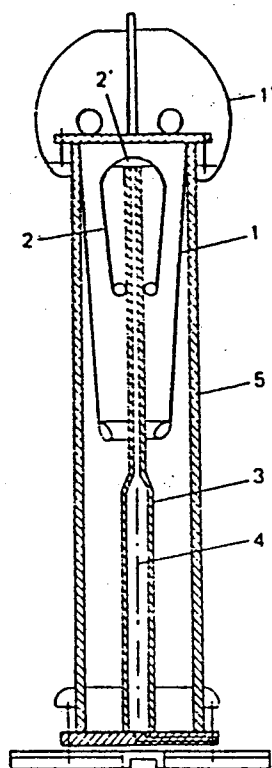
รูปที่ 4.18 ลักษณะภายในของตัวความต้านทานแรงสูง

4.4.5 การใช้ตัวเก็บประจุวัดแรงดัน

ในการวัดแรงดันกระแสสลับ มักนิยมใช้ตัวเก็บประจุแทน R ในรูปที่ 4.19 และค่า กระแสที่อ่านได้หรือค่าแรงดัน สามารถให้หาค่า RMS ของแรงดันสูงที่ต้องการวัดได้ โดยแทนค่าความต้านทานด้วยค่า $1/\omega C$ ตัวเก็บประจุที่นำมาใช้ในการวัด อาจประกอบขึ้นด้วยตัวเก็บประจุมต่ออนุกรมกัน หรือตัวเดียวขนาดใหญ่ที่มีแกนอิเล็กทรอนิกส์ร่วมกัน



(ก) ตัวเก็บประจุแบบต่ออนุกรมและมี capacitance



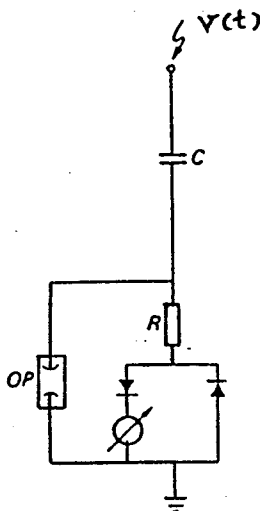
(ข) ตัวเก็บประจุแบบอิเล็กทรอนิกส์มีแกนร่วมstray

- 1,1 เป็นอิเล็กโตรดแรงสูง
- 2, 2 อิเล็กโตรดด้านแรงต่ำและ guarding ring
- 3 ฉนวนค้ำจุน
- 4 สายเคเบิลในการวัด
- 5 ครอบอกฉนวน

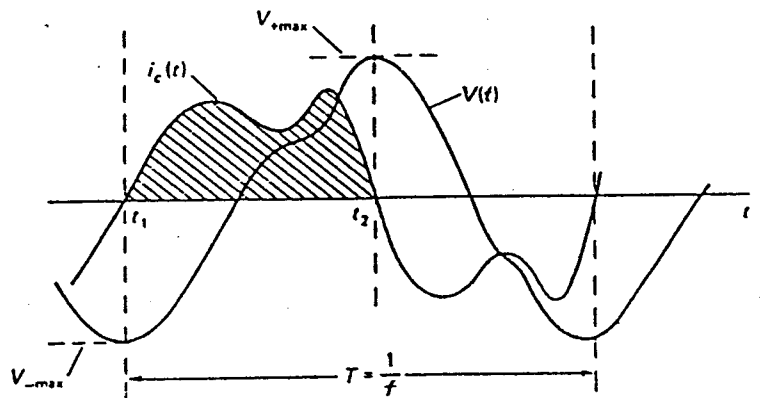
รูปที่ 4.19 ตัวเก็บประจุแรงสูงบรรจุก๊าซฉนวนไฟฟ้า

4.4.6 การวัดค่ายอดแรงดันกระแสสลับแบบ CHUBB-FORTESCUE

การวัดค่ายอดของแรงดันกระแสสลับ อาจใช้ช่องประกายไฟไม่มีเข็มชี้หรือตัวเลขบอกค่าแรงดันโดยตรง ในปี พ.ศ. 2456 ได้มีวิศวกร 2 ท่าน คือ Chubb และ Fortescue ดังในรูปที่ 4.20 (ก) ประกอบด้วย ตัวเก็บประจุแรงสูง C ไดโอด 2 ชุด มิเตอร์วัดกระแสแบบขดลวดเคลื่อนที่ ความต้านทาน R อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน (OP) ซึ่งเป็นท่อ gas discharge R ทำหน้าที่ช่วยให้ OP ทำงาน



(ก) วงจร



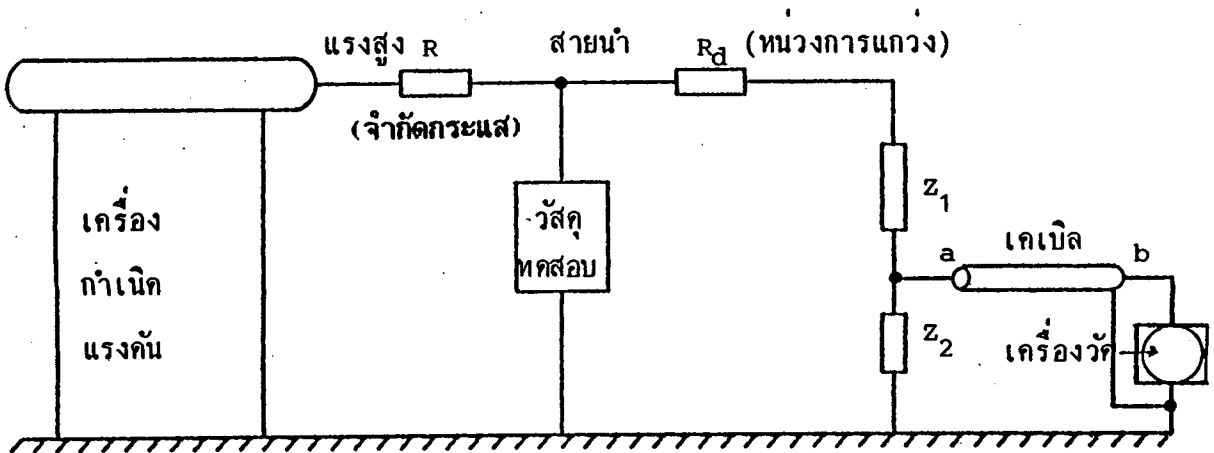
(ข) แรงดัน $V(t)$ ที่ต้องการวัดและกระแสผ่าน C

รูปที่ 4.20 การวัดค่ายอดของแรงดันเอซีโดยใช้วงจร CHUBB-FORTESCUE

หลักการวัด พิจารณาตามรูปที่ 4.20 (ข) ในครึ่งคาบเวลาจาก t_1 ถึง t_2 กระแสที่ไหลผ่านมิเตอร์และไดโอด เท่ากับกระแสไหลผ่าน C สมมติให้แรงดันคร่อม R มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงดันสูง $V(t)$ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง V_{+max} และ V_{-max} กระแสเฉลี่ย I ของ $i_c(t)$

4.4.7 ตัวแบ่งแรงดัน (VOLTAGE DIVIDER) ใช้วัดแรงดันสูง

การวัดแรงดันสูงในโรงประลองไฟฟ้าทั่วไปมีส่วนประกอบ ดังในรูปที่ 4.21 โดยมีตัวแบ่งแรงดันที่ใช้ช่วยลดแรงดันที่ต้องการวัดและป้อนแรงดันขนาดต่ำลงให้แก่เครื่องวัดชนิดต่าง ๆ เช่น CRO, โวลท์มิเตอร์ เป็นต้น สายต่อด้านแรงสูงต้องเป็นชนิดที่ไม่มีค่าความเหนี่ยวนำ และด้านเครื่องวัดต้องมีซีลด์ที่ช่วยให้สัญญาณวัดไม่ผิดเพี้ยนไป เนื่องจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก



รูป 4.21 ส่วนประกอบของการต่อวงจรวัดแรงดันสูง

Z_1 และ Z_2 เป็นตัวแบ่งแรงดันที่อาจใช้เป็นความต้านทานหรือความจุไฟฟ้า ความเหนี่ยวนำไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ เพราะว่ามี stray capacitance มาก ตัวแบ่งแรงดันต้องใส่อยู่ในท่อฉนวนและที่ขั้วแรงสูงมีลักษณะเป็นโลหะวงกลม มีขอบมนโดยรอบ เพื่อช่วยกระจายความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ผิวของท่อฉนวนให้สม่ำเสมอ และป้องกันการวาบไฟตามผิว ความสูงของท่อฉนวนขึ้นอยู่กับแรงดันทดสอบ

การใช้ตัวแบ่งแรงดันในการวัดให้ได้ค่าที่ไม่คลาดเคลื่อนทั้งขนาดและรูปคลื่น ขึ้นอยู่กับลักษณะของแรงดันชนิดนั้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีเป็นแรงดันในภาวะชั่วคราว เช่นแรงดันอิมพัลส์การวัดแรงดันที่มีขนาดสูงกว่า 10 kV ต้องการเทคนิคเฉพาะเนื่องจากผลของ stray capacitance ทำให้การวัดคลาดเคลื่อนและผลของวงจรอื่น ๆ รวมทั้งการซีลด์ต้องนำมาพิจารณาด้วยตัวแบ่งแรงดันไม่มีซีลด์จึงต้องวาง

ให้อยู่ห่าง-จากส่วนที่มีสนามไฟฟ้าค่อนข้างสูง เพื่อลดการรบกวนการวัดค่าแรงดัน ในการวัดที่ไม่ต้องการความละเอียดแม่นยำสูงเช่นในการทดลอง ศึกษาเบื้องต้นตัวแบ่งแรงดันอาจมีราคาแพงเกินไป ในกรณีเช่นนี้ อาจย้ายวงจรวัดในรูปที่ 4.21 จากสายนำของ Z_1 และส่วนที่ต่อไปยังเครื่องวัดไปอยู่ด้านเครื่องกำเนิดแรงดันและใช้ตัวเก็บประจุของเครื่องกำเนิดแรงดันเป็นตัวแบ่งแรงดัน

แรงดันอิมพัลส์มีส่วนประกอบที่มีความถี่สูง อาจถึง 100 MHz ขึ้นไป ดังนั้นในการวัดแรงดันสูง โค้ดใช้ตัวแบ่งแรงดันจำเป็นต้องกำหนดวงจรวัดที่เหมาะสมกับชนิดของอิมพัลส์ ลักษณะการตอบสนองในการวัดของวงจรที่ใช้ลักษณะการทำงานเฉพาะของตัวแบ่งแรงดัน และสายเคเบิลที่ต่อเข้าเครื่องวัด

หน่วยที่ 5

การทดสอบด้านไฟฟ้าแรงสูง

ในการทดสอบฉนวนไฟฟ้าอาจจำแนกได้หลายลักษณะขึ้นอยู่กับการนำไปใช้งาน นับตั้งแต่การทดสอบในอุตสาหกรรมที่ผลิตวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง การทดสอบหลังจากการติดตั้งเข้าสู่ระบบเสร็จสิ้นแล้ว และการทดสอบหลังจากได้มีการใช้งานไปชั่วระยะเวลาหนึ่งเช่น 3 ปี เหตุผลของการทดสอบแต่ละชนิด เพื่อตรวจเช็คให้ได้วัสดุอุปกรณ์ที่มีคุณภาพสูง เชื่อถือได้ ทั้งนี้เป็นการป้องกันอันตรายและให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ใช้ รวมทั้งมิให้เกิดความล้มเหลวของฉนวนก่อนสิ้นอายุใช้งาน ในบทนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับข้อมาตรฐานในการทดสอบ การจัดอุปกรณ์และห้องทดสอบ วิธีทดสอบ และการทดสอบของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าแรงสูงบางชนิดที่สำคัญและเป็นตัวอย่างทั่วไปเกี่ยวกับการทดสอบด้านไฟฟ้าแรงสูง

5.1 มาตรฐานของการทดสอบ

การทดสอบด้วยแรงดันสูงแยกได้เป็น 3 ประเภทคือ

ก. การทดสอบแบบการปล่อยประจุทำลาย โดยใช้แรงดันทดสอบที่ทำให้เกิดการเสียดสีฉนวนฉนวน การทดสอบเช่นนี้มีกระแสสูงและในช่วงเวลาสั้น ๆ การเสียดสีฉนวนอาจอยู่ในลักษณะการวาบไฟตามผิว (flashover) การเกิดสปาร์กโอเวอร์หรือประกายข้าม (sparkover) หรือการเจาะทะลุ (puncture) ในการทดสอบให้เกิดการเสียดสีฉนวนฉนวนหลาย ๆ ครั้งกับฉนวนตัวอย่าง ต้องใช้แรงดันทดสอบการเสียดสีฉนวนฉนวน 50 % ซึ่งหมายถึงแรงดันที่มีขนาดเท่านี้จะทำให้โอกาสที่เกิดการเสียดสีฉนวนฉนวน เป็น 50 % หรือ เกิดการเสียดสีฉนวนฉนวนครั้งหนึ่ง ของจำนวนครั้งที่ทดสอบทั้งหมด ถ้าแรงดันนี้ทำให้เกิดการเสียดสีฉนวนฉนวนแบบวาบไฟตามผิวเรียกว่า แรงดัน CFO (critical flashover voltage)

ข. การทดสอบความทนต่อแรงดันไฟฟ้า ตามขนาดและเวลาในการทดสอบตามที่กำหนด เช่น การทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับนาน 1 นาทีการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าหรืออิมพัลส์สวิตชิงขนาดของแรงดันทดสอบความทน (withstand test voltage) ต้องมีค่าสูงกว่าแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้นในระบบที่จะนำเอาวัสดุอุปกรณ์นั้นไปใช้งาน

ค. การทดสอบแบบหาลักษณะสมบัติหรือพารามิเตอร์ของฉนวน เป็นการทดสอบที่ไม่ต้องใช้แรงดันสูงถึงขั้นให้เกิดการเสียดสีฉนวนฉนวน เช่น การทดสอบเพื่อหาค่าสภาพต้านทาน ค่าสภาพยอม (permittivity) ค่าตัวประกอบกำลังสูญเสีย ค่าประจุและกระแสอิมพัลส์ในการปล่อยประจุบางส่วน ค่าความชื้นของฉนวน เป็นต้น

การทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ทำให้ทราบแรงดันที่ฉนวนทนได้ ระดับแรงดันนี้เรียกว่า BIL (Basic Impulse Insulation Level) และสำหรับแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง เรียกว่า SIL (Switching Impulse Insulation Level)

ข้อกำหนดในการทดสอบแบ่งออกได้เป็น 4 ประการคือ

ก. การเลือกตัวอย่างเพื่อการทดสอบและการจัดวางอุปกรณ์ผลิตแรงสูง อุปกรณ์วัด วัสดุทดสอบ ไม่ให้มีผลกระทบของโครงสร้างที่ต่อลงดินและสิ่งที่ยื่นล้ำเข้ามาใกล้ ต่อค่าที่ต้องการวัด ซึ่งเรียกว่า proximity effect โดยปกติระยะห่างของโครงสร้างค่าจุนควรห่างจากวัสดุทดสอบไม่น้อยกว่า 1.5 เท่าของช่วงกว้างของฉนวนระหว่างอิเล็กโทรด และ ดินที่จะทดสอบการเสียดสภาพฉนวน แต่กรณีที่ต้องการทดสอบการเสียดสภาพฉนวนอยู่ภายในเนื้อฉนวนล้วนอาจมีระยะห่างน้อยกว่านี้ได้

ข. การกำหนดชนิดของแรงดันทดสอบ ลักษณะสภาพของฉนวนและสภาวะอากาศ แรงดันทดสอบขึ้นอยู่กับลักษณะที่ต้องการทดสอบ อาจเป็นการทดสอบที่ต้องการทราบความทนต่อแรงดันชนิดต่างๆของฉนวนหรืออาจเป็นการบ่อนแรงดันเพื่อวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของฉนวน เช่น สภาพต้านทานตัวประกอบกำลังสูญเสีย $\tan \delta$ เป็นต้น

- ลักษณะสภาพของฉนวนทดสอบ อาจกำหนดให้อยู่ในสถานะต่าง ๆ และมีระยะที่เป็นข้อกำหนดในการทดสอบ ได้แก่

- ระยะรั้วตามผิว (leakage หรือ creepage distance) เป็นระยะสั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโทรด โดยวัดไปตามผิวฉนวนภายนอก

- ระยะอาร์ก (arcing distance) เป็นระยะสั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโทรดที่วัดโดยตรงในอากาศ หรือน้ำมันรอบฉนวน

- สถานะเปียก (wet condition) เป็นสถานะที่สร้างขึ้นแทนฝนสำหรับการทดสอบฉนวนภายนอก เช่น ใช้หัวฉีดสเปรย์ฉีดน้ำคล้ายฝนในปริมาณและทิศทางตามข้อกำหนด ไปยังฉนวนก่อนการทดสอบและระหว่างการทดสอบ สภาพต้านทานของน้ำประมาณ 100 ถึง 180 เมกกะ-โอห์มเมตร

- สถานะแห้ง (dry condition) เป็นสถานะที่ให้ฉนวนแห้งและสะอาด

- สถานะมีมลภาวะ (pollution condition) เป็นสถานะทดสอบตามข้อกำหนด เช่น IEC Technical Committee No.36 เพื่อสร้างให้คล้ายกรณีมีฝุ่นละอองควิน เคมี และไอเกลือ

- สถานะบรรยากาศ (atmospheric condition) เป็นข้อกำหนดเกี่ยวกับ ตัวประกอบ k_h และ k_d ที่ใช้ปรับค่าแรงดันทดสอบที่มีความชื้น ความดันและอุณหภูมิแตกต่างไปจากค่าที่สถานะมาตรฐาน

ค. การกำหนดประเภท และ วิธีการทดสอบ เป็นข้อกำหนดที่แตกต่างกันตามแต่มาตรฐานที่ต้องการ ยกตัวอย่างเช่น ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก 354-2523 ได้ระบุให้ทดสอบลูกถ้วยแขวนปอร์ซเลนเป็น 3 ประเภท คือ

ค.1 การทดสอบเฉพาะแบบ (type test) หมายถึงการทดสอบว่าลักษณะขนาดและข้อกำหนดทางไฟฟ้าเป็นไปตามมาตรฐานหรือไม่ได้แก่ การทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับ ตามค่ากำหนดในสถานะเปียกและแห้ง การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว และ ลบ การทดสอบด้วยแรงดัน

กระแสลับในลักษณะติดตั้งใช้งานเพื่อตรวจสอบคลื่นรบกวนระบบสื่อสารโดยวัดค่า RIV เป็น μV

ค.2 การทดสอบให้การรับรอง (acceptance test) หมายถึง การทดสอบผลิตภัณฑ์ ในคุณสมบัติต่าง ๆ ตามข้อกำหนดเป็นมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชนิดนั้น ทั้งทางกลและไฟฟ้าและทดสอบในลักษณะการปล่อยประจุทำลายแบบเจาะทะลุ เพื่อให้ทราบค่าความทนต่อแรงดันอิมพัลส์

ค.3 การทดสอบประจำ (routine test) เป็นการทดสอบที่มีอยู่ประจำในโรงงาน โดยทำการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ทุก ๆ ตัว สำหรับลูกถ้วยไฟฟ้าเป็นการทดสอบการวาวไฟตามผิว โดยใช้แรงดันความถี่ประมาณ 200 kHz เป็นเวลา 3-5 วินาที หรือใช้แรงดันขนาดและความถี่ต่ำลงทดสอบในเวลาที่ยาวกว่า

ง. การวิเคราะห์และประเมินผลการทดสอบ เป็นข้อกำหนดที่ต้องมีมาตรฐานเช่นกัน เนื่องจากการทดสอบด้วยแรงดันเป็นเชิงสถิติ โดยเฉพาะเกี่ยวกับการเสียดสภาพฉนวน ซึ่งต้องมีการทดสอบเป็นจำนวนครั้งอย่างจำกัด ค่าแรงดันเฉลี่ย และค่าความเบี่ยงเบนเป็นผลการ วิเคราะห์ที่มักนำไปใช้งาน การวิเคราะห์และประเมินผล อาจแบ่งออกตามลักษณะและจำนวนการป้อนแรงดันทดสอบได้ 3 ชนิด ดังนี้

ง.1 การทดสอบใช้แรงดันขนาดเท่ากันทีละกลุ่มๆ ละประมาณ 10 ถึง 20 ครั้ง แล้วนับจำนวนที่เกิดการเสียดสภาพฉนวน เป็นเปอร์เซ็นต์ของจำนวนแรงดันที่ทดสอบแต่ละกลุ่มแล้วนำไปเขียนกราฟโดยมีการกระจายในลักษณะของ Gaussian ซึ่งสามารถหา $V_{50\%}$ หรือค่าแรงดันเสียดสภาพฉนวน 50% ที่ใช้ทดสอบ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ย และหาค่าความเบี่ยงเบนเป็นค่าแตกต่างของแรงดันที่โอกาสการเสียดสภาพฉนวนเป็นจำนวน 16% ถึง 50% ของจำนวนแรงดันแต่ละกลุ่ม การเพิ่มค่าแรงดันสำหรับกลุ่มถัดไป ควรเพิ่มประมาณ 3% ของ $V_{50\%}$ โดยประมาณ

ง.2 การทดสอบใช้การเพิ่มแรงดันขึ้น จนกระทั่งเกิดการเสียดสภาพฉนวน แล้วบันทึกค่าแรงดันสูงสุดในแต่ละครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและความเบี่ยงเบนของแรงดันทดสอบ

ง.3 การทดสอบใช้การเพิ่มแรงดันทีละขั้น จนกระทั่งที่แรงดันค่าหนึ่งจะเกิดการเสียดสภาพฉนวน การทดลองครั้งถัดไปจะต้องลดขนาดแรงดันลงมาขั้นหนึ่ง ถ้าเกิดการเสียดสภาพฉนวนอีกก็ให้ลดแรงดันลงไปอีกขั้นในครั้งถัดไป แต่ถ้าไม่เกิดการเสียดสภาพฉนวนก็ให้เพิ่มขึ้นไปอีกขั้นหนึ่ง ทดสอบซ้ำจนกระทั่งได้ทราบว่าค่าแรงดันเสียดสภาพฉนวน 50% นั้น มีค่าเท่าไร โดยดูจากกราฟ วิธีนี้เรียกว่า up and down method

จากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแรงดัน ทำให้สามารถหาค่า confidence limit และโอกาสของการเกิดการเสียดสภาพฉนวนที่แรงดันค่าอื่น ๆ

5.2 วงจรทดสอบแรงดันสูง

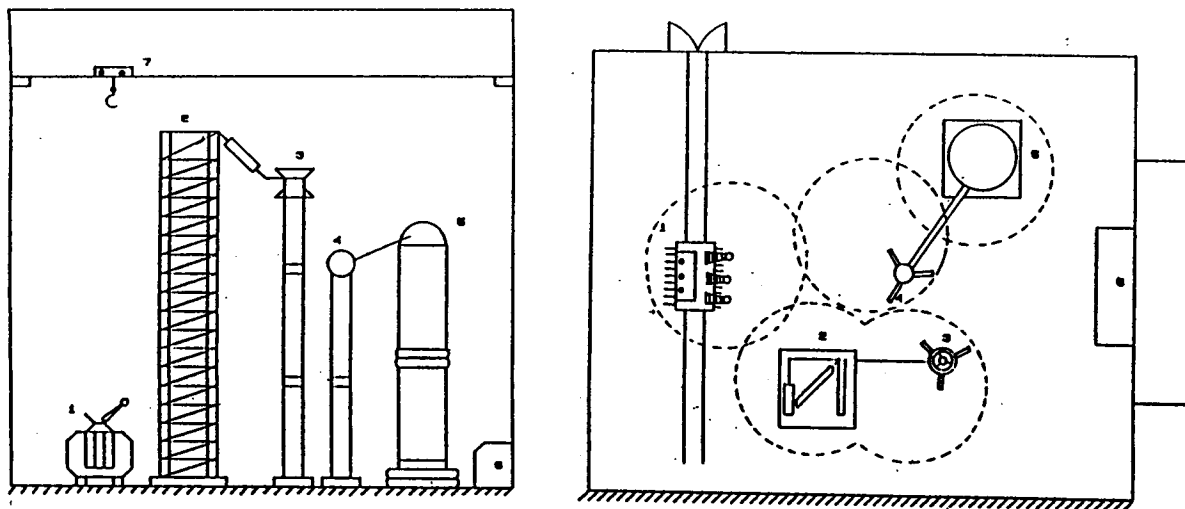
ขนาดพื้นที่และความสูงของโรงประลองไฟฟ้าแรงสูง ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันทดสอบโดยทั่วไปสำหรับแรงดันกระแสลับขนาด 100 KV, 10 KVA จะใช้ห้องที่สูงประมาณ 2-3 เมตร หาก ระดับแรงดันสูงกว่านี้ความสูงของห้องและระยะโดยรอบควรเป็นดังในตารางที่ 5.1 อาคารปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่ใหญ่ที่สุดของประเทศเป็นของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต มีขนาด กว้าง \times ยาว \times สูง = 28 \times 41 \times 25 ม

หน่วยเป็นเมตร สามารถทดสอบแรงดันกระแสสลับได้ถึง 1200 kV ตั้งอยู่ที่สถานีไฟฟ้าย่อยบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ

ตารางที่ 5.1 ความสูงของห้องหรือความกว้างที่แรงดันทดสอบขนาดต่าง ๆ

แรงดันกระแสสลับ		แรงดันทดสอบ อิมพัลส์	แรงดันทดสอบ สวิตชิง	ระยะต่ำสุด
ระบบ	ทดสอบ	kV	kV	
30	85	170	-	-
110	260	550	-	-
220	505	1050	-	-
400	640	1425	900	4
765	960	2300	1300	12
1100	1400	2800	1800	20
1500	1900	3500	2200	30

ลักษณะการจัดห้องปฏิบัติการ เป็นดังตัวอย่างในรูปที่ 5.1 ส่วนประกอบหลักในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ หม้อแปลงทดสอบ ตัวเก็บประจุ ตัวแบ่งแรงดันเครื่องผลิตแรงดันกระแสตรงและอิมพัลส์ และอุปกรณ์วัดชนิดต่าง ๆ ในห้องควบคุม



รูปที่ 5.1 การจัดวางอุปกรณ์ทดสอบในอาคารปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

1. หม้อแปลงที่นำมาวัดทดสอบ
2. เครื่องผลิตแรงดันอิมพัลส์
3. ตัวแบ่งแรงดันอิมพัลส์
4. ตัวเก็บประจุ
5. หม้อแปลงทดสอบ
6. ห้องควบคุม
7. เคนยก

.2 และเครื่องผลิตแรงดันอิมพัลส์ ได้รับการออกแบบให้มีขนาดดังตัวอย่างในตารางที่ 5.3 ค่า impulse capacitance C_1 มีค่าประมาณ 25 nF หรือใหญ่กว่าเพื่อใช้ในการทดสอบที่มีโหลดมาก วงจรของ C_1 .

