

การศึกษาลักษณะสมบัติการเบรกดาวนิมพัลส์ฟ้าผ่าของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง



นายวาณิช ขนอม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON LIGHTNING IMPULSE BREAKDOWN CHARACTERISTICS OF ARCING HORNS FOR
POWER TRANSFORMER PROTECTION



Mr. Wanit Khanom

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาลักษณะสมบัติการเบรกดาวนิมพัลส์
ฟ้าผ่าของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลง
ไฟฟ้ากำลัง

โดย

นายวานิช ขนอม

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรณรงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร. อภิบาล พฤกษ์านูบาล)

วาณิช ขนอม : การศึกษาลักษณะสมบัติการเบรกดาวนอิมพัลส์ฟ้าผ่าของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับ
ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง. (A STUDY ON LIGHTNING IMPULSE BREAKDOWN
CHARACTERISTICS OF ARCING HORNS FOR POWER TRANSFORMER PROTECTION)
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล, 70 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอแบบจำลองอินทิเกรชันสำหรับจำลองการเบรกดาวนของแกปอากาศ
ภายใต้แรงดันอิมพัลส์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการจำลองคุณลักษณะแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับ
การป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบจำหน่าย โดยเปรียบเทียบเส้นโค้งแรงดันเบรกดาวน-เวลาเบรกดาวนที่ได้
จากการจำลองกับผลการทดลอง ทั้งในกรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs และ แรงดัน
อิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น 5/50 μs ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ เพื่อพิจารณาความแม่นยำของผลการจำลองพบว่า
แบบจำลองที่นำเสนอสร้างได้ง่ายและให้ผลที่น่าพอใจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อนิสิต.....วาณิช ขนอม.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2553.....

5070611321 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS: VOLT-TIME CHARACTERISTIC / INTEGRATION MODEL

WANIT KHANOM : A STUDY ON LIGHTNING IMPULSE BREAKDOWN CHARACTERISTICS OF ARCING HORNS FOR POWER TRANSFORMER PROTECTION. THESIS ADVISOR : CHANNARONG BALMONGKOL, Dr.Eng. 70 pp.

This thesis presents an integration model for simulating breakdown of air gaps under lightning impulse voltages. The proposed model can be applied to create the volt-time characteristics of arcing horns for lightning protection of distribution power transformers. To determine the accuracy of the proposed model, the simulation results are compared with the experimental results for the arcing horns under standard lightning impulse wave of 1.2/50- μ s and nonstandard lightning impulse wave of 5/50- μ s with positive and negative polarity. It is found that the proposed model with simple implementation can give satisfied results.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department:Electrical Engineering..... Student's Signature: *Wanit Khanom*.....

Field of Study: ...Electrical Engineering... Advisor's Signature: *Chun*.....

Academic Year:2010.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือจาก อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้แนวทางการศึกษาวิจัย การแก้ปัญหา และแก้ไขข้อบกพร่องจนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรัักษ์ และ อาจารย์ ดร. อภิบาล พุกษานูปาล ที่ช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ คุณถาวร เอื้อดี และ คุณเกรียงไกร โอบฐัฐนุ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์วัด และ อุปกรณ์ทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง และในการทดลองมาโดยตลอด ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคนรวมทั้งเพื่อนสาวคนสนิทซึ่งเป็นกำลังใจให้ฝ่าฟันจนประสบความสำเร็จ ข้าพเจ้า ขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ท้ายสุดนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้ซึ่งมอบโอกาสให้ได้รับสิ่งที่มีคุณค่าอย่างยิ่งสำหรับชีวิตข้าพเจ้านั้นคือการศึกษา และเป็นกำลังใจรวมทั้งสนับสนุนข้าพเจ้าในทุกๆ ด้านตลอดมาจนประสบความสำเร็จในที่สุด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินการ.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	2
1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	2
2 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์.....	3
2.1 เบรกดาวน์ในอากาศ.....	3
2.1.1 การเกิดไอออน (Ionization).....	3
2.1.1.1 ไอออนไนเซชันโดยการชน (Collision Ionization).....	4
2.1.1.2 โฟโต้ไอออนไนเซชัน (Photoionization).....	4
2.1.1.3 เทอร์มัลไอออนไนเซชัน (Thermal Ionization).....	5
2.1.2 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์ในแก๊ปอากาศ.....	5
2.1.2.1 กลไกเบรกดาวน์ของทาวน์เซนต์.....	6
2.1.3 เบรกดาวน์เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์.....	7
2.1.3.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ (Time Lag of Breakdown).....	7
2.1.3.2 เส้นโค้งแรงดัน-เวลา (V-t Curve).....	8
2.1.3.3 ความน่าจะเป็นการเกิดเบรกดาวน์.....	10
2.1.4 คู่ชั้วเป็ียงอาร์ก.....	12

บทที่	หน้า
3 โปรแกรม EMTP และ แบบจำลองเบรกดาวนีย์	14
3.1 โปรแกรม EMTP	14
3.1.1 TACS	15
3.2 แบบจำลองเบรกดาวนีย์ของแกปอากาศ	15
3.2.1 อินทิเกรชันโมเดล	16
3.2.2 โมเดลของ Sekioka	17
3.3 การสร้างแบบจำลองเบรกดาวนีย์ด้วยโปรแกรม EMTP	18
3.3.1 การสร้างอินทิเกรชันโมเดลในโปรแกรม EMTP	20
4 กระบวนการทดลองหาเส้นโค้งแรงดัน-เวลา.....	21
4.1 วงจรทดสอบ.....	21
4.2 การหาค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ 50%.....	24
4.3 การสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลา.....	24
5 การจำลองและการวิเคราะห์ผล.....	27
5.1 การจำลองการเบรกดาวนีย์ของแกปอากาศ.....	27
5.1.1 แบบจำลองอินทิเกรชันของ Wanit	27
5.1.2 แบบจำลองอินทิเกรชันของ Chowdhuri	28
5.1.3 แบบจำลองอินทิเกรชันของ Kind	29
5.2 เส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่ง	29
5.2.1 กรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s.....	29
5.2.2 กรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/4 μ s.....	33
5.3 เส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก	36
5.3.1 กรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s.....	36
5.3.2 กรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 5/50 μ s.....	38
5.3.3 การศึกษาผลกระทบจากความจุไฟฟ้าบริเวณปลอกฉนวนตัวนำแรงสูง.....	42
5.3.4 การประมาณค่า $V_{50\%}$ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s.....	45

บทที่	หน้า
6 สรุปและข้อเสนอแนะ	52
6.1 สรุปผลการวิจัย	52
6.2 ข้อเสนอแนะ	53
รายการอ้างอิง	54
ภาคผนวก	55
ภาคผนวก ก ข้อมูลแรงดันเบรกดาวนและเวลาเบรกดาวน	56
ภาคผนวก ข ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	70



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	$V_{50\%}$ ของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กในระบบ 24 kV และ 33 kV	24
5.1	ค่า α , DE และ $V_{50\%}$ ของอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่ง	29
5.2	ค่า DE และ V_0 ของอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่ง	31
5.3	ค่า $V_{50\%}$ กรณีอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่ง	34
5.4	ค่า DE และ V_0 ของอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่ง	34
5.5	ค่า DE และ V_0 ของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก	36
5.6	ข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์ 50% ที่ระยะแกปต่างๆ	45

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวนีย์..... 8
2.2	เส้นโค้งแรงดัน-เวลา..... 9
2.3	แรงดัน $V_{50\%}$ 10
2.4	ลักษณะทางมิติของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก..... 14
2.5	คู่ขั้วเบี่ยงอาร์กขณะที่ติดตั้งกับบุชซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้า 14
3.1	อินทิเกรชันโมเดลของ Sekioka 17
3.2	ขั้นตอนการคำนวณเวลาเบรกดาวนีย์ 18
3.3	แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นรูปคลื่น 1.2/50 μs และ 5/50 μs 19
3.4	แรงดันอิมพัลส์หลังคลื่นรูปคลื่น 1.2/50 μs และ 5/50 μs 19
3.5	การสร้างอินทิเกรชันโมเดลจากวงจร TACS 20
3.6	ตัวอย่างการใช้ TACS สร้างอินทิเกรชันโมเดล 20
4.1	วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 22
4.2	อิเล็กทรอนิกส์ของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ 24 kV และ 33 kV 22
4.3	คู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงในระบบ 24 kV 23
4.4	คู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงในระบบ 33 kV 23
4.5	เส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กกรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/50 μs สำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm 25
4.6	เส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กกรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ 5/50 μs สำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm 26
5.1	แบบจำลองอินทิเกรชัน..... 27
5.2	ผลการเปรียบเทียบการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของ Wanit และ Chowdhuri กรณีอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่งสำหรับระยะแกป 10 cm และ 20 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ..... 30
5.3	ผลการเปรียบเทียบการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของ Wanit และ Kind กรณีอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่งสำหรับระยะแกป 10 cm และ 20 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ..... 32

รูปที่	หน้า
5.4 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณีอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่ง สำหรับระยะแกป 10 cm และ 20 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า $1.2/4 \mu\text{s}$ ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ.....	35
5.5 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า $1.2/50 \mu\text{s}$ ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ	37
5.6 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า $5/50 \mu\text{s}$ ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ.....	39
5.7 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า $5/50 \mu\text{s}$ จากการ ใช้ $V_{50\%}$ กรณีอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ.....	41
5.8 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm รูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ กรณีทดสอบผลกระทบจากค่าความจุไฟฟ้าบริเวณปลอกฉนวนแรงสูง ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ.....	43
5.9 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm รูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน $5/50 \mu\text{s}$ กรณีศึกษาผลกระทบจากค่าความจุไฟฟ้าบริเวณปลอกฉนวนแรงสูง ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ.....	44
5.10 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{50\%}$ กับระยะแกป	46
5.11 เปรียบเทียบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{50\%}$ กับระยะแกป ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ	47
5.12 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ กรณีทดสอบแบบจำลองโดยใช้ค่า $V_{50\%}$ จากการประมาณค่าด้วยสมการ ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ.....	49
5.13 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดันเวลาของอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ ที่ระยะแกป 5, 10, 15, 20 และ 28.5 cm โดยใช้ค่า $V_{50\%}$ จากการประมาณค่าด้วยสมการ.....	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง จะมีปรากฏการณ์ที่เป็นอันตรายต่อระบบไฟฟ้า คือ แรงดันเกินทรานเซียนต์ (Transient Overvoltages) ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเกิดฟ้าผ่า หรือจากการสวิตซ์ชิงภายในระบบไฟฟ้า ก่อให้เกิดแรงดันเกินที่มีค่าสูงมากในระยะเวลาสั้นๆ ที่อาจจะสร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จึงมีความจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก (arcing horns) เป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินชนิดหนึ่งที่ทำหน้าที่ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง จากแรงดันเกินทรานเซียนต์ เพราะคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กมีราคาถูก มีส่วนประกอบเพียงแค่อิเล็กโตรดแบบแท่ง-แท่ง วางห่างกันให้มีแกปอากาศ โดยที่ระยะแกปจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันของหม้อแปลงไฟฟ้า

เพื่อการใช้คู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังอย่างมีประสิทธิภาพ ควบคู่กับการออกแบบการประสานการฉนวนภายในระบบไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องทราบลักษณะสมบัติการเบรกดาวนของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก ในรูปของคุณลักษณะแรงดัน-เวลา (V-t curve) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเบรกดาวนกับระยะเวลาที่เกิดการเบรกดาวน โดยสามารถทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหา V-t curve ในกรณีที่บ่อนแรงดันอิมพัลส์รูปแบบต่างๆได้ แต่ยุ่งยากและใช้เวลา จึงมีความพยายามที่จะสร้างแบบจำลองการเบรกดาวนซึ่งสามารถจำลอง V-t curve ได้อย่างใกล้เคียงเพื่อช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่าย สามารถนำไปใช้ในการศึกษาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้อย่างสะดวก มีการคิดค้นแบบจำลองการเบรกดาวนขึ้นมากมาย แบบจำลองหนึ่งที่ได้รับคามนิยมใช้ คือ อินทิเกรชันโมเดล (Integration Model) [4]

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำอินทิเกรชันโมเดลที่เสนอโดย Sekioka [4] มาปรับปรุงเพื่อให้สามารถจำลอง V-t curve ของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก (Arcing Horn) ของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 22 kV และ 33 kV เปรียบเทียบกับผลการทดลองทั้งกรณีบ่อนแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐานและไม่ใช้รูปคลื่นมาตรฐาน

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

ศึกษาแบบจำลองการเบรกดาวนอิมพัลส์ฟ้าผ่าของแกปอากาศ เพื่อนำไปสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. ทดสอบการเกิดเบรกดาวน์ในอากาศของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับใช้ป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ 22 kV และ 33 kV โดยใช้แรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่น 1.2/50 μ s และ 5/50 μ s ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ

2. จำลองการเกิดเบรกดาวน์ของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กโดยใช้โปรแกรม EMTP สร้างแบบจำลองเบรกดาวน์ เพื่อใช้จำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลา และนำมาเปรียบเทียบกับเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองจริง

1.4 ขั้นตอนการศึกษาและวิธีดำเนินการ

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการของแบบจำลองเบรกดาวน์เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลอง
2. ศึกษาการใช้งาน TACS สำหรับการสร้างแบบจำลองเบรกดาวน์ในโปรแกรม EMTP
3. สร้างแบบจำลองเบรกดาวน์จากพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้มา และทำการตรวจสอบความถูกต้อง และเที่ยงตรงของแบบจำลองเบรกดาวน์
4. ทำการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองกับผลที่ได้จากการทดลองจริง
5. สรุปผลงานและรวบรวมข้อมูลที่ได้มาทั้งหมด
6. เรียบเรียงข้อมูล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

ทำให้มีความเข้าใจในแบบจำลองการเกิดเบรกดาวน์ และสามารถนำไปจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาได้ ทำให้ได้แบบจำลองที่ถูกต้องและเหมาะสมของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า

1.6 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

- เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ที่จะนำเสนอในแต่ละบทเรียงลำดับดังนี้
- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับการเบรกดาวน์ในอากาศ และ คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก
 - บทที่ 3 กล่าวถึงโปรแกรม EMTP และ แบบจำลองเบรกดาวน์
 - บทที่ 4 กล่าวถึงกระบวนการทดลองหาเส้นโค้งแรงดัน-เวลา
 - บทที่ 5 กล่าวถึงการจำลองและวิเคราะห์ผลจากโมเดล
 - บทที่ 6 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน

2.1 เบรกดาวนในอากาศ [1]

ก๊าซอาจเรียกได้ว่าเป็นฉนวนอีกชนิดหนึ่งที่สำคัญในด้านการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ใช้เป็นทั้งฉนวนหลัก และระบายความร้อน เป็นฉนวนภายนอกที่ราคาถูกที่สุดก็คือ อากาศที่ใช้เป็นฉนวนของสายส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง อย่างไรก็ตามสภาพการเป็นฉนวนก๊าซนั้นสามารถเสียได้เช่นกัน เมื่อมีดีสชาร์จในก๊าซเกิดขึ้น คำว่า ดีสชาร์จในก๊าซนั้นเป็นการอธิบายปรากฏการณ์การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านก๊าซ โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุ คือ อิเล็กตรอนและไอออน ที่เกิดเพิ่มทวีคูณจากกระบวนการไอออไนเซชันด้วยวิธีใดวิธีหนึ่ง ไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีสนามไฟฟ้าทำให้อนุภาคประจุเคลื่อนที่ระหว่างอิเล็กโทรด ดีสชาร์จเบรกดาวนในแก๊สอาจแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ เบรกดาวนสมบูรณ์ และเบรกดาวนบางส่วน

1) เบรกดาวนสมบูรณ์ (Complete Breakdown) หมายถึง การเกิดเบรกดาวนตลอดแก๊ส เชื่อมโยงระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งเกิดขึ้นในฉนวนแล้วแรงดันจะเหลือน้อยมาก มีกระแสไหลมากตามแนวที่เกิดเบรกดาวน กระแสเบรกดาวนนี้จะจำกัดด้วยความต้านทานภายในของวงจรไฟฟ้า

2) เบรกดาวนบางส่วน (Partial Breakdown) หมายถึง เบรกดาวนไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นในระบบการฉนวนที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ เป็นการเกิดไอออไนเซชันในแก๊สเพียงบางส่วน (Partial Discharge = PD) หรือ ฟรีดีสชาร์จ เช่น ดีสชาร์จแบบโคโรนา ดีสชาร์จตามผิว เป็นต้น

2.1.1 การเกิดไอออไนเซชัน (Ionization)

อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซเมื่อได้รับพลังงานเพียงพอ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปหนึ่งอิเล็กตรอน อะตอมเหล่านั้นก็จะมีประจุเป็นบวก ทั้งหมดนี้เรียกว่าเกิดไอออไนเซชัน กระบวนการที่แยกอิเล็กตรอนออกจากโมเลกุล ส่วนกระบวนการที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากของแข็ง เรียกว่า การปล่อยอิเล็กตรอน (Electron emission) และอิเล็กตรอนจะหลุดออกมาจากอิเล็กโทรด ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้ก๊าซมีสภาพนำไฟฟ้าได้

ก๊าซจะมีสภาพความนำไฟฟ้าได้เมื่อ เกิดอนุภาคประจุอิสระที่มีจำนวนมากเพียงพอซึ่งกระบวนการทวีคูณเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอน และไอออนในแก๊สนั้นแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ กระบวนการแตกตัวของอิเล็กตรอนจากโมเลกุลของก๊าซ เกิดจากการชนของอนุภาคกับโมเลกุล (อิเล็กตรอน, ไอออน และ โปรตอนชนกับโมเลกุล) และกระบวนการปล่อย

อิเล็กตรอนออกจากผิวอิเล็กโตรด เมื่อได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าสูง หรือได้รับพลังงานความร้อน รังสี หรือไอออนวิ่งมากระทบผิวอิเล็กโตรด

2.1.1.1 ไอออนไนเซชันโดยการชน (Collision Ionization)

เมื่ออนุภาคหนึ่งวิ่งชนอีกอนุภาคหนึ่งด้วยความเร็ว จะมีการถ่ายทอดพลังงาน จลน์ขึ้นถ้าไม่มีผลให้เกิดการกระตุ้น (Excitation) หรือ ไอออนไนเซชัน เรียกการชนนั้นว่า การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Collision) แต่ถ้าชนแล้วอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซที่ถูกชนได้รับพลังงานจากอนุภาคที่มาชนจนเกิดการกระตุ้นหรือไอออนไนเซชันขึ้น เรียกการชนแบบนี้ว่า การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Collision)

ถ้าอิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนอะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซ โดยที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าในขณะที่วิ่งเข้าหาอะตอม พลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจะเป็นพลังงานจลน์ ถ้าพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับจากสนามไฟฟ้านี้มีค่ามากกว่าพลังงานไอออนไนเซชัน ของโมเลกุลก๊าซ W_i ก็จะทำให้เกิดไอออนไนเซชัน ตามความสัมพันธ์ในสมการต่อไปนี้

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.1)$$

เมื่อเกิดไอออนไนเซชันจะเกิดอิเล็กตรอนหลุดออกมาจากโมเลกุลที่เป็นกลาง เหลือเป็นไอออนบวก อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะเคลื่อนที่ไปชนโมเลกุลก๊าซตัวอื่นแล้วให้อิเล็กตรอนตัวใหม่อีกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เรียกว่า ะวาลานซ์ของอิเล็กตรอน (Electron Avalanche)

2.1.1.2 โฟโตไอออนไนเซชัน (Photoionization)

เมื่อป้อนพลังงานให้แก่อะตอมหรือโมเลกุลก๊าซที่เป็นกลาง อิเล็กตรอนในอะตอมหรือโมเลกุลจะอยู่ในสภาพถูกกระตุ้น (Excitation) แต่จะคงสภาพอยู่ในสภาวะนั้นเป็นช่วงเวลาสั้นๆ เพียง 10^{-8} ถึง 10^{-7} วินาที แล้วอิเล็กตรอนจะกลับลงสู่สภาวะปกติ (Ground State) พร้อมกับปล่อยพลังงานที่รับมาในตอนแรกในรูปของโฟตอน (Photon) และถ้าโฟตอนวิ่งเข้าไปกระทบกับอะตอมหรือโมเลกุลที่เป็นกลางตัวอื่น ก็อาจทำให้เกิดการกระตุ้นหรือไอออนไนเซชัน

การเกิดไอออไนเซชันเนื่องจากโมเลกุลรับพลังงานจากโฟตอนเรียกว่า โฟโตไอออไนเซชัน พลังงานโฟตอนที่ทำให้เกิดไอออไนเซชัน คือ

$$h\nu \geq W_i \quad (2.2)$$

h เป็นค่าคงตัวของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.6257×10^{-34} จูล-วินาที ν คือ ความถี่ของโฟตอน

2.1.1.3 เทอร์มัลไอออไนเซชัน (Thermal Ionization)

เป็นการไอออไนซ์อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซด้วยพลังงานความร้อน ในก๊าซที่มีอุณหภูมิสูงๆ ไอออไนเซชันอาจเกิดขึ้นได้จาก

- 1) ไอออไนเซชันโดยการชนกันเองของโมเลกุลหรืออะตอม เนื่องจากอุณหภูมิสูงทำให้อะตอมหรือโมเลกุลมีความเร็วสูง จึงได้พลังงานจลน์สูง ทำให้เกิดไอออไนเซชัน
- 2) ก๊าซร้อนทำให้มีโฟตอนปล่อยออกมา และเกิดโฟตอนไอออไนเซชันขึ้นได้
- 3) การชนของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงในข้อ 1) และ 2)

ตามความเร็วกระจายของแมกซ์เวลล์ อะตอมมีความเร็วต่างๆกัน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของก๊าซ ที่อุณหภูมิห้องการเกิดไอออไนเซชันด้วยพลังงานจลน์ที่ได้จากการเคลื่อนไหวของโมเลกุลอากาศเป็นไปได้ยาก จากการคำนวณจะพบว่าที่บรรยากาศบนพื้นโลก เทอร์มัลไอออไนเซชันจากการชนที่อุณหภูมิห้องได้สักครั้งทุกๆ 10^{500} ปี ส่วนใหญ่ไอออไนเซชันจะเป็นผลสืบเนื่องจากโฟตอน

2.1.2 ทฤษฎีการเกิดเบรกดาวนในแก๊ปอากาศ

การเกิดเบรกดาวน หมายถึง การเปลี่ยนสภาพการชนวนไปสู่สภาพนำไฟฟ้า คือเป็นช่วงต่อระหว่างสถานะภาพที่กระแสไหลประทังตัวเองไม่ได้ (Nonself-sustained) ไปสู่สถานะที่กระแสไหลประทังตัวเองได้ (Self-sustained) ช่วงต่อดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้เมื่อในแก๊ปมีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนในอวาลานซ์มากพอจนทำให้แก๊ปมีสภาพนำไฟฟ้าสูง และโดยทฤษฎีแล้วกระแสไหลเป็นค่าอนันต์ คือกระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าของวงจรรายนอกเท่านั้น

การเกิดเบรกดาวน้อธิบายด้วยกลไกเบรกดาวน้อทาวน์เซนต์ (Townsend Theory) ซึ่งในขั้นแรกถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้อธิบายการเกิดเบรกดาวน้อและหาแรงดันเบรกดาวน้อในสนามไฟฟ้ากระจายแบบสม่ำเสมอ และต่อมาถูกปรับปรุงเพื่อหาระดับแรงดันวิกฤตหรือแรงดันเบรกดาวน้อในสนามไฟฟ้ากระจายแบบไม่สม่ำเสมออีกด้วย ทั้งสองทฤษฎีนี้ใช้พื้นฐานของการเกิดอะวาลานซ์วิกฤต (Critical Avalance) เป็นจุดเปลี่ยนจากอะวาลานซ์ไปสู่การเกิดเบรกดาวน้อตามกลไกเบรกดาวน้อของทาวน์เซนต์ และจากอะวาลานซ์ไปสู่สตรีมเมอร์ตามกลไกเบรกดาวน้อแบบสตรีมเมอร์

2.1.2.1 กลไกเบรกดาวน้อของทาวน์เซนต์

การเกิดเบรกดาวน้อของทาวน์เซนต์อธิบายการเกิดเบรกดาวน้อได้ดังนี้ เบรกดาวน้อเกิดขึ้นจากจำนวนอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในแก๊ส และการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนสืบเนื่องมาจากการไอออนไนเซชันกระบวนการขั้นต้น (Primary or α process) แต่ลำพังกระบวนการขั้นต้นนี้ไม่สามารถทำให้เกิดเบรกดาวน้อได้ จะต้องมีการชนสองมาเสริม โดยไอออนไนเซชันกระบวนการขั้นสอง (Secound process) ได้แก่ ไอออนไนเซชันโดยไอออนบวกชนโมเลกุลของก๊าซ (β process) และกระบวนการเพิ่มทวิคูณของอิเล็กตรอนที่ปล่อยหลุดจากแคโทด (γ process)

ขณะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไประหว่างอิเล็กโตรดอาจชนและเกิดไอออนไนเซชันได้หลายครั้งก่อนที่จะถึงอิเล็กโตรด ทาวน์เซนต์ได้ชี้ให้เห็นว่าจำนวนการเกิดไอออนไนเซชันต่อหนึ่งหน่วยระยะที่อนุภาคประจุเคลื่อนที่ไปกำหนดด้วย ค่าสัมประสิทธิ์การเกิดไอออนไนเซชันของทาวน์เซนต์ โดยอนุภาคประจุวิ่งชนโมเลกุลในแก๊สเป็นสัมประสิทธิ์ α และ β โดย α เป็นค่าเฉลี่ยของการชนไอออนไนเซชันของอิเล็กตรอน 1 ตัวที่เคลื่อนที่ไปในแก๊สระยะ 1 ซม. β เป็นจำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดจากไอออนหนึ่งตัวขณะอะตอมของก๊าซต่อหน่วยระยะทางตามแนวสนามไฟฟ้า แต่เนื่องจากไอออนบวกมีมวลมาก จึงเป็นการยากที่จะเกิดกระบวนการ β ได้ ดังนั้นกระบวนการขั้นที่สองที่สำคัญคือ กระบวนการ γ อิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการ γ ซึ่งเป็นกระบวนการขั้นที่สองนี้มาจาก

1) ไอออนบวกชนแคโทด (γ_c) อิเล็กตรอนจะหลุดจากแคโทดต้องได้รับพลังงานจากไอออนบวกอย่างน้อยเท่ากับค่าเวิร์คฟังก์ชันของโลหะที่ใช้ทำแคโทดนั้น

2) โฟตอนชนแคโทด (γ_e) ระหว่างที่เกิดอะวาลานซ์ อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นไม่เพียงแต่ทำให้โมเลกุลก๊าซเกิดไอออนไนเซชันเท่านั้น แต่ยังทำให้เกิดโฟตอนอีกด้วย โฟตอนที่เกิดขึ้นบางส่วนนี้จะวิ่งเข้าหาแคโทดและทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ โดยเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากการชนนี้ว่าโฟโตอิเล็กตรอน (Photo Electron)

3) โฟตอนไอออไนเซชัน (γ_p) โฟตอนที่เกิดขึ้นทำให้เกิดโฟโตไอออไนเซชันในโมเลกุลก๊าซ ดังนั้น $\gamma = \gamma_i + \gamma_e + \gamma_p + \dots$ และ กระบวนการขั้นที่สองเหล่านี้อาจเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันก็ได้และมักเรียก γ นี้ว่าสัมประสิทธิ์ไอออไนเซชันที่สองของทาวนด์เซนด (Townsend Ionization Coefficient) อิเล็กตรอนที่เกิดจากกระบวนการขั้นที่สองนี้จะทำให้เกิดอวาลานซ์เพิ่มขึ้น กระบวนการเหล่านี้จะเกิดขึ้นซ้ำๆจนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ขึ้น ทั้งหมดนี้เรียกว่า กลไกเบรกดาวน์ของทาวนด์เซนด

สามารถเขียนเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ได้ดังสมการ (2.3) โดย d คือ ระยะแกป และ Γ มีค่าเป็น $\frac{\beta}{\alpha} + \gamma$

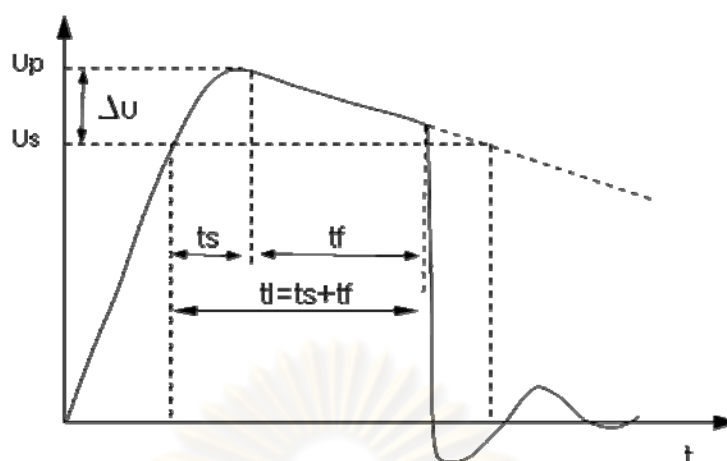
$$\Gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \quad (2.3)$$

2.1.3 เบรกดาวน์เนื่องจากแรงดันอิมพัลส์

การเกิดเบรกดาวน์ของก๊าซในกรณีแรงดันสถานะคงตัว (Steady State Voltage) เช่น แรงดันกระแสตรงหรือแรงดันกระแสสลับความถี่พลังงาน ถือว่าค่าสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปมีค่าคงตัว แต่ในกรณีที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์ แรงดันจะคงอยู่ในช่วงระยะเวลาสั้น นั่นคือสนามไฟฟ้าจะคงอยู่ในช่วงเวลาสั้นด้วย ดังนั้นถึงแม้ขนาดของแรงดันอิมพัลส์เท่ากับแรงดันสถานะคงตัววิกฤตก็ตามการเกิดเบรกดาวน์ในแกปอากาศจะไม่เกิดขึ้นทันที แต่จะต้องใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ (Time Lag of Breakdown)

2.1.3.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์ (Time Lag of Breakdown)

เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน์สามารถแบ่งออกได้ 2 ส่วนหลัก ส่วนแรกเนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาช่วงหนึ่งเพื่อจะมีอิเล็กตรอนที่มีพลังงานเริ่มต้นมากพอที่จะทำให้เกิดอวาลานซ์ได้ ซึ่งโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนระหว่างที่ป้อนแรงดันอิมพัลส์ซึ่งสนามไฟฟ้าจะคงอยู่ในช่วงเวลาในหน่วยไมโครวินาทีนั้นขึ้นกับธรรมชาติของแกป และปริมาตรแกปที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงพอ เวลาที่ใช้สร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้นนี้จึงเป็นค่าทางสถิติและเรียกว่า เวลาล่าช้าทางสถิติ t_s (Statistical Time Lag) ส่วนที่สองคือ เวลาส่วนที่เหลือที่ทำให้เกิดเบรกดาวน์ผ่านอิเล็กโตรดอย่างสมบูรณ์ขึ้นด้วยการไอออไนเซชันตามด้วยการเกิดอวาลานซ์และสตรีมเมอร์ เรียกว่าเวลาล่าช้าก่อตัว t_f (Formative Time Lag)

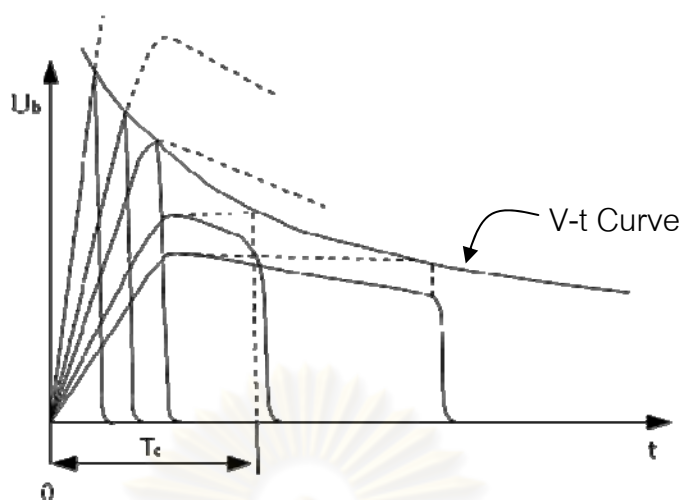


รูปที่ 2.1 เวลาล่าช้าของการเกิดเบรกดาวน

เมื่อเพิ่มระดับแรงดันที่ป้อนให้อิเล็กโตรด เวลาล่าช้าทางสถิติจะลดลงเพราะโอกาสที่อิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำจะสามารถทำหน้าที่เป็นอิเล็กตรอนเริ่มต้น เพื่อให้เกิดอวาลานซ์ต่อไปก็จะมีมากขึ้น เวลาล่าช้าทางสถิติมักจะมีค่าน้อยกว่าที่ควรจะเป็นเมื่อพิจารณาจากโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนอิสระในอากาศ ทั้งนี้เนื่องจากอากาศอาจมีไอออนลบมากกว่าอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้โอกาสที่จะได้อิเล็กตรอนเริ่มต้นจากการปลดปล่อยอิเล็กตรอน (Detachment) จากไอออนลบมีมากกว่า และมักพิจารณาให้การปลดปล่อยอิเล็กตรอนเป็นสาเหตุหลักในการสร้างอิเล็กตรอนเริ่มต้น ในขณะที่เดียวกันเวลาล่าช้าก่อตัวจะมีค่าลดลง เพราะสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวเร่งให้อิเล็กตรอนมีความเร็วมากขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนอิสระมีพลังงานเพียงพอที่จะก่อให้เกิดอวาลานซ์เร็วขึ้น

2.1.3.2 เส้นโค้งแรงดัน-เวลา (V-t Curve)

ขนาดของแรงดันและช่วงเวลาคงอยู่ของแรงดันอิมพัลส์มีผลอย่างมากต่อเวลาล่าช้า เมื่อเพิ่มขนาดของแรงดันขึ้นเวลาล่าช้าจะลดลง จึงสามารถแสดงความคงทนของฉนวนเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีรูปคลื่น เหมือนเดิมแต่สามารถเปลี่ยนแปลงขนาดของค่ายอดแรงดันได้เส้นโค้งแรงดัน-เวลา ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนกับเวลาเบรกดาวนหรือเวลาที่คลื่นตัด ถ้าคลื่นตัดบริเวณหางคลื่น ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนคือค่ายอดแรงดันอิมพัลส์กรณีที่คลื่นตัดบริเวณหน้าคลื่น ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน คือ แรงดัน ณ เวลาที่เกิดการเบรกดาวน ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เส้นโค้งแรงดัน-เวลา

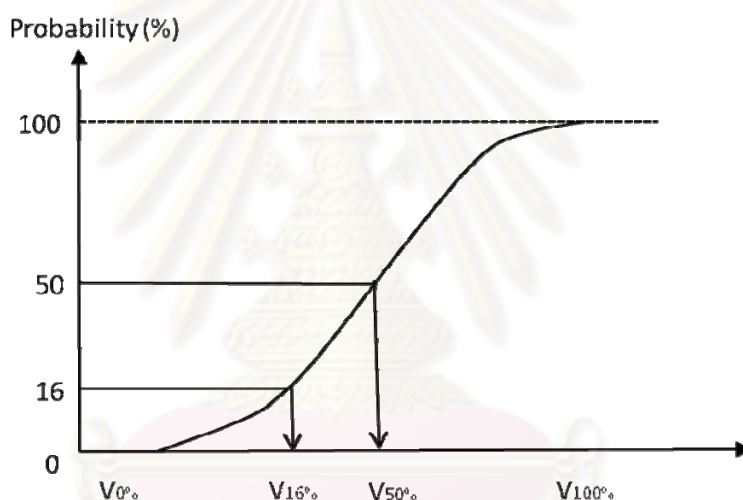
เนื่องจากเวลาเบรกดาวนาคือ เวลาล่าซึ่งประกอบด้วยเวลาล่าช้าทางสถิติและเวลาล่าช้าก่อตัว เวลาเบรกดาวนาคจึงมีค่าไม่แน่นอนจนถึงแม้ว่าจะป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีรูปคลื่นเหมือนเดิมทุกประการก็ตาม ดังนั้นการแสดงเวลาเบรกดาวนาคในเส้นโค้งแรงดัน-เวลาจึงต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติและแสดงค่าด้วยค่ากลางของข้อมูล

เส้นโค้งแรงดัน-เวลาสร้างได้โดยใช้วิธีระดับแรงดันคงที่ (Constant Level Voltage) เริ่มจากสร้างรูปคลื่นอิมพัลส์ให้มีเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นตามที่ต้องการแล้วป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีค่ายอดคงที่ค่าหนึ่งเข้าอิเล็คโตรดเพื่อให้เกิดเบรกดาวนาค จากนั้นบันทึกค่ายอดแรงดันเบรกดาวนาคและเวลาเบรกดาวนาคเมื่อได้จำนวนข้อมูลเวลาเบรกดาวนาคตามที่ต้องการแล้วจึงหาค่ากลางทางสถิติของข้อมูลเวลาเบรกดาวนาค และทำซ้ำในขั้นตอนเดิมที่ระดับแรงดันอื่นๆ จากนั้นสร้างกราฟระหว่างค่าเฉลี่ยค่ายอดแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนาค กับค่ากลางข้อมูลเวลาเบรกดาวนาคคือในแต่ละระดับแรงดันที่เลือกจะได้จุดเพื่อสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลา 1 จุด เมื่อพล็อตจุดทั้งหมดแล้วก็ลากเส้นเชื่อมจุดเหล่านั้นเข้าด้วยกันก็จะได้เส้นโค้งแรงดัน-เวลา

เส้นโค้งแรงดัน-เวลานี้ใช้เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบการฉนวนระบบไฟฟ้าแรงสูงจากแรงดันอิมพัลส์ ทั้งแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า และแรงดันอิมพัลส์สวิตชิง เช่น การใช้คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก (Arcing Horn) สำหรับป้องกันความเสียหายของหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจากแรงดันเกินต่างๆ

2.1.3.3 ความน่าจะเป็นการเกิดเบรกดาวน

ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์สูงสุดที่ไม่ว่าจะป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่ระดับแรงดันนี้กี่ครั้งก็ไม่ทำให้เกิดการเบรกดาวนได้เลย เรียกระดับค่ายอดแรงดันนั้นว่า $V_{0\%}$ หรือค่าคงทนอยู่ได้ต่อแรงดันอิมพัลส์ (Impulse Withstand Voltage) ซึ่งคือค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่มีโอกาสเบรกดาวนเป็น 0% แต่เมื่อเพิ่มค่ายอดแรงดันขึ้นเรื่อยๆ จนค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ต่ำสุดค่าหนึ่งที่ไม่ว่าจะป้อนแรงดันกี่ครั้งก็จะเกิดเบรกดาวนขึ้นทุกครั้ง เรียกระดับแรงดันนั้นว่า $V_{100\%}$ ซึ่งคือค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่มีโอกาสเบรกดาวนเป็น 100% ถ้าเพิ่มแรงดันสูงกว่าแรงดัน $V_{100\%}$ นี้ก็จะเกิดเบรกดาวนทุกครั้งและ $V_{50\%}$ คือ ค่ายอดแรงดันที่ทำให้เกิดเบรกดาวนเป็นจำนวนครึ่งครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ป้อนทั้งหมด แสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แรงดัน $V_{50\%}$

ถ้าข้อมูลแรงดันเบรกดาวนมีจำนวนน้อย ฟังก์ชันการกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนอาจไม่เป็นฟังก์ชันการกระจายแบบปกติ เช่น เป็นแบบล็อกปกติ แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล หรือแบบอื่นๆ แต่อาจแทนการกระจายของข้อมูลนี้ด้วยฟังก์ชันการกระจายแบบปกติได้ เพราะให้ผลการคำนวณค่า $V_{50\%}$ และ σ ไม่ผิดพลาดมากนักเมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากฟังก์ชันที่ถูกต้อง จึงถือได้ว่าฟังก์ชันกระจายของแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนมีลักษณะเป็นฟังก์ชันการกระจายแบบปกติ (Normal Distribution) ซึ่งสามารถหาค่า $V_{0\%}$ และ $V_{100\%}$ ได้โดย

$$V_{0\%} = V_{50\%} - 3\sigma \quad (2.4)$$

$$V_{100\%} = V_{50\%} + 3\sigma \quad (2.5)$$

σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สามารถหาค่า $V_{50\%}$ และ σ ได้จากการทดลองได้หลายวิธีโดยวิธีการทดลองที่นิยมสำหรับชนวนที่คืนตัวได้อย่างก้ำกึ่ง ได้แก่

1) วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ (Multiple Level Method) หาค่า $V_{50\%}$ ด้วยเส้นกราฟความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรกดาวนกับค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ป้อนเริ่มโดยป้อนแรงดันอย่างน้อย 20 ครั้งทีละระดับแรงดันแต่ละค่า โดยเลือกระดับแรงดันที่มีโอกาสเกิดเบรกดาวนอยู่ในช่วงใกล้ๆค่า 50% ทั้งค่าที่สูงกว่าและค่าที่ต่ำกว่า 50% ความน่าจะเป็นของการเบรกดาวนในแต่ละระดับแรงดันหาได้จากจำนวนครั้งที่เกิดเบรกดาวนต่อจำนวนครั้งที่ป้อนในแต่ละระดับแรงดัน จากนั้นพลอตข้อมูลลงกราฟโดยให้แกนตั้งเป็นค่าความน่าจะเป็น และแกนนอนเป็นค่ายอดแรงดันเบรกดาวนและลากเส้นเชื่อมจุดต่างๆ จากกราฟคำนวณค่า σ ได้จาก $V_{50\%} - V_{16\%}$ ดังรูปที่ 2.3 โดยถือว่าแรงดันเบรกดาวนมีการกระจายแบบปกติ

2) วิธีปรับขึ้นลง (Up and Down Method) หาค่า $V_{50\%}$ โดยเลือกระดับแรงดันค่าหนึ่งทีคาดว่าจะ เป็น $V_{50\%}$ ป้อนเข้าอิล็กโตรด ทุกครั้งที่ป้อนแรงดัน ถ้าหากไม่เกิดเบรกดาวนให้เพิ่มแรงดันขึ้นเป็น ΔV ถ้าหากเกิดเบรกดาวนให้ลดแรงดันลง ΔV โดย ΔV มีค่าประมาณ 3% ของค่าประมาณ $V_{50\%}$ เริ่มต้น จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันทั้งหมดควรมีค่าไม่น้อยกว่า 20 ครั้ง หาค่า $V_{50\%}$ ได้จากสมการที่ (2.6) K_i คือจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันค่ายอด V_i

$$V_{50\%} = \frac{\sum k_i V_i}{\sum k_i} \quad (2.6)$$

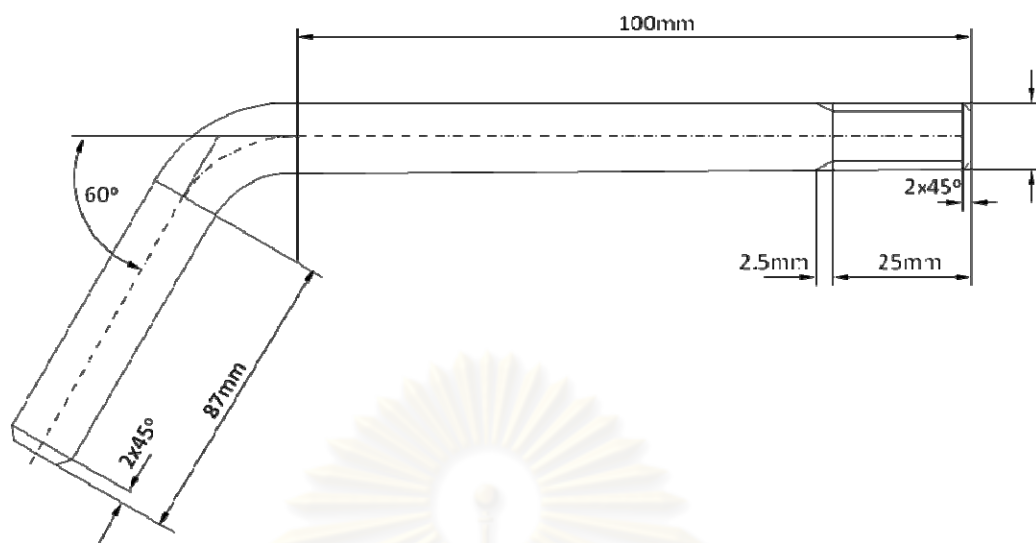
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1.4 คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก [2]

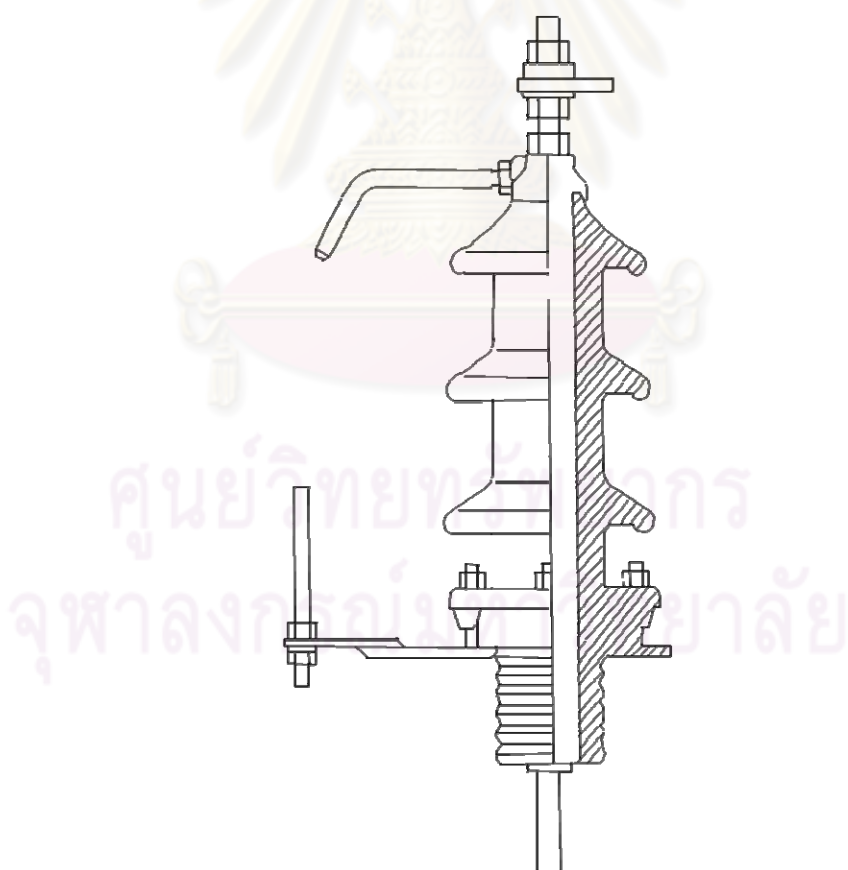
อุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูง โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ที่กลางแจ้ง เช่น สายส่งไฟฟ้าแรงสูงชนิดแขวนเหนือศีรษะ หรือ หม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงเหล่านี้จะต้องเผชิญกับแรงดันเกินทรานเซียนต์ โดยทั่วไปมีสาเหตุมาจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า หรือแรงดันเกินจากการสวิตชิง เหตุการณ์ที่ทำให้เกิดแรงดันเกินเหล่านั้นไม่สามารถคาดการณ์ล่วงหน้าได้ และไม่สามารถป้องกันการเกิดเหตุการณ์เหล่านั้นได้โดยสมบูรณ์ สายส่งไฟฟ้าที่ต่ออยู่บัสบาร์ (Bus Bar) หรือบushing ของหม้อแปลงไฟฟ้า ย่อมมีความเสี่ยงที่จะได้รับแรงดันเกินทรานเซียนต์มากที่สุด

คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก (Arcing Horn) เป็นตัวนำที่ถูกลอกแบบขึ้นมาสสำหรับใช้ป้องกันฉนวน หรือ อุปกรณ์ไฟฟ้ากำลังจากความเสียหายที่เกิดขึ้นจากแรงดันเสิร์จ คู่ขั้วเบี่ยงอาร์กจะกระตุ้นให้เกิดการเบรกดาวนขึ้นระหว่างอิเล็กโตรดทั้งสองขึ้น ป้องกันไม่ให้แรงดันเสิร์จวิ่งเข้าสู่อุปกรณ์ที่ป้องกัน โดยทั่วไปแล้วคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กจะประกอบไปด้วยอิเล็กโตรดสองแท่ง ติดตั้งคร่อมอยู่ทั้งสองฝั่งของฉนวนที่เราต้องการป้องกัน โดยอิเล็กโตรดขึ้นหนึ่งจะติดตั้งอยู่บริเวณฝั่งไฟฟ้าแรงสูง ส่วนอิเล็กโตรดอีกหนึ่งขึ้นจะติดตั้งทำการต่อกราวด์ไว้ และมักพบเห็นได้บ่อยครั้งตามฉนวนลูกถ้วยชนิดแขวนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบแขวนเหนือศีรษะ (Over Head Line) หรือสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า มักจะติดตั้งอยู่บริเวณบushing ไฟฟ้าแรงสูงของหม้อแปลงกำลัง คู่ขั้วเบี่ยงอาร์กโดยทั่วไปแล้วมีอยู่หลายรูปแบบ โดยบางชนิดมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก บางชนิดจะเป็นลักษณะวงแหวน หรือ ลักษณะโค้งมน