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างขนาดของหม้อแปลงทดสอบ

แรงดันพิกัด kV	กระแสพิกัด A	กำลังพิกัด kVA	อิมพีแดนซ์ลัดวงจร %
100	0.1	10	10
300	0.3	100	10
800	0.5	400	15
1200	1.	1200	25
2000	2.	1200	25

ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างขนาดของเครื่องผลิตแรงดันอิมพัลส์

แรงดันอัดประจุ (V_1) kV	C_1 nF	พลังงาน (W) kWs	อัตราพลังงานต่อแรงดัน W/V_1 (kWs/MV)
200	25	0.5	2.5
400	25	2.0	5.0
1000	25	12.5	12.5
2000	25	50.0	25.0
4000	25	200.0	50.0

การกำหนดขนาดพิกัดของหม้อแปลงทดสอบ เครื่องผลิตแรงดันสูงกระแสตรงและ แรงดันอิมพัลส์ ควรกำหนดให้สูงกว่าขนาดของแรงดันทดสอบที่ต้องการเป็นจำนวนเท่าดังนี้ [38]

แรงดันกระแสสลับ	1.1 เท่า
แรงดันกระแสตรง	1.7 เท่า
แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	2.0 เท่า
แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง	2.6 เท่า

5.3 การทดสอบฉนวนของระบบสายส่งแรงสูง

ในงานระบบสายส่งแรงสูงกระแสสลับ แรงดันทดสอบ ได้แก่ แรงดันกระแสสลับ แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตชิง ถ้าเป็นสายส่งแรงสูงกระแสตรงก็ต้องใช้แรงดันกระแสตรงแทนแรงดันกระแสสลับ นอกจากนี้แรงดันกระแสตรงยังใช้ทดสอบฉนวนที่มีค่าความจุไฟฟ้าสูง เช่น เคเบิล เพื่อเลี่ยงการหาหม้อแปลงทดสอบที่มีขนาดใหญ่เพียงพอในการจ่ายกระแสให้แก่โหลด

ฉนวนที่ถูกนำมาทดสอบแยกออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ฉนวนคืนสภาพเอง (self-restoring insulation) และฉนวนที่ไม่คืนสภาพเอง ฉนวนชนิดแรกได้แก่ฉนวนภายนอกหรือผิว ซึ่งสามารถนำมาทดสอบการเสียดสภาพฉนวนได้หลาย ๆ ครั้ง แต่ฉนวนชนิดหลังกระทำเช่นนั้นไม่ได้ เนื่องจากเป็นเนื้อฉนวนภายใน เช่น ในฉนวนของแข็ง ในท่อฉนวนก๊าซ ในฉนวนน้ำมัน จึงต้องใช้อุปกรณ์ทดสอบความทนต่อแรงดันตามค่าที่กำหนด โดยไม่เกิดการเสียดสภาพฉนวน

ในระยะเริ่มแรก ระดับฉนวนของอุปกรณ์ในระบบ กำหนดโดยอาศัยประสบการณ์ภาคสนามในอดีตเป็นหลัก ต่อมาได้มีคณะทำงานสากลร่วมมือกันทำมาตรฐานการทดสอบขึ้น และในปัจจุบัน ระบบไม่เกิน 245 kV ฉนวนในระบบต้องทดสอบความคงทนด้วยแรงดันกระแสสลับ 1 นาที (1 minute frequency test) และแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และในระบบเกิน 300kV ต้องมีการทดสอบด้วยแรงดัน

อิมพัลส์สวิตชิ่ง ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความเชื่อถือได้ในการนำ ระบบมาใช้งาน ตารางที่ 5.4 และ 5.5 เป็นค่ามาตรฐานของแรงดันทดสอบอุปกรณ์ระบบแรงสูง ที่กำหนดขึ้นของ IEC Publication 71, 1972 Draft 17A (C.O.) 103, 104 นำมาเป็นตัวอย่างบางค่าเท่านั้น ในช่องที่เป็นแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าและสวิตชิ่งเป็นค่า BIL และ SIL ของระบบนั่นเอง

5.4 การทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับ

การทดสอบด้วยแรงดันกระแสสลับขนาดสูงกว่าแรงดันปกติที่นำฉนวนมาใช้เป็นเวลา 1 นาที เพื่อเมื่อไว้ในกรณีนี้อาจเกิดระดับแรงดันเท่านี้ ในช่วงอายุการใช้งานดังแสดงใน ตารางที่ 5.4 และ 5.5 ปัจจุบันนี้มีนักวิจัยบางกลุ่มแสดงความคิดเห็นว่าค่าดังกล่าวยังสูงเกินไปจริงมาก ควรได้มีการทบทวนใหม่ การทดสอบนี้กำหนดให้กระทำในสถานะแห้งสำหรับอุปกรณ์ที่นำมาใช้ภายในร่ม ถ้านำไปใช้ในที่แห้งให้ทดสอบในสถานะเปียกด้วย โดยให้มีลักษณะของฝนตกในอัตรา 1.5 มม./นาที และให้นำที่ใช้ทดสอบมีสภาพต้านทาน $\rho = 100$ โอห์มเมตร

แรงดันทดสอบชนิดนี้ต้องมีความถี่ในช่วง 40-60 Hz และค่ายอดมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน $\pm 5\%$ แรงดันทดสอบอาจผลิตจากหม้อแปลงทดสอบหรือใช้วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม และควรมีตัวความต้านทานที่ช่วยจำกัดกระแสในกรณีที่เกิดการเสียดสภาพฉนวนที่ฉนวนทดสอบ โดยทั่วไปการทดสอบในสถานะแห้ง กระแสควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 1 แอมป์ ยกเว้นกรณีการทดสอบฉนวนขนาดเล็ก ๆ อาจให้กระแสต่ำกว่านี้ได้ สำหรับกรณีเป็นการทดสอบในสถานะเปียกหรือมีมลภาวะ กระแสลัดวงจรขณะเกิดการเสียดสภาพฉนวนที่ฉนวนทดสอบ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดัน ($R_s + jX_s$) และกระแสลัดวงจรอาจกำหนดให้มีค่าสูงกว่า 6 แอมป์ขึ้นไป การใช้วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรมมีข้อดีในการทดสอบฉนวนของเคเบิลและตัวเก็บประจุ ซึ่งจะมี กระแสเชิงความจุ (capacitive current) สูง และมักจะสูงกว่ากระแสรั่วที่ผิวฉนวนใน สถานะแห้งเพราะว่าวงจรของแหล่งจ่ายแรงดัน มีคุณสมบัติควบคุมกระแสในขณะลัดวงจร ซึ่งมีความถี่ต่างไปจากความถี่เรโซแนนซ์

ตารางที่ 5.4 ค่าแรงดันทดสอบฉนวนในระบบแรงดันต่าง ๆ ถึงระบบ 245 kV

แรงดันพิกัดสูงสุด ของระบบ (line-line) V_s kV(RMS)	แรงดันทดสอบ 1 นาที 50 Hz		แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s	
	ไปยังดิน V_p kV(RMS)	ระหว่างหน้า สัมผัส kV(RMS)	ไปยังดิน *	ระหว่างหน้า *
			kV(peak)	kV(peak)
3.6	10	12	20, 40	23, 46
7.2	20	23	40, 60	46, 70
12	28	22	60, 75	70, 85
17.5	38	45	75, 95	85, 110
24	50	60	95, 125	110, 145
36	70	80	145, 170	165, 195
52	95	110	250	290
72.5	140	160	325	375
100	150-185	175-210	380, 450	440, 520
123	230	265	550	630
145	230-275	265-315	550, 650	630, 750
170	275-325	315-375	650, 750	750, 860
245	325, 360, 395	375, 415, 460	750, 850, 950	860, 950, 1050
245	460	530	1050	1200

หมายเหตุ : ช่องที่มีมากกว่า 1 ค่า ให้ใช้ค่าต่ำได้ในระบบที่มีการต่อลงดินอย่างมีประสิทธิภาพ
และมีระบบป้องกันแรงดันเกิน

ตารางที่ 5.5 ค่าแรงดันทดสอบฉนวนในระบบแรงดัน 300 kv ขึ้นไป

แรงดัน พิกัดสูง สุดของ ระบบline -line	แรงดันไปยังดิน			แรงดันระหว่างหน้าสัมผัส					
	50 Hz 1 นาที	อิมพัลส์ ฟ้าผ่า	อิมพัลส์ สวิตชิง	BIAS TEST $V_1 + V_2$		อิมพัลส์ สวิตชิง	BIAS TEST $V_3 + V_4$		50 HZ
		V_s kV (RMS)	1.2/5 0 μ s (peak) kV	250/ 2500 μ s (peak) kV	V_1 1.2/5 0 μ s (peak) kV	V_2 0.7 $\sqrt{2/3}V_s$ (peak) kV	250/ 2500 μ s (peak) kV	V_3 250/ 2500 μ s (peak) kV	V_4 $\sqrt{2/3}$ V_s (peak) kV
300	380	950	750	950	170	850	700	245	435
300	380	1050	850	1050	170	850	700	245	435
362	450	1050	850	1050	205	950	800	295	520
362	450	1175	950	1175	205	950	800	295	520
420	520	1130	950	1300	240	1050	900	345	610
420	520	1425	1050	1425	240	1050	900	345	610
525	620	1425	1050	1425	300	1175	900	430	760
525	620	1550	1175	1550	300	1175	900	430	760
765	830	1800	1300	1800	435	1550	1100	625	1100
765	830	2100	1425	2100	435	1550	1100	625	1100

หมายเหตุ: ค่าแรงดันทดสอบของแต่ละระบบที่เป็นค่าต่ำกว่าให้ใช้ในกรณีที่มีการต่อลงดินอย่างมีประสิทธิภาพ

การวัดแรงดันทดสอบสามารถใช้วิธีใดวิธีหนึ่งเพื่อวัดค่า RMS และค่ายอด และการป้อนแรงดันทดสอบ ควรเริ่มจากค่าที่ต่ำ ๆ เพื่อป้องกันการแกว่งในภาวะชั่วคราว และจากค่าที่ประมาณ 75% ขึ้นไป ควรเพิ่มแรงดันประมาณ 2% ต่อวินาที จนกระทั่งถึงค่าแรงดันทดสอบที่ต้องการแล้วจึงรักษาระดับแรงดันอยู่เป็นเวลาตามกำหนด เช่น 1 นาที จึงค่อย ๆ ลดระดับแรงดันลงค่อนข้างเร็ว แต่ไม่ควรตัดวงจรทันทีเนื่องจากอาจเกิดแรงดันเกินในขณะตัดวงจร บางกรณีที่ทำให้เกิดการเสียหายฉับพลันขึ้นที่ฉนวน ก็จะไม่อาจกระทำตามที่กล่าวแล้วได้ จึงต้อง บันทึกค่าสุดท้ายขณะเกิดการเสียหายฉับพลัน

5.5 การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

การทดสอบฉนวนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า ขึ้นอยู่กับค่ามาตรฐานและวิธีทดสอบในแต่ละกรณี และแยกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ชนิดไม่คืนสภาพการเป็นฉนวนกับชนิดที่คืนสภาพการเป็นฉนวนหลังการทดสอบ

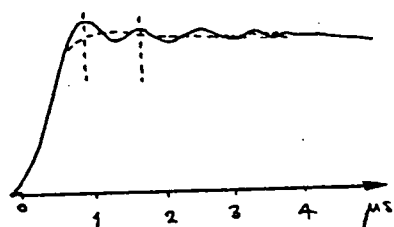
5.5.1 ข้อกำหนดของแรงดันทดสอบอิมพัลส์ฟ้าผ่า

แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน กำหนดให้มี T_1 virtual front time = 1.2 μ s และ T_2 half value virtual time = 50 μ s เวลา T_1 วัดได้โดยการใช้ออสซิลโลสโคป และเป็นค่า 1.67 เท่าของช่วงเวลาที่แรงดันมีค่าเป็น 30% และ 90% ของค่ายอด จุดเริ่มเสมือน O_1 เป็นจุดที่นับย้อนจากเวลาที่แรงดันมีค่า 30% โดยย้อนกลับไปอีก $0.3T_1$ สำหรับเวลา T_2 เป็นค่านับจากจุด O_1 ไปในกรณีที่แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีคลื่นแกว่งไม่เรียบและมีช่วงพุ่งเกิน (overshoot) ที่ใกล้ค่ายอดดังในรูปที่ 5.2 ถ้ามีความถี่น้อยกว่า 0.5 MHz หรือมีช่วงเวลาในช่วงพุ่งเกินมากกว่า 1 μ s ต้องใช้ค่ายอดจริง แต่ถ้าความถี่มากกว่า 0.5 MHz หรือมีช่วงเวลาในช่วงพุ่งเกินน้อยกว่า 1 μ s ให้ใช้การลากเส้นเฉลี่ยเพื่อหาค่ายอดของแรงดัน ความคลาดเคลื่อนของแรงดันชนิดนี้ ได้กำหนดไว้ดังนี้

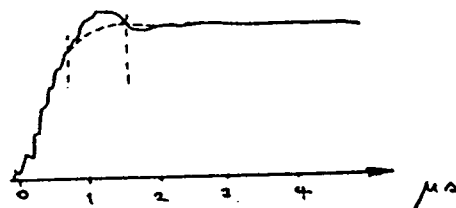
ค่ายอด +3%

T_1 และ T_2 เป็น $\pm 30\%$ และ $\pm 20\%$ ตามลำดับ

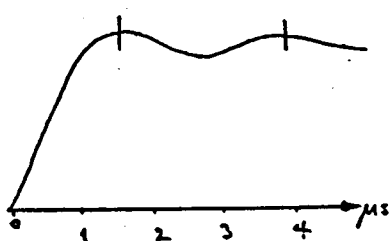
นอกจากนี้ยังมีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีช่วงตัดที่เวลา T_c ซึ่งโดยทั่วไป T_c อยู่ระหว่าง 2 ถึง 5 μ s.



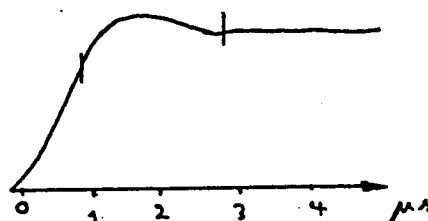
(ก)



(ข)



(ง)



(ค)

รูปที่ 5.2 ตัวอย่างของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีการแกว่งและช่วงพุ่งเกิน
 (ก) และ (ข) ค่าของแรงดันถูกกำหนดโดยเส้นกราฟเฉลี่ย
 (ค) และ (ง) ค่าของแรงดันถูกกำหนดโดยค่ายอดของคลื่น

5.5.2 วิธีทดสอบความทนของฉนวนที่ไม่คืนสภาพ (NONE-SELF-RESTORING)

ฉนวนที่ไม่คืนสภาพการเป็นฉนวนหลังจากการทดสอบที่อาจเกิดการเสียหายฉนวนล้ม ต้องมีการกำหนดลักษณะในการทดสอบโดยเฉพาะ แล้วแต่ชนิดของฉนวนและต้องให้มีการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่ค่าที่ได้กำหนดให้ฉนวนมีความทนได้ และมีช่วงเป็นบวกลบตามกำหนดเป็น จำนวน 3 ครั้ง ถ้าไม่เกิดการเสียหายฉนวนล้ม ให้ถือว่าฉนวนนั้นผ่านการทดสอบความทนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

5.5.3 วิธีทดสอบความทนของฉนวนที่คืนสภาพ (SELF-RESTORING)

การทดสอบฉนวนที่คืนสภาพการเป็นฉนวน ภายหลังจากการเสียหายฉนวนล้มเกิดขึ้น มีอยู่ 2 วิธี
 ก. ให้ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 15 ครั้ง ที่ขนาดและเป็นช่วงบวกลบตาม กำหนด ถ้าการทดสอบมีการเสียหายฉนวนล้มไม่เกิน 2 ครั้ง ถือว่าฉนวนชนิดนั้นผ่านการทดสอบ
 ข. การทดสอบอาจใช้วิธีหาค่าแรงดันเสียหายฉนวนล้ม 50% ($V_{50\%}$) ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยการ

คำนวณเชิงสถิติ ถ้าแรงดันอิมพัลส์ที่ฉนวนมีความทนได้ กำหนดให้เป็นค่า $V_{W90\%}$ ซึ่งหมายถึงค่าที่ฉนวนสามารถทนขนาดแรงดันนี้ได้ด้วย โอกาสสูงถึง 90% ตามการกระจายแบบ Gaussian หรือ Normal

$$V_{W90\%} = (1 - 1.30\sigma)V_{50\%} \quad (5.1)$$

ค่า σ เป็นค่า per unit standard deviation ของ $V_{50\%}$ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า IEC ได้กำหนด σ เท่ากับ 0.03 และ ถ้าเป็นแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงให้เท่ากับ 0.06 เนื่องจากมีการกระจายของการเสียหายฉนวนได้มากกว่า ถ้าแทนค่า σ เท่ากับ 0.03 จะได้ $V_{W90\%}$ เท่ากับ 0.961 $V_{50\%}$ ถ้าหากในการทดสอบความทนต่อแรงดันของฉนวน ได้กำหนดให้ทนได้ถึงค่า $V_{W90\%}$ จากสมการที่ (5.1) แรงดัน $V_{50\%}$ เท่ากับ 1.0405 $V_{W90\%}$ ดังนั้นการทดสอบที่ให้ค่า $V_{50\%}$ มากกว่านี้ ถือได้ว่าฉนวนผ่านการทดสอบ วิธีการหา $V_{50\%}$ มี 3 วิธี

สำหรับการทดสอบ ฉนวนที่มีทั้งส่วนที่คืนสภาพได้และไม่ได้ปนกันให้ใช้แรงดันอิมพัลส์ที่ฉนวนทนได้จำนวน 15 ครั้งทดสอบ ถ้าในส่วนที่เป็นฉนวนที่คืนสภาพไม่ได้ไม่มีการเสียหายฉนวนและมีการเสียหายฉนวนในส่วนที่คืนสภาพได้ไม่เกิน 2 ครั้ง ให้ถือว่าผ่านการทดสอบ

5.5.4 วิธีการทดสอบการเสียหายฉนวน

ในการใช้อุปกรณ์บางชนิดต้องใช้การเกิดการเสียหายฉนวน เช่น ช่องประกายแบบแห้งที่คร่อมขั้วขิงของหม้อแปลง และช่องประกายของกับดักฟ้าผ่า เป็นต้น การทดสอบให้ใช้แรงดันอิมพัลส์ขนาดและขั้วที่กำหนดทำการทดสอบ 5 ครั้ง ถ้าหากมีการไม่เสียหายฉนวนเกิดขึ้น 1 ครั้ง ต้องการทดสอบเพิ่มอีก 10 ครั้ง โดยเสียหายฉนวนทั้ง 10 ครั้ง จึงถือว่าผ่านการทดสอบ ถ้าเกิดการไม่เสียหายฉนวนเกินกว่า 1 ครั้ง ใน 5 ครั้งแรก ถือได้ว่าไม่ผ่านการทดสอบ

5.6 การทดสอบความทนด้วยแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง

แรงดันอิมพัลส์สวิตชิงมาตรฐานกำหนดให้มีเวลาถึงค่ายอด T_{cr} เท่ากับ 250 μs และเวลาช่วงทางคลื่นที่ลดขนาดลงไปถึงครึ่ง T_2 เท่ากับ 250 μs โดยมีความคลาดเคลื่อนได้เท่ากับ $\pm 3\%$, $\pm 20\%$ และ $\pm 60\%$ สำหรับค่ายอด, T_{cr} และ T_2 ตามลำดับ

ในการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์สวิตชิงนั้นจำเป็นสำหรับระบบแรงดัน 300 kV ขึ้นไป เนื่องจากระดับของฉนวนที่ระบบที่มีแรงดันยิ่งสูงขึ้น จำเป็นต้องกำหนดขนาดฉนวนให้มีขนาดฉนวนให้มีขนาดพอดี ๆ ไม่สามารถเพื่อให้มีขนาดยิ่งมากขึ้น เพราะราคาค่าฉนวนจะยิ่งแพง วิธีการทดสอบคล้ายกันกับการทดสอบความคงทนด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และบางกรณีอาจมีการทดสอบควบคู่ไปกับแรงดันกระแสสลับของระบบ ดังในตารางที่ 5.5 ในช่อง bias test

5.7 ลักษณะสมบัติการเสียสภาพฉนวนเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์

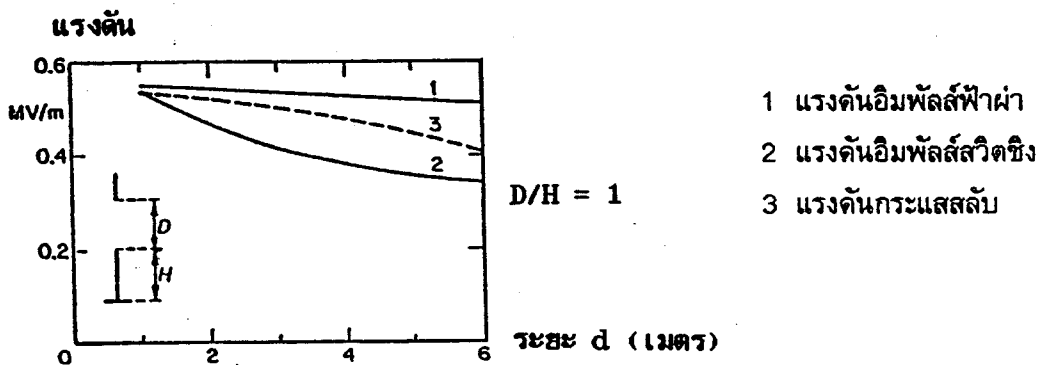
การทดสอบฉนวนในลักษณะต่าง ๆ ทำให้ทราบลักษณะสมบัติการเสียสภาพฉนวนและสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ ในการทดสอบฉนวนภายนอกที่ได้มีผู้ทำการทดลองและรวบรวมไว้มีอยู่มากมาย ในหัวข้อนี้มากล่าวไว้เป็นตัวอย่าง 4 ประเภท คือ

ก. ช่องประกายระหว่างอิเล็กโตรดแท่ง ซึ่งใช้เป็นคู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก (arcing horn) ในการป้องกันแรงดันเกินที่บุงขิงของหม้อแปลง ลูกถ้วยไฟฟ้า

ข. ช่องประกายระหว่างอิเล็กโตรดแท่งและพื้นระนาบ ลักษณะสมบัติของการเสียสภาพฉนวนอาจใช้เป็นข้อมูลของอุปกรณ์สายส่งที่วางตัวอยู่เหนือพื้นดิน โดยมีอากาศเป็นฉนวน

ค. ช่องประกายระหว่างอิเล็กโตรดวางขนานกัน ให้ลักษณะสมบัติคล้ายกับสายตัวนำแรงสูงที่วางขนานกัน หรือขนานกับสายดิน และมีอากาศเป็นฉนวน

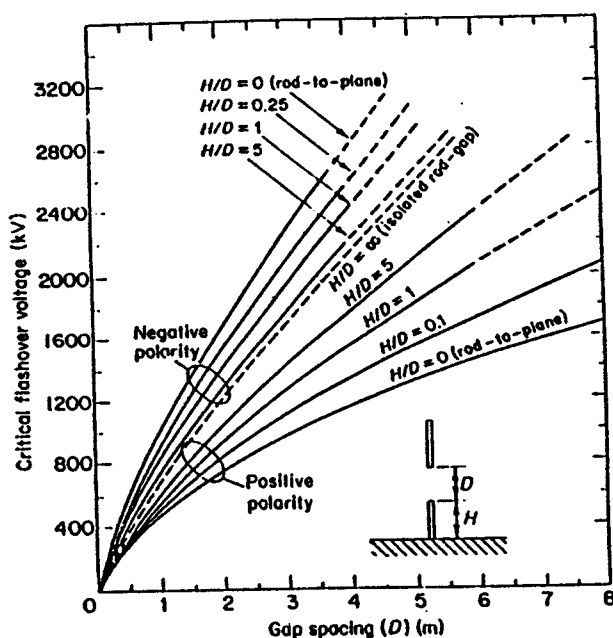
ง. ลูกถ้วยไฟฟ้า ที่ประกอบกันเป็นลูกโซ่ ซึ่งใช้เป็นฉนวนของสายส่ง แบบสายพาดในอากาศ ระบบสายส่งแรงสูง 300 kV ขึ้นไป แรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งมีความสำคัญมากขึ้นต่อการกำหนดความทนต่อแรงดันของฉนวน ในทางปฏิบัติแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่งมีรูปคลื่นหลากหลาย เนื่องจากมีสาเหตุการเกิดต่างกัน ความแตกต่างในด้านลักษณะสมบัติของการเสียสภาพฉนวนของฉนวนที่เกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และสวิตชิ่ง แสดงให้เห็นในรูปที่ 5.3 เส้นประเป็นของแรงดันกระแสสลับ ที่นำมาเปรียบเทียบด้วย แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีค่าสูงที่สุด เนื่องจากเวลาของแรงดันสั้นที่สุด จึงต้องใช้ขนาดแรงดันสูงในการทำให้เกิดการเสียสภาพฉนวน กรณีแรงดันอิมพัลส์สวิตชิ่ง การเสียสภาพฉนวนเกิดขึ้นได้ที่ขนาดแรงดันต่ำที่สุด เนื่องจากมีเวลายาวกว่า สำหรับแรงดันกระแสสลับที่สูงกว่าแรงดันเกินสวิตชิ่ง เพราะว่ามีผลของขั้วบวกกลับสลับกัน ทำให้การเสียสภาพฉนวนเกิดขึ้นที่ขนาดแรงดันสูงขึ้น



รูปที่ 5.3 แรงดันเสียสภาพฉนวนต่อระยะช่องประกาย D

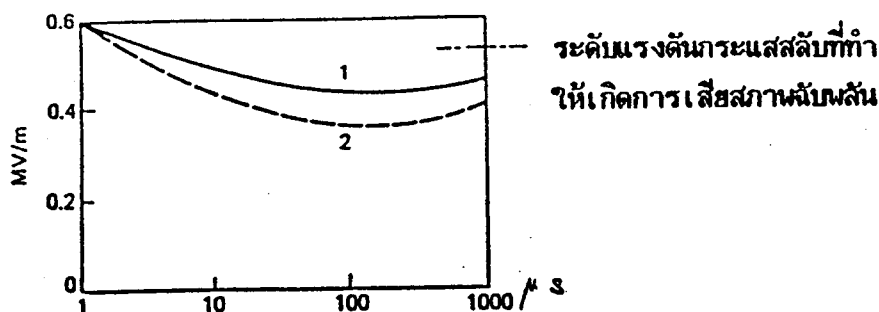
จากรูปที่ 5.3 การเพิ่มระยะของ D ยิ่งมาก ยิ่งทำให้สัดส่วนของแรงดันเสียสภาพฉนวนต่อเมตรอิมพัลส์ ซึ่งยิ่งทำให้ต้องใช้ฉนวนยิ่งมากขึ้นในระบบแรงดันสูงระดับ UHV ผลกระทบของสิ่งข้างเคียง เช่น โครงสร้างที่ต่อลงดินยังมีความสำคัญยิ่งขึ้นในการออกแบบฉนวนของระบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.4

แรงดันอิมพัลส์บวก ทำให้เกิดการเสียหายฉับพลันต่ำกว่าแบบลบ และกรณีระยะ H สั้นลง และกลายเป็นแท่งอิเล็กโตรดกับระนาบดิน แรงดันอิมพัลส์บวกทำให้เกิดการเสียหายฉับพลันที่ค่าต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับแบบลบ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่า กรณีอิมพัลส์บวกอยู่ที่แท่งอิเล็กโตรดบน จะก่อให้เกิด positive streamer ไปยังดินได้สะดวก แต่ใน กรณีแท่งอิเล็กโตรดบนเป็นลบ การเกิด positive streamer ต้องมาจากระนาบดินซึ่งเป็นไปได้ค่อนข้างยากเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ระนาบดินมีความเครียดต่ำกว่ามาก โดยทั่วไป negative streamer เกิดขึ้นได้น้อยกว่า positive streamer ในอากาศ



รูปที่ 5.4 การเสียหายฉับพลันเนื่องจากแรงดันอิมพัลส์ของช่องประกาย

ถ้าเวลาที่เริ่มนับจนกระทั่งเกิดการเสียหายฉับพลันยาวยิ่งขึ้นขนาดแรงดันอิมพัลส์จะยิ่งต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 เวลาป้อนแรงดันอิมพัลส์ให้เกิดการเสียหายฉนวน (time to flashover) กับขนาดแรงดันต่อเมตร

1. อิเล็กโตรดเป็นชนิดแท่ง
2. อิเล็กโตรดเป็นชนิดแท่งกับระนาบ

แรงดันเสียหายฉนวนของช่องประกาย ที่ค่าที่สุดทุกระยะของช่องประกาย ดังในรูปที่ 5.3 เป็นแรงดันอิมพัลส์สวิตซิง และเป็นช่วงบวกค่าแรงดันต่อระยะช่องประกาย ลดลงมากในช่วงระยะกว้าง ๆ ค่าแรงดันเสียหายฉนวนต่าง ๆ นี้มีค่าเปลี่ยนไปหากมีสิ่งข้างเคียงและสภาวะอากาศเปลี่ยนไป การหาระยะช่องประกาย d เพื่อการทดสอบในห้องปฏิบัติการ หรืองานในระบบแรงสูงสามารถหาได้จากสมการที่คิดขึ้นโดยอาศัยผลการทดลองประกอบ [43]

$$V_{50\%} = k \left(1 + \frac{8}{d} \right)^{-1} \quad \text{KV} \quad (5.2)$$

k เป็นค่า gap factor

$V_{50\%}$ เป็นค่าแรงดันเสียหายฉนวน 50% ของแรงดันอิมพัลส์สวิตซิง

5.8 การทดสอบหม้อแปลงแรงสูง

การทดสอบหม้อแปลงให้ทราบคุณลักษณะก่อนที่จะนำไปใช้งานให้ตรงตามข้อกำหนด อาจแยกเป็นการทดสอบทั่วไป กับ การทดสอบแรงสูงด้วยแรงดันอิมพัลส์ การทดสอบทั่วไปเป็นการทดสอบที่ไม่อาจทำลายฉนวน ได้แก่

การทดสอบหาค่าตัวประกอบกำลังสูญเสีย

- อัตราส่วนของจำนวนรอบและชั่ว
- ความต้านทานของฉนวน ขดลวด และแกน
- กำลังสูญเสียของแกนเหล็ก, ขดลวด

- อุณหภูมิและการระบายความร้อน (บางกรณี)
- เสียงรบกวนและโคโรนา (บางกรณี)
- การทำงานของส่วนควบคุมอื่น ๆ
- zero sequence impedance

ในด้านความทนของฉนวนของหม้อแปลง ต้องมีการทดสอบดังต่อไปนี้

ก. แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

- ทดสอบด้วยแรงดันลดค่า เช่น 50% - 70% ของแรงดันเต็มคลื่น 1 ครั้ง
- ทดสอบด้วยแรงดันที่เป็นคลื่นลบ 2 ครั้ง
- ทดสอบด้วยแรงดันเต็มคลื่นตามขนาด BIL 1 ครั้ง
- ทดสอบแรงดันอิมพัลส์ที่มีช่วงหน้าคลื่นที่ชันมาก

ข. แรงดันอิมพัลส์สวิตชิง (บางกรณี)

- ทดสอบด้วยแรงดันลดค่า เช่น 50% - 70% ของแรงดันเต็มคลื่น 1 ครั้ง
- ทดสอบด้วยแรงดันเต็มคลื่น 2 ครั้ง

ค. Applied potential and induced potential tests

การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ ต้องใช้อุปกรณ์เฉพาะในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง จึงนิยมทดสอบกับหม้อแปลงขนาดใหญ่ แต่การทดสอบ applied potential และ induced potential เป็นการทดสอบหลังจากได้ทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์แล้ว ตามลำดับ

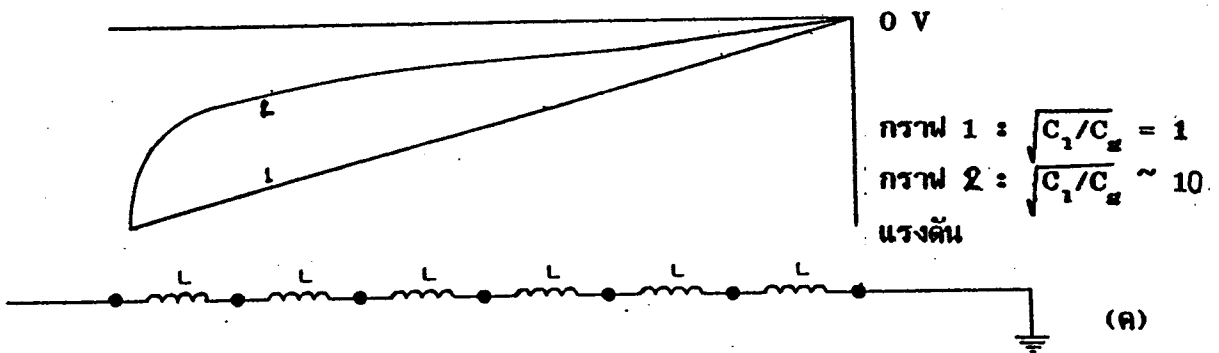
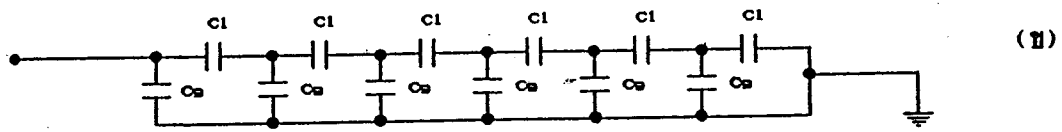
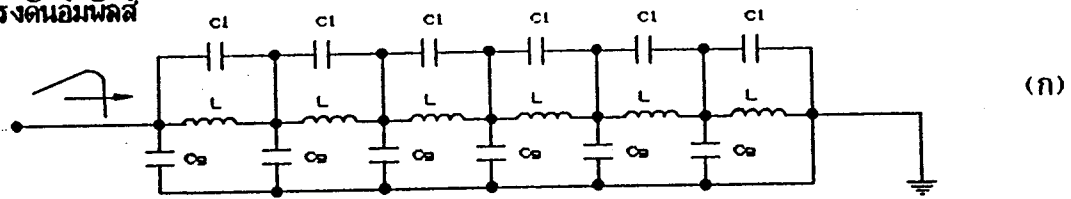
การทดสอบ applied potential เพื่อเช็คความทนของฉนวนของขดลวดเคลดดำ โดยต่อขั้วของขดลวดเคลดดำทั้งหมดเข้าด้วยกัน แล้วป้อนแรงดันระหว่างขั้วกับดิน โดยให้ขดลวดอื่นๆต้องต่อลงดินด้วย ป้อนแรงดันทดสอบตามกำหนดเป็นเวลา 1 นาที

การทดสอบ induced potential ทำต่อจาก applied potential เพื่อเช็คความทนของฉนวนของขดลวดที่ต่อแบบวาย โดยต่อแรงดันเข้าทางด้านขดลวดแรงต่ำ เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำไปยังขดลวดแรงสูง ใช้ความถี่ 120 - 400 Hz เพื่อลดกระแสในขดลวด หม้อแปลงที่วัดกระแสได้ต่ำกว่าขีดกำหนด ในช่วง 7,200 คาบเวลา ถือว่าผ่านการทดสอบ

วงจรสมมูลของหม้อแปลง ในการทดสอบ ดังในรูป 5.6 ซึ่งมีค่าความเหนี่ยวนำ L ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างขดลวดแต่ละกลุ่ม C_1 และไปยังดิน C_g ในขณะที่แรงดันอิมพัลส์เข้าสู่หม้อแปลง ค่าความ

เหนี่ยวนำ L มีลักษณะเสมือนเป็นค่าอิมพีแดนซ์สูงมากต่อแรงดันอิมพัลส์ วงจรสมมูลจึงเป็นดังรูปที่ 5.6 (ข) ในช่วงทางคลื่นอิมพัลส์ ค่า C มีลักษณะเสมือนเปิดวงจรดังรูปที่ 5.6 (ค) การกระจายของแรงดันตลอดแนว L จะไม่เป็นเส้นตรงแต่ขึ้นอยู่กับ C_0/C_1

แรงดันอิมพัลส์



รูปที่ 5.6 วงจรสมมูลหม้อแปลงและการกระจายของแรงดันตลอดแนวขดลวด

- ก. ก่อนเกิดอิมพัลส์
- ข. ช่วงหน้าคลื่นของอิมพัลส์
- ค. ช่วงหางคลื่นของอิมพัลส์

5.9 การทดสอบวัสดุอุปกรณ์ฉนวนแรงสูงชนิดต่าง ๆ

วัสดุอุปกรณ์ฉนวนแรงสูงมีหลายชนิด มีลักษณะการนำไปใช้งานต่างๆ แตกต่างกันไป เช่น ใช้นอกอาคาร บางชนิดสัมผัสกับอากาศภายนอก บางชนิดปิดมิดชิด (GIS) เป็นต้น ฉนวนไฟฟ้ามีทั้งแบบสามารถคืนสภาพได้เองและไม่คืนสภาพ หลังจากการเสียดสภาพฉนวน ดังนั้นการทดสอบฉนวนจึงแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ

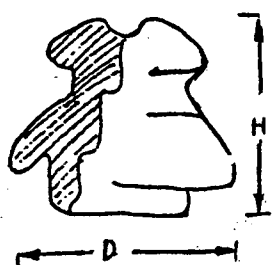
1. ใช้แรงดันทดสอบประเภทต่างๆ ทดสอบทั้งในแบบให้เกิดการเสียดสภาพฉนวนพลาซ่า เพื่อดูลักษณะสมบัติของฉนวนและแบบทดสอบสภาพความคงทน ซึ่งอาจไม่มีการเสียดสภาพฉนวนพลาซ่า เช่น ทดสอบด้วยค่า BIL

2. การทดสอบโดยใช้ค่าวัดทางไฟฟ้าอื่นๆ ที่สามารถชี้ให้เห็นถึงสภาพของฉนวนได้ เช่น ตัวประกอบกำลังสูญเสีย ค่าความจุไฟฟ้า กำลังสูญเสียไดอิเล็กตริก ประจุในการเกิดการปล่อยบางส่วน สนามไฟฟ้า และค่าอื่นๆ ที่เป็นการทดสอบลักษณะเฉพาะของวัสดุอุปกรณ์ชนิดนั้นๆ

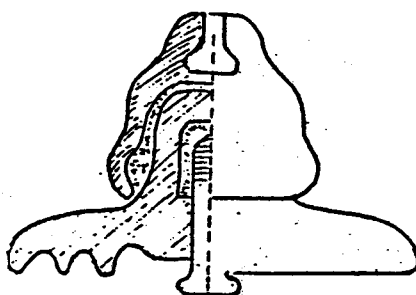
นอกจากนี้ยังมีการทดสอบในสภาวะการใช้งาน ในสภาวะผิดปกติหรือมลภาวะ การทดสอบจึงเป็นตามมาตรฐานของอุปกรณ์แต่ละชนิด เช่น ลูกถ้วยไฟฟ้า สายเคเบิล กั๊บดักฟ้าผ่า บุชชิ่ง ตัวเก็บประจุ เบรกเกอร์ เป็นต้น

5.9.1 การทดสอบลูกถ้วยไฟฟ้าและบุชชิ่ง

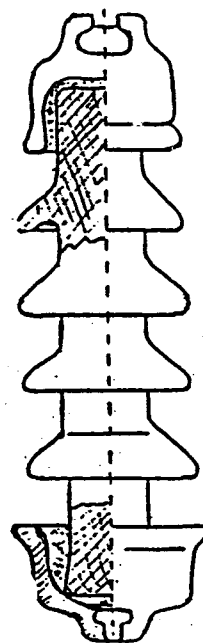
ลูกถ้วยไฟฟ้ามีหลายชนิดดังตัวอย่างในรูป ซึ่งทำจากพอร์ซเลนหรือแก้ว



pin insulator



suspension insulator

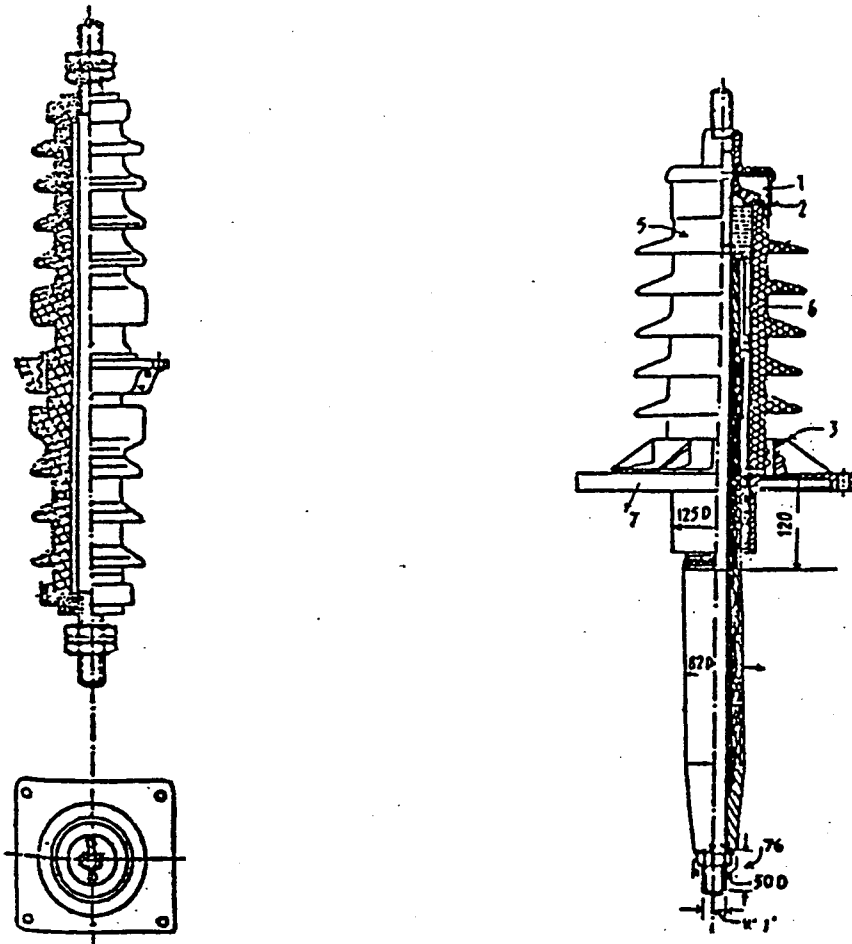


rod-type insulator

รูปที่ 5.7 ตัวอย่างลูกถ้วยไฟฟ้า

พอร์ซเลนยังสามารถนำมาทำบุชชิ่ง เพื่อต่อสายแรงสูงเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าดังรูป ฉนวนที่บรรจุภายใน อาจเป็น RESIN , กระจก และน้ำมัน การทดสอบด้วยแรงดันสูงได้แก่ การทดสอบการเกิดการวาวไฟ ตามผิว ในสถานะแห้งและเปียก โดยใช้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าลบ ชนิดคลื่นตัดและคลื่นเต็มอย่างละ 3 ครั้ง ตามข้อกำหนด ANSI ของสหรัฐ ถ้าในแต่ละชนิดที่ทำการทดสอบ 3 ครั้ง โดยฉนวนมีความทนต่อแรงดัน ก็ผ่านการทดสอบ ถ้าเกิดการวาวไฟ 1 ใน 3 ถือว่าผ่าน ถ้าทดสอบใหม่อีก 3 ครั้งต้องไม่เกิดการวาวไฟอีก ถ้าการทดสอบมีการวาวไฟ 2 ใน 3 ขึ้นในครั้งแรก ถือว่าไม่ผ่านการทดสอบ สำหรับมาตรฐาน IEC ได้กำหนดให้ทดสอบ 15 ครั้งถ้าเกิดการวาวไฟ 2 ใน 15 ครั้ง ถือว่าผ่านการทดสอบ

การเสียดสภาพฉนวน เช่น การทดสอบการเจาะทะลุผ่าน ซึ่งกระทำในฉนวนน้ำมัน เพื่อป้องกันการวาบไฟตามผิว

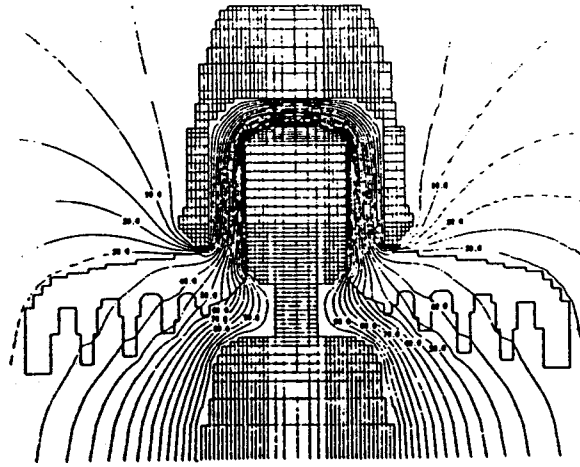


รูปที่ 5.8 ตัวอย่าง บุชชิง 35 KV

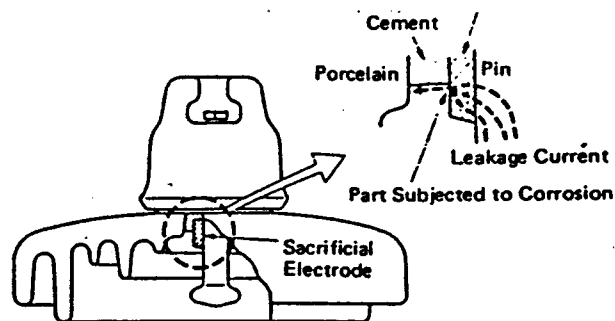
1 = rain , 2 = cast iron , 3 = cement filler , 4 = paper insulation

5 = cement filler , 6 = resin , 7 = flange

นอกจากการทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ ยังต้องมีการทดสอบความทนต่อแรงดัน DC , AC ที่จะนำลูกถ้วยหรือบุชชิงไปใช้งาน เช่น การทดสอบ 1 นาที ด้วยแรงดัน AC บางกรณีอาจมีการทดสอบลักษณะสมบัติทั่วไปของอุปกรณ์ด้วย เช่น ฉนวนเปอร์ซเลน น้ำมัน และกระดาษ โดยการทดสอบ สภาพต้านทาน ความจุไฟฟ้า การปล่อยประจุบางส่วน และการกระจายความเครียดของสนามไฟฟ้า การรบกวนคลื่นวิทยุ ดังรูป 5.9 แสดงลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยและการเกิดกระแสรั่วไหลผ่านเนื้อฉนวน อันเป็นผลให้เกิดการกักความร้อนแก่เหล็กยึดตรงกลาง ตรงบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง



(ก) เส้นสมศักย์

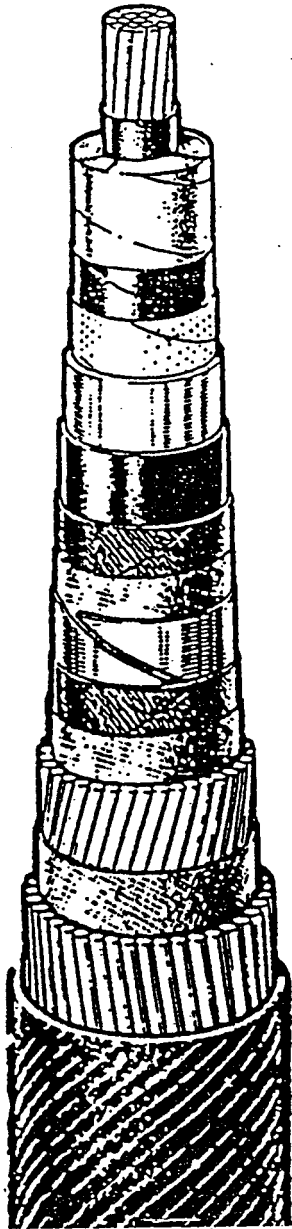


(ข) บริเวณที่มีกระแสรั่วและผลกระทบ

รูปที่ 5.9 ตัวอย่างของสนามไฟฟ้าและเส้นสมศักย์ของลูกถ้วยและการเกิดกระแสรั่ว

5.9.2 การทดสอบเคเบิลแรงสูง

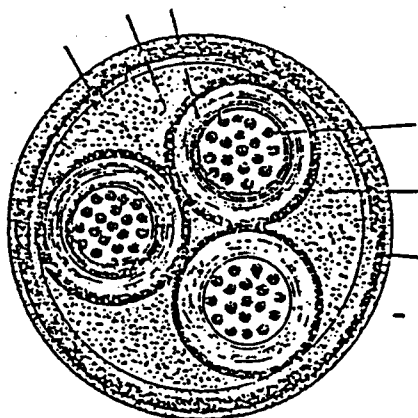
ฉนวนของเคเบิลต้องมีความทนต่อแรงดัน ไม่แตกหักในการบิดงอและสามารถถ่ายเทความร้อนได้ในบางกรณีที่มีกระแสฟลักสูง ในปัจจุบันฉนวนของเคเบิล ได้แก่ สารโพลีเมอร์ เช่น PEX , PVC กระดาษชุบน้ำมันและก๊าซที่มีความดัน รูปที่ 5.10 เป็นตัวอย่างของเคเบิลแกนเดี่ยวแบบกระดาษชุบน้ำมัน