คู่ขั้วเบี่ยงอาร์กมีบทบาทสำคัญในด้านการป้องกันระบบไฟฟ้า ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันจึงจำเป็นต้องมีประสิทธิภาพในการจัดสัมพันธ์การฉนวน (Insulation Coordination) คู่ขั้วเบี่ยงอาร์กจึงควรได้รับการออกแบบให้มีลักษณะค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าเข้าใกล้อนันต์ที่สภาวะการทำงานปกติ เพื่อป้องกันการสูญเสียที่เกิดจากกระแสเหนี่ยวนำ และ คู่ขั้วเบี่ยงอาร์กต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำในระหว่างที่เกิดการอาร์กขึ้นที่อิเล็กโตรด และวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโตรดของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กนั้นต้องมีความสามารถในการกลับคืนสภาพจากความร้อนสูงที่เกิดจากอาร์กได้ด้วย โดยคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 ลักษณะทางมิติของคู้วเบี่ยงอาร์ก



รูปที่ 2.5 คู้วเบี่ยงอาร์กขณะติดตั้งกับวาล์วซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 3

โปรแกรม EMTP และ แบบจำลองเบรกดาวน

3.1 โปรแกรม EMTP [3]

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ไม่ได้อยู่ในสภาวะคงตัว ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ (Load Flow) หรือ การคำนวณกระแสลัดวงจร และยังมีวิเคราะห์ในสภาวะทรานเซียนต์ที่สามารถแบ่งออกได้ตามช่วงเวลาที่ทำกรวิเคราะห์ ได้แก่ ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Transients) ที่มีช่วงเวลาย่านไมโครวินาที ถึงวินาที และทรานเซียนต์กลไฟฟ้า (Electromechanical Transients) ซึ่งนำมาใช้ในการศึกษาเสถียรภาพ (Stability Studies) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งจะมีช่วงเวลาย่านมิลลิวินาที ถึงวินาที Electro-Magnetic Transients Program หรือ EMTP ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยในการคำนวณระบบไฟฟ้าในสภาวะทรานเซียนต์ แต่นอกเหนือจากการคำนวณในสภาวะทรานเซียนต์แล้ว EMTP ยังสามารถคำนวณระบบไฟฟ้าในสภาวะปกติได้อีกด้วย ในตัวโปรแกรม EMTP ประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน R, ตัวเหนี่ยวนำ L, ตัวเก็บประจุ C, และ อุปกรณ์ต่างๆ สำหรับจำลองระบบไฟฟ้า รวมทั้งวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป นอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบสำหรับการวิเคราะห์ระบบควบคุม เช่น TACS (Transient Analysis of Control System) และสามารถวิเคราะห์ระบบเครื่องกลไฟฟ้า เช่น มอเตอร์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้อีกด้วย จึงเป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมใช้งานกันอย่างกว้างขวาง

การวิเคราะห์สภาวะทรานเซียนต์ของ EMTP จะทำการวิเคราะห์ในโดเมนเวลา ทำให้สามารถนำผลการวิเคราะห์ในช่วงเวลาที่ผ่านไปแล้ว มาใช้คำนวณค่าตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการได้ โดยการคำนวณผ่าน TACS หรือ MODELS นอกจากนี้ การวิเคราะห์ในโดเมนเวลา ยังสามารถดำเนินการวิเคราะห์กับอุปกรณ์ที่ทำงานไม่เป็นเชิงเส้นได้ง่ายเมื่อเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่ได้อีกด้วย

ในการจำลองระบบไฟฟ้าด้วยโปรแกรม EMTP ทำโดยการสร้างองค์ประกอบจำลองจากแบบโดยประมาณ ไปจนถึงแบบที่ละเอียดถูกต้องดังตัวอย่าง เช่น แบบจำลองโดยประมาณของแหล่งจ่ายพลังงานขนาดใหญ่ซึ่งมีเครื่องผลิตไฟฟ้าหลายๆเครื่องอาจสร้างองค์ประกอบจำลองโดยประมาณเป็นแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับอิมพีแดนซ์เท่านั้น การเลือกใช้อุปกรณ์จำลองจะขึ้นอยู่กับชนิดของงานการวิเคราะห์ และที่ตั้งขององค์ประกอบ ซึ่งอาจอยู่ในโซนที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์มากน้อยไม่เท่ากัน เช่น โหลดทางด้านแรงต่ำอาจมีความสำคัญไม่

มากนักในการวิเคราะห์ทางด้านแรงสูงจึงใช้วงจรสมมูลแบบง่าย ๆ ได้ เช่น เป็นค่าอิมพีแดนซ์ตัวเดียว หลังจากสร้างองค์ประกอบจำลองต่างๆ เรียบร้อยแล้วก็สามารถนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นระบบไฟฟ้าเพื่อนำมาวิเคราะห์ได้ ซึ่งในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจำเป็นต้องใช้ TACS เข้ามาควบคุมการจำลองเพื่อให้ทำงานได้ตามต้องการ โดยที่ระบบควบคุม TACS จะแยกตัวต่างหากจากโปรแกรม EMTP แต่สามารถติดต่อกันผ่านทาง การส่งข้อมูลแรงดัน และกระแส จากนั้นจึงส่งข้อมูลกลับมาเป็นสัญญาณ TACS (TACS Switch)

3.1.1 TACS

TACS ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นองค์ประกอบจำลองแบบบล็อกไดอะแกรม โดยผู้ใช้สามารถนำฟังก์ชันสำเร็จรูปที่มีการสร้างเอาไว้ใน EMTP อยู่แล้วมาประกอบใช้งานได้ทันที แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ TACS ไม่ได้รับการออกแบบมาเพื่อสร้างอัลกอริทึม จึงค่อนข้างลำบากในการออกแบบวงจรควบคุมในลักษณะที่ต้องใช้อัลกอริทึมที่ซับซ้อน

การเชื่อมต่อระหว่าง TACS และ วงจรไฟฟ้าเป็นการเชื่อมต่อแบบทางเดียว ผลการคำนวณจากวงจรไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านไปยัง TACS จากนั้น TACS จึงคำนวณและได้ผลลัพธ์ออกมาส่งต่อให้แก่วงจรไฟฟ้าในรอบการคำนวณถัดไป ทำให้เกิดความล่าช้าในการส่งผลการคำนวณจาก TACS เข้าสู่วงจรไฟฟ้าเป็นเวลา Δt เวลาล่าช้าของสัญญาณควบคุมจาก TACS นี้ อาจส่งผลให้เกิดความไม่เสถียรในการคำนวณได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของ Δt และ ธรรมชาติของระบบที่ทำการจำลอง แต่ถ้านำ TACS มาใช้เป็นส่วนประกอบของระบบควบคุม เวลาล่าช้านี้จะส่งผลดีในการจำลอง เพราะในระบบจริง มักจะมีความล่าช้าของระบบควบคุมอยู่แล้ว อย่างไรก็ตาม ควรจะลดค่า Δt ให้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความไม่เสถียรในการคำนวณ

3.2 แบบจำลองเบรกดาวนซ์ของแกปอากาศ

การนำอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่งมาใช้เป็นคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กติดตั้งคร่อมระหว่างบรูชซึ่งแรงสูงของหม้อแปลงไฟฟ้านั้นจะทำให้เกิดการเบรกดาวนซ์ที่แกปอากาศ ก่อนที่จะเกิดการวาบไฟทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าได้รับความเสียหาย แบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยมีดังนี้

3.2.1 อินทิเกรชันโมเดล

ในบางครั้งเมื่อแรงดันอิมพัลส์มีค่ามากกว่าค่าแรงดันวิกฤต V_0 จะทำให้แกปอากาศเกิดการสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนของอุปกรณ์ จนสุดท้ายมีการเบรกดาวนเกิดขึ้น สภาพความทนได้ของฉนวนอุปกรณ์ที่เกิดจากการรับรูปคลื่นแรงดันได้นั้นสามารถแทนด้วยค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งก็คือ Disruptive Effect (DE) โดยค่า DE หาได้จากสมการ (3.1)

$$DE = \int_{T_0}^{T_b} (V(t) - V_0)^k dt \quad (3.1)$$

โดย	$V(t)$	คือ	รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมแกป
	V_0	คือ	แรงดันวิกฤตที่เริ่มการอินทิเกรตที่เวลา T_0
	T_b	คือ	เวลาที่ผลการอินทิเกรตมีค่าเท่ากับ DE
	k	คือ	ค่าคงที่ขึ้นกับลักษณะคลื่นแรงดันอิมพัลส์

สำหรับค่าตัวแปรข้างต้นสามารถหาได้จากการแก้สมการอินทิกรัลที่เกิดจากรูปคลื่นอิมพัลส์หลายรูปคลื่นกับข้อมูลเวลาเบรกดาวน จากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลองจริง โดยถือว่าเมื่อป้อนรูปคลื่นอิมพัลส์ที่ชั่วแรงดันเหมือนเดิมเข้าอิเล็กทรอนิกส์หนึ่งยอมให้ค่า สภาพความทนได้ของฉนวน (DE) เท่าเดิม เช่น ไม่ว่าจะป้อนรูปคลื่น 1.2/50 μs หรือ 5/50 μs ไม่ว่าจะค่ายอดแรงดันเท่าไรก็ตามยอมต้องให้ค่า DE เท่ากัน สมการที่ (3.2) แสดงถึงการอินทิกรัลที่เกิดจากรูปคลื่นอิมพัลส์สองรูป ได้แก่ $V_a(t)$ และ $V_b(t)$ กับ เวลาเบรกดาวน T_{BA} และ T_{BB} ที่ได้จากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาเพื่อแก้สมการหาค่า DE, V_0 และ k

$$DE = \int_{T_0}^{T_{ba}} (V_a(t) - V_0)^k dt = \int_{T_0}^{T_{bb}} (V_b(t) - V_0)^k dt \quad (3.2)$$

วิธีแก้สมการเพื่อหาค่าคงที่ DE, V_0 , และ k สามารถใช้วิธีเชิงเลข (Numerical Method) ได้ เช่น วิธีของ Newton-Raphson ในการหาค่า แต่เป็นเรื่องยากที่จะให้ได้คำตอบที่ถูกต้อง จึงมีผู้เสนอวิธีเลือกพารามิเตอร์ในรูปแบบที่ง่ายขึ้นกว่าเดิม [5] ดังนี้

1. $k=1$ คือ หลักการ equal-area criterion โดยพื้นที่ที่อินทิเกรตเป็นสัดส่วนกับการขยายตัวของลีดเดอร์ ตามความสัมพันธ์เชิงเส้นของความเร็วลีดเดอร์ กับแรงดันตกคร่อมอิเล็กทรอนิกส์กรณีนี้ V_0 เป็นค่า inception voltage ของลีดเดอร์

2. $k=2$ และ V_0 คือ corona inception voltage ผลการอินทิเกรตจะเป็นสัดส่วนกับประจุที่ไหลสู่แกป ตามความสัมพันธ์กำลังสองระหว่างกระแสโคโรนา กับแรงดันที่ป้อน ซึ่งก็คือเบรกดาวนจะเกิดเมื่อประจุที่ไหลเข้าเกินค่าวิกฤต

3. ค่า $T_0=0$ และ $V_0=0$ แต่ก็พบว่ายังคงให้ผลที่คลาดเคลื่อนเป็นอย่างมาก

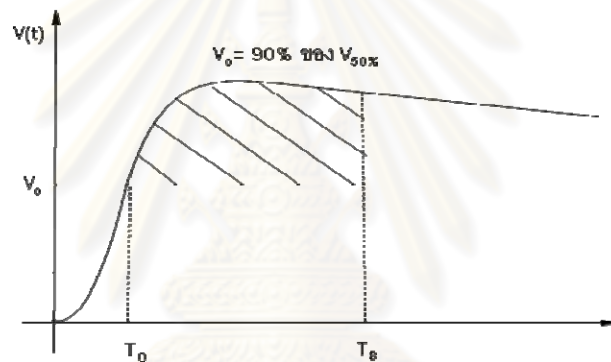
นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Darveniza [6] เสนอไว้ว่าถ้าเลือก $3 \leq k \leq 5$ ให้ใช้ $0 \leq V_0 \leq V_{50\%}$ และถ้าเลือก $k \leq 1$ ให้ใช้ $V_0 = 90\%$ ของ $V_{50\%}$

3.2.2 โมเดลของ Sekioka [4]

Sekioka เสนอให้ $k=1$ และ ค่า V_0 มีค่าประมาณ 90% ของ $V_{50\%}$ โดยที่ $V_{50\%}$ คือ ระดับแรงดันที่ทำให้ฉนวนมีโอกาสเบรกดาวน 50% สำหรับค่าของ DE กรณีอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่ง หาได้จากสมการต่อไปนี้โดย D คือระยะแกป (m)

$$\text{ข้าวบวก} \quad DE = 0.65D - 0.04 \quad (3.3)$$

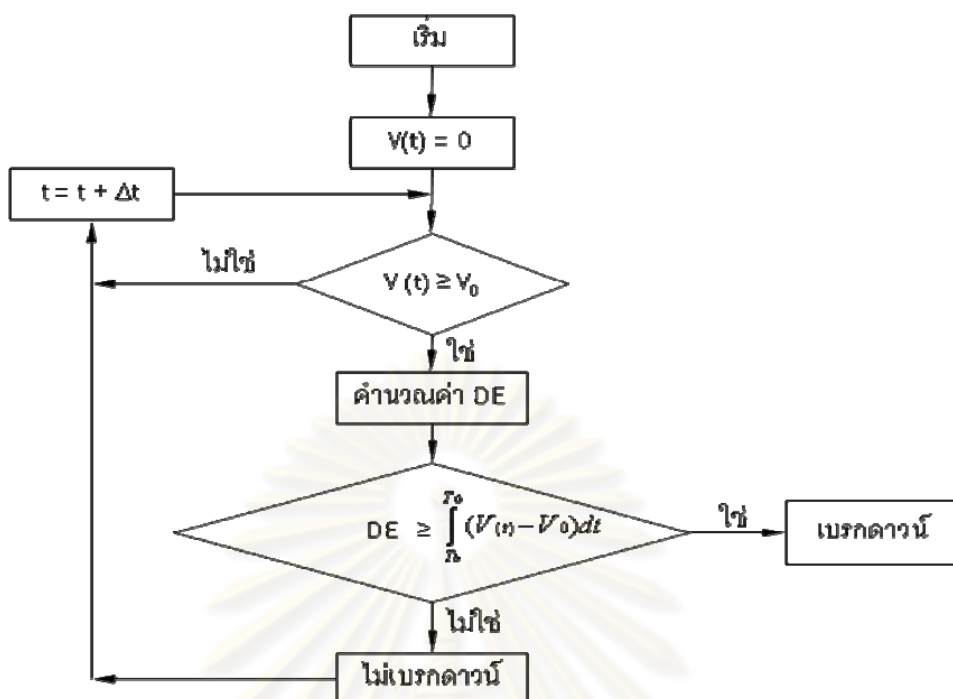
$$\text{ข้าวลบ} \quad DE = 0.61D - 0.15 \quad (3.4)$$



รูปที่ 3.1 อินทิเกรชันโมเดลของ Sekioka

สามารถแสดงขั้นตอนการหาเวลาเบรกดาวนของอินทิเกรชันโมเดลได้ดังรูปที่ 3.2

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการคำนวณเวลาเบรกดาวน

3.3 การสร้างแบบจำลองเบรกดาวนด้วยโปรแกรม EMTP

สร้างโมเดลเบรกดาวนด้วยโปรแกรม EMTP โดยใช้ข้อบังคับประกอบ TACS ในโปรแกรม EMTP เลือกใช้ TACS ในการสร้างอินทิเกรชันโมเดลเนื่องจากอินทิเกรชันโมเดลไม่มีความซับซ้อนนักจึงสามารถนำองค์ประกอบใน TACS มาต่อวงจรสร้างขึ้นได้โดยง่าย

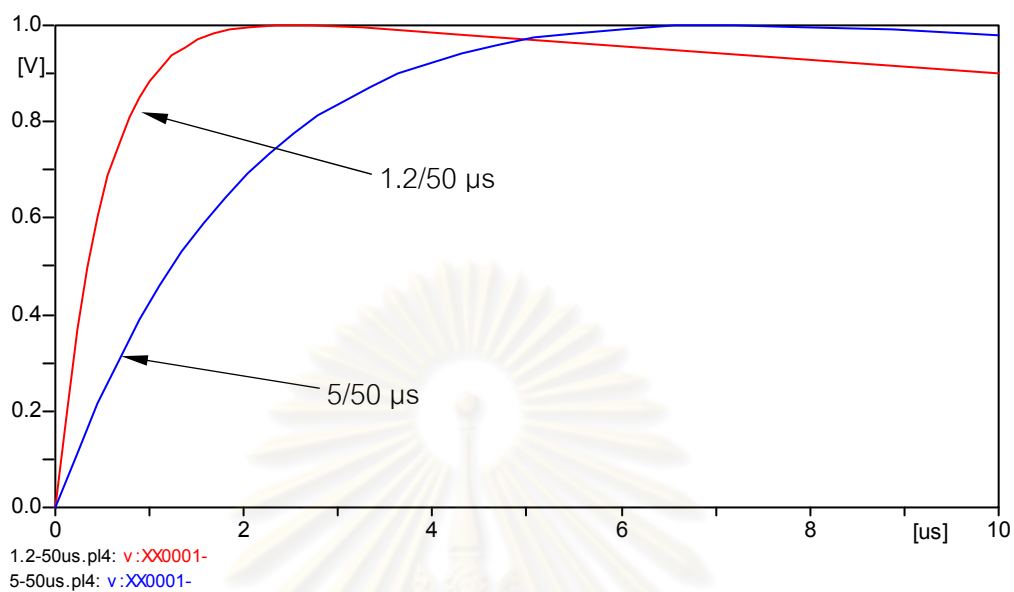
สร้างรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าป้อนเข้าสู่โมเดลเบรกดาวนโดยตรง ซึ่งใช้แหล่งกำเนิดแรงดันเสิร์จ (TACS source) และสร้างแรงดันอิมพัลส์ตามสมการ (3.5)

$$V(t) = V_p * A(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (3.5)$$

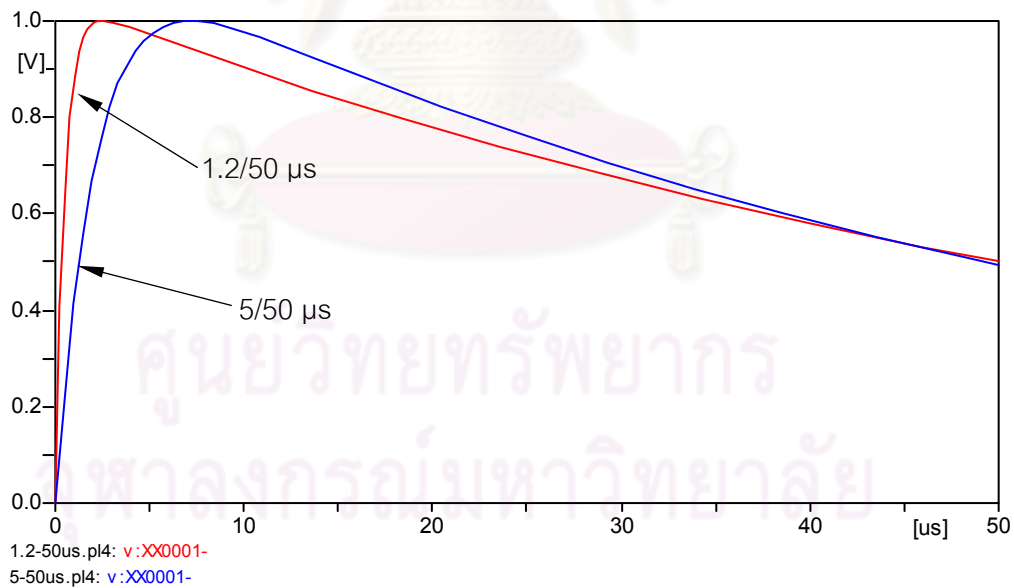
โดย V_p คือ ค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่ต้องการ

A, a และ b คือ ค่าคงที่

สำหรับกรณีรูปคลื่น 1.2/50 μs ใช้ค่า $A = 1.045$, $a = 1.4743 \times 10^4$, $b = 1.9921 \times 10^6$ และในกรณีรูปคลื่น 5/50 μs ใช้ค่า $A = 1.174$, $a = 1.738 \times 10^4$, $b = 4.828 \times 10^5$ จากข้อมูลดังกล่าวจะทำให้ได้รูปคลื่น 1.2/50 μs และ 5/50 μs เมื่อให้ $V_p = 1$ ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



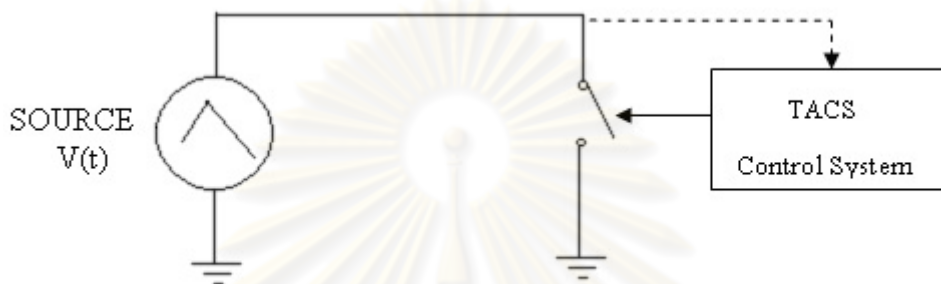
รูปที่ 3.3 แรงแดันอิมพัลส์หน้าคลื่นรูปคลื่น 1.2/50 μs และ 5/50 μs



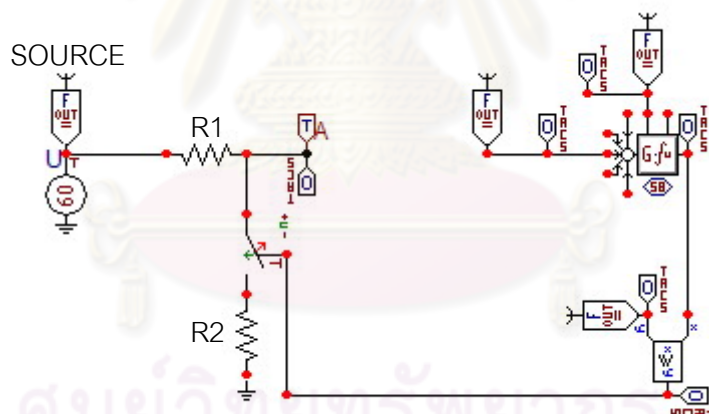
รูปที่ 3.4 แรงแดันอิมพัลส์หลังคลื่นรูปคลื่น 1.2/50 μs และ 5/50 μs

3.3.1 การสร้างอินทิเกรชันโมเดลในโปรแกรม EMTP

การจำลองเหตุการณ์เบรกดาวนด้วยอินทิเกรชันโมเดลจากโปรแกรม EMTP ทำโดยการแทนแอมป์ด้วย TACS สวิตช์ (type13) [7] โดยใช้อุปกรณ์ TACS ต่างๆทำหน้าที่อินทิเกรทสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมแอมป์ตามสมการอินทิกรัล และเมื่อผลการอินทิเกรทได้ค่าที่เกินกว่า DE ก็ส่งสัญญาณให้สับสวิตช์ ซึ่งก็เหมือนกับการเกิดเบรกดาวนขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 3.5 การสร้างอินทิเกรชันโมเดลจากวงจร TACS



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการใช้ TACS สร้างอินทิเกรชันโมเดล

จากวงจร TACS ตัวต้านทาน $R1$ และ $R2$ มีค่าน้อยมากประมาณศูนย์ ใส่เพื่อให้โปรแกรม EMTP และ TACS สามารถทำการคำนวณได้ แต่เนื่องจาก TACS สวิตช์ก่อนที่เกิดการเบรกดาวนจะไม่มีกระแสไหลผ่านสวิตช์ ดังนั้นถึงแม้ว่า $R1$ และ $R2$ มีค่าไม่เป็นศูนย์ก็จะมีแรงดันตกคร่อม $R1$ และ $R2$ เลย แรงดันที่ตกคร่อมแอมป์จึงมีค่าเท่ากับที่แรงดันที่แหล่งกำเนิดทุกประการ และเมื่อโปรแกรมได้เริ่มการคำนวณกระทั่งผลการอินทิเกรทออกมามีค่าเกินกว่า DE จากสมการก็เปรียบเสมือนว่าแอมป์ได้เกิดการเบรกดาวน

บทที่ 4

กระบวนการทดสอบหาเส้นโค้งแรงดัน-เวลา

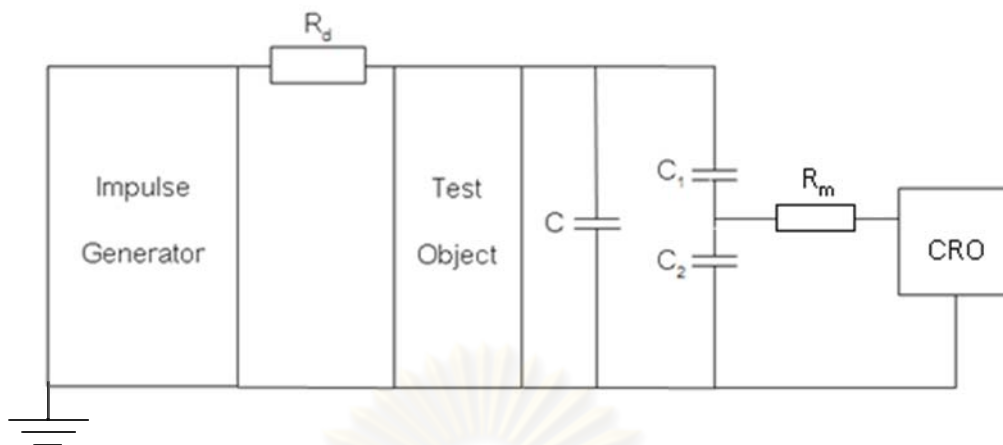
การทดสอบว่าโมเดลมีความถูกต้องหรือไม่ จำเป็นต้องเปรียบเทียบผลการจำลอง การเกิดเบรกดาวนด้วยเส้นโค้งแรงดัน-เวลา เพราะที่ไม่สามารถตรวจสอบด้วยวิธีการเปรียบเทียบ รูปคลื่นอิมพัลส์ที่เบรกดาวนกรณีใดกรณีหนึ่ง เนื่องจากการเกิดเบรกดาวนเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถคาดการณ์ขนาดของแรงดัน และเวลาเบรกดาวนล่วงหน้าได้ ดังนั้นจึงเปรียบเทียบโดยการ เทียบผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลา ของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กระบบ 22 kV และ 33 kV กับเส้นโค้ง แรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดสอบจริง เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลว่าสามารถ จำลองการเกิดเบรกดาวนของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กที่ระดับแรงดัน และ รูปคลื่นต่างๆได้อย่างถูกต้อง เหมาะสมหรือไม่

การเลือกรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าสำหรับใช้ทดสอบเพื่อหาเส้นโค้งแรงดัน-เวลาจะใช้ รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามนิยามใน IEC 60-1 [8] คือ รูปคลื่นหน้าคลื่นไม่เกิน 20 μs ซึ่งได้เลือกรูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs และ รูปคลื่นที่ไม่ใช้รูปคลื่นมาตรฐาน 5/50 μs ในการทดสอบเพื่อ ศึกษาผลจากรูปคลื่นที่ไม่ใช้รูปคลื่นมาตรฐานด้วย เพราะต้องการตรวจสอบว่าโมเดลเบรกดาวน สามารถใช้งานกับรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะอื่นที่ไม่ใช่รูปคลื่นมาตรฐานได้หรือไม่

เลือกทดสอบคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กของหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 22 kV และ 33 kV เพื่อ ศึกษาผลของการใช้โมเดลจำลองการเกิดเบรกดาวนของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก โดยระยะแกปที่เลือกมา ศึกษา มี 2 ระยะ ได้แก่ ระยะ 15.5 cm และ 22 cm ซึ่งเป็นระยะแกปอากาศของอาร์กชิงฮอร์นตรง ตามแบบของระบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 22 kV และ 33 kV [9]

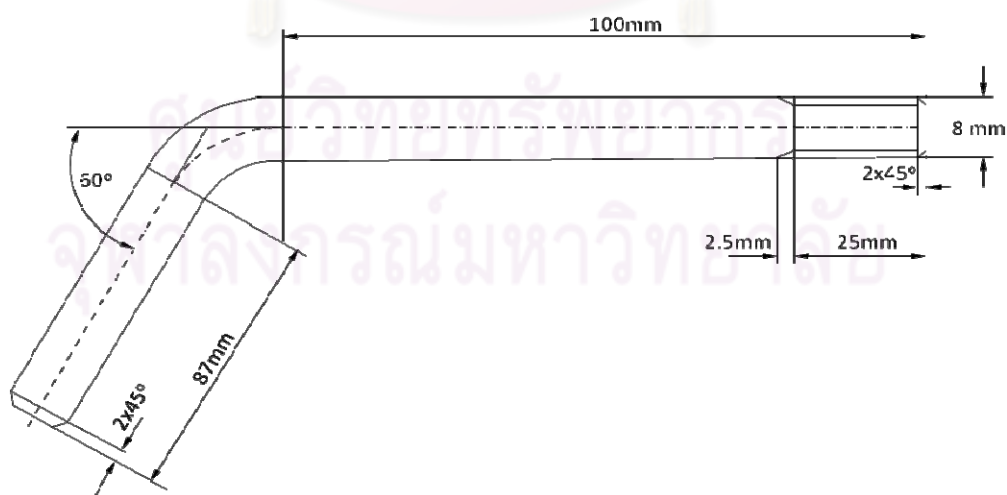
4.1 วงจรทดสอบ

สร้างรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าตามต้องการจากรังสีอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยวัดสัญญาณ รูปคลื่นอิมพัลส์ที่เบรกดาวนด้วยโวลเตจดีไวเดอร์ และวงจรทดสอบมีลักษณะดังรูปที่ 4.1 โดยที่ C คือ ตัวเก็บประจุซึ่งใช้สำหรับปรับรูปคลื่น C_1 , C_2 เป็นตัวเก็บประจุแรงสูงและแรงต่ำของอิมพัลส์ โวลเตจดีไวเดอร์, R_d คือ ความต้านทานหน่วงสำหรับปรับหน้าคลื่น, R_m คือ ความต้านทานแมทซิง, CRO คือ ออสซิลโลสโคป และ Test Object คือ คู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก

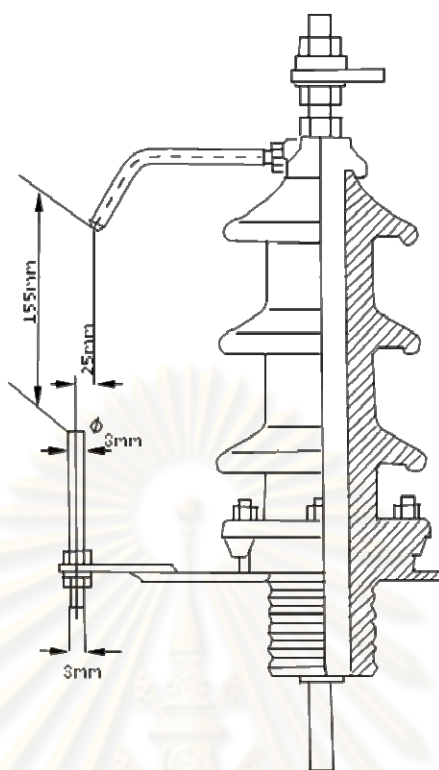


รูปที่ 4.1 วงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

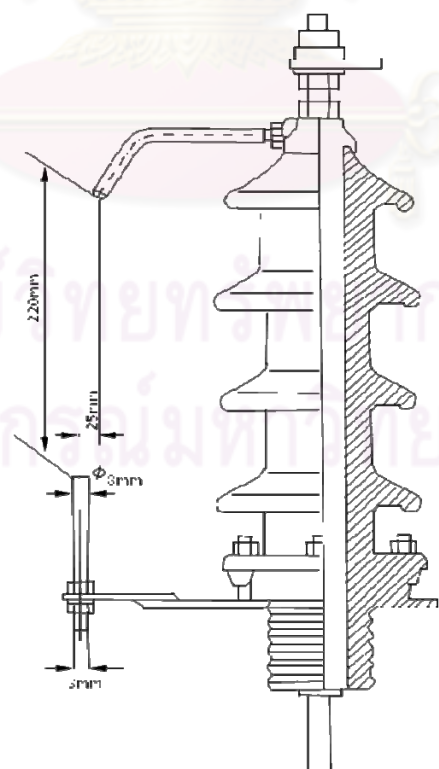
สำหรับอิลีกโตรดของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กในหม้อแปลงระบบ 22 kV และ 33 kV อิลีกโตรดของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกและทำจากสแตนเลส มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ที่ 8 mm โดยที่อิลีกโตรดฝั่งที่รับแรงดันอิมพัลส์จากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์มีความยาว 100 mm และที่บริเวณส่วนปลายของอิลีกโตรดจะเอียงทำมุม 60° และมีความยาวในส่วนปลายของอิลีกโตรดที่ 87 mm เพื่อให้ระยะอาร์กของอิลีกโตรดทั้งสองน้อยกว่าระยะอาร์กของบุชชิ่ง โดยที่อิลีกโตรดทั้งสองของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ 22 kV และ 33 kV จะมีระยะห่างอยู่ที่ 155 mm และ 220 mm และอิลีกโตรดตัวล่างฝั่งที่ต่อกราวด์จะมีระยะเยื้องกับอิลีกโตรดฝั่งแรงสูงอยู่ที่ 25 mm ทั้งในหม้อแปลงระบบ 22 kV และ 33 kV ดังรูปที่ 4.2 - 4.4



รูปที่ 4.2 อิลีกโตรดของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ 22 kV และ 33 kV



รูปที่ 4.3 คู่ชี้เบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงในระบบ 22 kV



รูปที่ 4.4 คู่ชี้เบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงในระบบ 33 kV

4.2 การหาค่าแรงดันเบรกดาวน50%

หาค่า $V_{50\%}$ ของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กของหม้อแปลงไฟฟ้าในระบบ 22 kV และ 33 kV ด้วยวิธีปรับขึ้นและลงเพราะเป็นวิธีที่สะดวก โดยมีจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันขึ้นและลงเป็นจำนวน 20 ครั้ง บันทึกอุณหภูมิ, ความชื้น และ ความดันอากาศ ระหว่างการทดสอบนำข้อมูลแรงดันเบรกดาวนที่ได้ทั้งหมดจากการทดสอบมาหาค่า $V_{50\%}$ โดยการหาค่าเฉลี่ยจากข้อมูลแรงดันเบรกดาวนทั้ง 20 ค่า ทำการปรับค่าเฉลี่ยแรงดันเบรกดาวนทุกกรณีให้เป็นค่าในสภาวะมาตรฐานดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 $V_{50\%}$ ของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กในระบบ 22 kV และ 33 kV

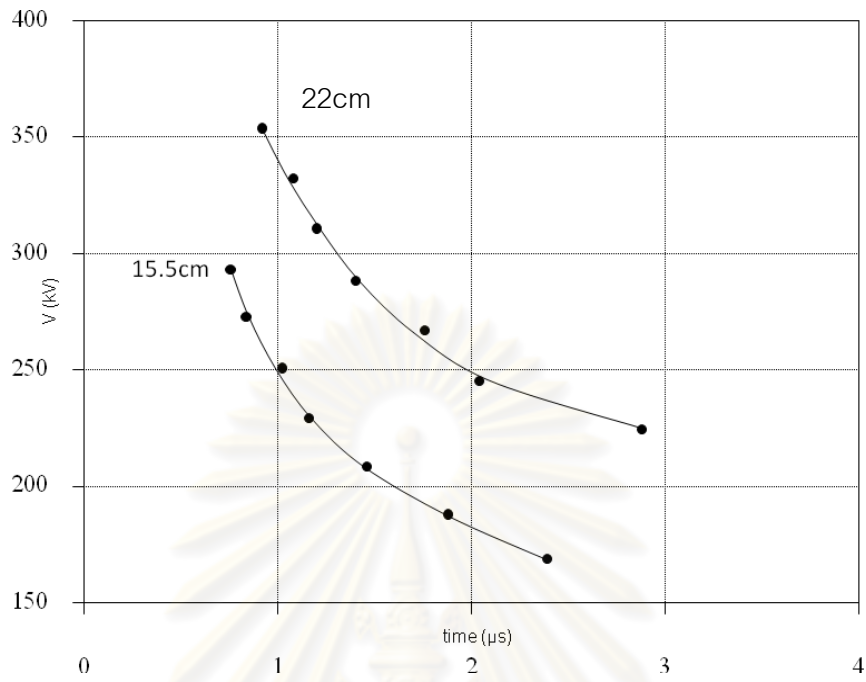
รูปคลื่น	ขั้ว	15.5 cm	22 cm
1.2/50 μ s	+	148.12kV	193.46kV
	-	157.14kV	209.62kV
5/50 μ s	+	147.50kV	190.07kV
	-	160.00kV	221.40kV

4.3 การสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลา

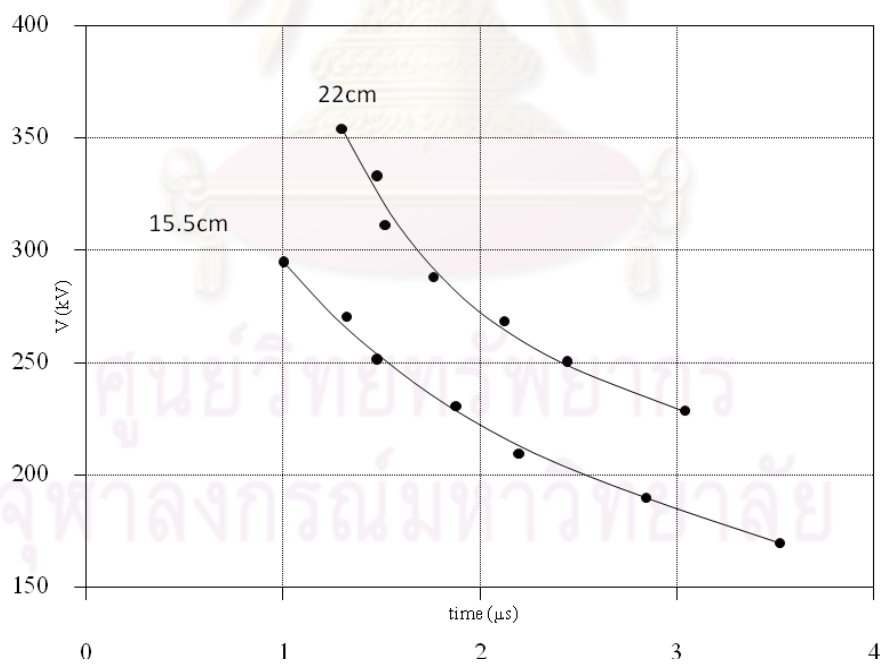
หาเส้นโค้งแรงดัน-เวลาโดยใช้วิธีระดับแรงดันคงที่ เลือกระดับค่ายอดแรงดันที่จะป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าอย่างน้อย 4 ระดับเพื่อให้ได้จุดเส้นโค้งแรงดัน-เวลา เพราะการสร้างเส้นโค้งจากจุดเหล่านั้นต้องมีจุดอย่างน้อย 4 จุดจึงสามารถสร้างเส้นโค้งได้ ในแต่ละระดับแรงดันที่เลือก ป้อนแรงดันให้เกิดการเบรกดาวนเป็นจำนวน 10 ครั้งเพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาหาค่าเฉลี่ยแรงดัน โดยบันทึกค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดเบรกดาวนและเวลาเบรกดาวน ดังนั้นคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กในระบบ 22 kV และ 33 kV จะได้ข้อมูลแรงดันและเวลาเบรกดาวน 10 ค่าเท่ากันหมดในแต่ละระดับแรงดัน บันทึกอุณหภูมิ, ความชื้น และ ความดันอากาศ ในทุกระดับแรงดันที่เลือกทดสอบ เพื่อนำไปใช้สำหรับปรับแรงดันให้เป็นค่าในสภาวะมาตรฐาน

การสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลาในการเลือกข้อมูลเวลาเบรกดาวน จะเลือกค่ามัธยฐานกลางเป็นตัวแทนของแต่ละชุดข้อมูลเวลาเบรกดาวนโดยนำเวลาเบรกดาวนทั้ง 10 ค่าที่ได้มาจากแต่ละระดับแรงดันมาหาค่ามัธยฐานกลางเพื่อหาความน่าจะเป็นของเวลาเบรกดาวน

เมื่อได้ข้อมูลมาแล้วจึงนำมาพล็อตกราฟระหว่าง แรงดันเบรกดาวนเฉลี่ยกับเวลาเบรกดาวน จะทำให้ได้เส้นโค้งแรงดัน-เวลาดังรูปที่ 4.5 และ 4.6



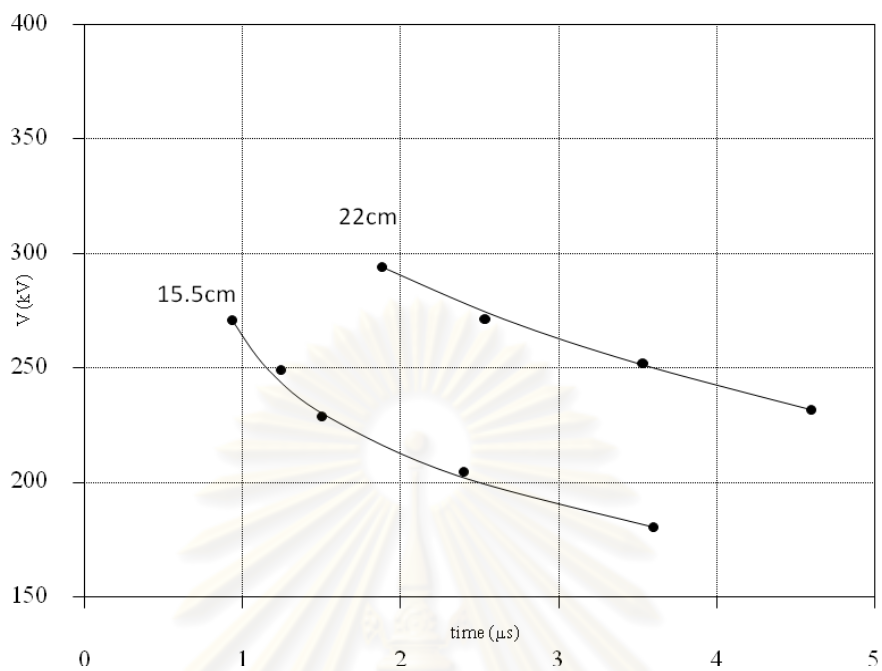
ก) ชั่วบวก



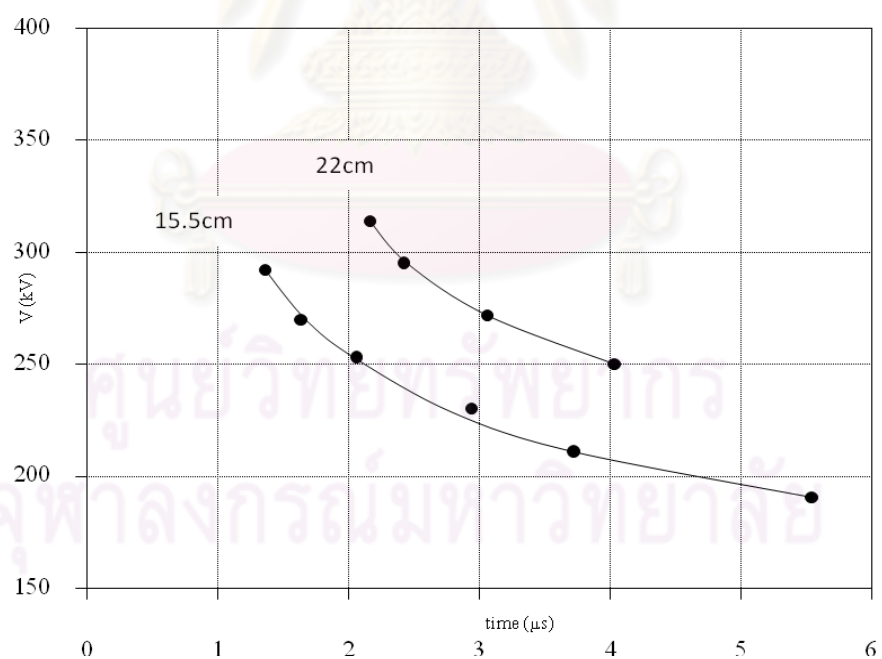
ข) ชั่วลบ

รูปที่ 4.5 เส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่หัวเบี่ยงอาร์กกรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/50 μs สำหรับระยะแกป

15.5 cm และ 22 cm



ก) ขั้วบวก



ข) ขั้วลบ

รูปที่ 4.6 เส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กกรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ 5/50 μs สำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm

บทที่ 5

การจำลองและการวิเคราะห์ผล

5.1 การจำลองการเบรกดาวนซ์ของแก๊ปอากาศ

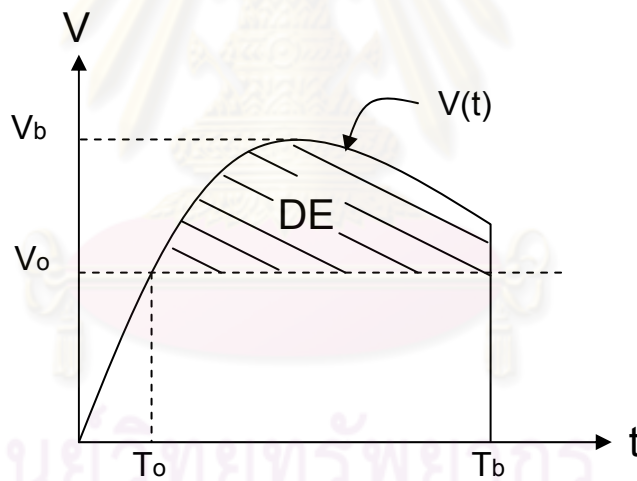
5.1.1 แบบจำลองอินทิเกรชันของ Wanit

แบบจำลองอินทิเกรชันของ Wanit อาศัยหลักการของ Sekioka [4] โดยใช้สมการอินทิกรัลดังสมการ (5.1) คำนวณค่า DE จากสมการ (5.2) และ (5.3)

$$DE = \int_{T_0}^{T_b} (V(t) - V_0)^k dt \quad (5.1)$$

ข้าวบวก $DE = 0.65D - 0.04 \quad (5.2)$

ข้าวลบ $DE = 0.61D - 0.15 \quad (5.3)$



รูปที่ 5.1 แบบจำลองอินทิเกรชัน

โดย	$V(t)$	คือ	รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมแก๊ป
	T_0	คือ	เวลาที่เริ่มอินทิเกรตเมื่อ $V(t) > V_0$
	T_b	คือ	เวลาที่เกิดการเบรกดาวนซ์
	k	คือ	ค่าคงที่แบบจำลองนี้กำหนดให้มีค่าเป็น 1
	V_0	คือ	90% ของ $V_{50\%}$ โดยที่ $V_{50\%}$ เป็นแรงดันที่ทำให้แก๊ปอากาศมีโอกาสเกิดการเบรกดาวนซ์ 50%

สมการหาค่า DE ข้างต้นเป็นสมการที่นิยมใช้กับอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่ง จึงทำการเปรียบเทียบผลจากการใช้สมการหาค่า DE นี้กับเส้นโค้งแรงดัน-เวลาจากการทดสอบ แต่เนื่องจากในกรณีอิมพัลส์ชั่ววูบ ค่า DE ที่คำนวณจากสมการข้างต้นจะมีค่าเป็นลบ เมื่อ $D < 24.6$ cm ซึ่งระยะแกปที่มีค่ามากที่สุดของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กที่ทำการจำลองมีระยะแกปน้อยกว่า 24.6 cm ดังนั้นผู้เขียนจึงต้องสร้างสมการสำหรับหาค่า DE ขึ้นใหม่ โดยแก้สมการอินทิกรัลที่เกิดจากรูปคลื่นอิมพัลส์หลายขนาดกับข้อมูลเวลาเบรกดาวนที่ได้จากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาเพื่อหาค่า DE โดยเวลาที่เริ่มอินทิเกรต คือเวลาที่แรงดันอิมพัลส์มีค่ามากกว่า V_0 ซึ่งก็คือค่า 90% ของ $V_{50\%}$ และเวลาที่หยุดอินทิเกรต คือ เวลาเบรกดาวน การแก้สมการอินทิกรัลหาค่า DE นั้นทำในกรณีของอิมพัลส์ 1.2/50 μs ชั่วววก และ ชั่วลบ ในกรณีอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่ง ที่ระยะแกป 5 ระยะ ได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 28.5 cm ซึ่งได้ข้อมูลเส้นโค้งแรงดัน-เวลาจาก [10-12] และสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE กับระยะแกปทำให้ได้สมการหา DE จากระยะแกป D (m) ขึ้นใหม่โดยเรียกว่าแบบจำลองของ Wanit ดังนี้

$$\text{ชั่วววก} \quad DE = 0.3705D - 0.0014 \quad (5.4)$$

$$\text{ชั่วลบ} \quad DE = 0.5173D - 0.0144 \quad (5.5)$$

5.1.2 แบบจำลองอินทิเกรชันของ Chowdhuri [11]