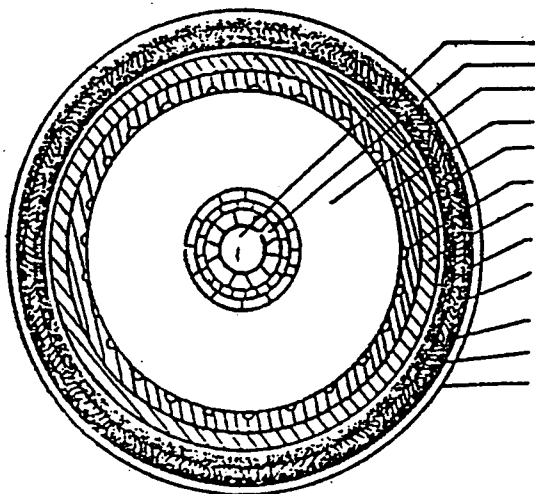
Submarine cable		1x1200 mm ² , BIL 960
Rated DC voltage	kV	400
Round conductor of profiled wires		
- material		copper
- cross-section	mm ²	1200
Semi-conductive layer		
Oil impregnated paper insulation		
- thickness	mm	17.5
Semi-conductive layer		
Lead alloy sheath		
PE-sheath		
Bedding		
Galvanized steel tapes		
Bedding		
Armour of steel wires		
with 2 layers in counter helix		
Outer protection		
- material		polypropylene
Overall diameter	mm	128
Weight	g/m	54

รูปที่ 5.10 ตัวอย่างเคเบิลขนาด 400 KV DC แสดงชั้นฉนวน

แกนเดี่ยว ฉนวนพลาสติกและกระดาษชุบน้ำมันต้องหลีกเลี่ยงการเกิดโพรงอากาศภายใน ที่ทำให้เกิดการปล่อยประจุบางส่วนภายในโพรงและทำให้เกิด treeing ที่ทำลายสภาพฉนวนได้



ก. เคเบิลสามแกนฝังดิน



ข. เคเบิลแกนเดี่ยวฉนวนน้ำมัน

รูปที่ 5.11 ตัวอย่างเคเบิลฉนวนพลาสติกและฉนวนน้ำมัน

การทดสอบของเคเบิลที่สำคัญ ได้แก่

- ก. การทดสอบความคงทนต่อแรงดันอิมพัลส์ที่ค่า BIL ดังเช่นอุปกรณ์อื่น ๆ
- ข. การทดสอบความคงทนต่อแรงดันกระแสสลับที่ความถี่กำลัง

โดยใช้ขนาดประมาณ 2.5 เท่าของแรงดันพิกัดของระบบเป็นเวลานานกว่า 10 นาทีขึ้นไป ตัวอย่าง- การทดสอบของโรงงานแห่งหนึ่ง โดยใช้สายเคเบิลที่เป็นตัวอย่างยาวประมาณ 10 เมตร ดังในตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ตัวอย่างแรงดันทดสอบของเคเบิล

	ชนิดของเคเบิล	ฉนวนโพลีเมอร์ กระดาษชุบน้ำมัน	บรรจุก๊าซ	บรรจุน้ำมัน
	แรงดันของระบบ (kV)	35	35	110
1.1	แรงดันที่ความถี่ 50 Hz (kV)	65	-	140
1.2	เวลาทดสอบ (นาที)	10	-	15
2.1	แรงดันกระแสตรง (kV)	-	130	-
2.2	เวลาทดสอบ	-	30	-

ค. การวัดค่า $\tan \delta$ โดยใช้ Schering bridge ตัวอย่างการกำหนดค่าแสดง ในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ตัวอย่างการวัด $\tan \delta$ ของเคเบิล

ชนิดของเคเบิล	กระดาษชุบน้ำมัน		บรรจุก๊าซ	บรรจุน้ำมัน
แรงดันของระบบ(kV)	10	35	35	110
แรงดันป้อนเพื่อการวัด (kV) (50 Hz)	23	65	40	70
$\tan \delta$ ค่าสูงสุดที่ ได้ยอมรับ	0.015	0.01	0.025	0.006
สภาพต้านทาน ($M\Omega/km$)	100	100	400	-

ง. การวัดค่าประจุเนื่องจากการปล่อยประจุภายในฉนวน (PD) ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 40 kHz ถึง 400 kHz

ฟ้าผ่าและการป้องกัน

ปรากฏการณ์ธรรมชาติที่มีผลต่อระบบไฟฟ้าที่สำคัญชนิดหนึ่งคือฟ้าผ่า ซึ่งเป็นไปตามสภาพธรรมชาติดินฟ้าอากาศ ที่มีเมฆฝนและลมมรสุมต่าง ๆ ประกอบด้วยการเกิดฟ้าผ่า พารามิเตอร์ของฟ้าผ่า ข้อมูลสถิติที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและการป้องกันฟ้าผ่าของระบบไฟฟ้า อาคาร และวัตถุก่อสร้างในแบบต่าง ๆ

6.1 ปรากฏการณ์และกลไกการเกิดฟ้าผ่า

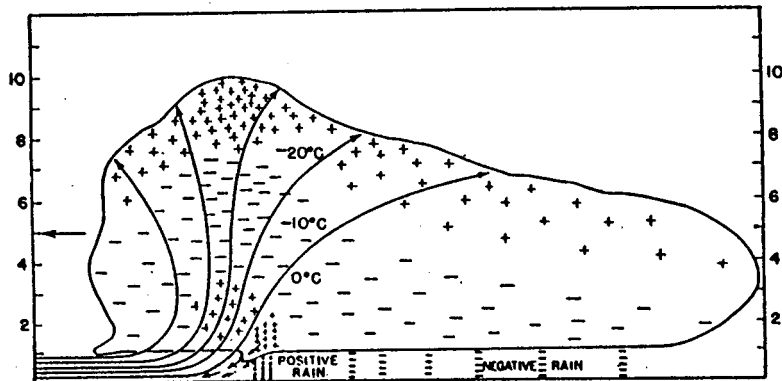
ลมและอากาศแปรปรวนทำให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าในกลุ่มของเมฆความแปรปรวน อาจแยกออกได้เป็น 2 ประเภท

ก. Heat storm เกิดขึ้นในวันที่อากาศอ้าว อากาศที่ร้อนจากเบื้องต่ำใกล้พื้นดินพุ่งตัวขึ้นไปที่สูงกว่าแล้วเย็นตัวลงในที่สูง ทำให้เกิดเมฆและเกล็ดน้ำแข็งลอยตามลมไปยังที่อื่น

ข. Frontal storm เกิดขึ้นจากกลุ่มเมฆในอากาศที่เย็นกว่า เคลื่อนตัวไปยังที่ร้อนกว่าแล้วจึงทำให้เกิด Heat storm อีก กลับกันไป

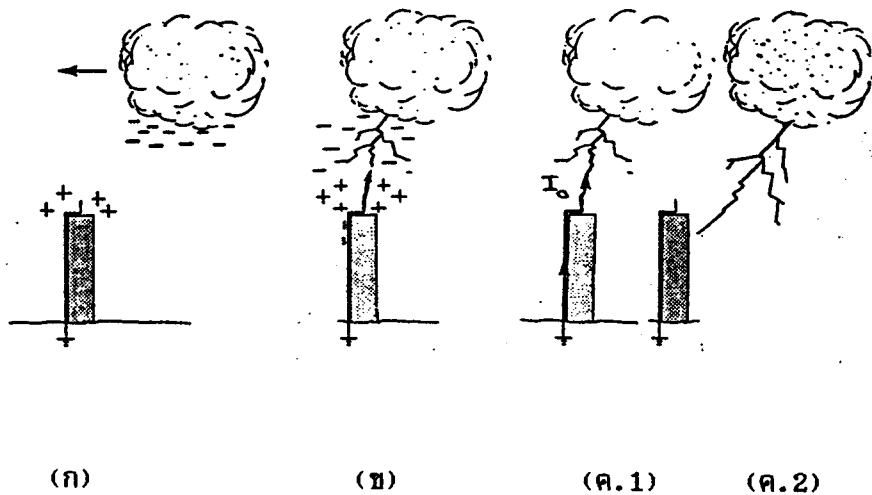
ในกลุ่มเมฆมีประจุไฟฟ้าแอมแปงอยู่โดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ต่ำมีละอองน้ำที่รับประจุลบได้มากกว่า และบริเวณเบื้องสูงมีละอองเกล็ดน้ำแข็งที่รับประจุบวกได้มากกว่า ดังในรูปที่ 6.1 ซึ่งในสภาวะพายุฟ้าคะนอง เนื่องจากมีอากาศแปรปรวน ประจุเหล่านี้เกิดการถ่ายเทเพื่อลดความเครียดของสนามไฟฟ้าโดยอากาศเกิดการแตกตัวให้ประจุและเกิดช่องฟ้าผ่าที่มีสภาพเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าได้ชั่วขณะที่เกิดฟ้าผ่า

ระยะความสูง (กม.)



รูปที่ 6.1 การแบ่งตัวของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ

ฟ้าผ่าเริ่มเกิดขึ้นได้จากการแตกตัวของประจุในอากาศ โดยทั่วไปขนาดของสนามไฟฟ้าที่ 10-30 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร สามารถทำให้อากาศเกิดการแตกตัวให้ประจุไฟฟ้าได้ ลักษณะการเกิดเป็นไปดังเช่นรูปที่ 6.2 โดยก้อนเมฆก่อให้เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าที่ยอดอาคารและบริเวณใต้ก้อนเมฆ กลไกการเริ่มเกิดฟ้าผ่า เริ่มจากการเกิดขึ้นนำฟ้าผ่า (STEPPED LEADER) ซึ่งเป็นตัวนำยาวประมาณ 50 เมตรและรอบ ๆ ชั้นนำจะมีการแตกตัวของประจุเป็นลักษณะของโคโรนา ในเขตรัศมีของชั้นนำประมาณ 30 เมตร และชั้นนำจะชักนำให้เกิดการแตกตัวของประจุในขั้นถัด ๆ ไปการเกิดในแต่ละชั้นใช้เวลาน้อยกว่าไมโครวินาที การเกิดโคโรนา และชั้นนำนี้ทำให้เกิดแสงจ้าที่มองเห็นได้ด้วยตา การเกิดขึ้นนำเข้าใกล้สู่อาคารและที่ระยะห่างนี้เรียกว่า ระยะเผชิญ (STRIKING DISTANCE) ก็ จะเกิดการเสียสภาพฉนวนของอากาศ ทำให้อากาศกลายเป็นตัวนำในลักษณะของพลาสมา และทำให้เกิดการไหลของประจุตรงข้าม คือประจุบวกกลับขึ้นไปสู่ก้อนเมฆ จึงเกิดเสียงฟ้าร้อง การไหลของประจุขึ้นไปยังเมฆนี้ เรียกว่า ลำฟ้าผ่าย้อน (RETURN STROKE) แนวช่องที่มีการไหลของประจุในอากาศนี้ ยังคงเป็นตัวนำไฟฟ้า ที่มีการไหลของประจุเกิดขึ้นได้อีก เพื่อถ่ายประจุจากเมฆและพื้นดิน จึงเรียกว่า DART LEADER



รูปที่ 6.2 การเกิดฟ้าผ่าระหว่างเมฆและยอดอาคารหรือด้านข้างของอาคาร

- ก. ความเครียดของสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างเมฆและอาคาร
- ข. เกิดชั้นนำฟ้าผ่า (STEPPED LEADER) และสตรีมเมอร์บวกวิ่งขึ้น
- ค.1 เกิดลำฟ้าผ่าย้อนกลับ (RETURN STROKE)
- ค.2 ชั้นนำฟ้าผ่า อยู่ในบริเวณใกล้ด้านข้างอาคารและเกิดลำฟ้าผ่าย้อนกลับที่ด้านข้างอาคาร

ฟ้าผ่าอาจมีแรงดันไฟฟ้าเทียบกับพื้นดินถึง 100 MV และลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงถึง 30,000°K และมีขนาดกระแสได้ถึง 100 kA [49] ผลกระทบของฟ้าผ่าจึงมีหลายด้าน ได้แก่

ก. ผลกระทบด้านความร้อน ถ้าหากสิ่งที่ถูกฟ้าผ่าไม่สามารถถ่ายเทพลังงานลงสู่ดินได้ในเวลาอันสั้น ความร้อนที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิสูงถึง 30,000°K จึงทำให้เกิดไฟไหม้ได้อย่างรวดเร็ว เช่น ฟ้าผ่าลงที่ถังเก็บเชื้อเพลิง ถ้าจุดที่ฟ้าผ่าเป็นถังตัวนำไฟฟ้าเกิดหลอมละลายขึ้น ก็จะทำให้เกิดการระเบิดได้

ข. ผลกระทบด้านแรง เนื่องจากกระแสฟ้าผ่าทำให้เกิดแรงของคูลอมบ์ในตัวนำไฟฟ้าที่รับกระแสฟ้าผ่า และความร้อนทำให้เกิดการขยายตัวเป็นแรงระเบิดได้ ดังเช่นฟ้าร้อง

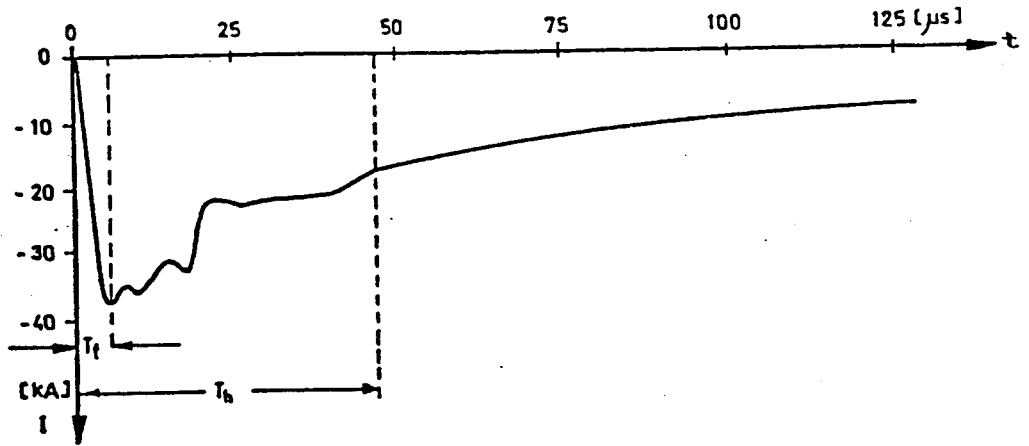
ค. ผลกระทบด้านไฟฟ้า ก่อนเกิดฟ้าผ่า สนามไฟฟ้าที่สูงมากอาจรบกวนระบบ สื่อสารและไฟฟ้าต่าง ๆ เมื่อเกิดฟ้าผ่าแล้วกระแสฟ้าผ่าทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนคลื่นอื่น ๆ เกิดการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้า และเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่วัตถุข้างเคียง กระแสฟ้าผ่าทำให้เกิดเล็วขึ้นในระบบไฟฟ้าเช่นระบบสายส่งซึ่งเป็นสาเหตุของแรงดันเกินฟ้าผ่าที่อุปกรณ์และฉนวนต่าง ๆ และเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่ถูกฟ้าผ่าหรืออยู่ข้างเคียง

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ ฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆและฟ้าผ่า ลงสู่พื้นโลกหรือขึ้นจากพื้นโลกซึ่งสังเกตได้โดยง่ายจากการเกิดแขนงของฟ้าผ่าถ้าฟ้าผ่าลงจะมี แขนงอยู่ด้านก้อนเมฆ แยกกระจายลงไปสู่พื้นดิน ซึ่งตรงข้ามกับฟ้าผ่าขึ้น ลักษณะของฟ้าผ่าที่ได้มีการวิจัยเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบและป้องกันฟ้าผ่า มีหลายอย่าง ได้แก่ กระแสฟ้าผ่า รูปคลื่น เป็นบวกหรือลบ และขนาดของกระแส จำนวนครั้งที่เกิดฟ้าผ่าที่เดียวกัน (stroke per flash) ช่วงเวลาระหว่างลำฟ้าผ่า (lightning stroke) รวมทั้งสถิติของลักษณะต่าง ๆ รวมทั้งวันได้ยืนยันเสียงฟ้าร้องต่อบี

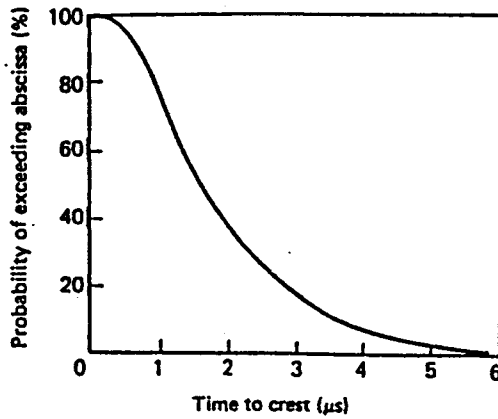
ปริมาณของพลังงานที่เกิดจากฟ้าผ่า ที่ระดับแรงดันต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น ที่แรงดันฟ้าผ่าลงสู่พื้นดินเป็น 10 MV เกิดการปล่อยประจุลงสู่ดินประมาณ 20 คูลอมบ์ พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจึงเท่ากับ 20×10^7 Ws หรือ 55 กิโลวัตต์ชั่วโมง พลังงานนี้ได้รับการถ่ายเทในเวลาสั้น เช่น 2 วินาที ซึ่งทำให้ขนาดของกำลังสูงถึง 100 MW

6.2 กระแสฟ้าผ่า

รูปคลื่นของกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีลักษณะดังในรูปที่ 6.3 (ก) T_f เป็นเวลาหน้าคลื่น (front time) และ T_H เป็นเวลาหางคลื่นที่มีค่ากระแสเป็นครึ่งหนึ่งของค่ายอด (half value time) ทั้งค่า T_f และ T_H มีความเปลี่ยนแปลงไปอย่างอิสระต่อกัน ในรูปที่ 6.3 (ข) แสดงให้เห็นถึงเวลาของ T_f ที่วิจัยโดย Anderson [41]



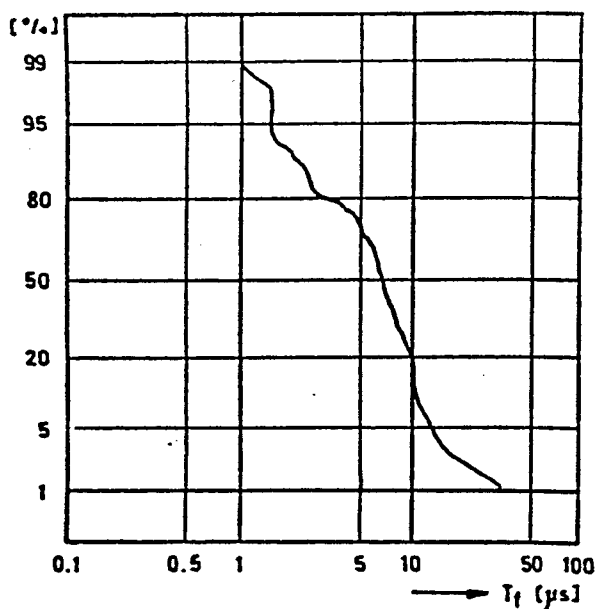
(ก) ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสลิ่มพัลส์ฟ้าผ่า



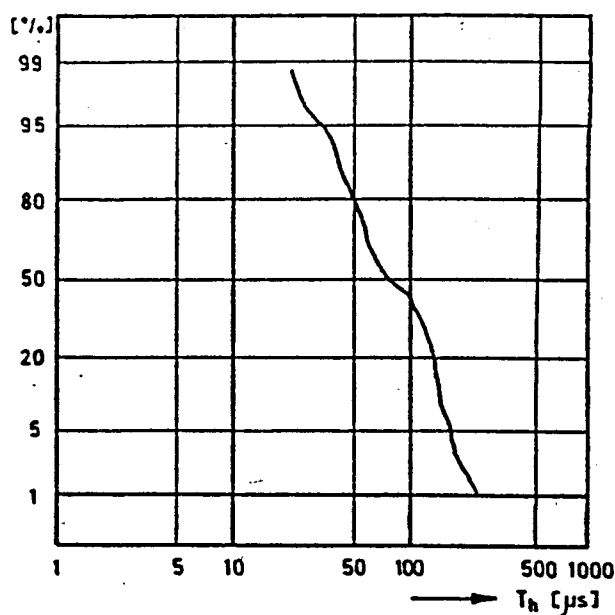
(ข) เวลาค้นหาคลื่น (T_f)

รูปที่ 6.3 ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสลิ่มพัลส์ฟ้าผ่าและเวลาค้นหาคลื่น T_f

เวลาค้นหาคลื่น T_f และเวลาลงคลื่น T_h มีสถิติของโอกาสในการมีค่าไม่ต่ำกว่าค่า T_f และ T_h ค่าใด ๆ แสดงอยู่ในรูปที่ 6.4 (ก) และ (ข) [53] เช่น ประมาณ 95% ของกระแสลิ่มพัลส์ฟ้าผ่าที่ T_f มากกว่า 1.5 μ s และประมาณ 5% ที่มี T_h ไม่เกิน 200 μ s



(ก) เวลาค้นหาคลิ่น



(ข) เวลาทางคลิ่นที่มีขนาดครั้งค่ายอด

รูปที่ 6.4 เปอร์เซนต์ของเวลาหน้าคลิ่นและทางคลิ่นที่มากกว่าค่า T_f และ T_h

ข้อมูลสถิติของกระแสฟ้าผ่าที่ได้มาจากนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน มีความกระจายในค่าต่าง ๆ พอสมควร ซึ่งอาจเป็นเพราะสถานที่ในการเก็บข้อมูลและวิธีการเก็บข้อมูลแตกต่างกันไป โดยสรุปแล้ว ประมาณ 50% ของกระแสฟ้าผ่า อยู่ในช่วงมากกว่า 10 kA ไปจนถึง 40 kA และมี T_f ประมาณไม่เกิน 5.5 μ s และมี T_h ประมาณไม่ต่ำกว่า 75 μ s และค่าเหล่านี้มีแนวโน้มลดลง ถ้าเกิดฟ้าผ่าหลาย ๆ ครั้ง ติดต่อกัน

6.3 อันตรายของฟ้าผ่าต่อสิ่งมีชีวิต

ร่างกายของคนมีความต้านทานต่อการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้น แรงดันที่สัมผัสร่างกายจึงเป็นจุดสำคัญในการป้องกัน มิให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย โดยทั่วไปกระแสไฟฟ้า 1 มิลลิแอมป์ ก็สามารถทำให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อได้ ร่างกายของคนมีความต้านทานแตกต่างกันไปตามสภาวะผิวและบริเวณที่เกิดการสัมผัสกับแรงดันไฟฟ้า จากการศึกษาของ Freiburger (พ.ศ.2477) ซึ่งทำวิจัยที่แผนกเก็บศพ ได้พบว่า การป้อนแรงดันกระแสสลับขนาดต่างกันทำให้ความต้านทานของร่างกายมีค่าต่างกัน ความต้านทานจากมือข้างหนึ่งถึงขาข้างหนึ่งมีค่าดังในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ความต้านทานของร่างกาย

แรงดัน (โวลต์)	ความต้านทานของร่างกาย (โอห์ม)	
	ช่วงที่วัดได้	ค่าเฉลี่ย
350 (AC)	945 - 2100	1500
500 (AC)	700 - 1900	1200

นอกจากนี้ยังได้พบว่าค่าความต้านทานจะลดลงไป 25% หลังจากที่เวลาที่มีแรงดันผ่านไป 3 วินาที ดังนั้นที่แรงดันไม่เกิน 500 โวลต์ จึงกำหนดให้ค่าความต้านทานเฉลี่ยของร่างกาย ประมาณ 900 โอห์ม ทำให้มีกระแสผ่านร่างกายจากมือถึงขาไว้สูงถึง 245 มิลลิแอมป์ ที่แรงดัน 220 โวลต์ ในด้านแรงดันฟ้าผ่า นิยมใช้ความต้านทานของร่างกายประมาณ 1,000 โอห์ม

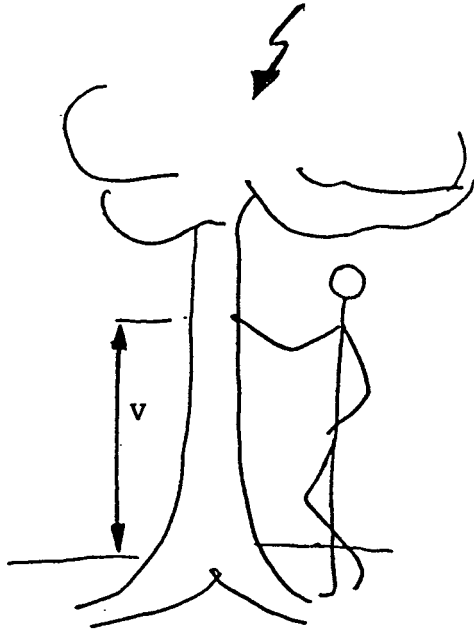
ร่างกายได้รับอันตรายจากกระแสไฟฟ้าโดยมีอาการที่เกิดขึ้นโดยทันที 3 อย่าง คือ

- ก. การทำงานผิดปกติของกล้ามเนื้อหัวใจ
- ข. การหยุดหายใจ
- ค. การไหม้ในบริเวณที่มีกระแสไหลผ่านสูง

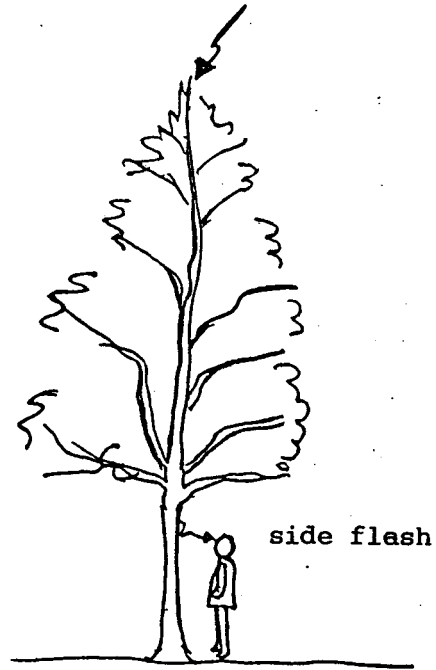
ฟ้าผ่าโดยทั่วไป อาจมีแรงดันสูงถึง 10^7 โวลต์ และมีประจุไฟฟ้ามากถึง 20 คูลอมบ์ทำให้สามารถถ่ายเทพลังงานลงสู่ดินได้ถึง 20×10^7 วัตต์วินาทีหรือ 55 กิโลวัตต์ชั่วโมง พลังงานนี้มีบางส่วนเข้าไปในจำนวนน้อยกับการทำให้อากาศเสียสภาพฉับพลัน ทำให้เกิดความร้อนที่วัตถุที่ถูกฟ้าผ่าฟ้าเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต อาจจำแนกออกตามลักษณะการถูกฟ้าผ่าได้ 4 ลักษณะคือ

ก. ถูกฟ้าผ่าโดยตรง (direct strike) เช่นกรณีของฟ้าผ่าลงยังผู้เล่นฟุตบอล ผ่านร่วมสู่มือและลงสู่พื้นดิน ถ้าร่างกายมีความต้านทาน 1,000 โอห์ม และกระแสฟ้าผ่ามีค่า ประมาณ 1,000 แอมป์ แรงดันคร่อมคนที่ถูกฟ้าผ่าตรงศีรษะจึงมีค่าประมาณ 1,000 กิโลโวลต์ และทำให้เกิดการรวบไฟตามผิวหรือในอากาศ อาร์กที่เกิดขึ้นทำให้แรงดันตกคร่อมคนลดลง เช่น ความยาวของอาร์กประมาณ 2 เมตร จะมีแรงดันคร่อมคนประมาณ 4 กิโลโวลต์ หรือ 20 โวลต์ ต่อ ซม. ถ้าร่างกายยังมีความต้านทานเท่าเดิม กระแสที่ผ่านร่างกายจะลดลงเป็น 4 แอมป์ และอาจทำให้คนถูกฟ้าผ่าไม่เป็นอันตรายถึงชีวิต

ข. คนสัมผัสสัมผัสกับวัตถุที่ถูกฟ้าผ่า ทำให้เกิดแรงดันสัมผัส (contact voltage) เช่น คนยืนฟังต้นไม้ที่ถูกฟ้าผ่า คนจับท่อน้ำประปาขณะเกิดฟ้าผ่าและมีกระแสไหลผ่านท่อประปาลงสู่ดิน ตามรูปที่ 6.5 (ก) ถ้าแรงดัน V มีค่าสูง ก็จะมีกระแสแบ่งไหลผ่านร่างกายลงสู่ดิน



(ก) แรงดันสัมผัส



(ข) การเกิดประกายไฟผ่าด้านข้าง

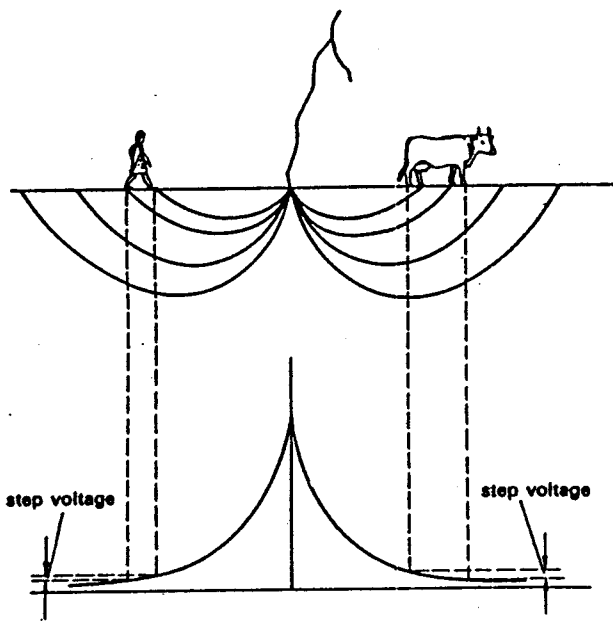
รูปที่ 6.5 ลักษณะของแรงดันสัมผัสเนื่องจากฟ้าผ่า และ side flash

ค. การเกิดประกายไฟผ่าด้านข้าง (side flash) เช่น คนที่ยืนอยู่ใกล้ต้นไม้ที่ถูกฟ้าผ่า ดังในรูปที่ 6.5 (ข) เนื่องจากต้นไม้มีความต้านทานสูง อาจเป็นกิโลโอม ในขณะที่เกิดฟ้าผ่าลงที่ต้นไม้ คนที่ยืนอยู่ใกล้ ๆ ยังคงมีแรงดันเป็นศูนย์เท่ากับพื้นดิน ดังนั้นที่จุดใกล้ศีรษะบนต้นไม้ไม่มีแรงดันเนื่องจากฟ้าผ่า และอาจมีขนาดสูงเพียงพอที่จะทำให้อากาศเสียสภาพฉับพลันและเกิดประกายไฟผ่าด้านข้างไปยังศีรษะ จึงมีกระแสไหลผ่านร่างกายลงสู่ดิน

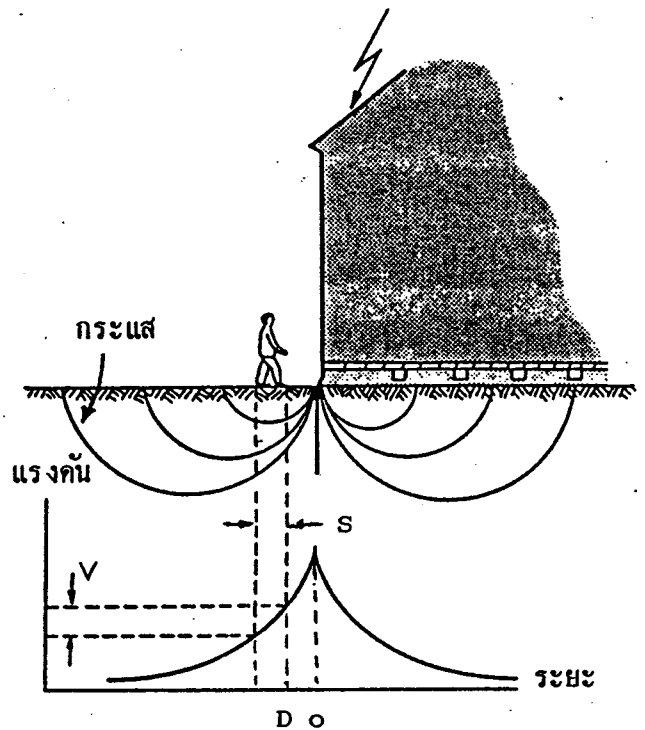
ง. การเกิดแรงดันก้าว (step voltage) การเกิดฟ้าผ่าลงสู่ดิน จะมีการไหลของกระแสลงสู่ดิน การกระจายของกระแสในดินทำให้มีความต่างศักย์ภายในดินและผิวดินรอบ ๆ ตำแหน่งที่เกิดฟ้าผ่า ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.6 (ก) และ (ข) แรงดันระหว่างเท้าหน้าและหลังจะมีความต่างศักย์เกิดขึ้น เรียกว่าแรงดันก้าว V [49]

$$V = I_0 \frac{\rho}{2\pi} \frac{s}{D(d+S)} \quad (6.1)$$

- l₀ เป็นกระแสฟ้าผ่า หน่วย แอมแปร์
- ρ เป็นสภาพต้านทานของดิน หน่วย โอห์มเมตร
- D เป็นระยะห่างจากตำแหน่งฟ้าผ่าไปยังเท้าหน้าที่ใกล้ตำแหน่งฟ้าผ่า หน่วย เมตร
- S เป็นระยะระหว่างเท้าหน้าและหลัง หน่วย เมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.6 แรงดันก้าว (step voltage) และการกระจายของกระแสในดิน

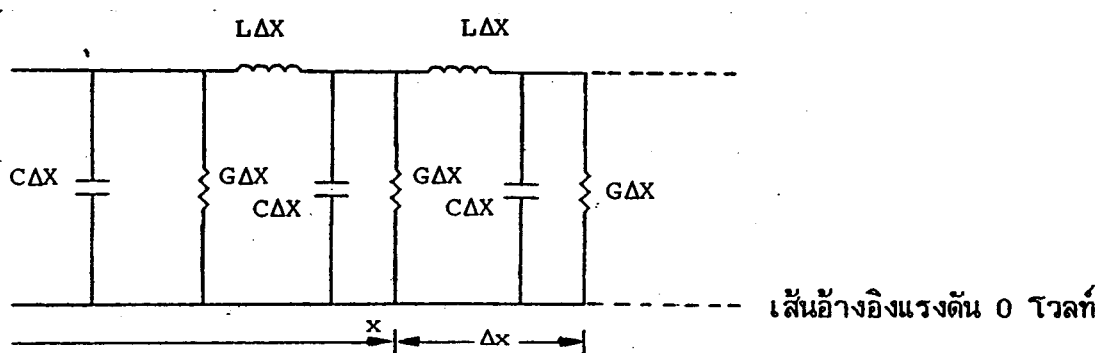
แรงดันก้าว อาจทำให้เกิดกระแสไหลผ่านขาทั้งสองข้างและส่วนอื่น ๆ ของร่างกาย ถ้าคนยืนให้เท้าอยู่ชิดกันก็จะมีแรงดันก้าวต่ำลง และไม่เป็นอันตราย

6.4 รากสายดิน (EARTH ELECTRODE)

รากสายดินเป็นโลหะเปลือยที่ฝังหรือตกลงไปในดินลึกเพื่อทำให้การถ่ายเทประจุของกระแสไฟฟ้าลงสู่ดินเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพความต้านทานของรากสายดินเป็นพารามิเตอร์ ที่เป็นอัตราส่วนของความต่างศักย์ระหว่างตำแหน่งอิเล็กโทรดและตำแหน่งห่างออกไปตามพื้นดินต่อกระแสไฟฟ้าผ่านความต้านทานรากสายดินจึงเป็นความต้านทานของดินในบริเวณโดยรอบอิเล็กโทรดมิใช่ของอิเล็กโทรดเท่านั้น วงจรรากสายดินใช้งานใน 2 ลักษณะ ลักษณะแรกเพื่อความปลอดภัย รากสายดินจึงต้องมีแรงดันใกล้หรือเป็นศูนย์ อีกลักษณะรากสายดินมีไว้เพื่อสร้างแรงดันอ้างอิงโดยอาจไม่จำเป็นต้องเป็นศูนย์

6.4.1 วงจรสมมูลของรากสายดินในกรณีของฟ้าผ่า

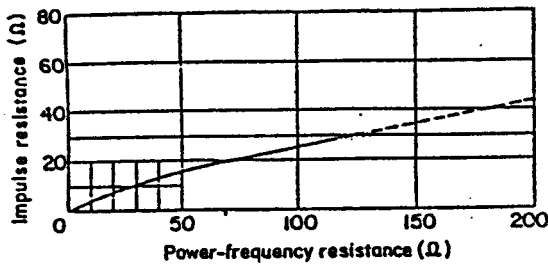
รากสายดินที่ใช้เพื่อความปลอดภัยเช่นให้กระแสฟ้าผ่าไหลลงดินมีลักษณะสมบัติแตกต่างจากที่นำไปใช้กับการให้กระแสรั่วที่เป็นกระแสสลับ รากสายดินที่เริ่มมีกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าไหลผ่าน จะมีลักษณะคล้ายกับเป็นวงจรของตัวนำไฟฟ้าที่มีค่าความนำของดินที่อยู่รอบ ๆ รากสายดินต่อกับค่าความเหนี่ยวนำของรากสายดิน และมีค่าความจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดกับระนาบอ้างอิงที่มีแรงดัน 0 โวลต์ จึงแสดงด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 6.7 ซึ่งคล้ายวงจรสมมูลสายส่ง แต่ความนำของดิน ($G\Delta x$) มีค่าสูงและความต้านทานของแท่งอิเล็กโทรดถือว่าน้อยตัดทิ้งได้



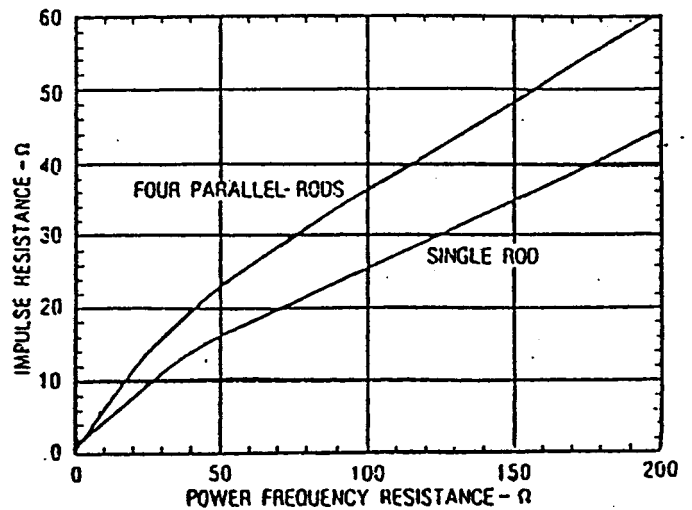
รูปที่ 6.7 วงจรสมมูลของรากสายดิน L,C,G เป็นค่าต่อหน่วยความยาว

ถ้าสภาพต้านทาน (ρ_e) ของดินไม่เกิน 5×10^3 โอห์มเมตร แขนง $C\Delta X$ อาจตัดทิ้งได้ ในช่วงต้นคลื่นของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า แท่งอิเล็กโทรดจะมีผลของความเหนี่ยวนำ $L\Delta X$ มาก ทำให้ค่าความต้านทานของรากสายดินสูงขึ้น และ ค่าอิมพีแดนซ์เสิร์จของรากสายดินมีค่าโดยทั่วไปประมาณ 150 โอห์ม และ ความเร็วของคลื่นเสิร์จประมาณ $1/3$ เท่าของความเร็วแสง ค่าทั้งสองนี้เปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ ถ้าแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามีขนาดสูง อาจทำให้

รอบๆ แท่งอิเล็กโทรด ทำให้เกิดโคโรนาโดยรอบแท่งและมีลักษณะช่วยนำไฟฟ้ามากขึ้นเป็นผลให้ความต้านทานของรากสายดินลดลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.8 โดยเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานของรากสายดินในกรณีความถี่กำลัง



(ก) ของ Diesendorf [42]



(ข) ของ Darveniza [62]

รูปที่ 6.8 ตัวอย่างความต้านทานอิมพัลส์ของรากสายดินเปรียบเทียบกับความต้านทานที่ความถี่กำลัง

6.4.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ความต้านทานของรากสายดิน

ค่าความต้านทานของรากสายดิน ที่นำมาพิจารณาเป็นตัวอย่างการวิเคราะห์มีลักษณะดังในรูปที่ 6.9 โดยสมมติให้ฐานของโครงอุปกรณ์เป็นรูปคลื่นทรงกลม มีรัศมีเท่ากับ r_0 ความต้านทานของรากสายดินที่ระยะรัศมี r ของครึ่งทรงกลมในบริเวณ dr เท่ากับ dR_e

$$dR_e = \rho_e \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (6.2)$$

ρ_e เป็นสภาพต้านทานของดินดิ่งในตาราง

R_e เป็นความต้านทานของรากสายดิน

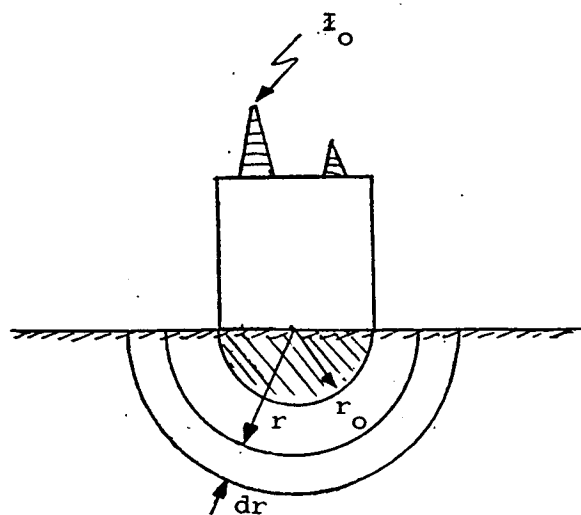
$$\begin{aligned} R_e &= \int dR_e \\ &= \int_{r_0} \frac{\rho_s dr}{2\pi r^2} \quad (6.3) \\ &= \frac{\rho_e}{2\pi r_0} \end{aligned}$$

$$R_e(r) = \int \frac{\rho_e}{r^2 \pi r^2} dr = \frac{\rho_e}{2\pi r} \quad (6.4)$$

ถ้าคิดความต้านทานของรากสายดินจากระยะ r ใด ๆ ไปถึงอนันต์ เท่ากับ $R(r)$
 ถ้าให้กระแสฟ้าผ่า I_0 ไหลผ่านรากสายดินไปถึงระยะ r ใด ๆ แรงดันตก V_r รัศมี r เทียบกับศูนย์ที่อนันต์
 จึงเป็นดังนี้

$$V_r = \frac{I_0 \rho_e}{2\pi r} \quad (6.5)$$

สมการที่ (6.5) แสดงให้เห็นถึงแรงดันของรากสายดินเป็นสัดส่วนกลับกับระยะรัศมี ซึ่ง
 สามารถใช้คำนวณหาแรงดันก้าว ดังในรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 รากสายดินรูปครึ่งทรงกลมรัศมี r_0

R_e มีค่าขึ้นอยู่กับ ρ_e ลักษณะของอิเล็กโทรด และความถี่ของกระแสไฟฟ้า ρ_e มีค่าแตกต่างกันไป ตามลักษณะของดิน และความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล มีผลให้ ρ_e อาจเปลี่ยนแปลงได้ถึง 5 เท่า ค่าทั่วไปของ ρ_e รวบรวมไว้ในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ความต้านทานของดิน ρ_e

ชนิดของพื้นดิน	$\rho_e(\Omega\text{-m})$
น้ำทะเล	0.2
น้ำจืดตามธรรมชาติ	10 - 50
ดินแฉะ	30 - 50
ดินเหนียวเปียก	50
ดินชั้นเล็กน้อย	100
ดินปนทรายชั้น	150
ทรายชั้น	200
ดินกรวดชั้น	500
ดินปนกรวดทรายแห้ง	1,000
หินภูเขา	1,000 ถึง 10,000
ปูนซีเมนต์ผสมทรายชั้น	50 - 200
ปูนซีเมนต์ผสมหินกรวดชั้น	200 - 400

ตัวอย่างที่ 6.1 กระแสไฟฟ้า (I_0) 1 kA ไหลผ่านรากสายดินที่สมมุติให้มีลักษณะเป็นรูปครึ่งทรงกลมรัศมี (r_0) เท่ากับ 1 เมตร ให้สภาพต้านทาน (ρ_e) เท่ากับ 100 โอห์มเมตร จงหาแรงดันที่รากสายดิน และที่ระยะห่างออกไปอีก 1 เมตร จงหาแรงดันก้ำวในระยะ 1 เมตร จากรากสายดิน

จากสมการที่ (6.5)

$$r = 1 \text{ เมตร (ที่รากสายดิน)} \quad R_e = \frac{100}{2\pi \times 1} = 15.92 \ \Omega$$

$$r = 2 \text{ เมตร (ที่ระยะห่างอีก 1 เมตร)} \quad R_e = 7.96 \ \Omega$$

$$\text{แรงดันก้ำว} = V(r=1) - V(r=2)$$

$$= I_0[15.92 - 7.96]$$

$$= 7.96 \text{ kV}$$

6.4.3 รากสายดินแบบต่าง ๆ

ในทางปฏิบัติรากสายดินควรมีค่า R_e ต่ำให้มากที่สุดเท่าที่จะกระทำได้ วัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรด อาจเป็น แท่ง แผ่น หรือสายยาวฝังดิน และด้วยโลหะ ทองแดง เหล็กอาบทองแดง หรืออาบสังกะสี เหล็ก สแตนเลส แต่อะลูมิเนียมผุกร่อนได้ง่ายและเกิดออกไซด์ จึงไม่เหมาะต่อการใช้งาน อิเล็กโทรดควรฝังอยู่ในดินลึก ลงไปสู่ที่ชื้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งอิเล็กโทรด มีขนาดประมาณ 1 ซม.ขึ้นไป ถึงประมาณ 2.5 ซม. ในปัจจุบันมีผู้ผลิตทำเป็นแฉกเพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสกับผิวดินการวางรากสายดิน จำแนกได้เป็น

ก. แบบคอกลงในแนวคิงด้วยแท่งอิเล็กโทรด

ข. แบบฝังอยู่ในแนวราบใต้ดิน อาจใช้แผ่นอิเล็กโทรดสายตัวนำ วางเป็นแนวเดียว หรือหลายๆ แนว หรือ วางเป็นวงแหวน

ค. แบบฝังด้วยสายตัวนำยาว ที่เรียกว่า counterpoise และ อาจมีการคอกแท่งอิเล็กโทรดในแนวคิง ที่ละช่วง เพื่อช่วยลดผลของการมีอิมพีแดนซ์เสิร์จสูงถึง 150 โอห์ม ในช่วงเริ่มมีเสิร์จ แบบนี้อาจนำมาใช้ในกรณีที่สองวิธีแรกไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น กรณีอยู่บนภูเขาที่มีชั้นหินมาก และอยู่ติดกับทะเล จึงอาจฝังสายดินลงไปสู่ทะเล ซึ่งมีสภาพต้านทานต่ำกว่ามาก

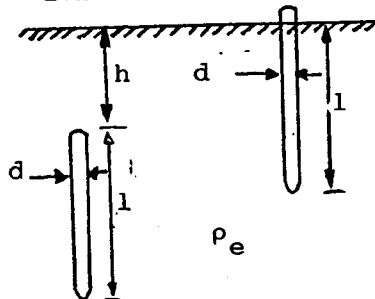
ค่าความต้านทานของรากสายดิน R_e คำนวณได้ในทำนองเดียวกันกับในหัวข้อที่ [58] [59] [60] [61] และ [49] ซึ่งได้รวบรวมขึ้น แต่เฉพาะที่นิยมนำมาใช้ในงานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ดังต่อไปนี้

แบบแท่งฝังดิน เส้นผ่านศูนย์กลาง d เมตร ฝังลึก h เมตร แท่งยาว l เมตร

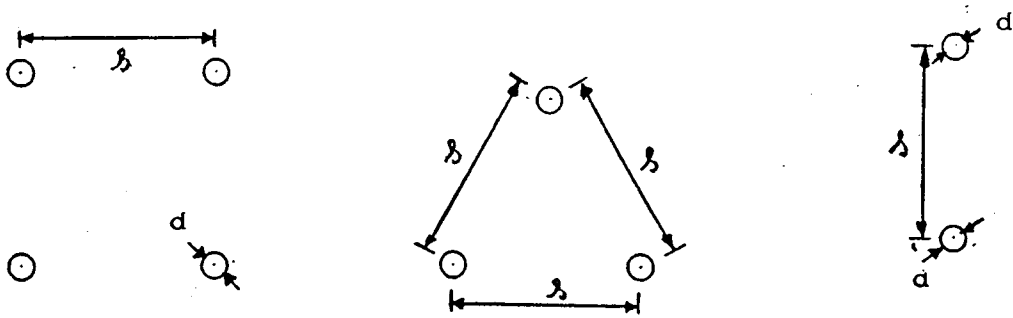
$$\text{แบบ ก. } R_e = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln \frac{4l}{d} \quad (6.6)$$

$$\text{แบบ ก. [49] } R_e = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln \frac{4l}{1.38d} \quad (6.7)$$

$$\text{แบบ ข. } R_e = \frac{\rho_c}{2\pi} \ln \frac{4l}{1.38d} \times \frac{2h+1}{4h+1} \quad (6.8)$$



รูปที่ 6.10 รากสายดินแบบแท่งเดี่ยว



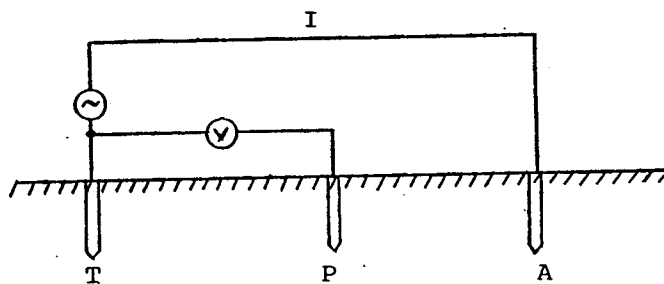
(ก) 2 แท่งขนานกัน (ข) 3 แท่งขนานกัน (ค) 4 แท่งขนานกันที่มีมุมจตุรัส

รูปที่ 6.11 รากสายดินแบบแท่งหลายแท่งขนานกันในแนวตั้ง

6.4.4 การวัดความต้านทานของดิน

นอกจากการวิเคราะห์เพื่อให้ทราบค่าความต้านทานของรากสายดิน การวัดยังเป็นอีกวิธีที่ทำให้ทราบค่าในสภาพที่เป็นจริงในขณะนั้น การวัดมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ การวัดค่าความต้านทานของรากสายดิน และการวัดสภาพต้านทานของดิน (earth resistivity ρ_e)

หลักการวัดความต้านทานของดินและอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการทดสอบ กระทำโดยต่อวงจรดังรูปที่ 6.12 ประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ทดสอบ T อิเล็กทรอนิกส์อ้างอิง P อิเล็กทรอนิกส์ช่วย A และใช้เครื่องมือวัดแรงดัน V และกระแส I

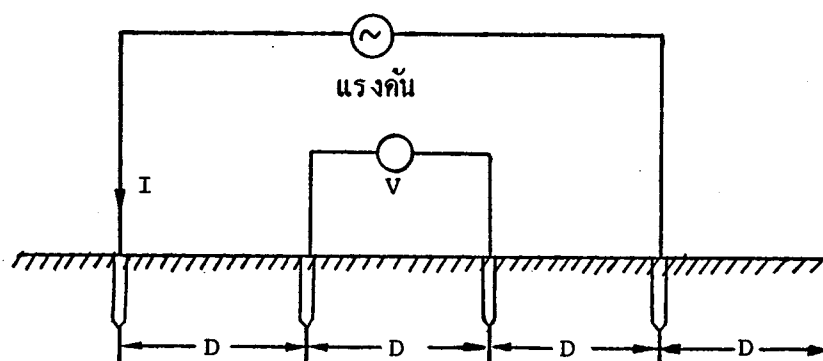


รูปที่ 6.12 การวัดความต้านทานดิน (ρ_e)

กระแสลับ I จะไหลผ่านอิเล็กโทรด T และ A ผ่านดิน อิเล็กโทรดทั้งสองควรวางห่างจากกันมาก ๆ เพื่อให้การกระจายของกระแสไฟฟ้าในดินของแต่ละอิเล็กโทรดมีผลกระทบต่อกัน โดยทั่วไปประมาณไม่ต่ำกว่า 40 เมตร อิเล็กโทรด P ควรวางในแนวต่อระหว่างอิเล็กโทรดที่มีกระแสไหลผ่านทั้งสอง และ อยู่ประมาณกึ่งกลางแนวต่อ ซึ่งเป็นบริเวณที่ไม่มีแรงดัน เนื่องจากไม่มีผลของสนามไฟฟ้าของทั้งสองอิเล็กโทรด ดังนั้นความต้านทานของรากสายดินจึงเป็นอัตราส่วนของ V ต่อ I เครื่องมือที่ใช้วัดอาจเป็นชนิดวงจรบริดจ์สมดุลย์เพื่อให้อ่านค่า R_e ได้โดยตรง

การวัดสภาพต้านทานของดิน (ρ_e) กระทำได้โดยใช้หลักการดังแสดงในรูปที่ 6. โดยมีอิเล็กโทรด 4 แท่ง ปักให้ห่างเท่า ๆ กันเป็นระยะ D เมตร ในแนวเส้นตรง กระแสไหลผ่านอิเล็กโทรดด้านนอกสุดและผ่านดิน อิเล็กโทรด 2 แท่งที่อยู่ข้างในมีความต่างศักย์เป็น V ถ้าสมมุติให้ดินมีสภาพต้านทานอย่างสม่ำเสมอ ความต้านทาน R_e ระหว่างระยะ D ไค ๆ จึงเท่ากับ V/I และเนื่องจากอิเล็กโทรดปักลงเพียงประมาณ 5 % ของระยะ D จึงเป็นลักษณะคล้าย อิเล็กโทรดครึ่งทรงกลมในหัวข้อที่ 6.9 และมีสมการที่ (6.6) เป็นความต้านทาน R_e ระหว่างอิเล็กโทรด 2 แท่ง โดยแท่งหนึ่งเป็นตัวอย่างอิงเนื่องจาก D มีขนาดกว้าง ดังนั้น

$$\rho_e = 2 \pi D (V/I) = 2 \pi D R_e \quad (6.9)$$

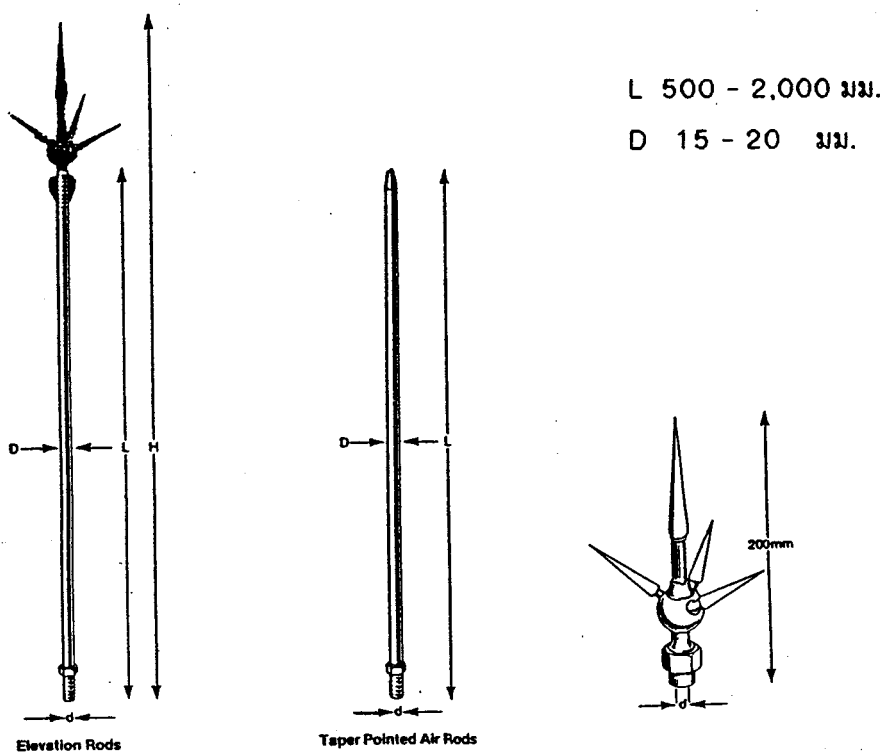


รูปที่ 6.13 การวัดสภาพต้านทานของดิน (ρ_e)

6.4.5 การป้องกันฟ้าผ่าสิ่งก่อสร้าง

ฟ้าผ่าสามารถป้องกันได้ หลักการป้องกันคือกรณีเกิดฟ้าผ่าขึ้นจะต้องนำกระแสไฟฟ้าลงดินอย่างมีประสิทธิภาพ โดยคำนึงถึงปริมาณกระแส อัตราการไหล (di/dt) จุดฟ้าผ่าที่แข็งแรง ผลของแรงดันเหนี่ยวนำไปยังสิ่งข้างเคียง และการกระจายกระแสลงสู่รากสายดิน กระแสฟ้าผ่าอาจมีขนาดสูงถึง 100 kA การป้องกันฟ้าผ่าจึงหมายถึงการป้องกันอาคารและโครงสร้างภายนอก และการป้องกันอุปกรณ์ที่เป็นโลหะอยู่ภายในและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่อาจเกิดมีผลกระทบเนื่องจากแรงดันเกิน ส่วนประกอบหลักของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่เรียกว่าระบบ ของฟาราเดย์ มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ

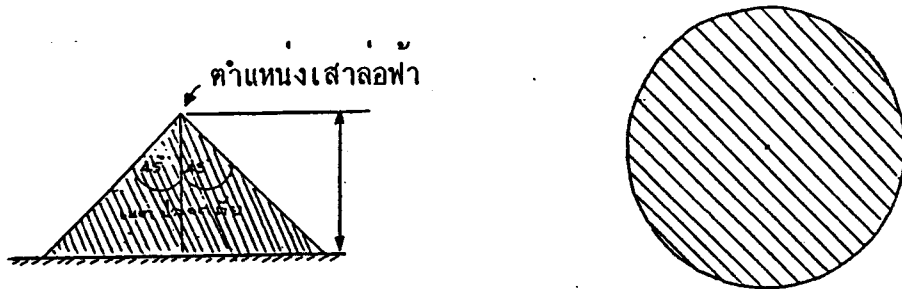
- ก. เสาหรือสายล่อฟ้า (air terminal) ดังตัวอย่างในรูปที่ 6.14
- ข. สายนำลงดิน (down conductor) เป็นสายทองขนาดต่าง ๆ
- ค. รากสายดิน (earth electrode) เป็นเสานขนาดต่าง ๆ ทำด้วยทองแดง ทองแดงชุบเหล็ก อาบสังกะสี หรือเหล็กสแตนเลส บางกรณีอาจเป็นตัวนำทองแดงที่ใช้ทำตาข่ายฝังใต้ดิน และเชื่อมต่อกับโครงเหล็กฐานราก



รูปที่ 6.14 เสาล่อฟ้า

การออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่ามีหลักการที่เริ่มจากการคำนวณค่า ระยะเผชิญ (striking distance, r_s) ในทางปฏิบัติได้จัดแบ่งการออกแบบเป็น 2 แบบ คือ

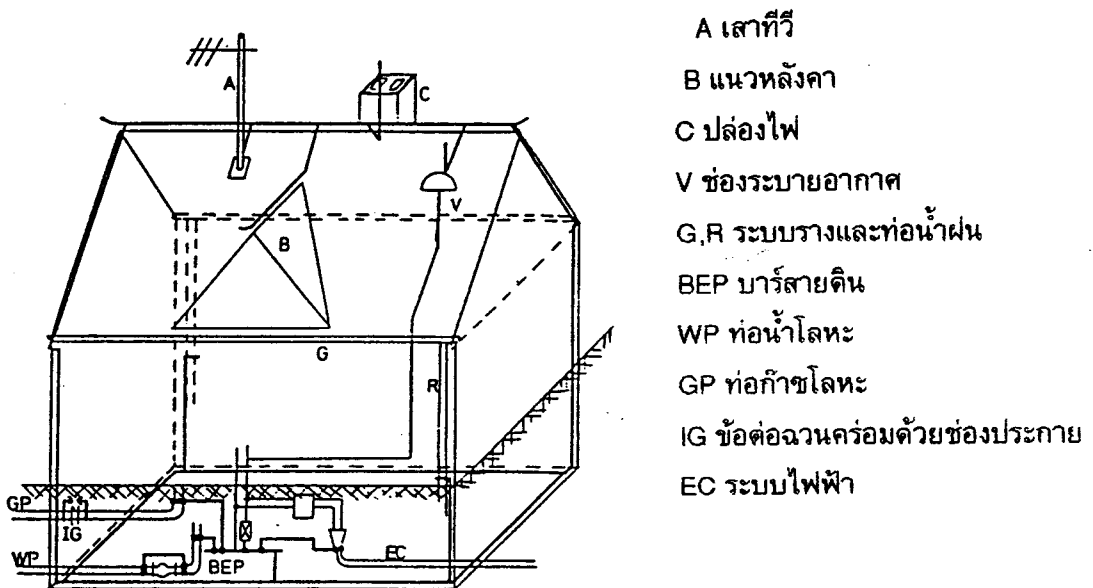
แบบที่ 1 สำหรับสิ่งก่อสร้างมีความสูงต่ำกว่า 20 เมตร ใช้หลักการที่กำหนดให้อยู่ในเขตปลอดภัยจากฟ้าผ่า (zone of protection) ซึ่งมีลักษณะเป็นกรวยคว่ำ ดังแสดงในรูปที่ 6.15 นำมาใช้ได้กรณีเส้นรอบวงประมาณ 40 เมตร



$h < 20$ เมตร

ภาพมองจากด้านบน

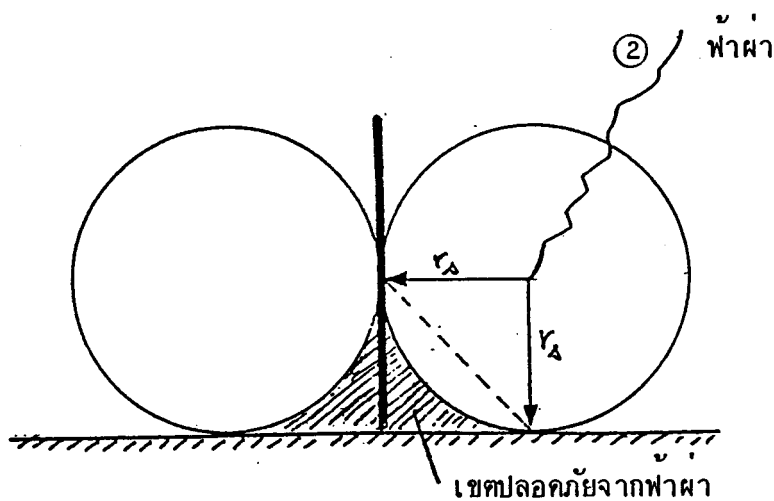
(ก) เขตปลอดภัยจากฟ้าผ่าของสิ่งก่อสร้างความสูงน้อยกว่า 20 เมตร



(ข) การติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่า [49]

รูปที่ 6.15 ระบบป้องกันฟ้าผ่าอาคารสูงไม่เกิน 20 เมตร

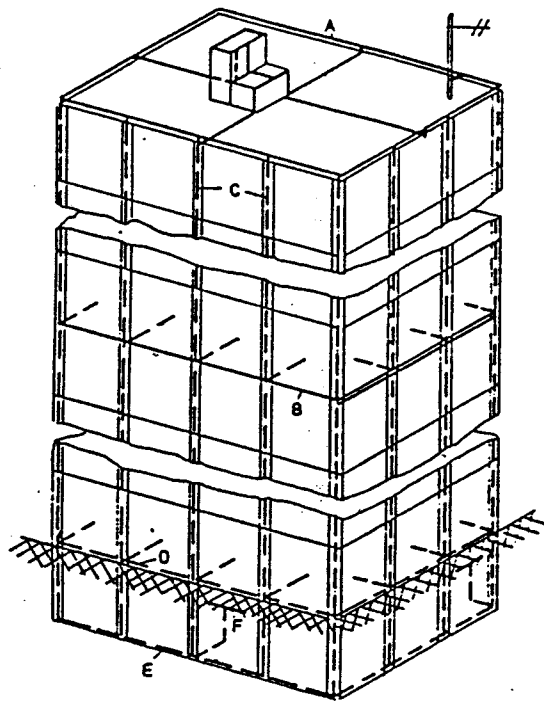
แบบที่ 2 สำหรับสิ่งก่อสร้างที่มีความสูงเกิน 20 เมตร เขตปลอดภัยจากฟ้าผ่า มีลักษณะละเอียดยิ่งขึ้น และแตกต่างไปจากแบบที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 6.16 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอาจเกิดฟ้าผ่าที่ด้านข้างของเสาสูง ๆ ได้



รูปที่ 6.16 ตัวอย่างแสดงฟ้าผ่าด้านข้างเสาสูง

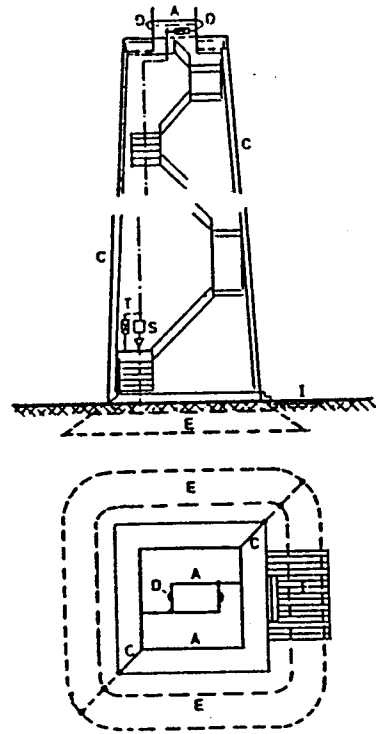
การป้องกันฟ้าผ่าจึงต้องพิจารณาการเกิดฟ้าผ่าด้านข้างและด้านบนด้วย โดยมีสายล่อฟ้ายื่นออกมาที่ด้านข้างของอาคารด้วย ดังแสดงในรูปที่ 6.17 ระยะเผช็ญ r_s มีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฟ้าผ่าจึงต้องเลือกขนาดกระแสฟ้าผ่าที่มีโอกาสเกิดไม่ต่ำกว่า 50 % ยกตัวอย่างเช่น ตามรูปที่ 6.5 กราฟเส้นที่ 1 กระแสฟ้าผ่าขนาด 20 kV หรือสูงกว่ามีโอกาสเกิดได้ 40 % ดังนั้น ขนาดกระแสฟ้าผ่าที่มีขนาดไม่เกิน 20 kA จึงมีโอกาสเกิด 60 % และมีระยะเผช็ญประมาณ 70 เมตร ถ้าต้องการใช้ระยะฟ้าผ่าที่มีโอกาสเกิดได้ 90% คือที่กระแสฟ้าผ่าไม่เกิน 5 kA ระยะฟ้าผ่าประมาณ 28 เมตร เป็นต้น

โดยทั่วไป ระบบไฟฟ้าที่อยู่บนอาคาร ควรอยู่ห่างจากเสาล่อฟ้า ไม่น้อยกว่า 0.5 เมตร โครงเหล็กของอาคารสามารถใช้เป็นสายนำลงดินช่วยกระจายการไหลของกระแสฟ้าผ่าได้ กรณีสิ่งก่อสร้างมีวัสดุติดไฟได้ง่าย เช่น ถังน้ำมัน คลังอาวุธ ต้องใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่าแยกออกจากสิ่งก่อสร้างเหล่านั้น เช่น ใช้สายดินซึ่งเหนือสิ่งก่อสร้างหรือใช้เสาล่อฟ้าที่สูงกว่าสิ่งก่อสร้าง และควรห่างออกไป ไม่น้อยกว่า 2 เมตร เพื่อป้องกัน side-flash ที่อาจเกิดที่วัตถุนำใกล้เคียง



(ก) อาคารสูง

- A,B เสาและสายล่อฟ้า
- C สายนำลงดิน
- D ระดับพื้นดิน
- E รากสายดินแบบตาข่าย
- F บัสบาร์ทองแดงของสายดิน

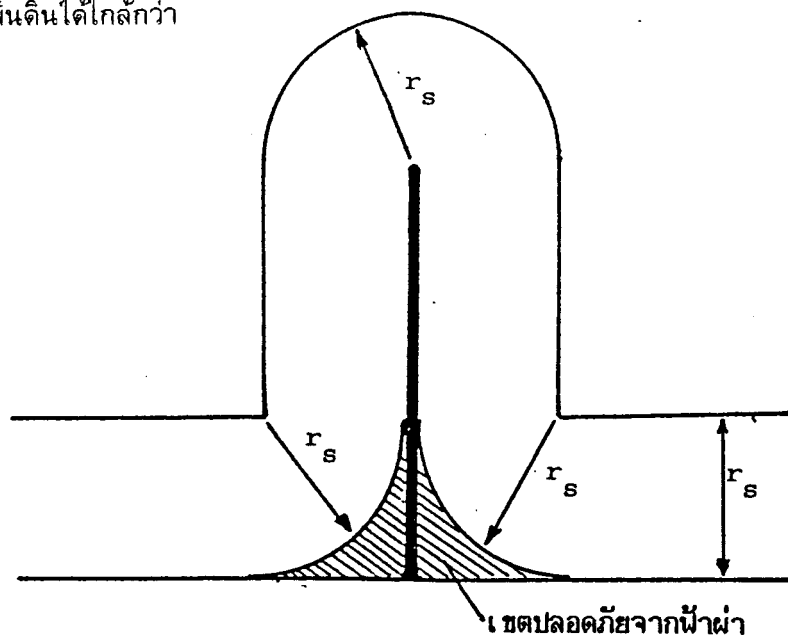


(ข) หอสูง

- A เสาล่อฟ้า
- C สายนำลงดิน ทุกระยะ 10-15 เมตร
- D ไฟกระพริบของอาคาร
- E รากสายดินแบบตาข่าย
- I พื้นฉนวนป้องกันแรงดันก้าว
- S ตู้ไฟฟ้า T กับดักฟ้าผ่า

รูปที่ 6.16 ตัวอย่างการติดตั้งระบบป้องกันฟ้าผ่าสิ่งก่อสร้างสูง

สิ่งก่อสร้างที่มีความสูงมีโอกาสเกิดฟ้าผ่าได้มากขึ้น ฟ้าผ่ามีโอกาสเกิดขึ้นได้ นับตั้งแต่ระดับ r_s ขึ้นไป โดยอาจเกิดที่เสาหรือสายล่อฟ้าที่ด้านข้างหรือด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 6.16 ระยะที่ต่ำกว่า r_s ฟ้าผ่ามีระยะไปสูพื้นดินได้ไกลกว่า



รูปที่ 6.16 ลักษณะฟ้าผ่าสิ่งก่อสร้างที่มีความสูง

ข้อกำหนดในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า ได้มีการกำหนดเป็นมาตรฐาน เช่น BSI CP326:1965 ซึ่งเป็นมาตรฐานของ British Standard Code of Practice ในเรื่อง The Protection of Structures against Lightning หรือ มาตรฐาน Lightning Protection Code 1980, NFPA78 สหรัฐอเมริกา เป็นต้น

ข้อกำหนดทั่วไปในการติดตั้งเสาและสายล่อฟ้าขึ้นอยู่กับลักษณะโครงหลังคาของ อาคารหรือสิ่งก่อสร้าง ถ้าเป็นยอดแหลมควรใช้เสาล่อฟ้าตั้งตรงตั้งเป็นระยะห่างกันประมาณ 18 เมตร บางประเทศเลือกใช้ระหว่าง 15 ถึง 20 เมตร และอุปกรณ์ที่เป็นโลหะทุกชนิด เช่น เสาทีวี ต้องต่อเชื่อมเข้ากับเสา ล่อฟ้าด้วย ดังในรูปที่ 6.14 และ 6.15 ถ้าหลังคาเป็นพื้นราบ สามารถติดตั้งสายล่อฟ้าในแนวนอนได้ โดยวางไว้ทุก ๆ ระยะห่างกัน 18 เมตร โดยอาจจัดทำในลักษณะของตาข่าย

ข้อกำหนดของจำนวนสายนำลงดิน ขึ้นอยู่กับพื้นที่บนหลังคาของอาคารหรือสิ่งก่อสร้าง และความสูงของอาคาร โดยกำหนดไว้ดังนี้

ถ้าอาคารสูงน้อยกว่า 30 เมตร และมีพื้นที่อาคารไม่เกิน 100 ตารางเมตร ใช้สายนำลงดิน 1 เส้น

ข. ถ้าพื้นที่เกิน 100 ตารางเมตร และอาคารสูงน้อยกว่า 30 เมตร ให้เลือกข้อใดข้อหนึ่งที่มีจำนวนสายนำลงดินน้อยกว่า

ข.1 ถ้าเนื้อที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 300 ตารางเมตร ให้เพิ่มอีก 1 สายจากเดิม

ข.2 ถ้าวัดโดยรอบได้ทุก ๆ 30 เมตร ให้มีสายนำลงดิน 1 สาย

ค. ถ้าอาคารสูงกว่า 30 เมตร ให้มีจำนวนสายนำลงดินตามพื้นที่ของอาคารดังในตาราง 6.3

ตารางที่ 6.3 จำนวนสายดินตามพื้นที่อาคาร

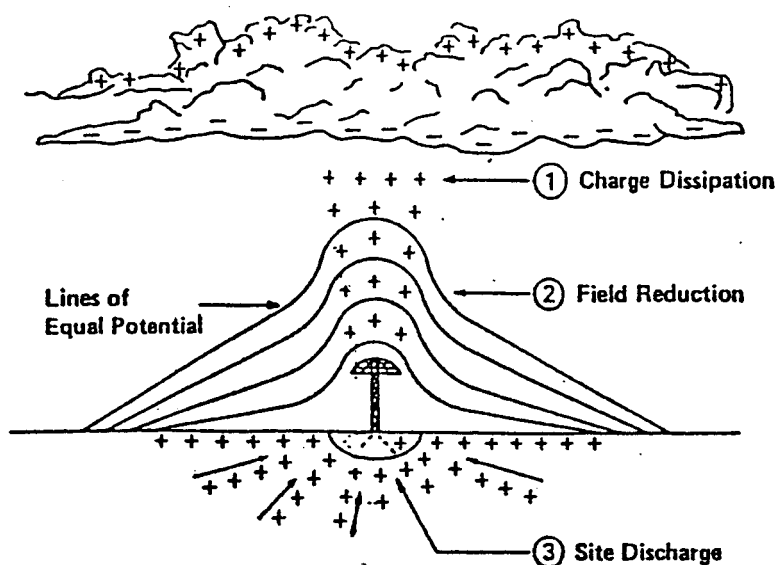
พื้นที่อาคารสูงกว่า 30 เมตร (ตารางเมตร)	จำนวนสายนำลงดิน
100 - 400	2
400 - 700	3
700 - 1000	4
1000 - 1300	5
1300 - 1600	6
1600 - 1900	7 เป็นต้น

สายนำลงดิน ต้องต่อถึงกันที่ทุก ๆ ระยะความสูง 20 เมตร เพื่อลดผลของการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำและ ควรแยกออกจากส่วนของระบบท่อแก๊สท่อไฟฟ้าอื่น ๆ ขนาดของสายอาจ เป็นทองแดงแบบแบนหรือแบบกลม เช่น 15 มม. × 4 มม. หรือประมาณ 60 ตารางมิลลิเมตร ถ้าสมมุติให้สายนำลงดินมีความเหนี่ยวนำประมาณ $1.2 \mu\text{H/m}$ และมีความยาว 30 เมตร เท่าความสูงของอาคาร มีกระแสฟ้าผ่าที่มีขนาด di/dt ประมาณ $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$ ไหลผ่านแรงดันคร่อมสายตัวนำจึงมีค่าประมาณ $1.2 \times 30 \times 100$ เท่ากับ 3600 kV แรงดันเหนี่ยวนำนี้มีผลต่อการเกิด side flash ได้ จึงควรต่อโลหะของโครงสร้างต่าง ๆ เพื่อให้เกิดสายนำลงดินขนานกันมากขึ้น และลดผลของความเหนี่ยวนำลงไปได้

รากสายดินมีข้อกำหนดให้มีค่าต่ำ ๆ โดยมีลักษณะแบบที่เหมาะสมในบางกรณีอาจไม่สามารถทำให้ความต้านทานมีค่าต่ำลงได้เนื่องจากมีหินหรือดินแข็ง จึงอาจต้องใช้การเติมเกลือและน้ำเพื่อช่วยลดสภาพต้านทานให้ต่ำลง และอาจใช้การลากสายไปยังบ่อน้ำไกลออกไปช่วยประกอบด้วย

นอกจากการป้องกันอาคารและสิ่งก่อสร้างด้วยวิธีการใช้เสาหล่อฟ้าแล้วยังมีผู้คิดค้นและได้ใช้หลักการกระจายสนามไฟฟ้ามิให้มีความเครียดสูงจึงไม่อาจเกิดสตรีมเมอร์จากพื้นดินขึ้นสู่ ชั้นนำฟ้าผ่า (step leader) ในระยะฟ้าผ่า r_s [63] ระบบที่ป้องกันมิให้เกิดฟ้าผ่านี้ เรียกว่า Disipation Array System ซึ่งประกอบด้วยตัวปล่อยประจุ ซึ่งมักใช้แท่งโลหะปลายแหลม จำนวนมาก และสายต่อลงดินที่ช่วยจ่ายประจุไปยังตัวปล่อยประจุ ซึ่งเรียกว่า Ground Current Collector (GCC) ดังแสดงในรูปที่ 6.17

Dissipation Array Principle

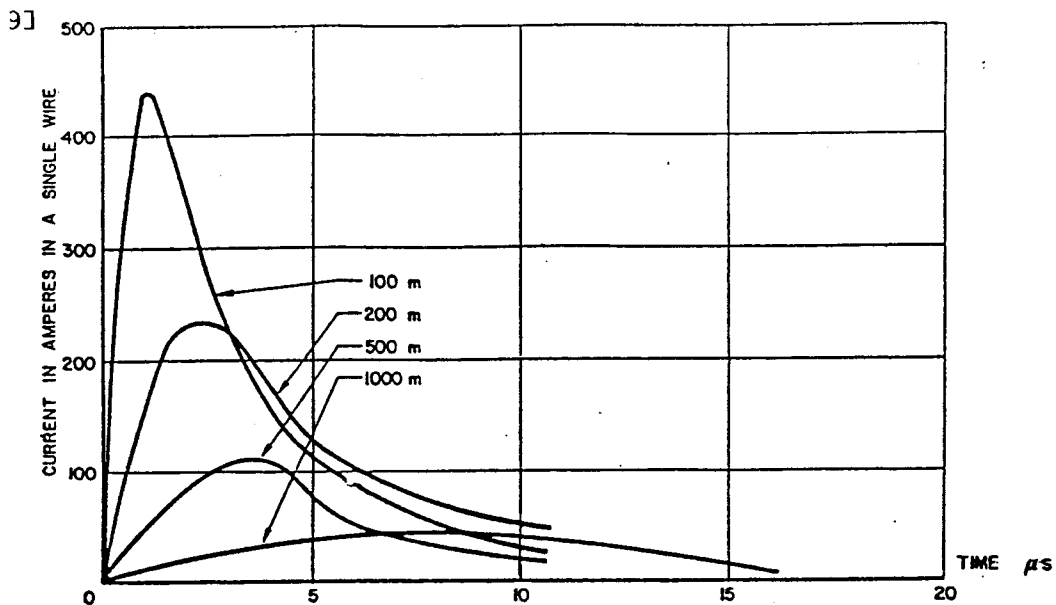


รูปที่ 6.17 ระบบป้องกันฟ้าผ่าแบบไม่ให้เกิดฟ้าผ่าในเขตป้องกัน

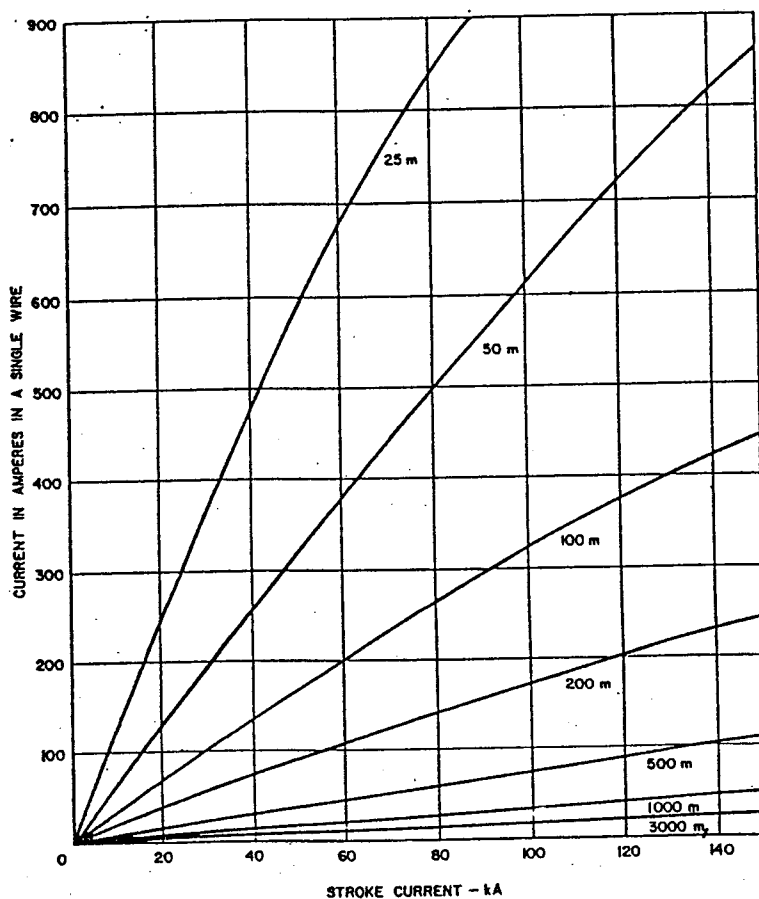
6.4.7 การป้องกันฟ้าผ่าของระบบโทรคมนาคม

คลื่นสัญญาณและอุปกรณ์ในการสื่อสารทั้งในอากาศและฝังใต้ดินอาจได้รับความเสียหายจากฟ้าผ่า ซึ่งอาจเนื่องจากฟ้าผ่าโดยตรง แรงดันเหนี่ยวนำในอากาศ กระแสฟ้าผ่าที่ไหลในดินทำให้เกิดแรงดันเกินคร่อมอุปกรณ์หรือเคเบิลฝังดินหรือจากการเกิดคลื่นรบกวน ผลกระทบของฟ้าผ่ามีมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณฟ้าผ่าลงสู่ดินต่อหน่วยพื้นที่ สภาพนำไฟฟ้าของดินและลักษณะของระบบสื่อสาร

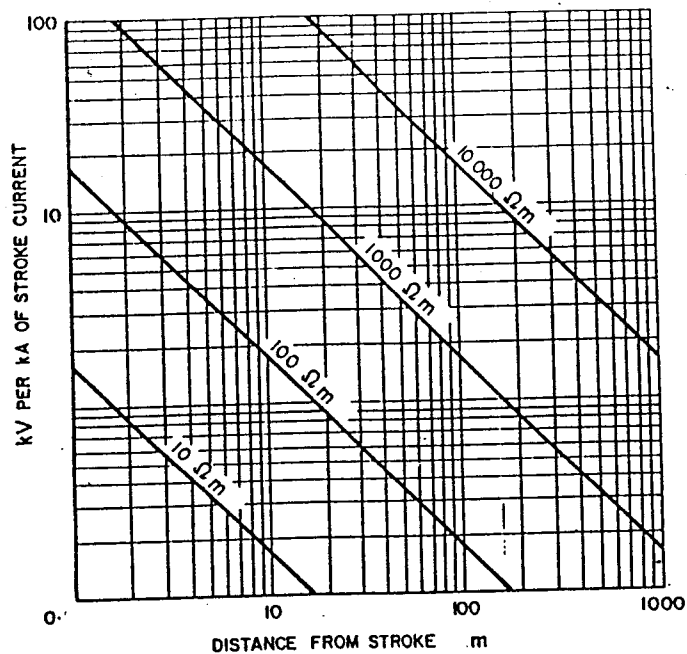
ฟ้าผ่าลงสู่ดินที่ระยะห่างจากสายโทรศัพท์ ประมาณ 100 เมตร อาจทำให้เกิดแรงดันลิว์จที่สายโทรศัพท์ 1 kV และเกิดกระแสลิว์จได้สูงถึง 35 A จึงทำความเสียหายต่อสายได้เช่นเดียวกับฟ้าผ่าลงที่สายโดยตรงฟ้าผ่าลงสู่ดินทำให้เกิดลิว์จบนสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปยังปลายสายรูปคลื่นของกระแสลิว์จบนสายโทรศัพท์ มีลักษณะดังในรูปที่ 6.18 ที่ระยะห่างจากจุดฟ้าผ่า 100 ถึง 1000 เมตร และรูปที่ 6.15 เป็นขนาดของกระแสลิว์จบนสายโทรศัพท์ที่ขนาดกระแสฟ้าผ่าต่าง ๆ สายโทรศัพท์แต่ละเส้นมีอิมพีแดนซ์ลิว์จประมาณ 500 โอห์ม และมีค่าน้อยลงในกรณีที่มีมากกว่า 1 เส้น โดยทั่วไปสายโทรศัพท์ใช้ดินเป็นสายอีกเส้นหนึ่งของวงจรโดยการต่อลงดินที่ปลายสายทั้งสองด้าน ดังนั้นฟ้าผ่าลงสู่ดินทำให้เกิดความต่างศักย์ในดิน ดังแสดงในรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 กระแสเหนี่ยวนำบนสายโทรศัพท์ เนื่องจากกระแสฟ้าผ่า 5/65 μ s ขนาด 150 kA ที่ระยะต่าง ๆ



รูปที่ 6.19 กระแสลึ่ร้จบนสายโทรศัพท์เส้นเดี่ยวเนื่องจากกระแสฟ้าผ่าที่ระยะต่าง ๆ



รูปที่ 6.20 การกระจายของแรงดันในดินที่มีสภาพต้านทานต่าง ๆ

สายโทรศัพท์ที่พาดเสาส่วนมากเป็นเสาที่มีความสูงไม่เกิน 10 เมตร การเกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่เสาและสาย จึงมีโอกาสต่ำ แต่วิธีป้องกันที่นิยมใช้คือการต่อสายดินจากยอดเสาลงสู่ดินทุก ๆ เสา เพื่อช่วยให้กระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ดินอย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้แรงดันเสิร์จที่เสาลดลง และแรงดันเสิร์จที่เคลื่อนที่ไปยังปลายสายมีขนาดที่ป้องกันมิให้เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ที่ต่อกับสายได้ กรณีฟ้าผ่าลงสู่ดินในบริเวณใกล้สาย ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนสายที่เป็นอันตรายต่อฉนวนของอุปกรณ์ได้เช่นกัน การป้องกันจึงใช้กับดักเสิร์จ (surge arrester) ติดตั้งที่ทุก ๆ ช่วงระยะสาย เพื่อให้กระแสเสิร์จไหลลงสู่ดิน และติดตั้งที่ปลายสายที่มีอุปกรณ์ต่อพ่วงอยู่ด้วย สำหรับระบบรับสัญญาณสื่อสารชนิดต่าง ๆ ที่อยู่บนเสาโทรคมนาคมหรือบนอาคารสูง สามารถป้องกันฟ้าผ่าได้โดยต่อส่วนที่เป็นโลหะเข้ากับระบบป้องกันฟ้าผ่าของเสา หรืออาคารสูงนั้น และ ภายในระบบสื่อสารจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จด้วย ตัวอย่างอุปกรณ์เหล่านี้ได้แก่ อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน เช่น varister

เคเบิลฝังดิน อาจได้รับความเสียหายจากฟ้าผ่าลงสู่ดินได้ เนื่องจากขณะที่กระแสฟ้าผ่าไหลกระจายลงสู่ดิน จะเกิดแรงดันก้าวขึ้นและทำให้เกิดแรงดันเสิร์จระหว่างดินและสายตัวนำ ในกรณีที่เคเบิลมีชีลด์โลหะหุ้ม มีผลช่วยเป็นตัวนำให้กระแสไหลที่โลหะหุ้มไปยังจุดที่ไกลจากฟ้าผ่าออกไปในดิน ทำให้ฉนวนของสายไม่ชำรุดเนื่องจากแรงดันเสิร์จ แต่ในกรณีที่เคเบิลไม่มีโลหะชีลด์เช่นเคเบิลพลาสติกก็มีวิธีป้องกันแรงดันเสิร์จให้ลดลงได้ถึง 2 เท่า โดยใช้สายชีลด์เป็นสายทองแดงเปลือยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มม. ฝังอยู่เหนือเคเบิล 30 ซม. มากกว่า 1 สาย และนิยมใช้ 2 สายวางคู่กัน

6.4.8 แรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบไฟฟ้ากำลัง

แรงดันเกินฟ้าผ่าส่วนมากเกิดขึ้นที่ระบบสายส่งและสายจ่าย โดยอาจเกิดจากฟ้าผ่า ลงบนสายโดยตรง หรือผ่าลงในบริเวณใกล้เคียงแล้วทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนสายเฟส หรือ การเกิดสนามไฟฟ้าสถิตย์บนสายเนื่องจากมีประจุไฟฟ้าในเมฆที่อยู่เหนือสายและเมื่อฟ้าผ่าภายในก้อนเมฆทำให้เกิดการถ่ายเทประจุในเมฆบริเวณนั้นหมดไปก็จะทำให้สนามไฟฟ้าสถิตย์บนสายหายไปอย่างฉับพลันและเกิดการเคลื่อนที่ของประจุไปบนสายทั้งสองปลายจากตำแหน่งนั้น จึงเกิดเป็นแรงดันเสิร์จที่ทำให้เกิดแรงดันเกินทุก ๆ จุดบนสายที่เสิร์จผ่านไปถึง ทั้งสามอย่างนี้ฟ้าผ่า ลงที่สายเฟสโดยตรง ในกรณีที่รุนแรงจะเกิดผลกระทบต่อระบบมากที่สุดและอาจมีอุปกรณ์ชำรุดเสียหายได้แรงดันเหนี่ยวนำอาจมีผลกระทบได้มากเช่นกันโดยเฉพาะในระบบสายจ่ายที่มีระดับของฉนวนต่ำกว่าระบบสายส่ง สำหรับอย่างทั้งสามมีผลกระทบน้อยกว่า เนื่องจากมีแรงดันเกิดต่ำกว่า

ฟ้าผ่าลงบนสายเฟส ดังในรูปที่ 6.21 (ก) ทำให้เกิดแรงดันเสิร์จ V ที่ตำแหน่ง ฟ้าผ่า ถ้ากระแสฟ้าผ่า I_0 มีอิมพีแดนซ์เสิร์จของล่ำฟ้าผ่า Z_0 สายเฟสมีอิมพีแดนซ์เสิร์จเท่ากับ Z_S กระแสฟ้าผ่าถูกแบ่งออกไปด้านละเท่า ๆ กัน

$$\text{จากรูปที่ 6.21 (ก) ถ้าให้ } Z_0 \gg Z_S \quad V = I_0 \frac{Z_S}{2} \quad (6.10)$$

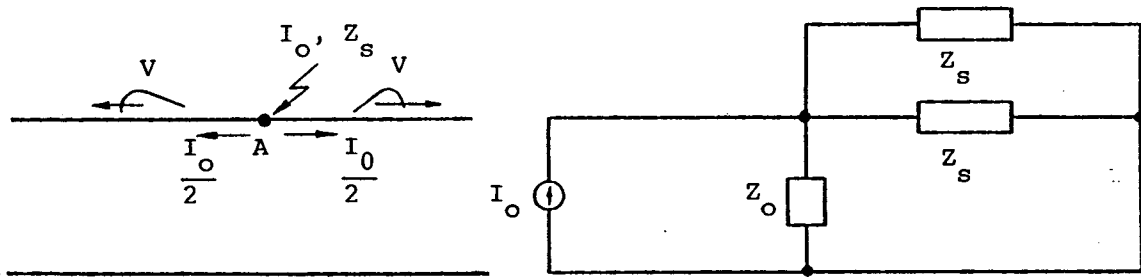
การหาค่า V อาจใช้วงจรสมมูลในรูปที่ 6.21 (ข) โดยพิจารณา Z_0 ด้วย

$$I_0 = \frac{V}{Z_0} + \frac{2V}{Z_S} \quad (6.11)$$

$$V = I_0 \left[\frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_S} \right]^{-1} \quad (6.12)$$

$$= I_0 \frac{Z_S}{2} (Z_0 \gg Z_S) \quad (6.13)$$

ค่าอิมพีแดนซ์เสิร์จของล่ำฟ้าผ่า Z_0 มีค่าประมาณ 100 ถึง 3000 โอห์ม ซึ่งมากกว่า Z_S



(ก) ฟิวส์บนสาย

(ข) วงจรสมมูลของฟิวส์และสาย

รูปที่ 6.21 แรงดันเสิร์จบนสายที่มีอิมพีแดนซ์เสิร์จ Z_s

จากทฤษฎีของสายส่งทั่วไป นำมาใช้กับสายเดี่ยวขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง d เมตร และอยู่สูงจากพื้นดิน h เมตร

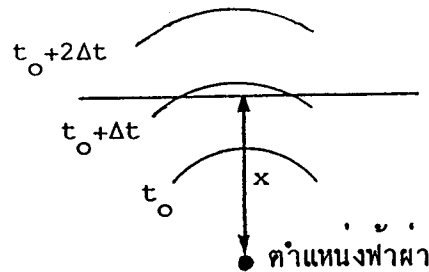
$$Z_s = \sqrt{L/C} \quad (\text{โอห์ม}) \quad (6.14)$$

$$L = \frac{\mu_0}{2} \ln(4h/d) \quad (\text{เฮนรีต่อเมตร})$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(4h/d)} \quad (\text{ฟารัดต่อเมตร}) \quad (6.15)$$

ตัวอย่างเช่น สายอยู่สูง 10 เมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ซม. จะมี Z_s เท่ากับ 450 โอห์ม ถ้ากระแสฟิวส์มีค่า 10 กิโลแอมป์ จะมีค่าแรงดันเสิร์จ V บนสายตามสมการที่ (6.12) เท่ากับ 2.25 เมกกะโวลท์ นับว่ารุนแรงและทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของฉนวนของสาย

ฟิวส์ลงสู่พื้นดิน มีแนวของฟิวส์เกือบตั้งฉากกับสายที่วางขนานกับพื้นดินทำให้เกิดแรงดันเสิร์จบนสาย ดังแสดงในรูปที่ 6.22 คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายมาถึงสายทำให้เกิดแรงดันเสิร์จขึ้น ขนาดแรงดันเสิร์จ V ขึ้นอยู่กับระยะระหว่างสายกับตำแหน่งฟิวส์ลงดิน (x) ขนาดกระแสฟิวส์ (I_0) ความสูงของสาย (h) ดังนี้ [61]



$$V = 30k \frac{h}{X} I_0 \quad (6.16)$$

$k \sim 1.07$ ถึง 1.38 ขึ้นอยู่กับความเร็วของกระแสฟ้าผ่า

รูปที่ 6.22 แรงดันเสิร์จเนื่องจากการเหนี่ยวนำ

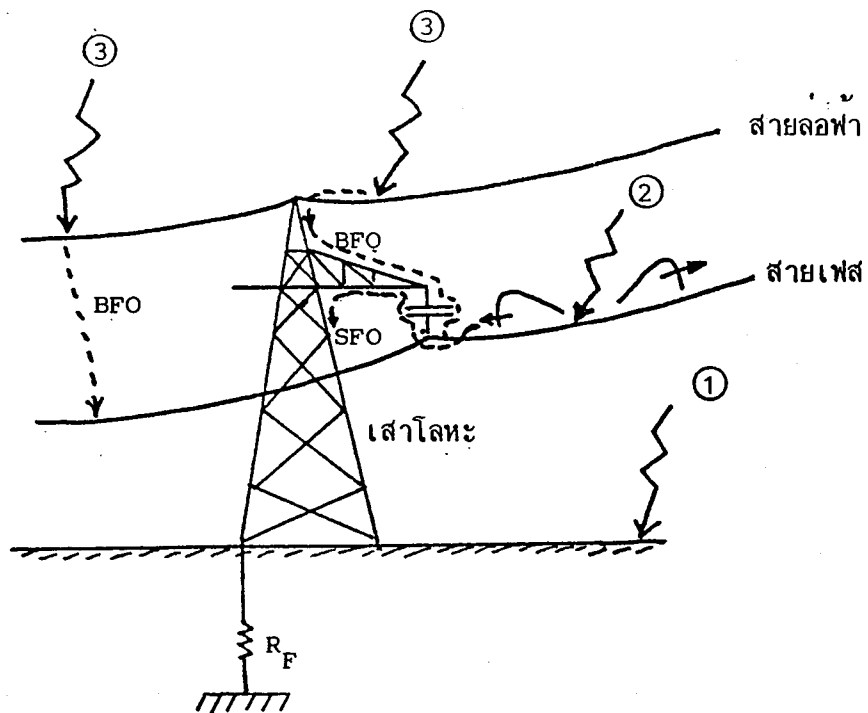
ตัวอย่างเช่น กระแสฟ้าผ่า 20 kA ที่อยู่ห่างจากสายของระบบ 22 kV ประมาณ 50 เมตร จะเกิดแรงดันเสิร์จบนสายที่สูง 12 เมตร มีค่าประมาณ 187 kV ที่ค่า k เท่ากับ 1.3 และมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันที่ลูกถ้วยไฟฟ้าของระบบนี้ จึงอาจเกิดการวาวไฟตามฉนวนสายไปยังเสา

ฟ้าผ่าลงสู่สาย สามารถป้องกันได้ด้วย การใช้สายชิลด์หรือสายดินที่ซึ่งอยู่เหนือสาย เฟสอย่างเหมาะสม ฟ้าผ่าลงบนสายชิลด์ก็จะเกิดแรงดันเกินขึ้นได้ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับความต้านทาน ของรากสายดิน วิธีการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิผลในการชิลด์นี้ ใช้หลักการทางสถิติในการหาอัตราความล้มเหลวของการชิลด์ (shielding failure) และใช้หลักการวิเคราะห์การจ้วงสาย ที่เรียกว่า Elustic

6.12 ระบบชิลด์ของระบบสายส่ง และ ELECTRO-GEOMETRIC MODEL

การป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง จากการถูกฟ้าผ่าโดยตรง กระทำได้โดยใช้ระบบชิลด์ ประกอบด้วยสายล่อฟ้า (overhead ground wire) หรือสายชิลด์และการต่อลงดินที่เสาแต่ละต้น ดังแสดงในรูปที่ 6.23 ฟ้าผ่าแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ

แบบที่ 1 ฟ้าผ่าลงสู่ดิน และเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส มีผลไม่รุนแรงเท่าแบบอื่นที่มีการป้องกันเสิร์จ



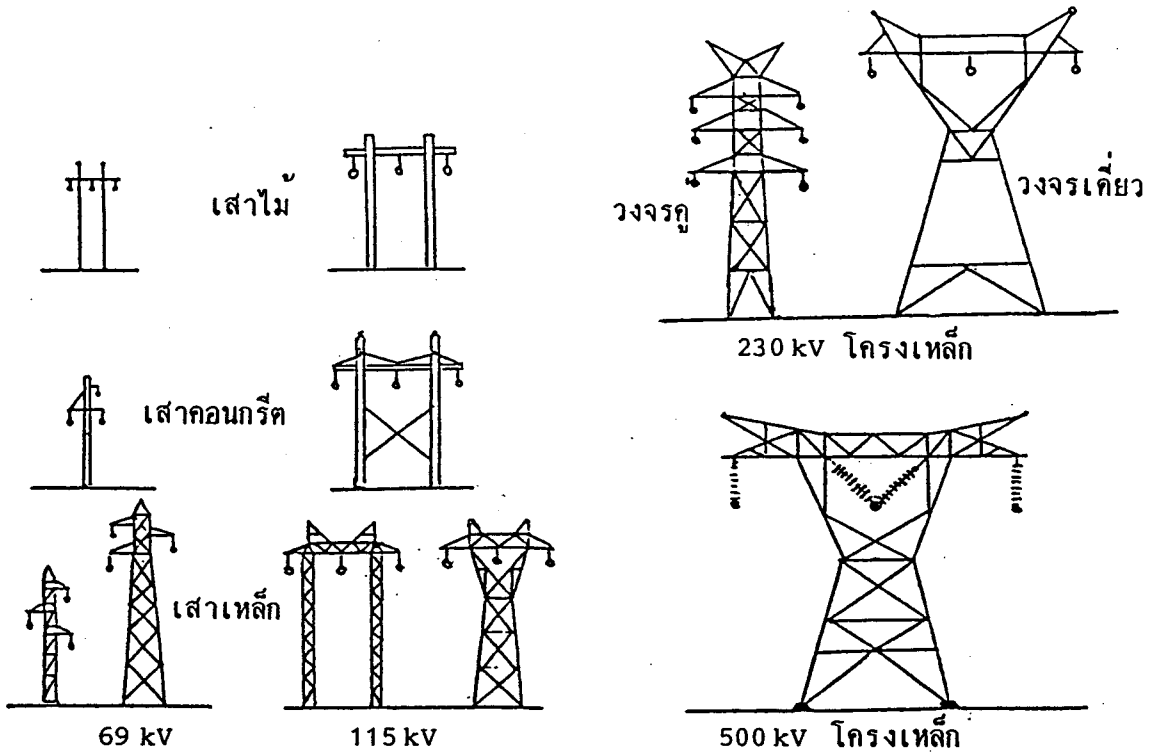
รูปที่ 6.23 ตำแหน่งฟ้าผ่าและการเกิด back flashover (BFO) และ shielding failure flashover (SFO)

แบบที่ 2 ฟ้าผ่าลงที่สายเฟส แม้มีสายล่อฟ้า เป็น ระบบป้องกันอาจมีการชิลด์ล้มเหลว (shielding failure, SF) และทำให้เกิดเสิร์จบนสายเฟส ถ้าแรงดันเสิร์จมีขนาดสูงกว่า แรงดัน SFO ดังในรูปที่ 6.24 ก็จะทำให้เกิดการแลบข้ามลูกถ้วยไปยังเสาและดินที่มีความต้านทานของรากสายดิน R_F อัตราการเกิดการแลบข้าม (shielding flashover rate, SFO) วิเคราะห์ได้โดยใช้วิธี Burgdorf-Kostenko หรือ วิธีของ Whitehead

แบบที่ 3 ฟ้าผ่าลงที่สายล่อฟ้าที่อยู่เหนือสายเฟสที่ฟ้าผ่ารุนแรง ก็อาจเกิดการแลบข้ามกรณีลูกถ้วยกลับไปยังสายเฟสทำให้เกิดเสิร์จในสายเฟสได้อัตราการแลบข้ามกลับ (BFO, back flashover) อาจป้องกันได้โดยให้ R_F มีค่าต่ำ ๆ นอกจากนี้ยังอาจเกิดการแลบข้ามในอากาศไปยังสายเฟส ทำให้เกิดเสิร์จในสายเฟส

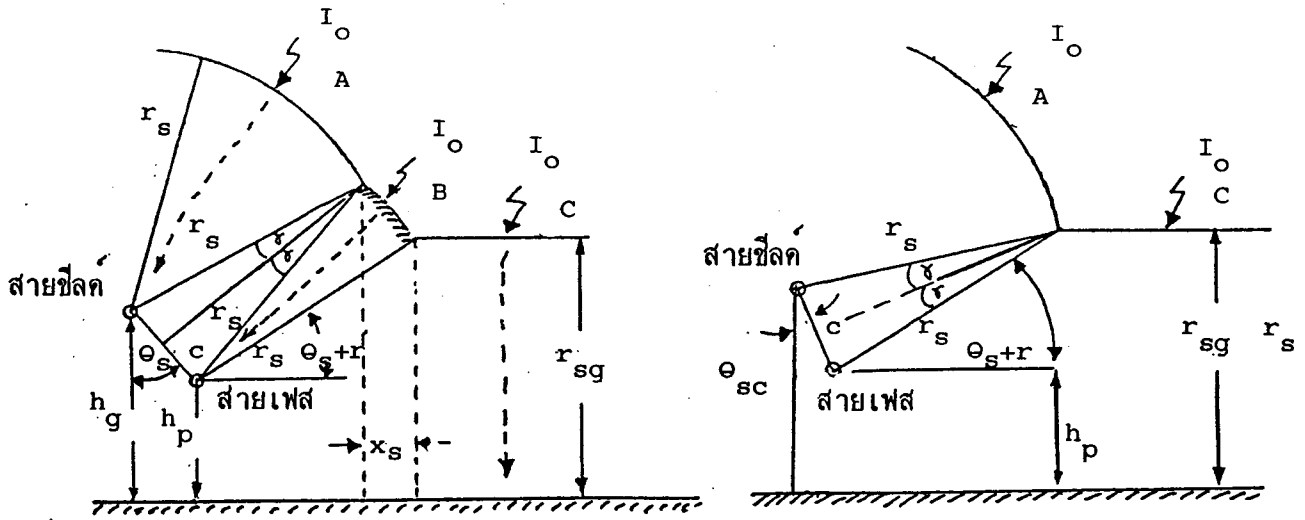
6.12.1 การวิเคราะห์มุมชิลด์ประสิทธิผล (EFFECTIVE SHIELDING ANGLE)

การชิลด์ล้มเหลวที่ทำให้เกิดการแลบข้ามที่ลูกถ้วยของสายส่งป้องกันได้โดยการวางตำแหน่งของสายชิลด์หรือสายล่อฟ้าอย่างเหมาะสม เพื่อไม่ให้ฟ้าผ่าที่มีกระแสสูงพอที่จะทำให้เกิดการแลบข้ามผ่านลงไปที่สายเฟสระบบสายชิลด์ที่นำมาใช้ในประเทศมีอยู่หลายลักษณะและมีทั้งระบบสายชิลด์ 1 เส้น และ 2 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 6.24



รูปที่ 6.24 ตัวอย่างเสาของระบบสายส่งแรงสูงภายในประเทศ

การวิเคราะห์หามุมซึลด์ประสิทธิผล ใช้ electro-geometric model ดังแสดง ในรูปที่ 6.25 มุมซึลด์ (θ_s) เป็นมุมระหว่างแนวตั้งกับเส้น C ลำฟ้าผ่าที่เข้ามาใกล้ระบบสายส่ง และอาจผ่าไปที่สายซึลด์สายเฟส หรือพื้นดิน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของลำฟ้าผ่าและขนาดของกระแส ฟาผ่า ซึ่งเป็นตัวกำหนดระยะฟ้าผ่า r_s ในรูปที่ 6.25 (ก) การซึลด์ล้มเหลวเกิดขึ้นเมื่อลำฟ้าผ่าเข้าสู่เขต B ถ้าขนาดกระแสฟ้าผ่านี้ทำให้เกิดการแลบข้ามที่ลูกถ้วย ย่อมสรุปได้ว่ามุมซึลด์นี้ไม่มีประสิทธิผล และบริเวณเส้นโค้งในเขต B นี้ เรียกว่า exposure arc แต่ในรูปที่ 6.25 (ข) เส้นโค้งนี้หมดไป เนื่องจากหามุมซึลด์ θ_s แคบลง ทำให้ฟ้าผ่าที่มีขนาดใหญ่กว่าหรือเท่ากับนี้ จะไม่สามารถลงไปสู่สายเฟสได้ มุมซึลด์นี้จึงต้องมีประสิทธิผล ระยะ r_s ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแส ดังในสมการที่ (6.1) ถึง (6.3)



(ก) การช็อตล้มเหลว

(ข) การช็อตไม่ล้มเหลว

รูปที่ 6.25 Electro-geometric model แสดง exposed arc และมุมช็อต

- เขต A พาดำไปที่สายลวด
- เขต B พาดำไปที่สายเฟส
- เขต C พาดำลงสู่ดิน

θ_c เป็นมุมช็อตประสิทธิผลมีค่ากระแสพาดำวิกฤตที่สามารถทำให้เกิดการแลบข้ามลูกถ้วยได้พอดี-

ในทางปฏิบัติ สายมีความสูงไม่เท่ากันตลอดทุกระยะ และเสาอาจตั้งอยู่ในบริเวณที่ลาดเอียงเชิงเขา ค่าระยะต่าง ๆ จึงต้องใช้เป็นค่าเฉลี่ยทั้งหมด รูปที่ 6.26 เป็น electro-geometric model ที่แสดงผลของความลาดเอียงของพื้นดิน การวิเคราะห์เพื่อออกแบบมุมช็อตมีขั้นตอนดังนี้

ก. กำหนดระยะเฉลี่ยต่าง ๆ

พื้นราบ

$$\bar{h} = h - \frac{2}{3} \times S \tag{6.17}$$

h = ความสูงของสายวัดที่ตำแหน่งเสา (h_p, h_g)
 s = ระยะหย่อนของสาย (sag) (s_p, s_g)

พื้นลาดเอียง

$$\bar{h} = h \quad (6.18)$$

พื้นที่บนภูเขา

$$\bar{h} = 2h \quad (6.19)$$

ในทุก ๆ กรณี มีค่าเฉลี่ยดังนี้

$$\text{(ค่าเฉลี่ย)} \quad \bar{h}_g = h_p + \bar{b} \quad (6.20)$$

$$\text{(ค่าเฉลี่ย)} \quad \bar{b} = b + \frac{2}{3} (s_p - s_g) \quad (6.21)$$

$$\text{(ตำแหน่งเสา)} \quad b = h_g - h_p \quad (6.22)$$

ข. หามุมซีลด์ประสิทธิผลเฉลี่ย θ_{sc} ซึ่งเป็นมุมซีลด์ที่กระแสไฟฟ้าผ่านขนาดพอดี ที่จะทำให้เกิดการแลบข้ามลูกถ้วยพอดีเป็นค่าวิกฤติ จากรูปที่ 6.26 จะต้องพิจารณาให้โค้ง $P_1P_2P_3$ หดไป หรือมุม $\theta_1 + \theta_3$ เท่ากับศูนย์

$$\beta = \arcsin c/2r_{sc} \quad (6.23)$$

$$\theta_1 = \theta_{sc} + \beta \quad (6.24)$$

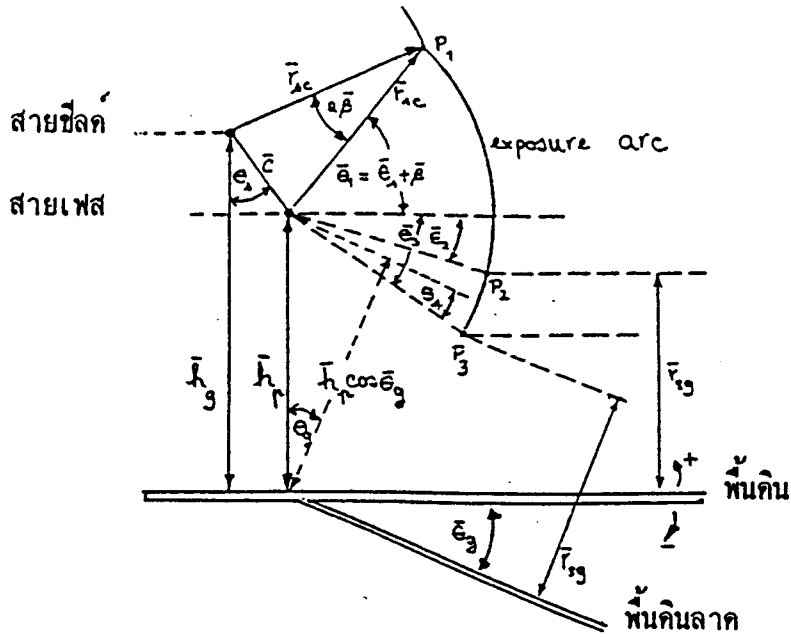
$$\theta_3 = \theta_g + \theta_4 \quad (6.25)$$

$$\theta_4 = \arcsin \left[\frac{y \cos \theta_g - r_{sc}}{r_{sc}} \right] \quad (6.26)$$

จาก $\theta_1 + \theta_3$ เท่ากับศูนย์

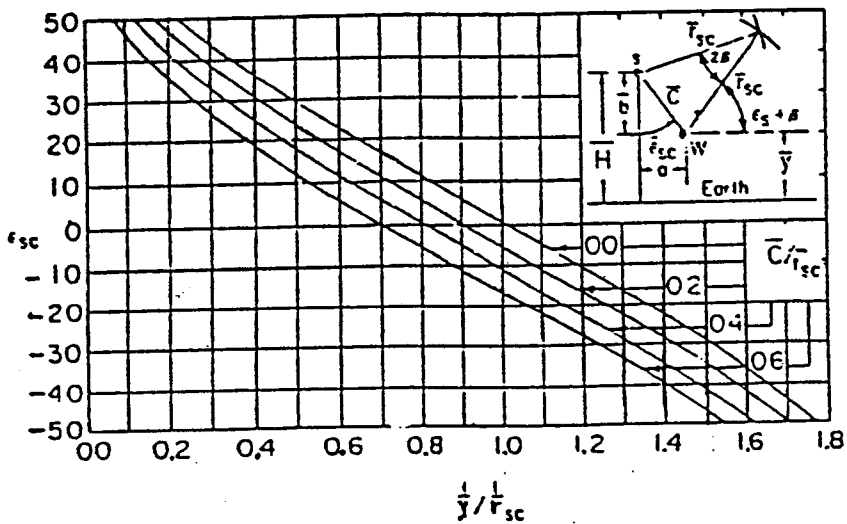
$$\theta_{sc} = -\beta - \theta_g - \arcsin \left[\frac{y \cos \theta_g - r_{sc}}{r_{sc}} \right] \quad (6.27)$$

มุม θ_{sc} มีค่าเป็นบวกหรือลบขึ้นอยู่กับระยะ c , r_{sc} และความสูงของสายต่าง ๆ ค่า θ_{sc} ที่วิเคราะห์ได้ต้องนำไปตรวจเช็คกับค่าระยะสมมุติแล้วปรับค่าเพื่อวิเคราะห์ซ้ำจนได้ค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 6.26 Electro-geometric model แบบค่าเฉลี่ยและมีพื้นลาด

ค่า θ_{sc} ตามสมการที่ (6.27) นำมาแสดงผลเป็นกราฟดังในรูปที่ 6.27



รูปที่ 6.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของมุมชีลด์กับระยะต่าง ๆ [67]

บทที่ 5

สรุปผลของโครงการ

สรุปผลของโครงการ

โครงการสื่อการสอนวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ใช้ประกอบการเรียนการสอน วิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ตามหลักสูตรของสาขาครุศาสตร์อุตสาหกรรมไฟฟ้า-ไฟฟ้ากำลัง สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล โครงการนี้ประกอบด้วยใบความรู้ แผ่นใส และแผงแสดงวงจรชุดประกอบสร้างแรงดันสูง ซึ่งเนื้อหาแบ่งออกเป็น 6 หน่วยเรียน ดังนี้คือ พื้นฐานวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง สนามไฟฟ้า ฉนวนไฟฟ้าและกลไกการเสียหายฉนวนพลาสมา การผลิตไฟฟ้าแรงสูง เพื่อใช้ในการทดสอบอุปกรณ์และการวัด การทดสอบอุปกรณ์ไฟฟ้าด้วยแรงสูง ฟ้าผ่าและการป้องกัน เนื้อหาได้เรียบเรียงมาจากเอกสารตำราภาษาไทยที่เกี่ยวกับวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง โดยการค้นคว้าและคัดเลือกเอาเฉพาะเนื้อหาที่ตรงตามคำอธิบายรายวิชา และวัตถุประสงค์ แล้วนำเอาเนื้อหา มาสรุปลงบนแผ่นใสเพื่อใช้ประกอบการสอน นอกจากนี้ยังได้จัดทำแผงวงจรสร้างแรงดันสูงมาประกอบการอธิบายเนื้อหาให้ชัดเจนและเข้าใจมากยิ่งขึ้น

ปัญหาและอุปสรรคการดำเนินงาน

1. เนื้อหาวิชาค่อนข้างยากทำให้การนำเนื้อหาจากตำราภาษาไทยมาจัดเรียงเข้าด้วยกันให้ตรงตามหลักสูตรไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร
2. การจัดทำแผ่นใสทำได้ยากเพราะขาด PLOTTER และโปรแกรมภาษาไทยต้องใช้โปรแกรมราชวิถีมาช่วยในการจัดทำแผ่นใส ทำให้รูปภาพต่าง ๆ ทำไม่ได้ ต้องใช้วิธีทำเป็น OVER LAP นอกจากนี้เครื่องหมายพิเศษต่าง ๆ โปรแกรมราชวิถีก็ทำไม่ได้ต้องใช้วิธีเขียนเพิ่มเติมเข้าไป
3. การออกแบบวงจรสร้างแรงดันสูง ต้องคำนึงถึงการจัดเรียงรูปภาพวงจรและตัวอักษรให้พอดีต้องนำไปแก้ไขหลายครั้ง และการทำใช้วิธีซิลสกรีนทำให้แก้ไขยาก
4. งานไม่เสร็จตามกำหนด เนื่องจากต้องค้นคว้าและศึกษาโปรแกรมที่ใช้พล็อตแผ่นใส

ข้อเสนอแนะ

1. ในการเรียนการสอนโดยใช้สื่อการสอนชุดนี้ควรจะทำแผนเตรียมการสอนและแบบร่างกระดานดำประกอบด้วย
2. ควรจะมีแบบฝึกหัดท้ายหน่วยเรียนประกอบทุกหน่วย
3. ควรจะมีตำราภาษาอังกฤษประกอบการเรียนการสอนด้วย
4. ควรจัดให้มีการไปดูงานนอกสถานที่เกี่ยวกับวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

บรรณานุกรม

- (1). สุรพล คำรงกิตติกุล, ดร. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2535.
- (2). สำรวัย สังก์สอาด, รศ.ดร. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- (3). ชำนาญ น่อเกียรติ, รศ.ดร. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2522.
- (4). จัดตฤทธิ ทองปรอน, อาจารย์ เอกสารประกอบการสอน สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ, 2536 .
- (5). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, เอกสาร HIGH VOLTAGE LABORATORY, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, 2533 .
- (6). มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เอกสาร HIGH VOLTAGE LABORATORY, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า , 2534 .
- (7). M.P.Chourasia, D.V.Razeving, "High Voltage Engineering", Khanna Plublishers ,Delhi, 1984.

ภาคผนวก ก

TABLE VI A

*Correlations between insulation levels
and minimum phase-to-earth air clearances*

Rated lightning impulse withstand voltage (kV)	Minimum phase-to-earth air clearance (mm)
40	60
60	90
75	120
95	160
125	220
145	270
170	320
250	480
325	630
450	900
550	1 100
650	1 300
750	1 500

TABLE VI B

*Correlations between insulation levels
and minimum phase-to-earth air clearances*

Impulse withstand voltages (kV)		Minimum phase-to-earth air clearance (m)	
Rated switching impulse withstand voltage	Rated lightning impulse withstand voltage	Conductor-structure	Rod-structure
(650)	750	1.4	1.5
(650)	850	1.5	1.7
750	850	1.6	1.9
750	950	1.7	1.9
850	950	1.8	2.4
850	1 050	1.9	2.4
950	1 050; 1 175	2.2	2.9
1 050	1 175; 1 300; 1 425	2.6	3.4
1 175	1 300; 1 425; 1 550	3.1	4.1
1 300	1 425; 1 550; 1 800	3.6	4.8
1 425	1 550; 1 800; 2 100	4.2	5.6
1 550	1 800; 1 950; 2 400	4.9	6.4

มาตรฐานระดับความถี่ IEC แรงดันลงระมาณถึง 765 kV

Highest voltage for equipment (r.m.s.) kV	Rated lightning impulse withstand voltage (LIWL)		Rated power-frequency short-duration withstand voltage	
	phase-to-earth (peak) kV	phase-to-phase (peak) kV	phase-to-earth (r.m.s.) kV	phase-to-phase (r.m.s.) kV
52	250	250	95	95
72.5	325	325	140	140
123	450	450	185	185
	550	550	230	230
145	450	(450)	185	(230)
	550	550	230	230
	650	650	275	275
170	550	(550)	230	(275)
	650	650	275	275
	750	750	325	325
245	650	(650)	275	(360)
	750	(750)	325	(360)
	850	850	360	360
	950	950	395	395
	1050	1050	460	460

Highest voltage for equipment (r.m.s.) kV	Rated switching impulse withstand voltage (SIWL)		Rated lightning impulse withstand voltage (LIWL)
	phase-to-earth (peak) kV	phase-to-phase (peak) kV	phase-to-earth (peak) kV
300	750	1175	850/950
	850	1300	950/1050
362	850	1300	950/1050
	950	1425	1050/1175
420	950	1425	1050/1175
	1050	1550	1175/1300/1425
525	1050	1675	1175/1300/1425
	1175	1800	1300/1425/1550
785	1300	2250	1425/1550/1800
	1425	2400	1550/1800/2100
	1550	2550	1800/1950/2400

ภาคผนวก ข

สูตรคำนวณประจุจินตภาพในทรงกลมรัศมี R_1 และ R_2 ที่วางห่างกันเป็นระยะ L_s

ทรงกลม R_2		ทรงกลม R_1	
ประจุจินตภาพ (image charge)	ระยะที่ประจุห่าง จากศูนย์กลาง	ประจุจินตภาพ (image charge)	ระยะที่ประจุห่าง จากศูนย์กลาง
<u>แรงดันบนทรงกลม = V_2</u>		<u>แรงดันบนทรงกลมเป็นศูนย์</u>	
$Q_2 = 4\pi\epsilon V_2 R_2$	0	$Q_{b1} = \frac{-Q_2 R_1}{L_s} = \frac{-Q_2 b_1}{R_1}$	$b_1 = \frac{R_1^2}{L_s}$
$Q_{a1} = \frac{-Q_{b1} R_2}{(L_s - b_1)} = \frac{-Q_{b1} a_1}{R_2}$	$a_1 = \frac{R_2^2}{(L_s - b_1)}$	$Q_{b2} = \frac{-Q_{a1} R_1}{(L_s - a_1)} = \frac{-Q_{a1} b_2}{R_1}$	$b_2 = \frac{R_1^2}{(L_s - a_1)}$
$Q_{ak-1} = \frac{-Q_{bk-1} R_2}{(L_s - b_{k-1})} = \frac{-Q_{bk-1} a_{k-1}}{R_2}$	$a_{k-1} = \frac{R_2^2}{(L_s - b_{k-1})}$	$Q_{bk} = \frac{-Q_{ak-1} R_1}{(L_s - a_{k-1})} = \frac{-Q_{ak-1} b_k}{R_1}$	$b_k = \frac{R_1^2}{(L_s - a_{k-1})}$
<u>แรงดันบนทรงกลมเป็นศูนย์</u>		<u>แรงดันบนทรงกลม = V_1</u>	
$Q'_{a1} = \frac{-Q_1 R_2}{L_s} = \frac{-Q_1 a'_1}{R_2}$	$a'_1 = \frac{R_2^2}{L_s}$	$Q_1 = 4\pi\epsilon V_1 R_1$	0
$Q'_{a2} = \frac{-Q'_{b1} R_2}{(L_s - b'_1)} = \frac{-Q'_{b1} a'_2}{R_2}$	$a'_2 = \frac{R_2^2}{(L_s - b'_1)}$	$Q'_{b1} = \frac{-Q'_{a1} R_1}{(L_s - a'_1)} = \frac{-Q'_{a1} b'_1}{R_1}$	$b'_1 = \frac{R_1^2}{(L_s - a'_1)}$
$Q'_{ak} = \frac{-Q'_{bk-1} R_2}{(L_s - b'_{k-1})} = \frac{-Q'_{bk-1} a'_k}{R_2}$	$a'_k = \frac{R_2^2}{(L_s - b'_{k-1})}$	$Q'_{bk-1} = \frac{-Q'_{ak-1} R_1}{(L_s - a'_{k-1})} = \frac{-Q'_{ak-1} b'_{k-1}}{R_1}$	$b'_{k-1} = \frac{R_1^2}{(L_s - a'_{k-1})}$

ภาคผนวก ง

สัญลักษณ์ที่ใช้ในวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

A	พื้นที่
D	ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า (flux density)
E	สนามไฟฟ้า (electric field)
E_b	สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ทำให้เกิดการเสียดสภาพฉนวน
E_{mean}	สนามไฟฟ้าเฉลี่ย
E_{max}	สนามไฟฟ้าสูงสุด
Q,q	จำนวนประจุไฟฟ้า
R_e	ความต้านทานของรากสายดิน
V_s	แรงดันระหว่างสาย rms สูงสุด
$V_{lightning}$	แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า
$V_{switching}$	แรงดันสวิตชิง
$V_{power-freq}$	แรงดันที่ความถี่ไฟฟ้ากำลัง
Z_0	ค่าอิมพีแดนซ์เสิร์จของลําฟ้าผ่า
Z_s	ค่าอิมพีแดนซ์เสิร์จของสาย
η	ตัวประกอบสนามไฟฟ้า (field efficiency factor)
ρ	ความหนาแน่นของประจุ
ρ_e	สภาพต้านทานของดิน
δ	relative air density หรือ correction factor
ϵ	ลักษณะคงตัวไดอิเล็กตริก (permittivity)
γ	townsend second ionisation coefficient
α	townsend first ionisation coefficient
SF₆	sulphur hexafluoride

ประวัติผู้จัดทำ



ชื่อ นายจันทน์ ใจนวล
 วัน เดือน ปีเกิด 12 เมษายน 2506
 ภูมิลำเนา 2/12 หมู่ 5 ต.วังเงิน อ.แม่ทะ จ.ลำปาง
 วุฒิการศึกษา จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาไฟฟ้า แผนกไฟฟ้ากำลัง
 วิทยาลัยเทคนิคลำปาง ปี พ.ศ.2526
 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาไฟฟ้า แผนกไฟฟ้ากำลัง
 วิทยาลัยเทคนิคลำปาง ปี พ.ศ.2532



ชื่อ นายไพโรจน์ ปิยรังสรรค์
 วัน เดือน ปีเกิด 7 กรกฎาคม 2510
 ภูมิลำเนา 135 หมู่ 2 ต.ท่าเดื่อ อ.ดอยเต่า จ.เชียงใหม่
 วุฒิการศึกษา จบการศึกษาระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาไฟฟ้า แผนกไฟฟ้ากำลัง
 วิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่ ปี พ.ศ.2529
 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาไฟฟ้า แผนกไฟฟ้ากำลัง
 วิทยาลัยเทคนิคเชียงใหม่ ปี พ.ศ.2532