ใช้สมการอินทิกรัลดังสมการ (5.6)

$$DE = \int_{T_0}^{T_B} (V(t) - V_0)^k dt \quad (5.6)$$

อินทิเกรชันโมเดลของ Chowdhuri แทนค่า k ด้วย $\alpha V(t)/V_0$ โดย α เป็นค่าคงที่ เหตุผลที่ให้ k ไม่เป็นค่าคงที่เพราะความเร็วของลีดเดอร์จะมีค่าสูงขึ้นตามสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันอิมพัลส์มีค่าสูงขึ้น V_0 เป็นค่าระดับแรงดันที่มีโอกาสน้อยมากที่จะทำให้เกิดการเบรกดาวน โดยสามารถคำนวณได้จากค่า $V_{50\%}$ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากผลการทดสอบ V_0 เป็นค่าคงที่จำเพาะระยะแกปและรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หนึ่งๆ เมื่อคำนวณหาค่า V_0 ได้แล้วสามารถคำนวณหาค่า α และ DE จากข้อมูลผลการทดลองที่หลายๆระดับแรงดันเบรกดาวนซึ่งมีเวลาการเกิดเบรกดาวนแตกต่างกัน โดยใช้สมการที่ (5.6) ดังนั้นค่าของทั้ง α และ DE จึงขึ้นกับลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ระยะแกป และอิเล็กทรอนิกส์

5.1.3 แบบจำลองอินทิเกรชันของ Kind [11]

ใช้สมการอินทิกรัลดังสมการ (5.7)

$$DE = \int_{T_0}^{T_B} (V(t) - V_0)^k dt \quad (5.7)$$

อินทิเกรชันโมเดลของ Kind จะใช้ค่า $k=1$ เช่นเดียวกับอินทิเกรชันโมเดลของ Sekioka สำหรับค่า V_0 และ DE สามารถคำนวณหาค่าได้จากข้อมูลผลการทดลองที่หลายระดับ แรงดันเบรกดาวน์ซึ่งมีเวลาการเกิดเบรกดาวน์แตกต่างกัน โดยใช้สมการที่ (5.7) ดังนั้นค่าของทั้ง DE จึงขึ้นกับลักษณะรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ระยะเวลา และอิเล็คโตรดเช่นเดียวกับอินทิเกรชันโมเดลของ Chowdhuri

5.2 เส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิเล็คโตรดแบบแท่ง-แท่ง

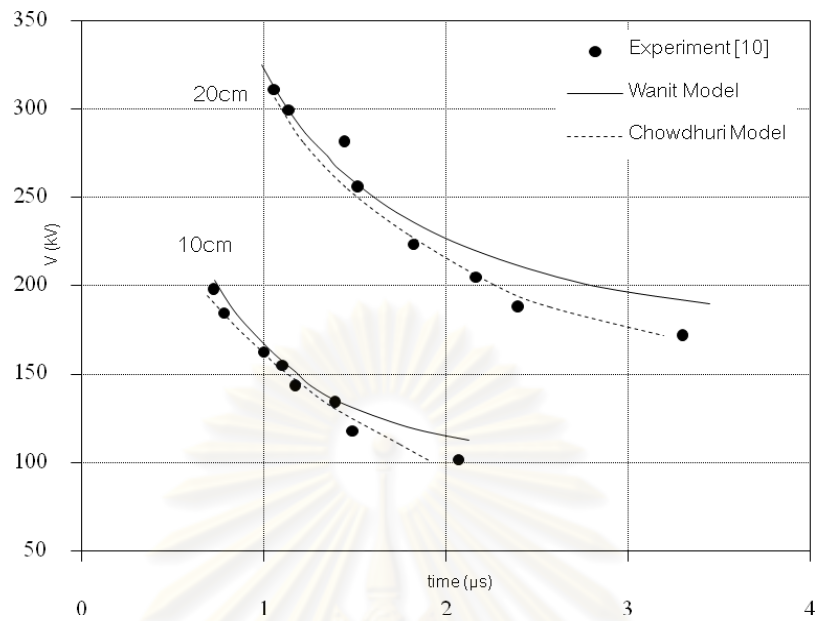
5.2.1 กรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s

5.2.1.1 การเปรียบเทียบแบบจำลองของ Wanit กับแบบจำลองของ Chowdhuri ตารางที่ 5.1 แสดงค่า α , DE และ V_{50} [11] ใช้กับแบบจำลองของ Chowdhuri

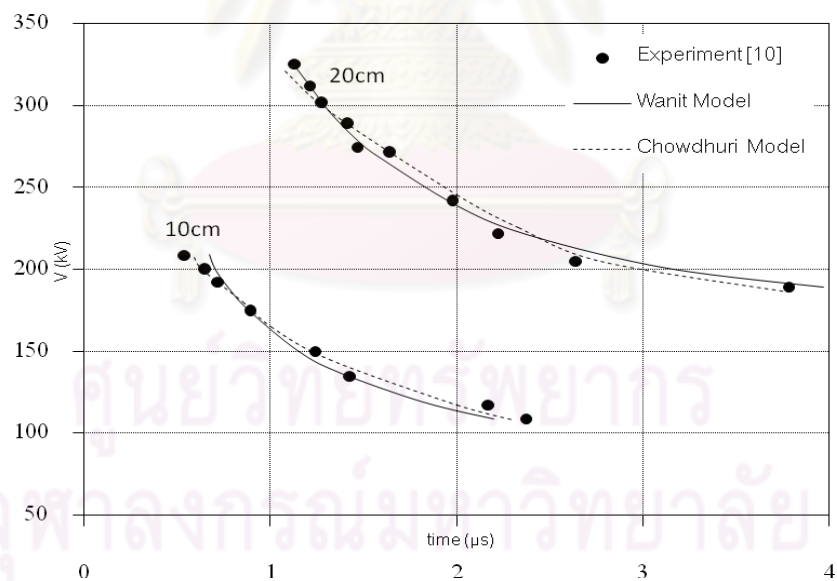
ตารางที่ 5.1 ค่า α , DE และ $V_{50\%}$ ของอิเล็คโตรดแบบแท่ง-แท่ง

รูปคลื่น		10 cm			20 cm		
		α	DE	$V_{50\%}$ (kV)	α	DE	$V_{50\%}$ (kV)
1.2/50	+	0.044	6.20e-03	94	0.065	12.8e-03	165
	-	0.111	11.9e-03	97	0.087	20.8e-03	174

ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาจากแบบจำลองของ Wanit เปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Chowdhuri ในกรณีอิเล็คโตรดแบบแท่ง-แท่ง ที่ระยะเวลา 10 cm และ 20 cm ด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s ดังรูปที่ 5.2 โดยแบบจำลองของ Wanit ใช้หาค่า DE จากสมการที่ (5.4) และ (5.5) และใช้ค่า $V_{50\%}$ จากตารางที่ 5.1 นำมาหาค่า V_0



(ก) ชั่วบวก



(ข) ชั่วลบ

รูปที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของ Wanit และ Chowdhuri กรณีอิเล็กโตรดแบบแท่ง-แท่งสำหรับระยะแกป 10 cm และ 20 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า 1.2/50 μs ก) ชั่วบวก, ข) ชั่วลบ

จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองอินทิเกรชันของ Chowdhuri สามารถจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลา ได้ใกล้เคียงกับผลที่ได้จากทดลองจริงมากกว่าทั้งในกรณีแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอก และชั่วลบ เพราะค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองคำนวณมาจากข้อมูลจากการทดลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลา ซึ่งทำให้เกิดความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลอง เนื่องจาก DE และ α ในแต่ละกรณีมีค่าแตกต่างกันไปเมื่อเปลี่ยนระยะแกป รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ ชั่วของแรงดัน และชนิดอิเล็กโทรด อีกทั้งสมการอินทิเกรชันที่ใช้มีความซับซ้อนกว่าแบบจำลองของ Wanit ถึงแม้ว่าแบบจำลองของ Chowdhuri จะให้เส้นโค้งที่ผ่านจุดซึ่งเลือกมาแก้สมการอินทิกรัลเกือบทุกจุด แต่ก็ไม่เหมาะกับการใช้งานทั่วไปเพราะต้องคำนวณหาค่า DE และ α จากเส้นโค้งแรงดัน-เวลาก่อนเสมอ และไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของค่า DE และ α ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของชั่วแรงดัน เวลาหน้าคลื่น หรือแม้แต่ระยะแกปได้เลย และผลการจำลองในบางกรณียังให้ความโค้งที่น้อยเกินไป สำหรับแบบจำลองอินทิเกรชันของ Wanit ถึงแม้จะให้ผลการจำลองที่ไม่แม่นยำเท่ากับแบบจำลองอินทิเกรชันของ Chowdhuri แต่ก็คลาดเคลื่อนจากกันไม่มาก ที่สำคัญแบบจำลอง อินทิเกรชันของ Wanit นั้นต้องการข้อมูลแค่ค่า $V_{50\%}$ ก็สามารถคำนวณหาค่า V_0 และ DE มาสร้างแบบจำลองได้อย่างสะดวกรวดเร็ว ไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลเส้นโค้งแรงดัน-เวลา จากการทดสอบมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง และการอินทิเกรทก็ทำได้ง่ายเนื่องจากใช้ค่า $k=1$

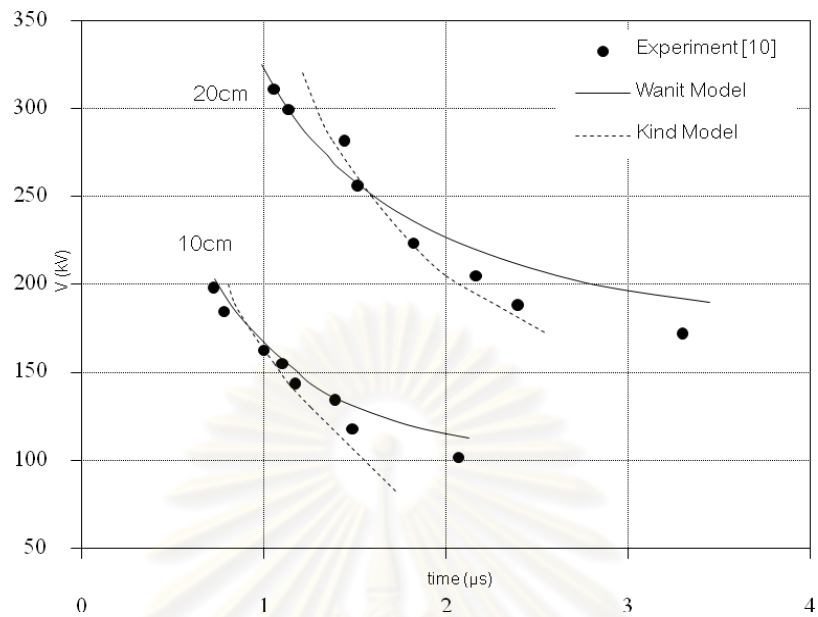
5.2.1.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองของ Wanit กับแบบจำลองของ Kind กรณีอิเล็กโทรดแบบแท่ง-แท่ง

ตารางที่ 5.2 แสดงค่า DE และ V_0 [11] ใช้กับแบบจำลองของ Kind

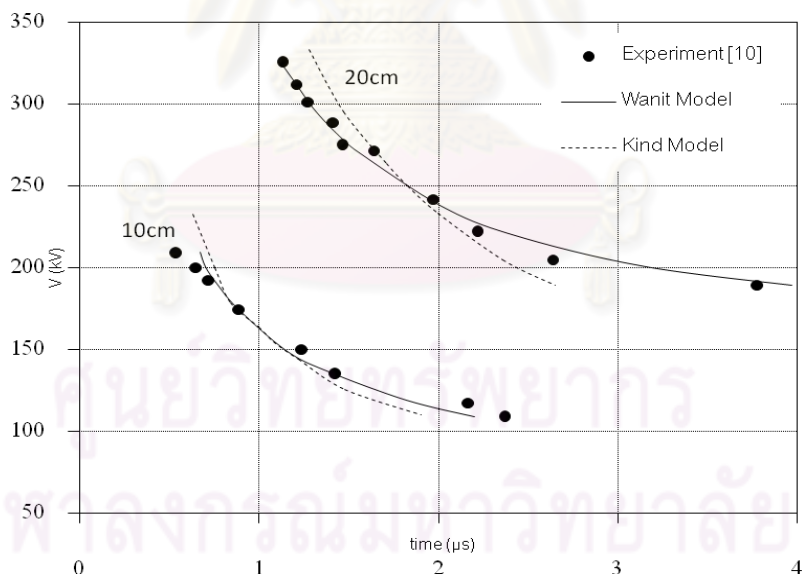
ตารางที่ 5.2 ค่า DE และ V_0 ของอิเล็กโทรดแบบแท่ง-แท่ง

รูปคลื่น		10cm		20cm	
		DE	$V_{50\%}$ (kV)	DE	$V_{50\%}$ (kV)
1.2/50	+	14e-03	94	15e-03	165
	-	22e-03	97	22e-03	174

ผลการจำลองแบบจำลองของ Kind เปรียบเทียบกับแบบจำลองของ Wanit ในกรณีอิเล็กโทรดแบบแท่ง-แท่ง ที่ระยะ 10 cm และ 20 cm ด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/50 μ s ดังรูปที่ 5.3 โดยแบบจำลองของ Wanit หาค่า DE จากสมการที่ (5.4) และ (5.5) และใช้ค่า $V_{50\%}$ จากตารางที่ 5.2 นำมาหาค่า V_0



(ก) ขั้วบวก



(ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของ Wanit และ Kind กรณีอิเล็กโทรดแบบแท่ง-แท่งสำหรับระยะแกป 10 cm และ 20 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ

จากรูปที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าอินทิเกรชันโมเดลของ Kind ให้ผลคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควรโดยเฉพาะกรณีอิมพัลส์ชั่ววอก ผลการจำลองที่ได้ยังมีลักษณะความโค้งที่ไม่เหมือนเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากการทดลอง และในกรณีชั่ววอกที่ระยะแกป 10 cm ที่ระดับแรงดันต่ำก็ให้ผลคลาดเคลื่อนเป็นอย่างมาก ถึงแม้ว่าแบบจำลองอินทิเกรชันของ Kind นั้นจะใช้ค่า $k=1$ เช่นเดียวกับแบบจำลองอินทิเกรชันของ Wanit แต่ผลที่ได้ออกมามีความคลาดเคลื่อนในทุกกรณี และยังยุ่งยากต่อการสร้างแบบจำลองมากกว่าแบบจำลองของ Wanit เพราะค่า DE จะต้องคำนวณใหม่เมื่อเปลี่ยนระยะแกป, ชั่วแรงดัน, รูปคลื่นอิมพัลส์ และ ยังคงต้องพึ่งข้อมูลการจากการทดลองมาสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลา แต่อินทิเกรทได้ง่ายกว่าแบบจำลองของ Chowdhuri แต่ผลการจำลองที่ได้ก็ยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร

โดยสรุปแล้วในทางปฏิบัติแบบจำลองอินทิเกรชันของ Kind ไม่เหมาะสำหรับนำมาจำลองหาเส้นโค้งแรงดัน-เวลา เพราะมีความยุ่งยากต่อการใช้งานเนื่องจากต้องหาค่า DE เป็นกรณีไป เช่นเดียวกับแบบจำลอง Chowdhuri และเนื่องจากแบบจำลองนี้ไม่ได้เสนอการหาค่า DE จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE กับระยะแกปออกมาเป็นสมการเพื่อความสะดวกต่อการใช้งานเหมือนกับสมการหาค่า DE จากแบบจำลองของ Wanit ดังที่ได้เสนอไว้ใน (5.4) และ (5.5)

5.2.2 กรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/4 μ s

จากการทดสอบแบบจำลองด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานกรณีอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่ง โดยใช้ค่า DE จากสมการที่ (5.4) และ (5.5) สามารถจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาออกมาได้อย่างใกล้เคียง แต่ในเหตุการณ์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังในบางครั้ง อาจทำให้เกิดแรงดันเสิร์จที่มีลักษณะเป็นคลื่นชนิดหางคลื่นสั้นอยู่บ้าง จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบแบบจำลองกับคลื่นชนิดนี้ด้วย เพื่อทดสอบว่าแบบจำลองที่เสนอขึ้นใหม่ยังคงสามารถใช้งานได้ดีกับคลื่นชนิดหางคลื่นสั้นนี้ได้หรือไม่ และเป็นการตรวจสอบว่าแบบจำลองสามารถใช้งานที่หน้าคลื่นต่าง ๆ ได้อย่างครอบคลุมเพียงไร จึงจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทำการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่กรณีอิมพัลส์ฟ้าผ่าหางคลื่นสั้นที่ 1.2/4 μ s โดยใช้ข้อมูลของ $V_{50\%}$ และเส้นโค้งแรงดัน-เวลาจาก [12] ซึ่งเป็นผลจากการทดสอบที่ระยะแกป 10 cm และ 20 cm ด้วยอิเล็กทรอนิกส์แบบแท่ง-แท่ง ดังข้อมูลในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่า $V_{50\%}$ กรณีอิเล็คโตรดแบบแบ่ง-แบ่ง [12]

รูปคลื่น	ขั้ว	10 cm	20 cm
		$V_{50\%}$ (kV)	$V_{50\%}$ (kV)
1.2/4 μ s	+	114	196
	-	120	222

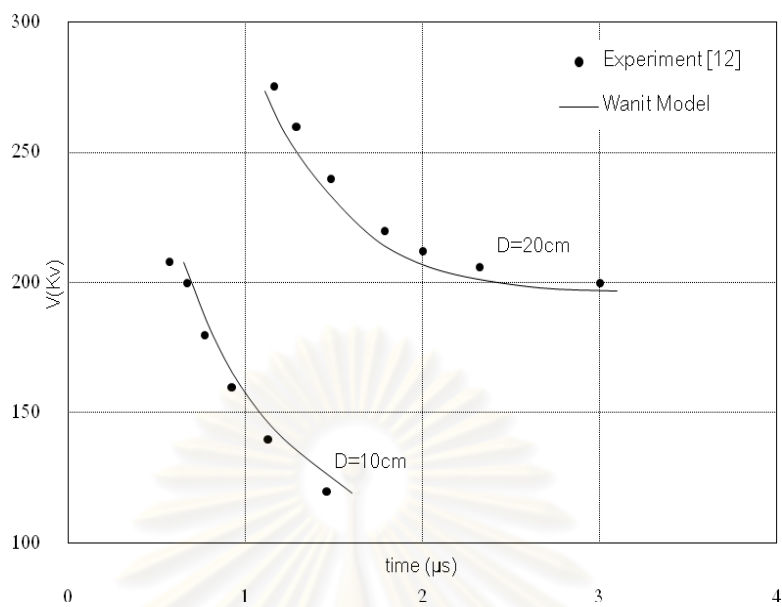
จากตารางที่ 5.3 เป็นข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์ $V_{50\%}$ ของอิเล็คโตรดแบบแบ่ง-แบ่ง ซึ่งเป็นผลการทดสอบจากงานวิจัย [12] สำหรับการจำลองเส้นโค้งแรงดันเวลาในกรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/4 μ s คำนวณค่า DE และ V_0 ในลักษณะเดียวกันกับกรณีอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานดังตารางที่ 5.4 เพื่อศึกษาผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลา ว่าแบบจำลองยังสามารถใช้งานได้ดีกับกรณีหน้าคลื่นชนิดนี้หรือไม่

ตารางที่ 5.4 ค่า DE และ V_0 ของอิเล็คโตรดแบบแบ่ง-แบ่ง

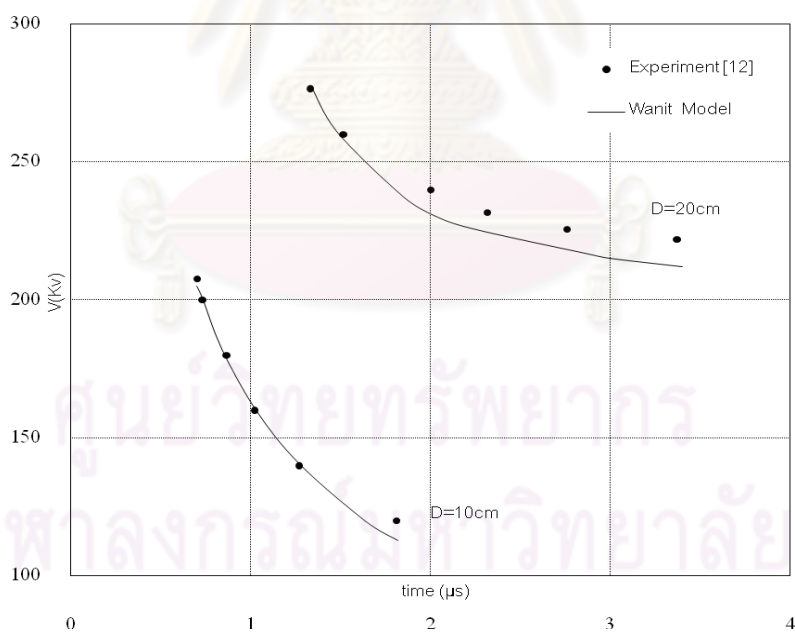
รูปคลื่น	ขั้ว	DE	V_0
1.2/4 μ s	+	0.3705D - 0.0014	$0.9 \cdot V_{50\%}$
	-	0.5173D - 0.0144	$0.9 \cdot V_{50\%}$

จากการทดสอบแบบจำลองด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าชนิดหางคลื่นสั้น 1.2/4 μ s สำหรับอิเล็คโตรดแบบแบ่ง-แบ่งที่ระยะแกป 10 cm และ 20 cm ทั้งกรณีขั้วบวก และขั้วลบ สามารถใช้ค่า DE จากตารางที่ 5.4 ในการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาได้เป็นอย่างดีดังแสดงในรูปที่ 5.4 ถึงแม้ว่าในกรณี อิมพัลส์ขั้วลบที่ระยะแกป 20 cm เส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่จำลองออกมาจะให้ผลที่ต่ำกว่าความเป็นจริงอยู่พอสมควร อันเนื่องมาจากค่า DE จากสมการที่คำนวณได้มีค่าน้อยเกินไปจึงทำให้แบบจำลองมีการเบรกดาวน์เร็วกว่าที่ควร แต่แบบจำลองก็ให้ผลการจำลองของเส้นโค้งที่มีลักษณะความโค้งที่เหมือนกับผลจากการทดสอบจริง และในกรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ขั้วบวกผลจากการจำลองโดยใช้ค่า DE จากตารางที่ 5.4 ยังคงให้ผลการจำลองที่มีความใกล้เคียงเป็นอย่างมากทั้งระยะแกป 10 cm และ 20 cm โดยที่เส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่ได้จากแบบจำลองให้ผลที่ใกล้เคียงกับจุดทุกจุด และยังมีความโค้งที่สอดคล้องกับผลจากการทดสอบ

จะสังเกตได้ว่าเส้นโค้งแรงดัน-เวลา จากแบบจำลองในช่วงเวลาก่อน 2 μ s ให้ผลการจำลองที่ใกล้เคียงเป็นอย่างมากโดยเฉพาะกับกรณีระยะแกป 10 cm เป็นการเบรกดาวน์ในช่วงเวลาหน้าคลื่นโดยส่วนใหญ่ ต่างกับในช่วงที่เกิดการเบรกดาวน์หลังคลื่นที่เวลา 2 μ s เป็นต้น



ก) ขั้วบวก



ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.4 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณีอิเล็กโตรดแบบแท่ง-แท่ง สำหรับระยะแก๊ป 10 cm และ 20 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า 1.2/4 μs ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ

5.3 เส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก

5.3.1 กรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs

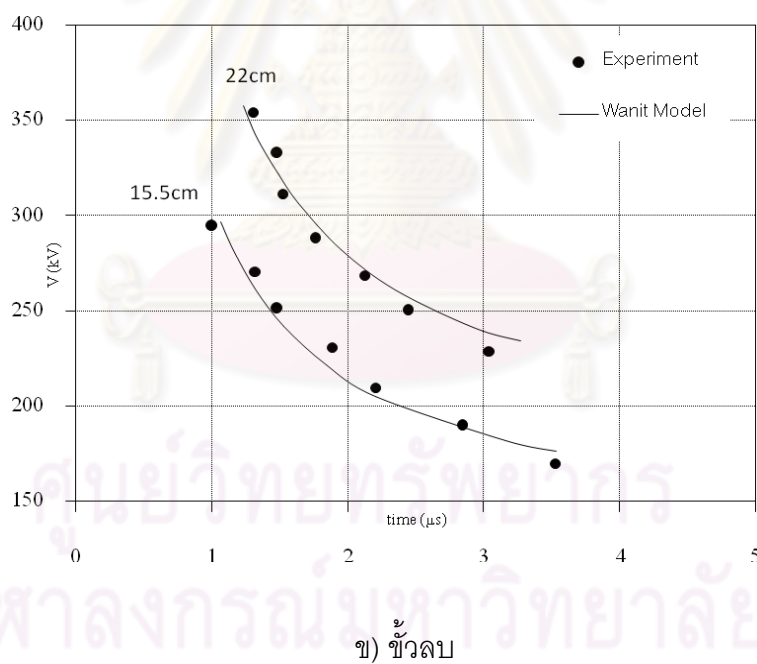
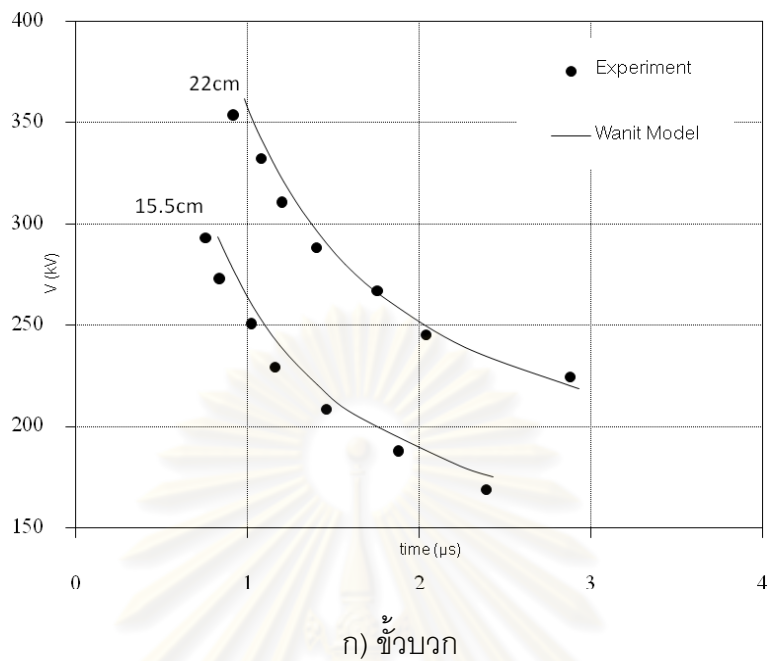
นำแบบจำลองเบรกดาวน์ที่ใช้ในกรณีอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่งมาจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้าระบบ 22 kV และ 33 kV ด้วยแบบจำลองอินทิเกรชันของ Wanit ทั้งขั้วบวก และ ขั้วลบ โดยใช้ข้อมูลสำหรับการจำลองจากตารางที่ 4.1 และ 5.5 เปรียบเทียบกับเส้นโค้งแรงดัน-เวลาจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงดังแสดงในรูปที่ 5.5

จะเห็นได้ชัดว่าผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาสำหรับคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กกรณีคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs ขั้วบวกและขั้วลบจากการสมการหาค่า DE ที่เสนอขึ้นใหม่ดังสมการที่ (5.4) และ (5.5) ให้ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กที่ระยะแกป 15.5 และ 22 cm ได้อย่างใกล้เคียงมาก ดังนั้นการใช้อินทิเกรชันโมเดลกับค่า DE จากสมการที่ (5.4) และ (5.5) สำหรับการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของรูปคลื่นอิมพัลส์มาตรฐาน 1.2/50 μs และเพื่อใช้ประโยชน์ในการออกแบบคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กอย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความสะดวกเป็นอย่างมาก เพราะเพียงแค่อ่านค่า $V_{50\%}$ ก็สามารถจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาได้ทันที

ตารางที่ 5.5 ค่า DE และ V_0 ของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก

รูปคลื่น	ขั้ว	DE	V_0
1.2/50 μs	+	0.3705D - 0.0014	$0.9 \cdot V_{50\%}$
	-	0.5173D - 0.0144	$0.9 \cdot V_{50\%}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



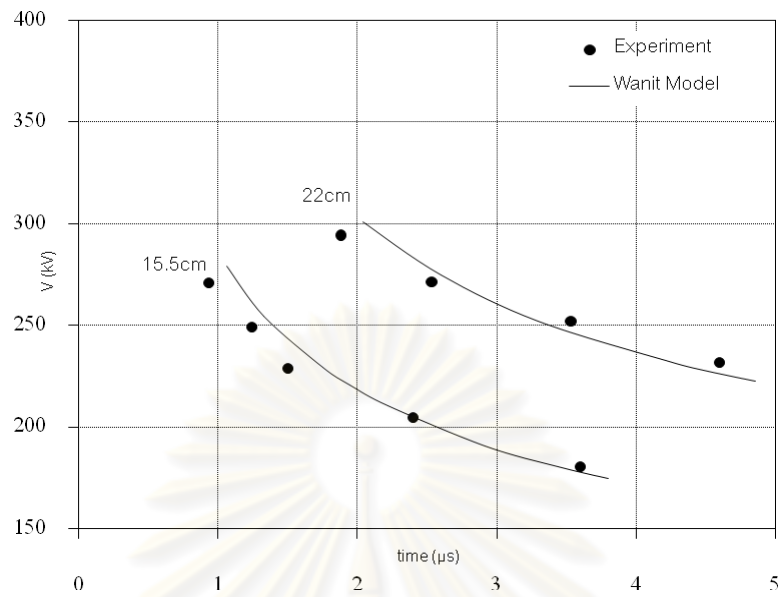
รูปที่ 5.5 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า 1.2/50 μs
 ก) ชั่วบวก, ข) ชั่วลบ

5.3.2 กรณีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 5/50 μ s

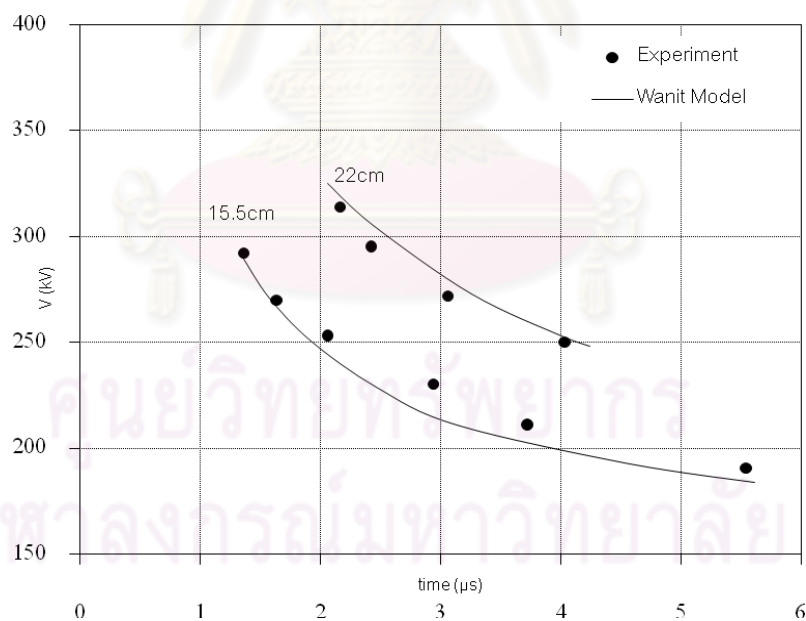
การเลือกศึกษารูปคลื่นที่ไม่ใช่รูปคลื่นมาตรฐาน เพื่อดูว่าผลของแบบจำลองเบรกดาวนสามารถใช้กับรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าลักษณะอื่นนอกเหนือจากรูปคลื่นมาตรฐานได้หรือไม่ เพราะในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังเหตุการณ์การเกิดแรงดันเกินส่วนใหญ่ มักเกิดมาจากฟ้าผ่าลงที่สายส่งไฟฟ้าโดยตรง หรือ ฟ้าผ่าบริเวณสายโอเวอร์เฮดกราวด์ (Over Head Ground Wire) แล้วเหนี่ยวนำเสิร์จฟ้าผ่าเหล่านั้นย้อนกลับไปที่สายส่งไฟฟ้า และเนื่องจากในเหตุการณ์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งไม่อาจคาดเดาถึงผลของรูปคลื่นเหล่านั้นได้ว่าจะออกมาในลักษณะใด แต่จากข้อมูลทางสถิติที่บันทึกกล่าวไว้ว่า ช่วงเวลาหน้าคลื่นของเสิร์จฟ้าผ่าที่พบมักมีค่าไม่เกิน 10 μ s [8] ดังนั้นจึงเลือกทดสอบกับคลื่นที่ไม่ใช่คลื่นมาตรฐานที่ 5/50 μ s ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางของหน้าคลื่นเสิร์จฟ้าผ่าที่พบบ่อยส่วนใหญ่ และทำการทดสอบแบบจำลองการเบรกดาวนด้วยสมการหาค่า DE จากแบบจำลองของ Wanit ดังตารางที่ 4.1 และ 5.5 สมการเดียวกับกรณีที่จำลองด้วยคลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μ s

จากรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองนี้ให้ผลการจำลองที่หน้าคลื่น 5/50 μ s ได้ใกล้เคียงพอสมควรทั้งช่วงบวก และช่วงลบ การจำลองโดยใช้ค่า DE จากสมการตารางที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณีหน้าคลื่น 5/50 μ s ได้เป็นอย่างดีถึงแม้ว่าสมการสำหรับหาค่า DE ทั้งสองสมการนั้นจะสร้างขึ้นมาจากข้อมูลเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของหน้าคลื่น 1.2/50 μ s และเส้นโค้งจากการจำลองที่ได้ออกมาจะไม่ผ่านจุดครบทุกจุด แต่ก็ให้ผลการจำลองออกมาได้ใกล้เคียงกันเป็นอย่างมาก และมีลักษณะความโค้งที่สอดคล้องกันกับผลจากการทดสอบซึ่งสามารถสรุปการใช้ค่า DE และ V_0 เพื่อสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลาได้ดังตารางที่ 5.6

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ชั่วบวก



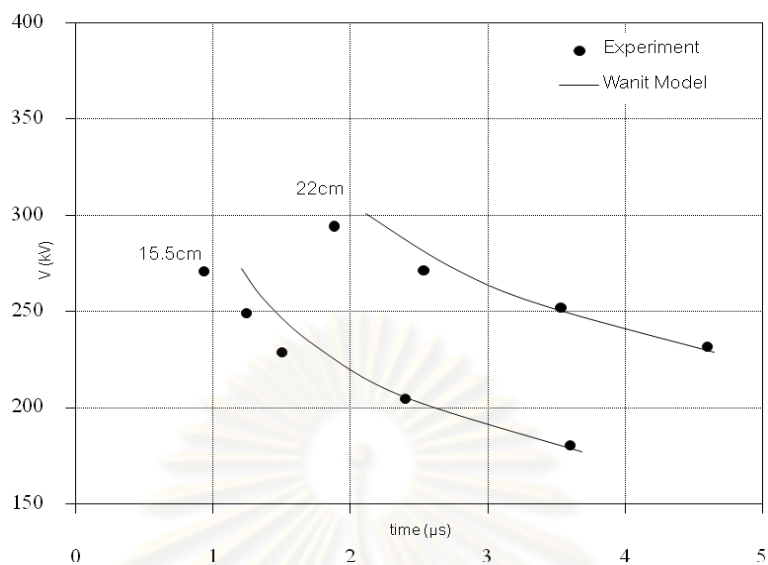
(ข) ชั่วลบ

รูปที่ 5.6 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเป็ยงอาร์กสำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 5/50 μs
 ก) ชั่วบวก, ข) ชั่วลบ

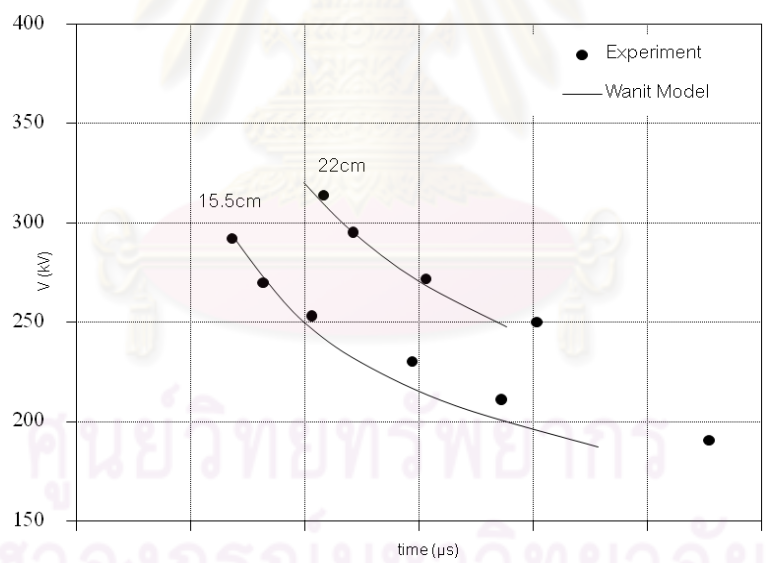
จากการทดสอบแบบจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากับคู่ขั้วเบี่ยงอาร์ก ในหลายกรณีที่ผ่านมาพบว่าแบบจำลองของ Wanit ให้ผลการจำลองได้อย่างใกล้เคียงทั้งในกรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs และในกรณีอิมพัลส์ฟ้าผ่ารูปคลื่นฟ้าผ่า 5/50 μs ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยทั้งสองกรณีสามารถใช้ค่า DE ร่วมกันได้จึงช่วยเพิ่มความสะดวกในการสร้างแบบจำลองยิ่งขึ้น จึงมีแนวคิดที่ว่าถ้าหากแบบจำลองสามารถใช้ค่า V_0 ร่วมกันในการจำลองที่หน้าคลื่นต่างๆได้ในระยะแถบที่เท่ากัน โดยใช้ค่า $V_{50\%}$ ของกรณีอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs ได้จะเป็นการเพิ่มความสะดวกต่อการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาและประหยัดเวลามากยิ่งขึ้น จึงทำการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณีหน้าคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 5/50 μs โดยใช้ค่า $V_{50\%}$ คลื่นมาตรฐาน 1.2/50 μs สำหรับการคำนวณผลของแบบจำลองอินทิกรัลและใช้ค่า DE จากตารางที่ 5.1

จากรูปที่ 5.7 หลังจากที่ใช้ $V_{50\%}$ จากกรณีคลื่นมาตรฐานมาจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาในกรณีแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 5/50 μs จะเห็นได้ว่าแบบจำลองให้ผลการจำลองที่คลาดเคลื่อนจากกรณีที่ใช้ค่า $V_{50\%}$ ของแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 5/50 μs เพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อมูล $V_{50\%}$ ในกรณีที่ทดสอบด้วยรูปคลื่น 1.2/50 μs มีค่าที่ใกล้เคียงกับ $V_{50\%}$ ที่ทดสอบด้วยรูปคลื่น 5/50 μs และเนื่องจาก V_0 เป็นจุดเริ่มต้นในการคำนวณของแบบจำลอง ดังนั้น V_0 จึงมีความสำคัญต่อความแม่นยำของแบบจำลองเป็นอย่างมากเพราะถ้าจุดเริ่มต้นในการคำนวณผิดไปจากที่ควรก็จะส่งผลทำให้การจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลา ออกมาผิดพลาดไปทั้งหมดได้ สำหรับในกรณีนี้จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองของ Wanit สามารถนำค่า $V_{50\%}$ จากการทดลองด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μs มาจำลองหาเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กในกรณีที่ทดสอบด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 5/50 μs ทั้งขั้วบวกและขั้วลบได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ขั้วบวก



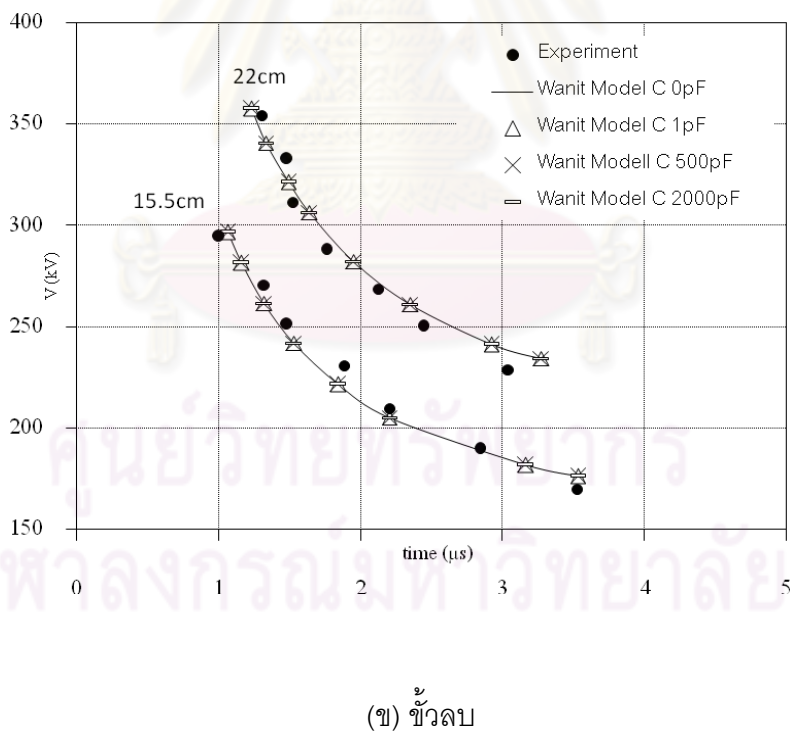
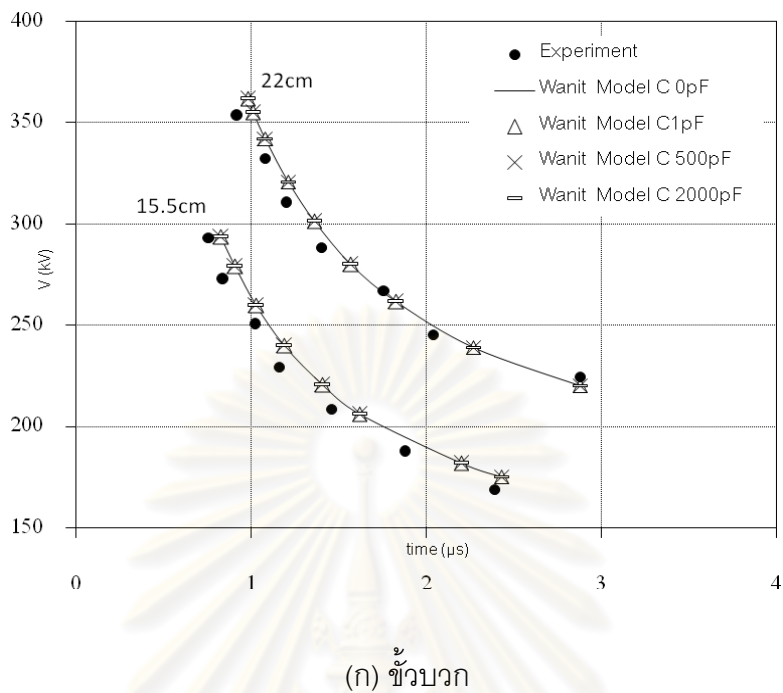
(ข) ขั้วลบ

รูปที่ 5.7 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเป็ียงอาร์กสำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้า 5/50 μs จากการใช้ $V_{50\%}$ กรณีอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน 1.2/50 μs ก) ขั้วบวก, ข) ขั้วลบ

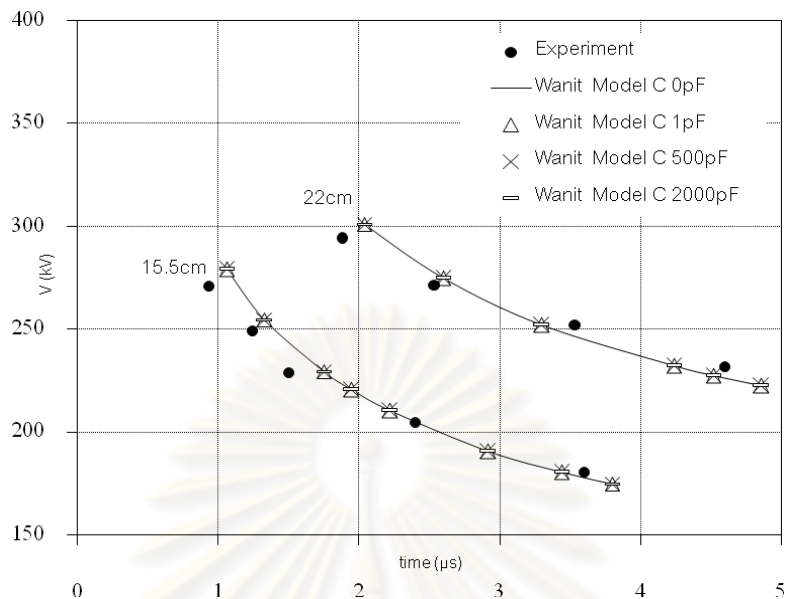
5.3.3 การศึกษาผลกระทบจากความจุไฟฟ้าบริเวณปลอกฉนวนตัวนำแรงสูง

ระยะแกปอากาศของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กที่ติดตั้งอยู่บริเวณ ปลอกฉนวนตัวนำแรงสูง (H.V. Bushing) นั้นมีค่าความจุไฟฟ้าค่าหนึ่งอยู่ จึงทำการใส่ค่าความจุไฟฟ้าต่างๆ ขนานเข้าที่บริเวณแกปอากาศในแบบจำลองโดยใช้ ค่าความจุไฟฟ้าที่ 1 pF, 500 pF และ 2000 pF ซึ่งเป็นค่าความจุไฟฟ้า จากอุปกรณ์ที่ใช้ในสำหรับต่อวงจรทดสอบ เพื่อศึกษาผลกระทบจากความจุไฟฟ้าที่บริเวณแกปอากาศของปลอกฉนวนตัวนำแรงสูง ว่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเบรกดาวนมากน้อยเพียงใด โดยทดสอบกับแบบจำลองเบรกดาวนของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กที่ระบบ 22 kV และ 33 kV ด้วยรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s และ 5/50 μ s ทั้งขั้วบวก และ ขั้วลบ ดังรูปที่ 5.8 - 5.9

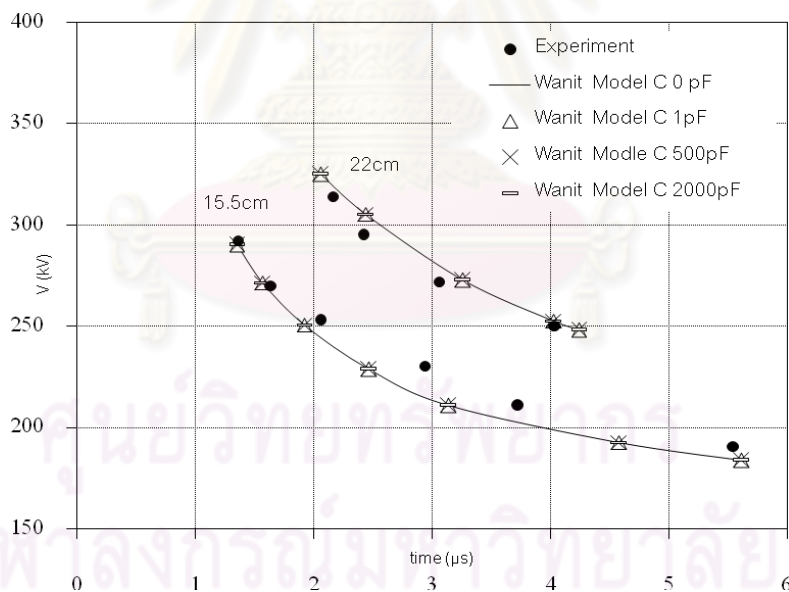
หลังจากการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาด้วยการขนานค่าความจุไฟฟ้าระดับต่างๆ เข้าไปที่แกปของแบบจำลอง ผลที่ได้ออกมา นั้นแทบไม่มีความแตกต่างกับกรณีที่ไม่ได้ขนานความจุไฟฟ้าเข้าที่แกป ซึ่งค่าที่ต่างกันก็มีเพียงเล็กน้อยมากโดยจะมีผลทำให้แรงดันเบรกดาวนมีค่าลดลงในหลักร้อยโวลท์เท่านั้นในแต่ละระดับแรงดันทดสอบเฉพาะกรณีค่า $C=2000$ pF ที่ระดับแรงดันเบรกดาวนที่สูงเท่านั้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระดับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงหลักร้อยโวลท์จากระดับแรงดันเบรกดาวนที่มีค่ามากถึงหลักแสนโวลท์ในช่วงเวลาไมโครวินาทีแล้ว จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่นำมาขนานที่แกปของแบบจำลองนั้นไม่มีผลต่อแรงดัน หรือ เวลาที่เบรกดาวนแต่อย่างใด



รูปที่ 5.8 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเมียงอาร์กสำหรับระยะแนป 15.5 cm และ 22 cm รูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน 1.2/50 μ s กรณีทดสอบผลกระทบจากค่าความจุไฟฟ้า บริเวณปลอกฉนวนแรงสูง ก) ชั่วบวก, ข) ชั่วลบ



(ก) ชั่วบวก



(ข) ชั่วลบ

รูปที่ 5.9 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเมียงอาร์กสำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm รูปคลื่นอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน 5/50 μ s กรณีศึกษาผลกระทบจากค่าความจุไฟฟ้า บริเวณปลอกฉนวนแรงสูง ก) ชั่วบวก, ข) ชั่วลบ

หลังจากการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาด้วยการขนานค่าความจุไฟฟ้าระดับต่างๆ เข้าไปที่แกปของแบบจำลอง ผลที่ได้ออกมา นั้นแทบไม่มีความแตกต่างกับกรณีที่ไม่ได้ขนานความจุไฟฟ้าเข้าที่แกป ซึ่งค่าที่แตกต่างกันก็มีเพียงเล็กน้อยมากโดยจะมีผลทำให้แรงดันเบรกดาวนมีค่าลดลงในหลักร้อยโวลท์เท่านั้นในแต่ละระดับแรงดันทดสอบเฉพาะกรณีค่า $C=2000$ pF ที่ระดับแรงดันเบรกดาวนที่สูงเท่านั้น ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระดับแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปเพียงหลักร้อยโวลท์จากระดับแรงดันเบรกดาวนที่มีค่ามากถึงหลักแสนโวลท์ในช่วงเวลาไมโครวินาทีแล้ว จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่นำมาขนานที่แกปของแบบจำลองนั้นไม่มีผลต่อแรงดัน หรือ เวลาที่เบรกดาวนแต่อย่างใด

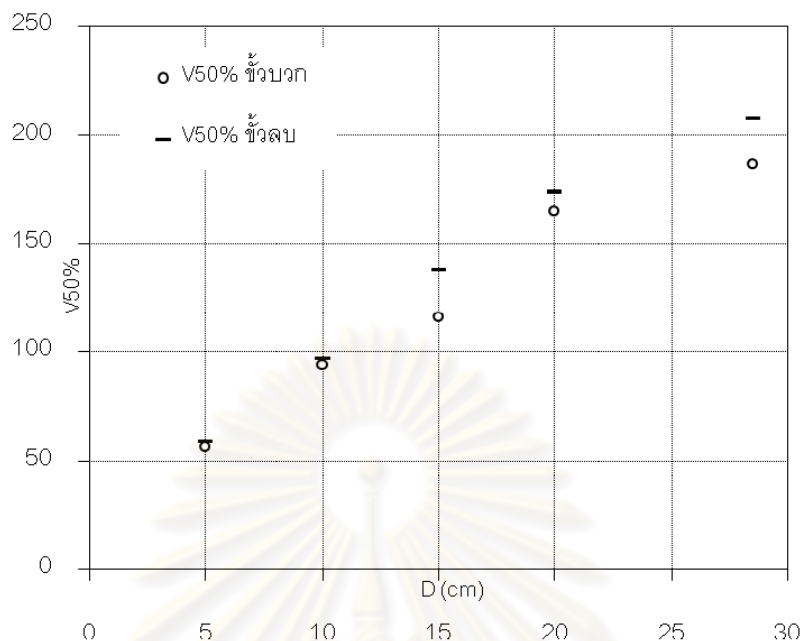
5.3.4 การประมาณค่า $V_{50\%}$ สำหรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า 1.2/50 μ s

จากข้อมูลของเส้นโค้งแรงดัน-เวลา (V-t curve) ที่ใช้สำหรับสร้างสมการหาค่า DE ที่ระยะแกปต่างๆ เส้นโค้งแรงดัน-เวลา ในแต่ละระยะแกปจะมีข้อมูลเบรกดาวน 50% ($V_{50\%}$) จากการทดสอบอยู่ด้วยเสมอ ดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลแรงดันเบรกดาวน 50% ที่ระยะแกปต่างๆ [10-12]

รูปคลื่น	$V_{50\%}$ ต่อระยะแกป D (cm)				
	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	28.5 cm
1.2/50					
+	56.6 kV	94 kV	116.2 kV	165 kV	186.58 kV
-	59 kV	97 kV	138 kV	174 kV	207.97 kV

จากตารางที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าชุดข้อมูลของ $V_{50\%}$ จะมีการเพิ่มขึ้นของแรงดันตามระยะแกปที่กว้างขึ้น และจากการเพิ่มขึ้นของแรงดันเหล่านั้นสามารถนำมาสร้างเป็นสมการสำหรับหาค่า $V_{50\%}$ จากความสัมพันธ์ของ $V_{50\%}$ กับ ระยะแกปเหล่านั้น จึงนำข้อมูล $V_{50\%}$ ที่ได้จากการทดสอบด้วยอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s ของทุกระยะแกปทั้งชั่วคราว และชั่วคราว มาสร้างกราฟเพื่อดูลักษณะความสัมพันธ์ของการเพิ่มขึ้นระหว่างแรงดันกับระยะแกปดังรูปที่ 5.10



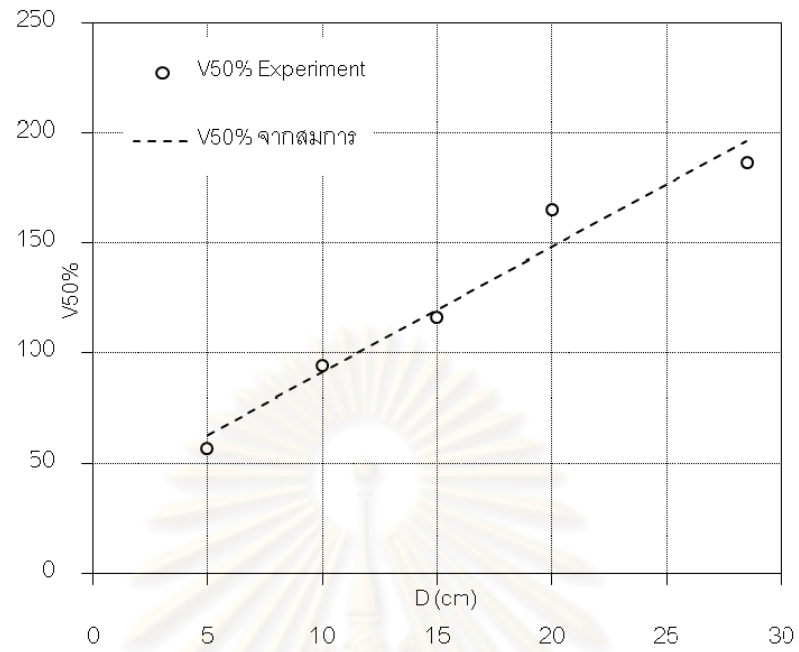
รูปที่ 5.10 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{50\%}$ กับระยะแกป

จากรูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มของของแรงดันกับระยะแกปที่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นในรูปแบบเชิงเส้น ซึ่งลักษณะการเพิ่มขึ้นของชุดข้อมูลแรงดันเบรกดาว์น 50% เหล่านี้สามารถสร้างเป็นสมการหาค่า $V_{50\%}$ ได้โดยใช้ข้อมูลของระยะแกป สำหรับการสร้างสมการหาค่า $V_{50\%}$ ทำโดยการนำข้อมูล $V_{50\%}$ ของหลายระยะแกปมาสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{50\%}$ กับ ระยะแกปโดยใช้ข้อมูลจาก [10-12] กรณีสัญลักษณ์คลื่นอิมพัลส์ 1.2/50 μs อิเล็กโตรดชนิดแ่ง-แ่ง ทั้งชั่วคราว ชั่วลบ ที่ระยะแกป 5 ระยะได้แก่ 5, 10, 15, 20, และ 28.5 cm ได้สมการหา $V_{50\%}$ จาก ระยะแกป D (m) ดังนี้

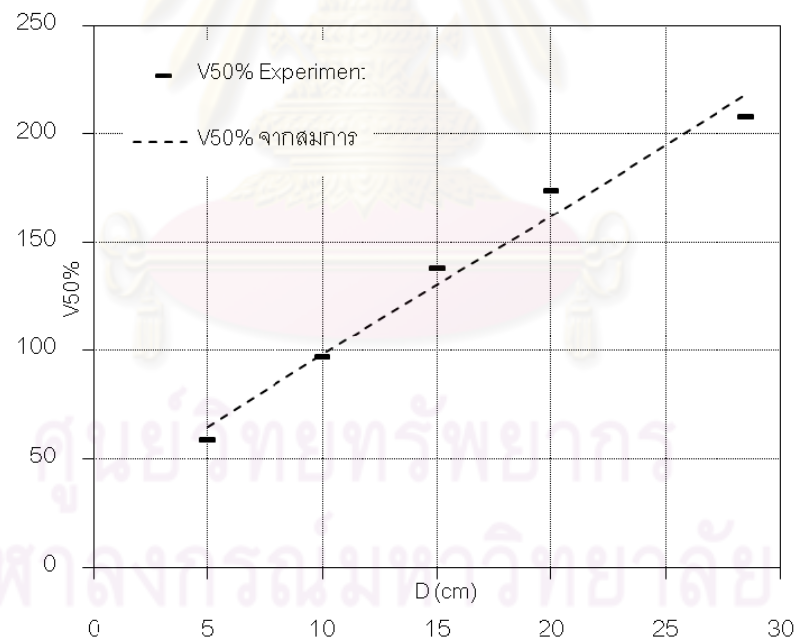
$$\text{ชั่วคราว} \quad V_{50\%} = 568.5155D + 34.4191 \text{ kV} \quad (5.8)$$

$$\text{ชั่วคราว} \quad V_{50\%} = 645.6689D + 33.8240 \text{ kV} \quad (5.9)$$

นำข้อมูลจากสมการสำหรับหาค่า $V_{50\%}$ ที่คำนวณขึ้นใหม่มาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลแรงดัน $V_{50\%}$ จากการทดสอบดังรูปที่ 5.11



(ก) ไข่บวก



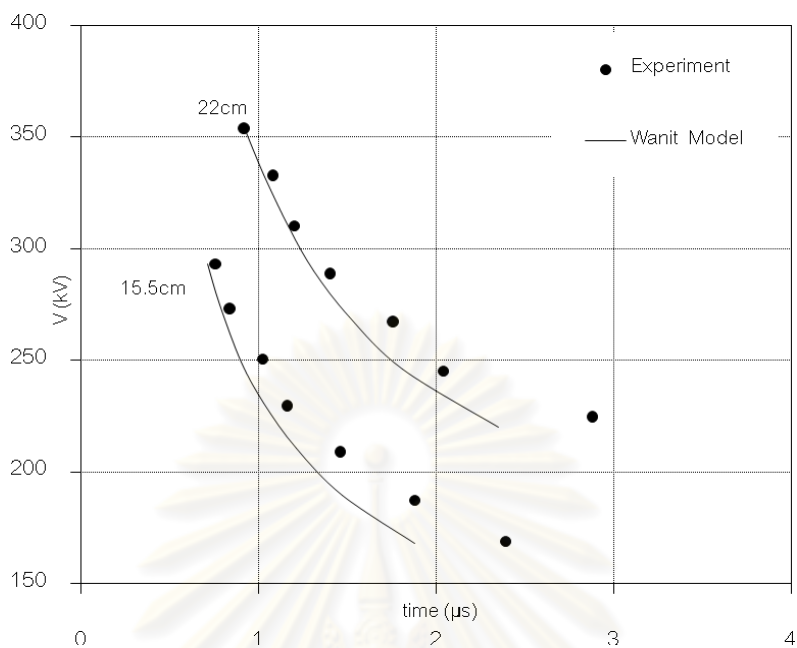
(ข) ไข่ลบ

รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบลักษณะความสัมพันธ์ระหว่าง $V_{50\%}$ กับระยะแกป ก) ไข่บวก, ข) ไข่ลบ

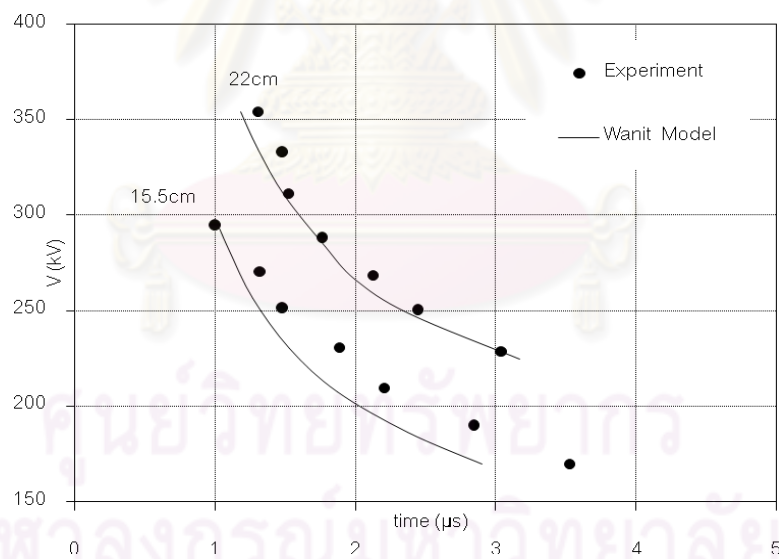
จะเห็นได้ว่าแรงดันเบรกดาวน $V_{50\%}$ ของซั้วลบจะมีค่าสูงกว่ากรณีของซั้วบวกในทุกระยะแกป และกรณีซั้วลบระดับแรงดันเบรกดาวนมีความเป็นเชิงเส้นมากกว่าในกรณีของซั้วบวกทำให้สามารถสร้างสมการหาค่า $V_{50\%}$ ใกล้เคียงกว่าในกรณีซั้วบวก ซึ่งปัญหาเหล่านั้นส่งผลต่อความแม่นยำในการจำลองการเกิดเบรกดาวน เพราะจุดเริ่มต้นการอินทิเกรทของแบบจำลองมีความสำคัญเป็นอย่างมากถ้าเกิดผิดพลาดไปจากที่ควร ก็ส่งผลให้การจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลา ออกมาผิดเพี้ยนไปตลอดทั้งเส้นโค้งได้

จากนั้นนำแบบจำลองที่ใช้ค่าแรงดันเบรกดาวน $V_{50\%}$ จากสมการที่ (5.8) และ (5.9) ไปสร้างคุณลักษณะแรงดัน-เวลา ของคู่ซั้วเบี่ยงอาร์ก เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs เพื่อทดสอบดูว่าค่าแรงดันเบรกดาวน $V_{50\%}$ จากสมการดังกล่าวที่นำเสนอจะสามารถใช้งานกับอินทิเกรชันโมเดลนี้ได้หรือไม่ ดังรูปที่ 5.12 ซึ่งหลังจากที่ใช้แรงดันเบรกดาวน $V_{50\%}$ จากสมการ (5.8) และ (5.9) จะเห็นได้ว่าโมเดลนี้ให้ผลการจำลองที่คลาดเคลื่อนมากกว่ากรณีที่ใช้ค่า $V_{50\%}$ จากการทดสอบในทุกกรณี แต่ผลการจำลองที่ได้ออกมาให้ลักษณะความโค้งของเส้นโค้งแรงดัน-เวลาที่สอดคล้องกับผลจากการทดสอบจริง ทั้งนี้ $V_{50\%}$ ที่คำนวณได้จากสมการ (5.8) และ (5.9) เป็นสมการที่สร้างขึ้นมาจากข้อมูล $V_{50\%}$ กรณีที่ทดสอบจากอิเล็คโตรดแบบแท่ง-แท่ง และเมื่อนำมาจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาในกรณีของคู่ซั้วเบี่ยงอาร์กจึงทำให้ผลการจำลองออกมามีความผิดพลาดจากที่ควร และเนื่องจากรูปทรงของอิเล็คโตรดแบบแท่ง-แท่งแตกต่างจากอิเล็คโตรดของคู่ซั้วเบี่ยงอาร์กจึงคาดว่า $V_{50\%}$ จากสมการดังกล่าวไม่เหมาะกับการนำมาใช้จำลองในกรณีของคู่ซั้วเบี่ยงอาร์ก จึงทำการทดสอบแบบจำลองอินทิเกรชันที่ใช้ค่า $V_{50\%}$ จากสมการมาจำลองเส้นโค้งแรงดันเวลาของอิเล็คโตรดแบบแท่ง-แท่งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs ที่ระยะแกป 5, 10, 15, 20 และ 28.5 cm ทั้งซั้วบวก และ ซั้วลบ ดังรูปที่ 5.13

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

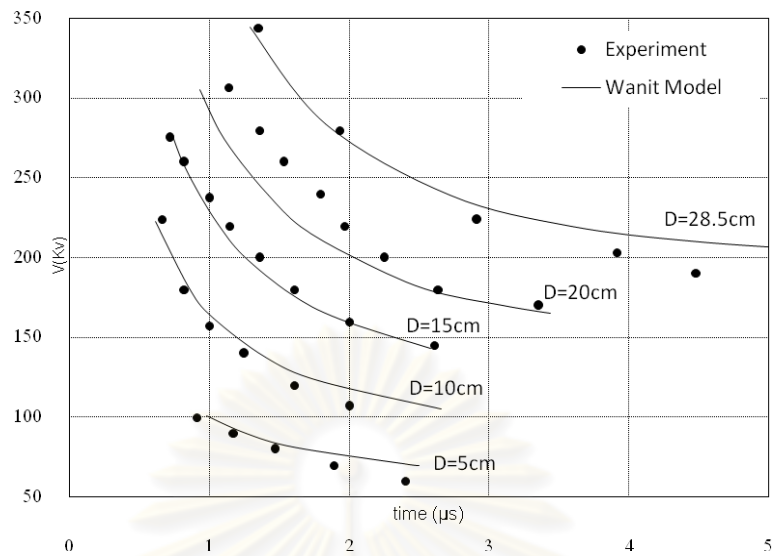


(ก) ชั่วบวก

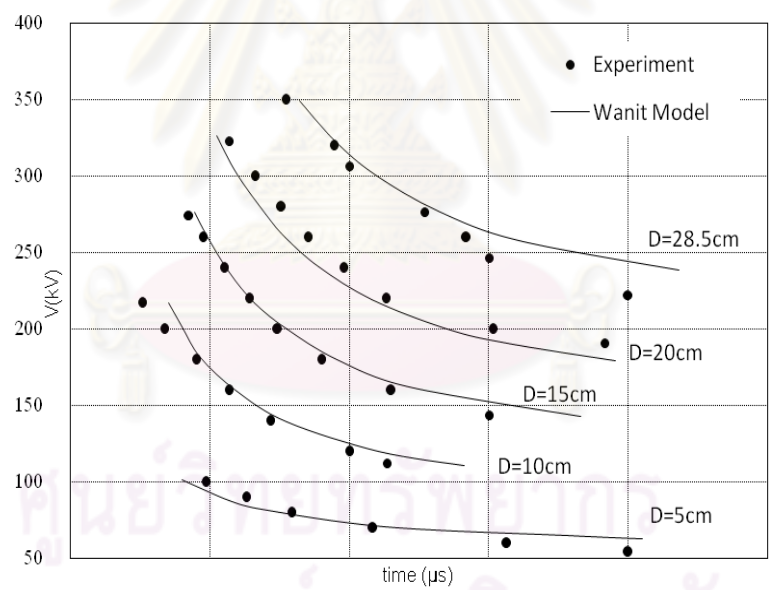


(ข) ชั่วลบ

รูปที่ 5.12 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับระยะแกป 15.5 cm และ 22 cm เมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs กรณีทดสอบแบบจำลองโดยใช้ค่า $V_{50\%}$ จากการประมาณค่าด้วยสมการ ก) ชั่วบวก, ข) ชั่วลบ



(ก) ไข้วบวก



(ข) ไข้วลบ

รูปที่ 5.13 ผลการจำลองเส้นโค้งแรงดันเวลาของอิเล็กโตรดแบบแท่ง-แท่งเมื่อได้รับแรงดันอิมพัลส์ไฟฟ้ามาตรฐาน $1.2/50 \mu\text{s}$ ที่ระยะแกป 5, 10, 15, 20 และ 28.5 cm โดยใช้ค่า $V_{50\%}$ จากการประมาณค่าด้วยสมการ

จากรูปที่ 5.13 จะเห็นได้ว่าแบบจำลองให้ผลการจองเส้นโค้งแรงดัน-เวลากรณี อิเล็กโตรดแบบแห้ง-แห้งโดยใช้ค่า $V_{50\%}$ ที่คำนวณจากสมการที่ (5.8) และ (5.9) ได้อย่างใกล้เคียง เกือบทุกกรณี ซึ่งเส้นโค้งที่ได้จากแบบจำลองมีความโค้งที่เหมือนกับผลจากการทดลองทุกกรณี ยกเว้นในกรณีช่วงเวลาที่ระยะแกป 20 cm จะเห็นได้ว่าเส้นโค้งจะอยู่ใต้ผลจากการทดลองเกือบทุก จุดเนื่องมาจากแรงดัน $V_{50\%}$ จากสมการที่ได้มีค่าต่ำเกินไปจึงส่งผลให้แบบจำลองเบรกดาวนเร็วขึ้น กว่าที่ควร แต่โดยรวมแล้วสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองสามารถให้ผลการจำลองที่ค่อนข้าง แม่นยำกับกรณีอิเล็กโตรดแบบแห้ง-แห้ง สำหรับแบบจำลองที่ใช้ $V_{50\%}$ จากสมการ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอนแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอแบบจำลองเบรกดาวนของแกปอากาศ (แบบจำลองของ Wanit) ซึ่งสามารถนำไปสร้างเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่ง และคู่ขั้วเบี่ยงอาร์คโดยอาศัยหลักการจากแบบจำลองอินทิเกรชันดังสมการ (6.1)

$$DE = \int_{T_0}^{T_b} (V(t) - V_0) dt \quad (6.1)$$

โดย $V(t)$ คือ รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมแกป, T_0 คือ เวลาที่เริ่มอินทิเกรตเมื่อ $V(t) > V_0$, T_b คือ เวลาที่เกิดการเบรกดาวน, $V_0 = 90\%$ ของ $V_{50\%}$ และค่า DE หาได้จากระยะแกป D (m) ดังสมการที่ (6.2) และ (6.3)

$$\text{ขั้วบวก} \quad DE = 0.3705D - 0.0014 \quad (6.2)$$

$$\text{ขั้วลบ} \quad DE = 0.5173D - 0.0144 \quad (6.3)$$

การสร้างแบบจำลองทำได้สะดวกเร็ว เพราะใช้ข้อมูลเพียงแค่แรงดันอิมพัลส์เบรกดาวน 50% ($V_{50\%}$) ก็สามารถสร้างแบบจำลองได้โดยง่าย

1. การทดสอบแบบจำลองของ Wanit โดยการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแบ่ง-แบ่งเมื่อได้รับแรงดันพัลส์ชนิดทางคลื่นสั้น $1.2/50 \mu s$ ผลการจำลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองทั้งในกรณีขั้วบวก และขั้วลบ

2. การทดสอบแบบจำลอง Wanit โดยการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของอิเล็กทรอนิกส์ชนิดแบ่ง-แบ่งเมื่อได้รับแรงดันพัลส์ชนิดทางคลื่นสั้น $1.2/4 \mu s$ ผลการจำลองมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองเพียงเล็กน้อยในกรณีเบรกดาวนหน้าคลื่น และในกรณีเบรกดาวนที่หลังคลื่นแบบจำลองจะให้ผลการจำลองที่คลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้น

3. การทดสอบแบบจำลองของ Wanit โดยการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์คสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV กรณีรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน $1.2/50 \mu s$ ผลการจำลองมีความใกล้เคียงจากผลการทดลองเป็นอย่างมากทั้งกรณีแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก และ ขั้วลบ

4. การทดสอบแบบจำลองของ Wanit โดยการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาของคู่ขั้วเบี่ยงอาร์คสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า 22 kV และ 33 kV กรณีรับแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าหน้าคลื่นยาว $5/50 \mu s$ ผลการจำลองยังคงมีความใกล้เคียงจากผลการทดลองทั้งในกรณีแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวก และ ขั้วลบ

พัลส์ชั่ววอก และ ชั่วลบ โดยสามารถนำแบบจำลองมาใช้งานกับหน้าคลื่น 5/50 μ s ได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงตัวคูณของ V_0 หรือ DE แต่อย่างใด

5. การประมาณค่า $V_{50\%}$ จากระยะแกปสามารถทำได้ในกรณีของอิเล็กทรอนิกส์แบบแบ่ง-แบ่ง ดังสมการที่ (6.4) และ (6.5) ซึ่งช่วยทำให้การจำลองหาเส้นโค้งแรงดัน-เวลามีความสะดวกมากยิ่งขึ้นเพราะใช้ข้อมูลเพียงแค่ระยะแกป D (m)

$$\text{ชั่ววอก} \quad V_{50\%} = 568.5155D + 34.4191 \text{ kV} \quad (5.8)$$

$$\text{ชั่วลบ} \quad V_{50\%} = 645.6689D + 33.8240 \text{ kV} \quad (5.9)$$

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาผลของแบบจำลองเบรกดาวนที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆเพิ่มเติมจากที่ได้ทำการศึกษาไปแล้วในงานวิจัยนี้ เช่น เปลี่ยนชนิดของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ทดสอบแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า, เปลี่ยนรูปคลื่นอิมพัลส์เป็นอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน หรือเพิ่มระยะแกป

2. ปรับปรุงโมเดลให้มีความถูกต้องแม่นยำและสะดวกกับการใช้งานยิ่งขึ้น เช่น การปรับปรุงสมการหาค่า $V_{50\%}$ สำหรับใช้ในแบบจำลองเบรกดาวนให้มีความแม่นยำมากขึ้นเพื่อช่วยเพิ่มความสะดวกในการจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลามากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2528.
- [2] Short, Tom A. Electrical Power Distribution Handbook. CRC Press. P. 348
- [3] ชาญณรงค์ บาลมงคล. เอกสารประกอบการเรียนรู้และใช้งาน Electromagnetic Transient Programs (EMTP). 2546
- [4] Sekioka, S.; et. al. Calculation of Flashover Characteristics in the EMTP Trans. On IEE Japan .113-B, .5(1993): 476 (In Japanese)
- [5] Meek, J.M.; Craggs, J.D. Electrical Breakdown of Gases. Chichester New York Brisbane Toronto: John Wiley&Sons, 1978.
- [6] Darveniza, M.; and Vlastos, A. E. The Generalized Integration Method for Predicting Impulse Volt-Time Characteristics for non-Standard Wave Shape – a Theoretical Basis. IEEE Trans. On Electrical Insulation .23, .3(June 1988): 373-381
- [7] Dr. W. Scott Meyer, and Dr.Tsu-huei Liu., Alternative Transients Program(ATP) Rule Book, 1987
- [8] IEC 60-1 International Standard High-Voltage Test Technique, 2nd Edition, 1989.
- [9] DIN 42531, Sheet1, September 1965
- [10] นรณัฐ ตปนีพันธ์. การศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองการเกิดวาบไฟและการใช้งานในโปรแกรมEMTP. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545
- [11] Chowdhuri, P. Mishra, A.K. and McConnell. B.W. Volt-Time Characteristics of Short Air Gaps Under Nonstandard lightning Voltage Waves, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.12, no.1, January 1997.
- [12] A. Carrus, E.Cinieri, A.Fumi and C.Mazzetti. Short Tail Lightning Impulse Behavior of Medium voltage line insulation. IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.14, No.1, January 1999



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์และเวลาเบรกดาวน์

ตารางที่ ก.1 แรงดันเบรกดาวน์และเวลาเบรกดาวน์ รูปคลื่น 1.2/50 μ s ขั้วบวก แกบ 15.5 cm

ระดับที่ 1 Vavg = 162.21 kV			ระดับที่ 2 Vavg = 180.13 kV			ระดับที่ 3 Vavg = 200.70 kV			ระดับที่ 4 Vavg = 221.80 kV		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	2.26	163.13	1	2	181.51	1	1.5	199.90	1	1.14	218.20
2	2.30	163.13	2	1.72	179.21	2	1.42	199.90	2	1.16	222.86
3	2.38	163.13	3	1.80	181.51	3	1.42	199.90	3	1.14	220.57
4	3.08	163.13	4	1.98	181.51	4	1.46	199.90	4	1.18	220.57
5	2.42	163.13	5	1.76	179.21	5	1.54	202.18	5	1.14	218.20
6	2.22	160.83	6	1.80	179.21	6	1.56	202.18	6	1.16	218.20
7	2.48	160.83	7	1.84	179.21	7	1.46	199.90	7	1.14	218.20
8	2.54	160.83	8	1.88	181.51	8	1.48	197.60	8	1.12	222.86
9	2.36	160.83	9	1.88	179.21	9	1.44	199.90	9	1.14	218.27
10	2.62	163.19	10	1.78	179.21	10	1.42	199.90	10	1.14	222.16
T=29.7C, h=63%, P=1006.3hPa			T=29.8C, h=62%, P=1006.1hPa			T=29.9C, h=60%, P=1006.0hPa			T=30.0C, h=58%, P=1005.7hPa		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1(ต่อ) แรงดันเบรกดาวน์และเวลาเบรกดาวน์ รูปคลื่น 1.2/50 μ s รั้วบวก แกบ 15.5 cm

ระดับที่ 5 Vavg = 249.01 kV			ระดับที่ 6 Vavg = 259.62			ระดับที่ 7 Vavg = 280.53		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	0.92	243.50	1	0.80	259.62	1	0.72	283.00
2	1.06	236.65	2	0.82	261.90	2	0.70	280.30
3	1.06	239.00	3	0.88	261.90	3	0.70	282.61
4	1.02	239.00	4	0.82	261.90	4	0.68	281.45
5	1.06	239.00	5	0.84	264.20	5	0.64	281.45
6	0.96	241.20	6	0.82	261.90	6	0.68	281.45
7	1.02	251.51	7	0.84	261.90	7	0.70	283.00
8	0.96	251.51	8	0.84	261.90	8	0.72	275.71
9	1.06	251.51	9	0.88	259.62	9	0.68	280.30
10	1.02	253.91	10	0.84	259.62	10	0.76	278.00
T=30.2C, h=57%, P=1005.7hPa			T=30.3C, h=55%, P=1005.3hPa			T=30.5C, h=54%, P=1005.3hPa		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 แรงดันเบรกดาวน์และเวลาเบรกดาวน์ รูปคลื่น 1.2/50 μ s ขั้วลบ แกบ 15.5 cm

ระดับที่ 1 Vavg = 162.09 kV			ระดับที่ 2 Vavg = 181.41			ระดับที่ 3 Vavg = 200.33			ระดับที่ 4 Vavg = 220.61		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	4.42	160.83	1	2.92	181.51	1	2.12	199.89	1	1.81	218.27
2	3.52	159.68	2	2.84	181.51	2	2.36	199.83	2	1.84	220.57
3	3.26	159.68	3	2.64	181.51	3	2.32	199.94	3	1.81	220.57
4	3.52	164.27	4	2.84	181.51	4	2.14	199.89	4	2.12	225.16
5	3.72	161.98	5	3.12	183.38	5	2.22	199.89	5	2.44	220.57
6	3.88	161.98	6	2.96	181.51	6	2.28	202.14	6	1.84	218.72
7	4.46	160.83	7	2.28	179.21	7	2.56	202.14	7	2.12	222.86
8	3.72	163.13	8	2.72	181.51	8	2.22	202.14	8	1.84	220.57
9	3.16	165.42	9	3.12	181.51	9	2.16	197.56	9	1.92	218.27
10	3.76	163.13	10	2.88	181.51	10	2.08	199.89	10	2.08	220.57
T=30.8C, h=49%, P=1005.3hPa			T=30.9C, h=49%, P=1004.9hPa			T=31C, h=49%, P=1004.8hPa			T=31.2C, h=48%, P=1004.7hPa		
ระดับที่ 5 Vavg = 239.91			ระดับที่ 6 Vavg = 258.73			ระดับที่ 7 Vavg = 281.73					
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)			
1	1.64	239.12	1	1.36	259.62	1	0.96	281.45			
2	1.62	236.65	2	1.28	259.62	2	1.00	281.45			
3	1.56	239.12	3	1.32	255.68	3	0.90	281.45			
4	1.45	239.12	4	1.36	259.24	4	0.92	281.45			
5	1.48	241.24	5	1.32	257.33	5	0.94	282.62			
6	1.48	243.54	6	1.28	259.62	6	0.94	280.31			
7	1.39	241.24	7	1.32	257.33	7	0.88	282.64			
8	1.42	241.24	8	1.36	259.62	8	0.90	284.16			
9	1.48	236.65	9	1.32	261.92	9	1.02	280.32			
10	1.62	241.24	10	1.36	257.33	10	0.90	281.45			
T=31.1C, h=48%, P=1004.7hPa			T=31C, h=48%, P=1004.8hPa			T=30.9C, h=50%, P=1004.7hPa					

ตารางที่ ก.3 แรงดันเบรกดาวน์และเวลาเบรกดาวน์ รูปคลื่น 1.2/50 μ s ขั้วบวก แกบ 22 cm

ระดับที่ 1 Vavg = 220.70 kV			ระดับที่ 2 Vavg = 240.10			ระดับที่ 3 Vavg = 260.60			ระดับที่ 4 Vavg = 281.22		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	3.48	218.72	1	2.20	239.00	1	1.80	259.62	1	1.48	278.00
2	3.12	220.57	2	2.12	239.00	2	1.76	259.60	2	1.40	280.30
3	2.92	218.72	3	1.96	239.00	3	1.80	261.92	3	1.40	280.30
4	3.16	220.57	4	1.96	241.20	4	1.68	259.62	4	1.36	278.00
5	2.96	222.86	5	2.08	241.20	5	1.60	257.33	5	1.36	282.60
6	2.56	220.57	6	2.00	241.20	6	1.80	259.62	6	1.40	280.30
7	2.64	222.86	7	2.04	239.00	7	1.64	262.00	7	1.40	284.90
8	3.12	218.72	8	1.96	241.20	8	1.76	264.22	8	1.40	284.90
9	2.84	220.57	9	1.96	239.00	9	1.84	259.60	9	1.36	282.60
10	2.96	222.86	10	1.92	241.20	10	1.68	261.92	10	1.40	280.30
T=25C, h=49%, P=1011.5hPa			T=25.6C, h=48%, P=1011.4hPa			T=26.3C, h=45%, P=1010.9hPa			T=26.6C, h=44%, P=1010.5hPa		
ระดับที่ 5 Vavg = 299.87 kV			ระดับที่ 6 Vavg = 320.27			ระดับที่ 7 Vavg = 340.94					
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)			
1	1.24	298.68	1	1.08	321.66	1	0.88	344.64			
2	1.28	301.56	2	1.04	321.66	2	0.84	338.94			
3	1.20	298.68	3	1.12	321.82	3	0.88	344.64			
4	1.28	298.68	4	1.08	315.92	4	0.88	333.15			
5	1.20	293.32	5	1.04	321.66	5	0.92	339.21			
6	1.16	298.68	6	1.04	321.66	6	0.84	341.76			
7	1.24	301.56	7	1.00	316.23	7	0.88	338.92			
8	1.20	301.56	8	1.04	321.66	8	0.84	341.76			
9	1.12	304.43	9	0.96	321.66	9	0.82	341.76			
10	1.28	301.56	10	1.12	318.82	10	0.82	344.64			
T=28.5C, h=36%, P=1007.3hPa			T=28.8C, h=36%, P=1006.5hPa			T=28.8C, h=36%, P=1006.3hPa					

ตารางที่ ก.4 แรงดันเบรกดาวินและเวลาเบรกดาวิน รูปคลื่น 1.2/50 μ s ขั้วลบ แกบ 22 cm

ระดับที่ 1 Vavg = 220.56 kV			ระดับที่ 2 Vavg = 240.10			ระดับที่ 3 Vavg = 260.28			ระดับที่ 4 Vavg = 279.01		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	3.04	218.27	1	2.36	239.12	1	1.96	259.62	1	1.72	280.34
2	3.21	220.56	2	2.24	241.24	2	2.12	259.62	2	1.76	278.12
3	2.84	220.56	3	2.32	243.54	3	2.24	259.62	3	1.72	278.12
4	3.04	220.56	4	2.26	241.24	4	2.12	259.62	4	1.68	280.36
5	2.84	220.56	5	2.44	241.24	5	1.96	259.62	5	1.72	278.12
6	2.76	222.86	6	2.28	239.12	6	2.12	261.92	6	1.72	278.12
7	2.84	220.56	7	2.32	241.24	7	1.96	259.62	7	1.82	280.36
8	3.04	220.56	8	2.24	241.24	8	2.16	261.92	8	1.72	278.12
9	2.84	220.56	9	2.28	241.24	9	2.08	261.62	9	1.84	280.36
10	2.72	220.56	10	2.24	241.24	10	2.16	259.62	10	1.72	278.12
T=29.7C, h=57%, P=1007hPa			T=30C, h=56%, P=1006.7hPa			T=28.8C, h=53%, P=1010.5hPa			T=30.1C, h=49%, P=1007.1hPa		
ระดับที่ 5 Vavg = 299.83			ระดับที่ 6 Vavg = 320.21			ระดับที่ 7 Vavg = 340.94					
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)			
1	1.42	301.56	1	1.44	321.66	1	1.24	338.92			
2	1.44	298.68	2	1.52	316.83	2	1.28	338.92			
3	1.52	301.56	3	1.52	321.66	3	1.36	241.76			
4	1.52	301.56	4	1.44	316.83	4	1.36	144.64			
5	1.64	304.43	5	1.58	321.66	5	1.28	341.76			
6	1.56	295.81	6	1.48	321.66	6	1.36	341.76			
7	1.48	301.56	7	1.42	316.83	7	1.32	341.76			
8	1.56	298.68	8	1.52	321.66	8	1.32	338.92			
9	1.48	295.81	9	1.44	321.66	9	1.24	338.92			
10	1.52	298.68	10	1.54	321.66	10	1.24	338.92			
T=30.1C, h=49%, P=1007.1hPa			T=30.1C, h=49%, P=1007.1hPa			T=30.2C, h=47%, P=1006.9hPa					

ตารางที่ ก.5 แรงดันเบรกดาวน์และเวลาเบรกดาวน์ รูปคลื่น 5/50 μ s ขั้วบวก แกบ 15.5 cm

ระดับที่ 1 Vavg = 173.67 kV			ระดับที่ 2 Vavg = 197.36			ระดับที่ 3 Vavg = 219.90		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	3.62	172.23	1	2.51	199.89	1	1.61	220.57
2	3.51	172.23	2	2.43	195.29	2	1.64	220.57
3	3.74	174.61	3	2.43	195.29	3	1.48	220.57
4	3.36	170.02	4	2.51	199.89	4	1.52	220.57
5	3.72	174.61	5	2.43	195.29	5	1.48	222.86
6	3.74	174.61	6	2.51	199.89	6	1.32	216.12
7	3.66	172.32	7	2.32	195.31	7	1.44	222.86
8	3.84	179.21	8	2.32	195.31	8	1.52	220.57
9	3.62	174.61	9	2.36	197.63	9	1.48	218.27
10	3.76	172.32	10	2.24	199.89	10	1.52	216.12
T=29.3C, h=70%, P=1009.9hPa			T=29.8C, h=66%, P=1009.5hPa			T=30.3C, h=64%, P=1007.4hPa		
ระดับที่ 4 Vavg = 220.61			ระดับที่ 5 Vavg = 259.42					
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)			
1	1.24	218.27	1	1.08	259.62			
2	1.20	220.57	2	0.92	258.48			
3	1.20	220.57	3	0.90	257.33			
4	1.32	225.16	4	0.94	261.26			
5	1.32	220.57	5	0.98	259.62			
6	1.28	218.72	6	0.90	261.26			
7	1.24	222.86	7	0.92	257.33			
8	1.20	220.57	8	1.08	258.48			
9	1.28	218.27	9	0.90	261.26			
10	1.20	220.57	10	0.94	259.62			
T=31.2C, h=48%, P=1004.7hPa			T=30.8C, h=62%, P=1006.3hPa					

ตารางที่ ก.6 แรงดันเบรกดาวน์และเวลาเบรกดาวน์ รูปคลื่น 5/50 μ s ขั้วลบ แกบ 15.5 cm

ระดับที่ 1 Vavg = 181.51 kV			ระดับที่ 2 Vavg = 200.35			ระดับที่ 3 Vavg = 219.42		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	5.60	179.21	1	3.70	199.89	1	3.08	218.27
2	5.70	183.81	2	3.76	199.89	2	2.86	218.27
3	5.12	179.21	3	3.56	199.89	3	2.92	220.57
4	5.60	183.82	4	3.76	204.48	4	2.84	218.27
5	5.40	181.51	5	3.52	197.61	5	2.88	220.57
6	5.50	181.51	6	3.80	202.18	6	2.96	220.57
7	5.21	179.21	7	3.84	197.61	7	3.00	218.27
8	5.00	179.21	8	3.56	199.89	8	2.96	220.57
9	5.80	183.81	9	3.56	202.18	9	3.14	218.27
10	5.60	183.81	10	3.76	199.89	10	2.92	220.57
T=31.1C, h=53%, P=1002.2hPa			T=31C, h=53%, P=1002.1hPa			T=31C, h=53%, P=1002.3hPa		
ระดับที่ 4 Vavg = 220.61			ระดับที่ 5 Vavg = 259.62			ระดับที่ 6 Vavg = 280.55		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	1.92	236.65	1	1.60	259.62	1	1.44	278.09
2	1.96	241.24	2	1.68	261.92	2	1.36	278.09
3	2.08	241.24	3	1.64	261.92	3	1.36	280.31
4	2.04	239.01	4	1.64	259.62	4	1.44	282.62
5	2.08	241.24	5	1.56	255.03	5	1.44	282.62
6	2.00	243.54	6	1.60	259.62	6	1.36	280.31
7	2.24	243.54	7	1.56	257.33	7	1.32	282.62
8	2.12	241.24	8	1.64	259.62	8	1.28	280.31
9	2.00	236.65	9	1.68	259.62	9	1.36	280.31
10	2.08	243.54	10	1.68	261.92	10	1.30	280.31
T=29.2C, h=57%, P=1006.4hPa			T=29.7C, h=57%, P=1006.8hPa			T=30.3C, h=52%, P=1007.1hPa		

ตารางที่ ก.7 แรงดันเบรกดาวน์และเวลาเบรกดาวน์ รูปคลื่น 5/50 μ s ขั้วบวก แก๊ป 22 cm

ระดับที่ 1 Vavg = 220.96 kV			ระดับที่ 2 Vavg = 240.36			ระดับที่ 3 Vavg = 219.42			ระดับที่ 4 Vavg = 280.56		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	4.80	222.86	1	3.62	241.24	1	3.08	218.27	1	2.16	278.04
2	4.42	218.27	2	3.54	239.02	2	2.86	218.27	2	2.04	278.04
3	4.42	222.86	3	3.70	241.24	3	2.92	220.57	3	2.00	282.62
4	4.61	222.86	4	3.82	243.54	4	2.84	218.27	4	1.88	278.04
5	4.42	218.27	5	3.54	239.02	5	2.88	220.57	5	1.84	282.62
6	4.20	218.27	6	3.62	239.02	6	2.96	220.57	6	1.88	282.62
7	4.61	222.28	7	3.54	239.02	7	3.00	218.27	7	1.92	280.34
8	4.80	220.56	8	3.32	241.24	8	2.96	220.57	8	1.88	282.62
9	4.61	220.56	9	3.40	239.02	9	3.14	218.27	9	1.80	282.62
10	4.61	222.86	10	3.28	241.24	10	2.92	220.57	10	1.88	278.04
T=31.6C, h=58%, P=1004.8hPa			T=31.6C, h=58%, P=1004.3hPa			T=31C, h=53%, P=1002.3hPa			T=31.2C, h=48%, P=1004.7hPa		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.8 แรงดันเบรกดาวนและเวลาเบรกดาวน รูปคลื่น 5/50 μ s ขั้วลบ แก๊ป 22 cm

ระดับที่ 1 Vavg = 239.67 kV			ระดับที่ 2 Vavg = 259.85			ระดับที่ 3 Vavg = 281.01			ระดับที่ 4 Vavg = 298.96		
No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)	No.	t(μ s)	V(kV)
1	4.12	239.02	1	3.08	259.62	1	2.44	278.04	1	2.36	304.43
2	4.24	241.24	2	3.04	261.92	2	2.40	280.31	2	21.6	292.94
3	3.96	239.02	3	3.08	259.62	3	2.52	280.31	3	2.28	298.68
4	4.00	239.02	4	3.04	257.33	4	2.36	280.31	4	2.16	298.68
5	3.92	239.02	5	3.08	259.62	5	2.40	282.64	5	2.16	295.81
6	4.12	236.65	6	2.96	259.62	6	2.44	284.91	6	2.20	298.68
7	4.08	241.24	7	3.16	261.92	7	2.44	282.64	7	2.16	298.68
8	4.00	241.24	8	3.28	261.92	8	2.40	278.06	8	2.12	304.43
9	3.96	239.02	9	2.96	257.33	9	2.44	282.64	9	2.16	298.68
10	4.16	241.24	10	3.04	259.62	10	2.36	280.31	10	2.20	298.68
T=30.7C, h=63%, P=1006.4hPa			T=31.1C, h=62%, P=1005.5hPa			T=31.6C, h=61%, P=1004.2hPa			T=31.7C, h=59%, P=1003.4hPa		

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ข้อมูลแรงดันจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง

ข้อมูลแรงดันจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง โดยวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลงในแต่ละเงื่อนไขทดลองเป็นจำนวน 20 ครั้ง เพื่อหาค่า $V_{50\%}$ คือ ค่ายอดแรงดันที่มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดเบรกดาวน 50% ในตารางแสดงระดับแรงดันค่ายอดอิมพัลส์เฉลี่ย (V_a) และ ค่ายอดอิมพัลส์ที่ระดับแรงดันป้อนนั้นๆ (V_p) สัญลักษณ์ 0 แทนเหตุการณ์ที่ไม่เกิดเบรกดาวน สัญลักษณ์ 1 แทนเหตุการณ์ที่เกิดเบรกดาวน

ข. 1 ข้อมูลแรงดันจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง กรณีคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในระบบ 22 kV

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง รูปคลื่น 1.2/50 μ s ขั้วบวก แกบ 15.5 cm

ระดับที่	V_a (kV)	V_p (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	136.80	136.80																				0
2	138.70	138.70																				1
3	142.90	143.50				0		0			0		0		0		0		1			
4	146.25	147.20	0		1		1		0		1		1		1		1		1			
5	149.40	149.70		1						1												

สภาพอากาศ $T=29.9^{\circ}\text{C}$, $P=1008.0\text{hPa}$, $h=62\%$

$V_{50\%} = 144.12\text{ kV}$

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง รูปคลื่น 1.2/50 μ s ชั่วลบ แกบ 15.5 cm

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	146.45	146.80		0		0																
2	151.11	151.50	1		1		0		0		0		0									
3	154.44	154.60						1		1		1		0		0		0		0		0
4	157.85	158.10													1		1		1		1	

สภาพอากาศ T=30°C, P=1008.6hPa, h=72%

$V_{50\%} = 152.05$ kV

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง รูปคลื่น 5/50 μ s ชั่วบวก แกบ 15.5 cm

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	136.18	136.80			0										0		0				0	
2	139.81	141.10		1		0		0				0		1		1		0		1		0
3	143.60	143.80	1				1		0		1		1							1		
4	147.40	147.40								1												

สภาพอากาศ T=32.4°C, P=1003.4hPa, h=32.4%

$V_{50\%} = 140.42$ kV

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง รูปคลื่น 5/50 μ s ชั่วลบ แกบ 15.5 cm

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	140.40	140.40														0						
2	143.34	143.90											0		1		0					0
3	146.82	147.30				0		0		0		1		1			0			1		1
4	150.03	150.70	0		1		1		1		1								1			
5	154.63	154.63		1																		

สภาพอากาศ T=29.8°C, P=1008.7hPa, h=65% $V_{50\%}$ = 148.70 kV

ข. 2 ข้อมูลแรงดันจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง กรณีคู่ขั้วเบี่ยงอาร์กสำหรับป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังในระบบ 33 kV

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง รูปคลื่น 1.2/50 μ s ชั่วบวก แกบ 22 cm

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	174.50	174.50													0							
2	180.42	181.40								0		0		1		0						
3	187.97	190.00	0		0				1		1		1			0		0				
4	194.40	196.50		1		0		1									1			0		1
5	201.45	202.20					1															1

สภาพอากาศ T=26.8°C, P=1009.7hPa, h=64% $V_{50\%}$ = 189.01 kV

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง รูปคลื่น 1.2/50 μ s ชั่วลบ แกบ 22 cm

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	190.40	190.40																				0
2	196.74	197.60					0		0				0		0							1
3	203.36	204.60		0		1		1		0		1		1		0		0		1		
4	208.26	209.60	1		1						1						1		1			

สภาพอากาศ T=29.8°C, P=1007.6hPa, h=57%

V_{50%} = 202.28 kV

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง รูปคลื่น 5/50 μ s ชั่วบวก แกบ 22 cm

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	172.02	172.02				0																
2	177.35	178.63	0		1		0				0				0				0		0	
3	182.84	183.21		1				0		1		0		1		0		1		1		1
4	188.50	188.94							1				1				1					

สภาพอากาศ T=31.6°C, P=1004.8hPa, h=58%

V_{50%} = 181.22 kV

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลจากวิธีปรับระดับแรงดันขึ้นลง รูปคลื่น 5/50 μ s ชั่วลบ แกบ 22 cm

ระดับที่	Va (kV)	Vp (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	207.80	208.20			0										0		0				1	
2	212.66	214.60		1		0		0				0		1		1		0		1		0
3	222.30	223.01	1				1		0		1		1						1			
4	228.10	228.10								1												

สภาพอากาศ T=30.5°C, P=1006.5hPa, h=64%

$V_{50\%} = 214.75$ kV

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวาณิช ชนอม เกิดเมื่อวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2528 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยสยาม ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรม ศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย