

การประเมินอัตราการผลิตความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง 500 กิโลโวลต์



นายเอกกรินทร์ พงศ์พีรพัฒน์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2472-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EVALUATION OF FAULT RATE CAUSED BY LIGHTNING OF 500 KV TRANSMISSION SYSTEM



Mr. Eakarin Pongpeerapat

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineer

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2472-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินอัตราการเกิดความผิดปกติเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง 500 กิโลโวลต์
โดย	นายเอกรินทร์ พงศ์พีรพัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เอกชัย ลีลาวัศม์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรวัชร์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกรินทร์ พงศ์พีรพัฒน์ : การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง 500 กิโลโวลต์. (EVALUATION OF FAULT RATE CAUSED BY LIGHTNING OF 500 KV TRANSMISSION SYSTEM)

อ. ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล, 112 หน้า. ISBN 974-17-2472-1.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงการประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง 500 กิโลโวลต์ ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการหาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่สามารถก่อให้เกิดความผิดพลาดของสายส่งด้วยโปรแกรม EMTP พร้อมศึกษาผลของแบบจำลองการเกิดเบรกดาวนซ์ของแกปอากาศระหว่างอาร์กซึ่งฮอรั่น แบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสา แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า และการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า ในส่วนที่สองนำค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ได้มาประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าโดยใช้ทฤษฎีของ Armstrong - Whitehead (A-W) และเปรียบเทียบผลที่ได้กับโปรแกรม FLASH และ LPDW

ผลการคำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดด้วยการใช้โปรแกรม EMTP ควบคู่ไปกับโปรแกรม A-W เทียบกับการใช้โปรแกรม FLASH พบว่า ค่าอัตราการเกิดความผิดพลาดที่ประเมินได้มีค่าใกล้เคียงกัน คือ 0.42 และ 0.43 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี ตามลำดับ แต่การคำนวณด้วย LPDW ไม่สามารถทำได้กับระบบที่กระแสฟ้าผ่าวิกฤติมีค่าเกินกว่า 300 kA จึงไม่สามารถนำมาใช้กับการศึกษานี้ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2545.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4270676021 : ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS : FAULT RATE / EMTP / LIGHTNING SURGE / TOWER FOOTING
RESISTANCE MODEL / ARRESTER MODEL / FLASH / LPDW

EAKARIN PONGPEERAPAT : THESIS TITLE (EVALUATION OF FAULT RATE
CAUSED BY LIGHTNING OF 500 KV TRANSMISSION SYSTEM)

THESIS ADVISOR : CHANNARONG BANMONGKOL, Dr.Sc.Techn. 112 pp.
ISBN 974-17-2472-1.

This thesis describes the evaluation of fault rate caused by lightning of 500 kV transmission system. It is divided into 2 parts. In the first part, the critical lightning currents causing faults of 500 kV transmission system are determined using Electromagnetic Transients Program (EMTP) including study the effects of breakdown models of air gap between arcing horn, tower footing resistance models, lightning arrester models, and installation of lightning arresters. In the second part, the critical lightning currents are used to evaluate fault rate with Armstrong-Whitehead (A-W) shielding theory. The evaluated results are compared with FLASH and LPDW program.

The fault rate evaluated by EMTP with A-W shielding theory is close to the fault rate evaluated by FLASH, i.e. 0.42 and 0.43 flashes/100 km/year respectively. But LPDW can not evaluate fault rate when the critical lightning current of the system is higher than 300 kA. Therefore, it can not be used in this study.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department <u>Electrical Engineering</u>	Student's signature
Field of study <u>Electrical Engineering</u>	Advisor's signature
Academic year <u>2002</u>	Co-advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขจนสำเร็จเรียบร้อย นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. เอกชัย ลีลาวัศมี และ อาจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรวัชรวิทย์ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอขอบคุณ คุณเสริมชัย จารุวัฒน์ ดิลก, คุณชูวงศ์ วัฒนศักดิ์ภูบาล และคุณเกศินี เลหาหะเจริญสมบัติ จากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในส่วนของการทำงานโปรแกรม LPDW และขอขอบคุณคุณ ประดิษฐพงษ์ สุขสิริถาวรกุล ที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับข้อมูลของกับดักฟ้าผ่า

อนึ่ง ในระหว่างศึกษาในระดับปริญญาโทมาบัณฑิต ข้าพเจ้าได้รับการสนับสนุนของทุนนักเรียนแลกเปลี่ยน AIEJ จาก Prof. Katsuhiko Naito และ Dr. Yukio Mizuno ทำให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสไปศึกษาวิจัยที่ประเทศญี่ปุ่นเป็นเวลา 1 ปี นอกจากนี้ข้าพเจ้ายังได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนโครงการวิจัยหรือค้นคว้าเพื่อทำวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ทำยนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำลังใจ รวมทั้งสนับสนุนในทุก ๆ ด้านเสมอมา ตลอดจนทุก ๆ ท่านที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกรินทร์ พงศ์ไพรัตณ์

กุมภาพันธ์ 2546

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย	3
2. แรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบสายส่งและการป้องกัน.....	4
2.1 ชนิดและต้นกำเนิดของแรงดันเกิน.....	4
2.2 การป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบสายส่ง	5
2.2.1 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse)	6
2.2.2 โอกาสการเกิดฟ้าผ่า	6
2.2.3 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง	8
2.2.4 ฟ้าผ่าในระบบสายส่ง	9
2.2.4.1 ฟ้าผ่าลงบนสายเฟส	11
2.2.4.2 ฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า	12
2.2.5 ระบบซีลด์และ electrogeometric model.....	16
2.2.6 การคำนวณอัตราการซีลด์ล้มเหลว (SFR) และ อัตราการแลบข้ามกลับ (BFR).....	22
2.2.7 อัตราการเกิดความผิดพลาด	24
2.2.8 กั๊บดักฟ้าผ่า	24
2.2.8.1 ลักษณะสมบัติของสารผสมของ zinc oxide.....	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.2.8.2 ส่วนประกอบของ ZnO.....	27
2.2.8.3 การนำไปใช้งานและการทดสอบกับดักฟ้าผ่า	28
3. โปรแกรม EMTP และการจำลองอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบสายส่ง	31
3.1 โปรแกรม EMTP	31
3.1.1 TACS.....	32
3.1.2 MODELS	32
3.2 การจำลองอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบสายส่ง.....	33
3.2.1 แบบจำลองเสาไฟฟ้า	33
3.2.1.1 แบบจำลองชนิดไม่มีการสูญเสียและเป็นเนื้อเดียว (lossless-homogeneous line model)	34
3.2.2 ความต้านทานดินของฐานเสาไฟฟ้า	35
3.2.2.1 แบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่	35
3.2.2.2 แบบจำลองชนิดขึ้นกับกระแส	36
3.2.3 แบบจำลองสายส่ง.....	38
3.2.3.1 แบบจำลองชนิดพารามิเตอร์คงที่ (Constant - parameter model)	39
3.2.3.2 แบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่ (Frequency-dependent model)	39
3.2.4 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า	40
3.2.4.1 แบบจำลองของ IEEE	40
3.2.4.2 แบบจำลองของ Pinceti	42
3.2.4.3 แบบจำลองของ Fernandez.....	43
3.2.5 แบบจำลองเบรกดาวนจ์ของแกปอากาศระหว่าง arcing horn.....	47
3.2.5.1 สวิตช์ควบคุมด้วยแรงดัน.....	47
3.2.5.2 แบบจำลองอินทิเกรชัน (Integration model)	47
3.2.5.3 แบบจำลองลีดเดอร์ (Leader model)	48
4. กระบวนการประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่า.....	51
4.1 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม EMTP	51
4.1.1 แบบจำลองเสิร์จฟ้าผ่า.....	51
4.1.2 แบบจำลองสายส่ง	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.1.3 แบบจำลองเสาไฟฟ้า	53
4.1.4 แบบจำลองลูกถ้วยฉนวน.....	54
4.1.5 แบบจำลองเบรกดาวนจ์	54
4.1.5.1 แบบจำลองสวิตช์ควบคุมด้วยแรงดัน.....	54
4.1.5.2 แบบจำลองอินทิเกรชั่น	54
4.1.5.3 แบบจำลองลีดเดอร์.....	55
4.1.6 แบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสาไฟฟ้า	56
4.1.6.1 แบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่	56
4.1.6.2 แบบจำลองชนิดขึ้นกับกระแส	56
4.1.7 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า	56
4.1.7.1 แบบจำลองของ IEEE	56
4.1.7.2 แบบจำลองของ Pinceti	57
4.1.7.3 แบบจำลองของ Fernandez.....	59
4.1.7.4 การจำลองหาแรงดันเหลือค้างของกับดักฟ้าผ่า.....	60
4.1.8 แบบจำลองระบบสายส่ง	62
4.2 การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม A-W	63
4.2.1 พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบ	63
4.2.2 กระบวนการคำนวณของโปรแกรม A-W.....	64
4.3 การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม FLASH.....	67
4.3.1 พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบ	67
4.3.2 กระบวนการคำนวณของโปรแกรม FLASH.....	68
4.3.2.1 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าและโอกาสการเกิดฟ้าผ่า.....	68
4.3.2.2 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง.....	69
4.3.2.3 ระยะฟ้าผ่า	69
4.3.2.4 เสรีจิมพีแดนซ์ของเสา.....	69
4.3.2.5 ผลของโคโรนา (corona)	70
4.3.2.6 ผลของแรงดันระบบ	70
4.3.2.7 เงื่อนไขการเกิด flashover	70

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.3.2.8 การคำนวณ SFR และ BFR.....	71
4.4 การประเมินอัตราการเกิดความผิดปกติเนื่องจากฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม LPDW	72
4.4.1 พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบ	73
4.4.2 กระบวนการคำนวณของโปรแกรม LPDW	74
4.4.2.1 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าและโอกาสการเกิดฟ้าผ่า	74
4.4.2.2 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง	74
4.4.2.3 ระยะฟ้าผ่า	75
4.4.2.4 ผลของโคโรนา	75
4.4.2.5 ผลของแรงดันระบบ	75
4.4.2.6 เงื่อนไขการเกิด flashover	75
4.4.2.7 การคำนวณ SFR และ BFR.....	76
5. ผลการจำลองและการวิเคราะห์.....	78
5.1 การประเมินอัตราการเกิดความผิดปกติด้วยโปรแกรม EMTP และ A-W.....	78
5.1.1 การศึกษาผลของแบบจำลองการเกิดเบรกดาวน	78
5.1.2 การศึกษาผลของแบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสา.....	83
5.1.3 การศึกษาผลของการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	85
5.2 การประเมินอัตราการเกิดความผิดปกติด้วยโปรแกรม FLASH.....	88
5.3 การประเมินอัตราการเกิดความผิดปกติด้วยโปรแกรม LPDW	90
6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	93
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	93
6.2 ข้อเสนอแนะ	95
รายการอ้างอิง.....	96
ภาคผนวก.....	98
ก. แรงดันเสิร์จที่สะท้อนจากฐานเสา และแรงดันเสิร์จที่สะท้อนมาจากเสาต้นถัดไป	99
ข. แฟกเตอร์คัปปลิง	107
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	112

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าคงที่ A และ B สำหรับคำนวณระยะฟ้าผ่า $r = AI^b$ เมื่อ h คือความสูงของสายเฟสและ h_t คือ ความสูงของเสา.....	17
2.2 ข้อมูลของแรงดันและกระแสของกัปดักฟ้าผ่า	29
3.1 ค่าแรงดันเหลือค้างของ A_0 และ A_1 (p.u.) ของแบบจำลองของ IEEE	41
3.2 ค่าแรงดันเหลือค้างของ A_0 และ A_1 (p.u.) ของแบบจำลองของ Pinceti.....	43
3.3 แรงดันเหลือค้างสูงสุดของ elementary valve block ที่มีแรงดันพิกัด 1 kV กระแส ดีเอสอาร์จ 5 และ 10 kA, $\gamma = 0.02$	45
3.4 ค่าคงที่ K1 และ K2 ในกรณีอีเล็กโตรดแบบ rod-rod.....	49
4.1 ค่าพารามิเตอร์ และเงื่อนไขในการวิเคราะห์.....	52
4.2 ค่าแรงดันเหลือค้างของ A_0 และ A_1 (kV) ของกัปดักฟ้าผ่า EXLIM P396-GH550 แบบจำลอง IEEE	57
4.3 ค่าแรงดันเหลือค้างของ A_0 และ A_1 (kV) ของกัปดักฟ้าผ่า EXLIM P396-GH420 แบบจำลอง Pinceti.....	58
4.4 V-I characteristic ของ A_0 และ A_1	60
4.5 แรงดันเหลือค้างของแบบจำลองต่าง ๆ	62
5.1 มุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A ที่ใช้ในการจำลองกรณีฟ้าผ่าลงที่ GW1.....	79
5.2 เฟสที่เกิดแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนและมุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A เมื่อติดตั้งกัปดักฟ้าผ่าที่ตำแหน่งต่าง ๆ กรณีฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า, ไม่มีแหล่งจ่ายแรงดัน	85
5.3 อัตราการเกิดความผิดพลาด (FR) ในกรณีที่ใช้ความต้านทานดินของฐานเสาเท่ากับ 10 Ω และไม่มีติดตั้งกัปดักฟ้าผ่า	92

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกินประเภทต่าง ๆ	4
2.2 รูปคลื่นนิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม	6
2.3 โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าคายอดเกินกว่า I_0 สำหรับฟ้าผ่าชั่วพล	7
2.4 right-of-way width หรือ shadow width (W)	9
2.5 ตำแหน่งฟ้าผ่า และการเกิดการชัตต์ล้มเหลวและแลบข้ามกลับ	10
2.6 วงจรของฟ้าผ่าบนสายเฟส	11
2.7 แรงดันแลบข้ามลูกถ้วยไฟฟ้า (254 X 146 mm) และช่องว่างอากาศระหว่างแท่งอิเล็กโทรด rod-rod	12
2.8 แรงดันที่เสา และ แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวน	13
2.9 สายส่ง 3 เฟสที่มีแฟกเตอร์คัปปลิงและแรงดันยอดเสาแตกต่างกัน	15
2.10 electrogeometric model	17
2.11 $D_c = 0$ เมื่อ $I = I_m$	19
2.12 ระยะ D_g' เมื่อ $I > I_m$	19
2.13 ส่วนขยายของรูปที่ 2.10	20
2.14 ไดอะแกรมสำหรับคำนวณ I_m	21
2.15 ลักษณะสมบัติของ zinc oxide เปรียบเทียบกับ silicon carbide	26
2.16 การนำกระแสของ ZnO ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร	26
2.17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเล็ร์จของกับดักฟ้าผ่า ZnO และ SiC	27
2.18 ลักษณะสมบัติของ ZnO และค่า α	28
2.19 การเปรียบเทียบแรงดันเกินสวิตชิงกับ BIL กรณีใช้กับดักฟ้าผ่า ZnO และ SiC	30
3.1 แบบจำลองเสาไฟฟ้าของ IEEE	34
3.2 แบบความต้านทานดินของฐานเสาชนิดขึ้นกับความถี่ (a,c) และ ชนิดที่ใช้ค่าความต้านทานคงที่ (b)	36
3.3 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ ของแบบจำลองในรูปที่ 3.2	36
3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Π_1 กับ Π_2	38
3.5 แบบจำลองชนิดพาราเมเตอร์คงที่	39
3.6 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่าของ IEEE	42
3.7 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่าของ Pinceti	43

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่าของ Fernandez	44
3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของตัวเหนี่ยวนำ L_1 กับ เปอร์เซนต์การเพิ่มของแรงดัน เหลือค้างเมื่อป้อนกระแสอิมพัลส์ (a) 5 kA, (b) 10 kA.....	46
3.10 การลดรูปของวงจรสมมูลเพื่อนำไปใช้เป็นแบบจำลองของกับดักฟ้าผ่าที่สมบูรณ์	46
3.11 แบบจำลองอินทิเกรชั่น.....	48
3.12 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองลีดเดอร์	50
4.1 รูปคลื่นของแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	53
4.2 โครงสร้างของเสา 500 kV และรูปแบบการวางตัวของสายส่งที่ใช้ในการวิเคราะห์	53
4.3 แบบจำลองเสาไฟฟ้า	54
4.4 การใช้ TACS ควบคุมการเกิดเบรกดาวนซ์ของแบบจำลองอินทิเกรชั่น	55
4.5 การใช้ MODELS ควบคุมการเกิดเบรกดาวนซ์ของแบบจำลองลีดเดอร์	55
4.6 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า EXLIM P396-GH550 ของ IEEE	57
4.7 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า EXLIM P396-GH550 ของ Pinceti.....	58
4.8 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า EXLIM P396-GH550 ของ Fernandez.....	59
4.9 วงจรที่ใช้จำลองด้วย EMTP เพื่อหาแรงดันเหลือค้างของกับดักฟ้าผ่า.....	60
4.10 แรงดันเหลือค้างสำหรับกระแสอิมพัลส์ 8/20 μ s, 10 kA ของแบบจำลอง (a) IEEE, (b) Pinceti และ (c) Fernandez	61
4.11 แรงดันเหลือค้างสำหรับกระแสอิมพัลส์ 1/2 μ s, 10 kA ของแบบจำลอง (a) IEEE, (b) Pinceti และ (c) Fernandez	61
4.12 แบบจำลองระบบสายส่ง	62
4.13 ระยะฟ้าผ่าลงที่สายล่อฟ้า และสายเฟส	65
4.14 โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มุมเอียง θ ใด ๆ	65
4.15 เวกเตอร์ Z	66
4.16 เวกเตอร์ P	66
4.17 เส้นโค้งแรงดัน-เวลา.....	70
4.18 แรงดันยอดเสามาเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเป็น 350 m ที่ความต้านทานดินของฐานเสาค่า ต่าง ๆ.....	71
4.19 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ใช้ใน LPDW	75

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม A-W.....	78
5.2 แรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยฉนวนของแต่ละเฟสเมื่อฟ้าผ่าลงที่ GW1 กรณีไร้แหล่งจ่ายแรงดันระบบ	80
5.3 กระแสฟ้าผ่าวิกฤติของแบบจำลองเบรกดาวน์แบบต่าง ๆ	80
5.4 อัตราการเกิดความผิดพลาดของแบบจำลองเบรกดาวน์แบบต่าง ๆ	81
5.5 แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนที่ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดการเบรกดาวน์หนึ่งเฟสของแบบจำลองเบรกดาวน์แบบต่าง ๆ ในกรณีเกิดการแลบข้ามกลับ	82
5.6 แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนที่ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดการเบรกดาวน์ของแบบจำลองเบรกดาวน์แบบต่าง ๆ ในกรณีเกิดความล้มเหลวของการป้องกันด้วยสายล่อฟ้า	82
5.7 กระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ความต้านทานดินของฐานเสา ก่อนเกิดดีสชาร์จค่าต่าง ๆ กัน	83
5.8 BFR ที่ความต้านทานดินของฐานเสา ก่อนเกิดดีสชาร์จค่าต่าง ๆ กัน	84
5.9 กระแสฟ้าผ่าวิกฤติกรณีเกิดการแลบข้ามกลับของแบบจำลอง MOV type 92 ของ EMTP (E) และ แบบจำลอง Pinceti (P).....	87
5.10 อัตราการเกิดความผิดพลาดเมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1, 2 และ 3 เทียบกับเมื่อไม่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าของแบบจำลอง MOV type 92 ของ EMTP	87
5.11 เปอร์เซนต์อัตราการเกิดความผิดพลาดเมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1, 2 และ 3 เทียบกับเมื่อไม่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	88
5.12 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม FLASH	89
5.13 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม LPDW - ข้อมูลทั่วไป....	90
5.14 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม LPDW - ความต้านทานดินของฐานเสา	91
5.15 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม LPDW - สายเฟสและสายล่อฟ้า	91
5.16 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม LPDW - ลูกถ้วย.....	91
ก.1 ฟ้าผ่าลงบนยอดเสา.....	100
ก.2 รูปคลื่นเสิร์จฟ้าผ่าที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	100
ก.3 Lattice diagram ที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเสิร์จที่สะท้อนจากฐานเสา	100
ก.4 แรงดันที่ยอดเสา.....	101

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.5 Lattice diagram ที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเสิร์จที่สะท้อนมาจากเสาต้นถัดไป	105
ข.1 สายตัวนำ 2 เส้น และ เสิร์จอิมพีแดนซ์ร่วม.....	108
ข.2 ระยะห่างระหว่างตัวนำ 2 เส้น.....	108
ข.3 เสิร์จอิมพีแดนซ์ร่วมของสายตัวนำ 2 เส้น.....	109
ข.4 แฟกเตอร์คัปปลิง e_2/e_1	110
ข.5 สายล่อฟ้า 2 เส้น และสายเฟส 1 เส้นที่นำไปใช้หาแฟกเตอร์คัปปลิง	111



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำทั่วไป

ระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าโดยทั่วไปจะเป็นระบบสายชิงอากาศ มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบกลางแจ้ง ดังนั้นอุปกรณ์ทั้งหลายเหล่านี้จึงมีโอกาสที่จะได้รับแรงดันเกินเนื่องจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า แรงดันเกินฟ้าผ่านี้มีช่วงการเกิดระยะสั้น ๆ ในลักษณะเสิร์จหรือทรานเซียนต์ และมีขนาดมากกว่าแรงดันเกินชนิดอื่น ๆ แรงดันเสิร์จฟ้าผ่าแม้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาอันสั้น แต่มีความสำคัญต่อเสถียรภาพและความเชื่อถือได้ ของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เพราะในช่วงเวลาดังกล่าว การฉนวนของระบบและของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าหากค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสูงกว่าค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวน จะทำให้เกิดการเบรกดาว์นของฉนวน และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดปกติในระบบ

การป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าโดยป้องกันฟ้าผ่าลงบนสายส่งโดยตรงนั้น โดยทั่วไปจะใช้สายดินชิงในอากาศ (overhead ground wire) เหนือสายส่งตามแนวความยาวของสายส่ง สายดินจะต่อลงดินอย่างดี เช่น มีสายนำลงดิน หรือต่อเข้ากับโครงเสาโลหะ หน้าที่ของสายดินนี้ก็คือเป็นสายล่อฟ้านั่นเอง โดยติดตั้งให้เป็นแนวเด่นที่จะรับ หรือล่อให้ฟ้าผ่าได้ง่ายกว่าที่จะผ่าลงสายเฟส คือ ทำหน้าที่เป็นชิลด์ให้กับสายส่ง แต่ถึงแม้ว่าโดยปกติจะมีการป้องกันสายส่งด้วยสายล่อฟ้าก็ตาม โอกาสที่จะเกิดความผิดปกติจากฟ้าผ่าโดยตรงของระบบสายส่งก็อาจมีได้ เนื่องจาก

1. เมื่อฟ้าผ่าลงมายังสายเฟส จะทำให้แรงดันของสายเฟสเพิ่มขึ้นอย่างมาก เกิดเป็นแรงดันเกินในระบบ ถ้าลูกถ้วยฉนวนไม่สามารถทนต่อแรงดันสูงระดับนี้ได้ การวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนก็จะเกิดขึ้น เรียกว่าเป็นความล้มเหลวของการป้องกันด้วยสายล่อฟ้า หรือ การชิลด์ล้มเหลว (shielding failure)

2. เมื่อฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า ส่วนหนึ่งของกระแสฟ้าผ่าจะไหลลงไปตามเสา ส่วนที่เหลือจะไหลผ่านเข้าไปในสายล่อฟ้า กระแสส่วนที่ไหลลงไปตามเสานี้จะไหลไปยังดินที่ฐานของเสาไฟฟ้าผ่านความต้านทานดินของฐานเสา แล้วสะท้อนกลับไปยังยอดของเสา ทำให้เสาไฟฟ้ามีศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น แรงดันคร่อมลูกถ้วย คือ ผลต่างระหว่างแรงดันของเสาไฟฟ้า กับ แรงดันของสายเฟส ถ้ามีค่าสูงอย่างเพียงพอจะก่อให้เกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ หรือแลบข้ามกลับ (backflashover)

เมื่อนำค่าอัตราการเกิดความผิดพลาดในกรณีเกิดการช็อตลัมเพลวมารวมกับค่าอัตราการเกิดความผิดพลาดในกรณีเกิดการแลบข้ามกลับ ก็จะเป็นอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่งนั่นเอง

การป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าเพื่อลดโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดจากฟ้าผ่าของระบบสายส่งเนื่องจากทั้งสองกรณีที่กล่าวมานี้ อาจทำได้โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่า (lightning arrester) กับดักฟ้าผ่าทำหน้าที่เป็นฉนวนกันมิให้กระแสไหลผ่านลงดินขณะใช้งานกับแรงดันปกติ อันเป็นเงื่อนไขของคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน แต่เมื่อเกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าขึ้นในระบบ กับดักฟ้าผ่าจะทำหน้าที่จำกัดแรงดันเกินเสิร์จ และระบายกระแสฟ้าผ่าให้ลงสู่ดินโดยเร็ว เพื่อป้องกันความเสียหาย ซึ่งถ้าแรงดันที่ถูกจำกัดนี้มีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนอยู่ได้ของการฉนวนของอุปกรณ์หรือของระบบ ก็จะไม่เกิดความผิดพลาดขึ้น

1.2 ที่มาของปัญหา

ในประเทศไทย การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าใช้สายส่งระบบ 500 kV เป็นหลัก เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเขตร้อนที่มีอัตราการเกิดฟ้าผ่าสูง ปัญหาฟ้าผ่าลงบนสายส่งจึงเป็นปัญหาสำคัญ การเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าลงสายส่งเป็นผลโดยตรงต่อความเชื่อถือได้ของระบบ จึงมีการศึกษาถึงการประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดจากฟ้าผ่าของระบบสายส่งขึ้น เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบสายส่งได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อไป

การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่งนั้น จะต้องหาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดทั้งในกรณีเกิดการช็อตลัมเพลว และ กรณีเกิดการแลบข้ามกลับ โดยจำลองระบบสายส่งด้วยแบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ จากนั้นนำค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ได้มาใช้คำนวณหาอัตราการเกิดความผิดพลาด การจำลองอุปกรณ์ต่าง ๆ และการคำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดนั้นมีความยุ่งยาก งานวิจัยฉบับนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อศึกษารวบรวมและพัฒนาแบบจำลองต่าง ๆ ในระบบสายส่ง 500 kV และ พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษารวบรวมแบบจำลองต่าง ๆ แล้วนำไปจำลองระบบสายส่งด้วยโปรแกรม EMTD
2. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ใช้โปรแกรม EMTP

- จำลองอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบสายส่ง 500 kV ได้แก่ สายส่ง เสาไฟฟ้า ลูกถ้วย ความต้านทานดินของฐานเสา และ กับดีกฟ้าผ่า รวมถึงแบบจำลองกระแสฟ้าผ่า และ แบบจำลอง การเกิดเบรกดาวน์ของแกปอากาศระหว่าง arcing horn

- ศึกษาผลของแบบจำลองการเกิดเบรกดาวน์ แบบจำลองความต้านทานดินของฐาน เสา และการติดตั้งกับดีกฟ้าผ่าในระบบสายส่ง

- ประเมินค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดปกติ

2. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณอัตราการเกิดความผิดปกติเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง และเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับโปรแกรม FLASH และ LPDW ของต่างประเทศ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. มีความเข้าใจในการจำลองระบบสายส่งด้วยแบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรม EMTP

2. สามารถพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณอัตราการเกิดความผิดปกติเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่งได้

3. สามารถนำไปใช้ในงานออกแบบระบบสายส่งได้อย่างเหมาะสม และมีประสิทธิภาพ

4. ช่วยลดผลกระทบ และความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากฟ้าผ่า

1.6 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษารวบรวมแบบจำลองต่าง ๆ ของอุปกรณ์ในระบบสายส่ง และ ศึกษาทฤษฎีและ หลักการของกระบวนการการประเมินอัตราการเกิดความผิดปกติเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง

2. จำลองระบบสายส่งด้วยโปรแกรม EMTP เพื่อหาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิด ความผิดปกติ

3. พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณอัตราการเกิดความผิดปกติเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง และเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับโปรแกรม FLASH และ LPDW

4. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5. เรียบเรียง ตรวจสอบ และจัดพิมพ์วิทยานิพนธ์เสนอต่อคณะกรรมการและดำเนินการ จัดสอบต่อไป

บทที่ 2

แรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบสายส่งและการป้องกัน

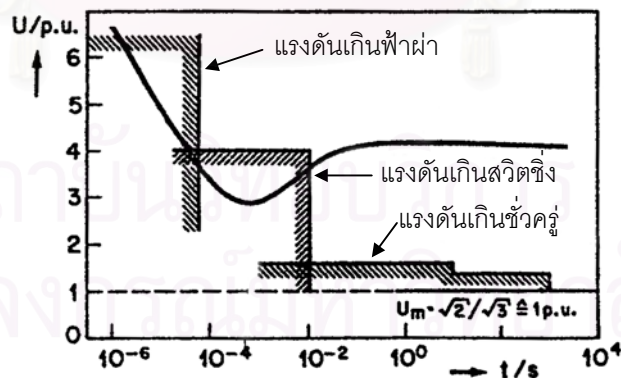
2.1 ชนิดและต้นกำเนิดของแรงดันเกิน

ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามีโอกาสได้รับแรงดันเกินที่มีต้นกำเนิด 2 ประเภท ประเภทแรกมีต้นกำเนิดมาจากภายในบรรยากาศ เช่น ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ประเภทที่สองมีต้นกำเนิดจากภายในระบบ เช่น แรงดันเกินชั่วคราว และแรงดันเกินสวิตชิงอันเนื่องมาจากการปิดวงจร เปิดวงจร หรือเกิดจากการผิดพ่วง [1] โดยแรงดันเกินเหล่านี้อาจมีขนาดเกินกว่าแรงดันระบบหลายเท่า เมื่อพิจารณาขนาดและช่วงระยะเวลาที่เกิดขึ้น อาจแบ่งแรงดันเกินออกได้เป็น 3 ชนิด คือ

- 1) แรงดันเกินฟ้าผ่า (lightning overvoltage)
- 2) แรงดันเกินสวิตชิง (switching overvoltage)
- 3) แรงดันเกินชั่วคราว (temporary overvoltage)

ช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกินทั้ง 3 ชนิดมีค่าแตกต่างกันดังรูปที่ 2.1 เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนว่าแรงดันเกินแต่ละชนิดนั้นมีขนาดมากน้อยเพียงใด จึงมีการเทียบขนาดแรงดันที่เกิดขึ้น

เป็นจำนวนเท่าของแรงดันเฟสค่ายอด $U_{ph} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_m = 1 \text{ p.u. (per unit)}$



รูปที่ 2.1 ช่วงระยะเวลาและขนาดของแรงดันเกินประเภทต่าง ๆ

ในรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าแรงดันเกินฟ้าผ่าจะมีขนาดเป็นจำนวนเท่ามากกว่าแรงดันเกินชนิดอื่น คือมีโอกาสสูงมากกว่า 6 เท่าของแรงดันเฟสค่ายอด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องมีการ

วิเคราะห์เพื่อการป้องกันและการออกแบบการประสานสัมพันธ์การฉนวน (insulation coordination) ให้เหมาะสม

2.2 การป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบสายส่ง

การป้องกันแรงดันเกินที่อาจเกิดขึ้นบนสายส่งเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะสายส่งมีความยาวมากกว่าอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ ในระบบไฟฟ้า มีโอกาสเกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าสูง และสายส่งยังเป็นพาหะที่นำแรงดันเกินจากแหล่งหนึ่งไปยังอีกแหล่งหนึ่ง ไปสู่อุปกรณ์สำคัญ ๆ ในระบบ โดยทั่วไป ในการออกแบบการฉนวนของอุปกรณ์และระบบ จะได้รับการออกแบบให้ทนต่อแรงดันเกินได้ระดับหนึ่ง ส่วนที่เกินกว่านั้นจะให้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินทำหน้าที่ตัด ยุบ หรือลดทอนลงให้ต่ำพอเพื่อมิให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์และระบบโดยอาศัยการประสานสัมพันธ์การฉนวนที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

การป้องกันแรงดันเกินในระบบสายส่ง สามารถนำ 3 วิธีต่อไปนี้มาใช้ร่วมกันได้ [2]

1. การติดตั้งสายดินซึ่งในอากาศเหนือสายส่งตามแนวความยาวของสายส่ง หรือ สายล่อฟ้ามิให้ฟ้าผ่าที่มีขนาดกระแสสูง ๆ ฝ่าลงสู่สายเฟส ในการออกแบบสายล่อฟ้าต้องคำนึงถึงมุมชีลด์ (shielding angle) ที่พอเหมาะและค่าความต้านทานดินของฐานเสาต้องมีค่าต่ำ ๆ เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยสูงและทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวนไปยังสายเฟส

2. การใช้ช่องว่างอากาศระหว่างแท่งอิเล็กโตรด หรือที่เรียกกันว่า arcing horn ติดตั้งคร่อมระหว่างอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน เช่น ลูกถ้วยฉนวน เมื่อเกิดแรงดันเกินขึ้นจะเกิดเบรกดาวนที่แกบอากาศระหว่างแท่งอิเล็กโตรด ช่วยมิให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน ทำให้ลูกถ้วยไม่ได้รับความเสียหาย การเกิดเบรกดาวนของแกบอากาศนี้เป็นการลัดวงจรสู่ดินเพียงชั่วคราวเท่านั้น

3. การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าใกล้กับอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกัน โดยทั่วไปการทำงานของกับดักฟ้าผ่า มีหลักการอยู่ 2 อย่าง คือ ต้องสามารถดิสชาร์จประจุฟ้าสู่ดินได้ ซึ่งทำให้แรงดันเกินลดลงก่อนผ่านเข้าไปยังอุปกรณ์ที่มันทำหน้าที่ป้องกัน และ มันต้องสามารถหยุดนำกระแสไฟฟ้าลงสู่ดินเมื่อประจุฟ้าผ่าถูกดิสชาร์จผ่านไปแล้ว หากหยุดไม่ได้ก็จะมีกระแสไฟฟ้าที่มาจากแหล่งจ่ายพลังงานของระบบไหลติดตามลงไปด้วย มีผลให้ตัวมันทนต่อพลังงานที่ถูกถ่ายเทเป็นเวลาหลาย ๆ มิลลิวินาทีไม่ได้ และเกิดระเบิดขึ้น

การวิเคราะห์แรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบสายส่งเพื่อป้องกันและออกแบบการประสานสัมพันธ์การฉนวนให้เหมาะสมสามารถแยกออกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

1. รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า
2. โอกาสการเกิดฟ้าผ่า

3. จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง
4. ฟ้าผ่าในระบบสายส่ง
5. ระบบซีลด์ และ electrogeometric model
6. การคำนวณอัตราการชัตต์ล้มเหลว และอัตราการแลบข้ามกลับ
7. อัตราการเกิดความผิดปกติ

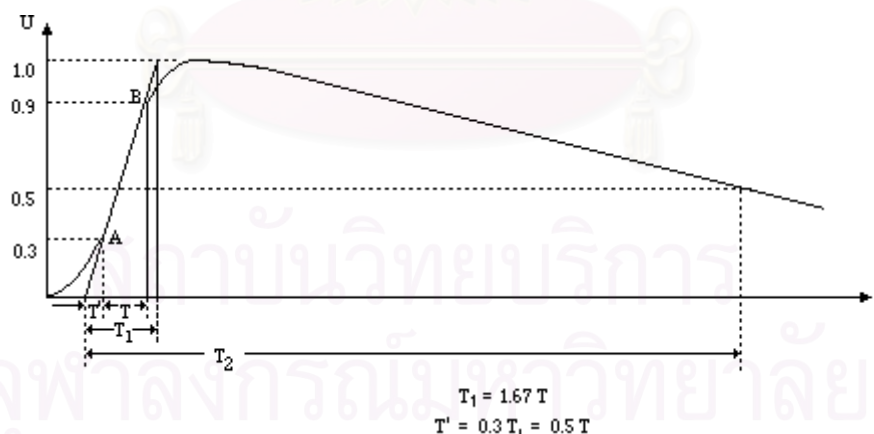
2.2.1 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า (Lightning impulse)

รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าอาจมีรูปร่างแตกต่างกันไป ตามมาตรฐาน IEC 60-1 [3] กำหนดให้รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม เป็นดังรูปที่ 2.2 พารามิเตอร์ต่าง ๆ คำนวณได้ดังนี้

ก) ค่ายอด คือ ค่ายอดของรูปคลื่นเต็ม

ข) เวลาหน้าคลื่น T_1 มีค่าเท่ากับ $1.67T$ โดย T เป็นผลต่างของเวลาที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 30 % ของค่ายอด กับเวลาที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 90 % ของค่ายอด ทั้งนี้สมมุติว่าจุดเริ่มต้นเป็นจุดที่แรงดันมีค่าเป็นศูนย์โดยคำนวณจากเส้นตรงที่ลากผ่านจุด 2 จุดที่นำมาคำนวณค่า T ดังกล่าว เรียกว่าจุดเริ่มต้นเสมือน (virtual origin, O_1)

ค) เวลาถึงกึ่งค่ายอด T_2 เป็นเวลาจากจุดเริ่มต้นเสมือนผ่านค่ายอด จนถึงจุดที่ขนาดของแรงดันมีค่าเท่ากับ 50 % ของค่ายอด



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าเต็ม

2.2.2 โอกาสการเกิดฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นในบรรยากาศ อันเป็นผลของการคายประจุหรือดิสชาร์จของประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ การสะสมของประจุที่มีขั้วต่างกันเป็นผลให้เกิด

สนามไฟฟ้าระหว่างกลุ่มประจุเหล่านั้น ถ้าประจุสะสมรวมกันมีปริมาณมากขึ้น ทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเกินค่าวิกฤติความคงทนของอากาศต่อแรงดันไฟฟ้า ก็จะเกิดการดีสชาร์จของประจุขึ้น อันเป็นจุดเริ่มต้นของการนำไปสู่การเกิดการดีสชาร์จเบรกดาวน์ขึ้น ดีสชาร์จอาจเกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆ หรือระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกก็ได้ ในกรณีที่เกิดดีสชาร์จขึ้นระหว่างเมฆกับพื้นโลก จะเป็นกรณีที่เกิดฟ้าผ่านั่นเอง [4]

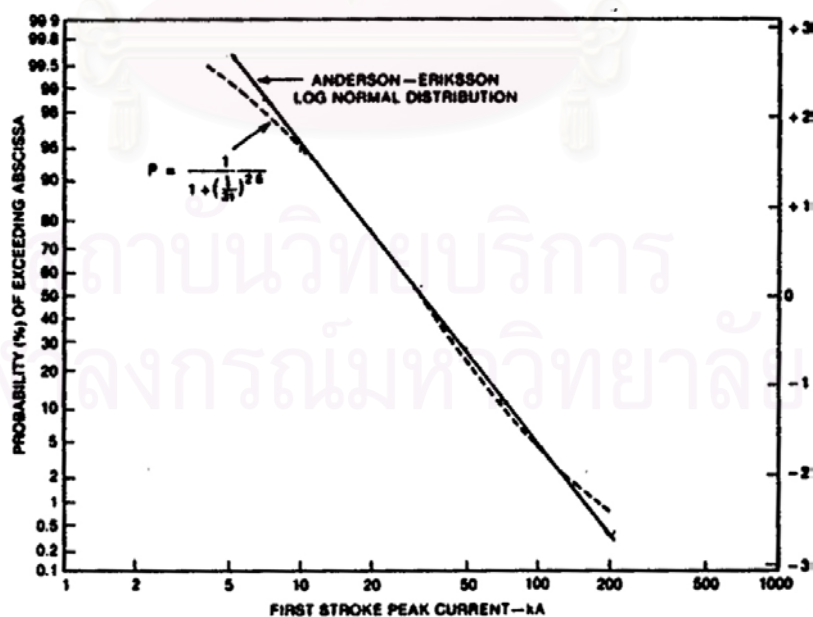
Armstrong-Whitehead [5] ได้นำเสนอโอกาสการเกิดฟ้าผ่า (probability density function) เป็น

$$P(I) = 0.0475e^{(-I/20)} + 0.001e^{(-I/50)} \quad (2.1)$$

โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าเกินกว่ากระแส I_0 อาจหาได้จากสมการประมาณค่าของ IEEE Working Group [6] ซึ่งมีพื้นฐานมาจากข้อมูลของ Anderson และ Eriksson [7] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือ

$$P(I > I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{31}\right)^{2.6}} \quad (2.2)$$

เมื่อ I_0 คือ กระแสฟ้าผ่าค่ายอด (kA)



รูปที่ 2.3 โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าค่ายอดเกินกว่า I_0 สำหรับฟ้าผ่าชั่วฉับ

2.2.3 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง

กำหนดให้ N_g เป็นความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน (ground flash density) (จำนวนครั้งต่อ 1 ตารางกิโลเมตรต่อปี) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากประสบการณ์ มีรูปแบบทั่วไปเป็น

$$N_g = k \cdot TD^a \quad (2.3)$$

เมื่อ TD คือ จำนวนวันที่เกิดฟ้าผ่าต่อปี (thunderstorm day per year หรือ keraunic level) มีผู้เสนอค่าคงที่ k และ a มากมาย Eriksson [8] เสนอสมการของ N_g ซึ่งได้รับการยอมรับจากทั้ง CIGRE และ IEEE [9] คือ

$$N_g = 0.04 TD^{1.25} \quad (2.4)$$

นอกจากนี้ IEEE Working Group [10] ยังได้เสนอสมการ

$$N_g = 0.05 TH \quad (2.5)$$

เมื่อ TH คือ จำนวนชั่วโมงที่เกิดฟ้าผ่าต่อปี (thunderstorm hour per year)

สายส่งที่ทอดแนวอยู่เหนือพื้นดินเป็นระยะสูง h เมตร จะมีไซนบนพื้นดินรอบ ๆ แนวสายที่ฟ้าผ่าเข้าสู่ไซนนี้แล้วก็จะผ่าลงสู่ระบบสายส่งทุกครั้ง แต่ฟ้าผ่านอกไซนนี้จะลงสู่พื้นดินทุกครั้ง รูปที่ 2.4 แสดงถึงลักษณะของไซนดังกล่าวนี้ โดยมองจากทางด้านกว้างออกไปจากเสาเป็นระยะ W และความกว้าง b ซึ่งจะมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อมีจุดสูงสุดเป็นจุดยอดเดียว เช่น การใช้สายดิน 1 เส้น ในทางปฏิบัติค่า b น้อยกว่าค่า h มาก ช่วงกว้าง W นี้เรียกว่า right-of-way width หรือ shadow width Whitehead [11] ได้สร้างสมการหาค่า W (m) ไว้ดังนี้

$$W = 4h^{1.09} + b \quad (2.6)$$

เมื่อ h คือ ความสูงเฉลี่ยของสายเฟส (m)

b คือ ระยะห่างระหว่างสายล่อฟ้า (m)

พารามิเตอร์ h ในสมการ (2.6) หาได้จาก

$$h_{av} = h_{ph} - \frac{2}{3}S \quad (2.7)$$

เมื่อ h_{av} คือ ความสูงเฉลี่ยของสายเฟส (m)

h_{ph} คือ ความสูงของสายเฟสที่เสา (m)

S คือ ระยะหย่อนของสาย (m)

Eriksson [8] เสนอสมการของระยะ W เป็น

$$W = 28 h_t^{0.6} + b \quad (2.8)$$

เมื่อ h_t คือ ความสูงของเสา (m)

สมการของ Eriksson ขึ้นกับความสูงของเสาเท่านั้น แต่สมการของ Whitehead ขึ้นกับความสูงเฉลี่ยของสายเฟส ซึ่งเป็นฟังก์ชันของทั้งความสูงของสายเฟสที่เสาและระยะหย่อนของสาย

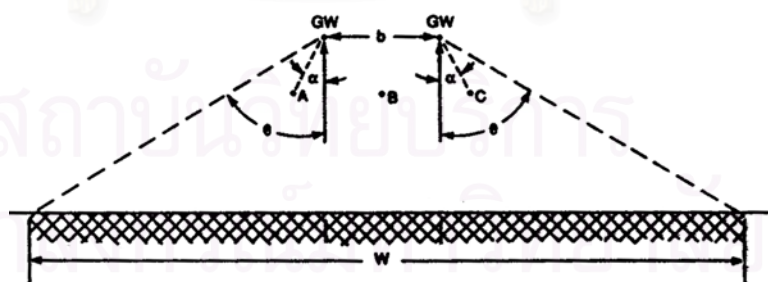
จากสมการของ N_g และ W สามารถกำหนดสมการของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่งต่อระยะทาง 100 กิโลเมตร (N_L) พื้นที่ของแนวสายส่งยาว 100 กิโลเมตร และกว้าง W เมตร

คือ $\frac{W}{10} \text{ km}^2$ ดังนั้น

$$N_L = N_g \cdot \frac{W}{10} \quad (2.9)$$

จาก (2.8) และ (2.9) จะได้

$$N_L = \frac{N_g}{10} (28h_t^{0.6} + b) \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.4 right-of-way width หรือ shadow width (W)

2.2.4 ฟ้าผ่าในระบบสายส่ง

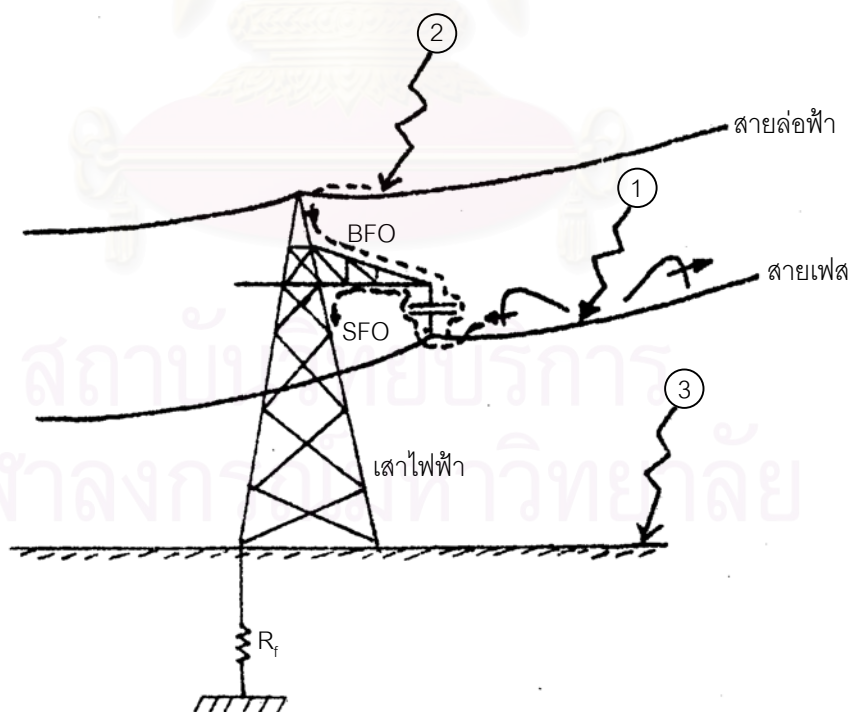
การวิเคราะห์แรงดันเกินฟ้าผ่า จำเป็นต้องกำหนดองค์ประกอบพื้นฐานและค่าพารามิเตอร์ของระบบสายส่งด้วย รูปที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของระบบซึ่งมีสายชีลด์ สายเฟส เสาไฟ

ฟ้า ลูกถ้วยฉนวน และความต้านทานดินของฐานเสา และแสดงการเกิดฟ้าผ่าลงบนระบบสายส่งในกรณีต่าง ๆ ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

กรณีที่ 1 ฟ้าผ่าลงที่สายเฟส แม้มีสายล่อฟ้าเป็นระบบป้องกัน อาจมีการซีลด์ลัมเหลวเกิดขึ้นทำให้แรงดันของสายเฟสเพิ่มขึ้นอย่างมาก หากลูกถ้วยฉนวนไม่สามารถทนต่อแรงดันสูงระดับนี้ได้ ก็จะมีการวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนไปยังเสาและดินที่มีความต้านทานดินของฐานเสา R_f

กรณีที่ 2 ฟ้าผ่าลงที่สายล่อฟ้าที่อยู่เหนือสายเฟส ส่วนหนึ่งของกระแสฟ้าผ่าจะไหลลงไปตามเสา ส่วนที่เหลือจะไหลเข้าไปในสายล่อฟ้า กระแสส่วนที่ไหลลงไปตามเสานี้จะไหลไปยังดินที่ฐานของเสาไฟฟ้า ผ่านความต้านทานดินของฐานเสา แล้วสะท้อนกลับไปยังยอดของเสา ทำให้เสามีศักย์ไฟฟ้าที่สูงขึ้น แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวน คือ ผลต่างระหว่างแรงดันของเสาไฟฟ้ากับแรงดันของสายเฟส ในกรณีที่ฟ้าผ่ารุนแรง ก็อาจเกิดการแลบข้ามลูกถ้วยกลับไปยังสายเฟสทำให้เกิดเสิร์จในสายเฟสได้

กรณีที่ 3 ฟ้าผ่าลงสู่ดิน เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส เนื่องจากค่าแรงดันเกินที่วัดได้แทบจะไม่มีโอกาสที่จะมีค่าเกิน 300 kV [12] แรงดันเหนี่ยวนำนี้จึงมีผลเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในระดับแรงดันของระบบสายส่ง



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งฟ้าผ่า และการเกิดการซีลด์ลัมเหลวและแลบข้ามกลับ

เนื่องจากในกรณีนี้ 3 มีผลไม่รุนแรงเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ในการวิเคราะห์หาโอกาสที่จะเกิดความผิดปกติจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง จึงพิจารณาจากกรณีฟ้าผ่าลงบนสายเฟสและกรณีฟ้าผ่าลงสู่สายล่อฟ้า ซึ่งจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป

2.2.4.1 ฟ้าผ่าลงบนสายเฟส

แรงดันเกินบนสายเฟสที่จุดฟ้าผ่าสามารถคำนวณได้จากค่ากระแสฟ้าผ่าและเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเฟส กระแสฟ้าผ่ามีวงจรสมมูลเป็นแหล่งจ่ายกระแสที่มีค่าอิมพีแดนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 มีโหนดเป็นเสิร์จอิมพีแดนซ์สมมูล ดังนั้นแรงดันเกินที่จุดฟ้าผ่าในรูปที่ 2.6 จึงเป็น

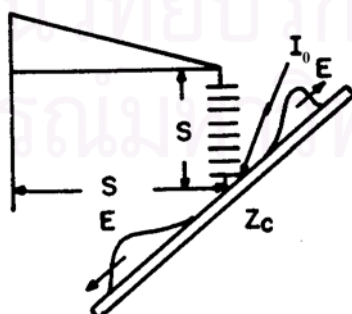
$$E = \frac{I_0 \cdot Z_{eq} Z_0}{(Z_0 + Z_{eq})} = \frac{I_0 Z_{eq}}{\left(1 + \frac{Z_{eq}}{Z_0}\right)} \quad (2.11)$$

- เมื่อ
- E คือ แรงดันเกินที่จุดฟ้าผ่า (kV)
 - I_0 คือ กระแสฟ้าผ่า (kA)
 - Z_{eq} คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์สมมูล (Ω)
 - Z_0 คือ อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า (Ω)

ถ้า $Z_0 \gg Z_{eq}$; $V = I_0 \cdot Z_{eq}$ และในกรณีนี้ $Z_{eq} = \frac{Z_c}{2}$ ดังนั้น

$$V = \frac{I_0 Z_c}{2} \quad (2.12)$$

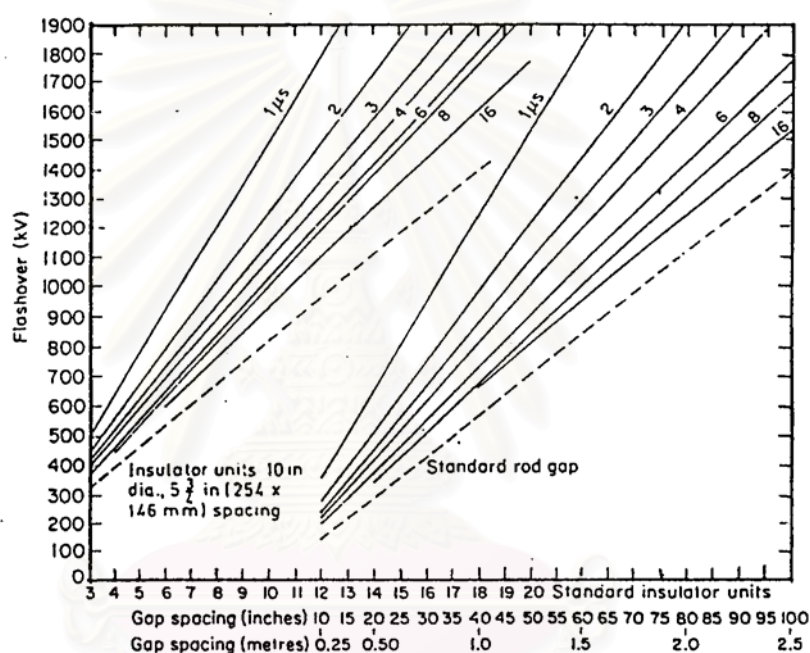
- เมื่อ Z_c คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเฟส



รูปที่ 2.6 วงจรของฟ้าผ่าบนสายเฟส

สมการ (2.12) แสดงถึงการถ่ายเทพริจของกระแส I_0 ไปข้างละครึ่งหนึ่ง ทำให้แรงดันเกิน E เคลื่อนที่ออกไปทางซ้ายและขวาของสายเฟส แรงดันเกินฟ้าผ่าที่เดินทางมาถึงขั้วลู่ด้วยฉนวนที่อยู่ใกล้กับตำแหน่งฟ้าผ่า จะเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวน หรือ เบรกดาวนในแกปอากาศกรณีติดตั้ง arcing horn ต่อเมื่อแรงดันเกินนั้นมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันวิกฤติที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวลู่ด้วยฉนวน หรือ เกิดการเบรกดาวนของแกปอากาศ (critical flashover voltage, CFO) ซึ่งมีค่าดังแสดงในรูปที่ 2.7 ดังนั้นกระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ทำให้เกิดการแลบข้ามได้จึงหาได้จากสมการ

$$I_c = \frac{2 \cdot \text{CFO}}{Z_c} \quad (2.13)$$



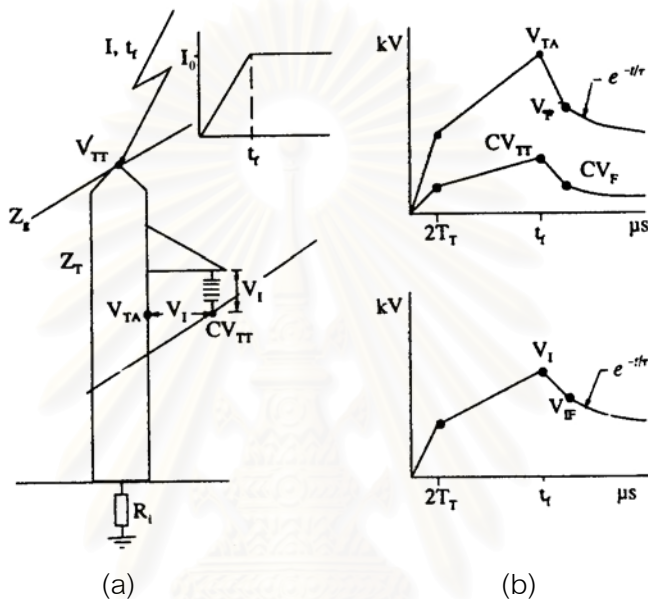
รูปที่ 2.7 แรงดันแลบข้ามลู่ด้วยไฟฟ้า (254 X 146 mm) และช่องว่างอากาศระหว่างแท่งอิเล็คโตรด rod-rod (เวลาบนเส้นกราฟเป็นเวลาที่ใช้ในการเกิดการแลบข้าม แรงดันที่ใช้เป็นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μs สำหรับเส้นประเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ทุก ๆ กราฟอยู่ที่สภาวะอากาศมาตรฐาน 20 °C, 1013 mbar, ความชื้นสัมบูรณ์ 11 g / m³)

2.2.4.2 ฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า

ฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้าทำให้เกิดแรงดันเกินที่ยอดเสา และทำให้เกิดเสิร์จเดินทางแยกเป็น 2 ทาง คือ 1) เดินทางลงไปตามเสา และ 2) เดินทางไปตามสายล่อฟ้าทั้ง 2 ด้าน โดยในกรณีแรก จะทำให้เกิดการสะท้อนของเสิร์จที่จุดต่อระหว่างฐานเสากับความต้านทานดินของฐานเสา ส่วนกรณีที่สองจะทำให้เกิดการสะท้อนของเสิร์จที่ยอดเสาด้านถัด ๆ ไป Hileman [9] ได้เสนอกระบวนการคำนวณค่าแรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า โดยพิจารณาหาแรงดันที่ยอดเสา ทั้งใน

กรณีที่คิดผลของเสิร์จที่สะท้อนที่ฐานเสา และกรณีที่คิดผลของเสิร์จที่สะท้อนมาจากเสาต้นถัด ๆ ไป รายละเอียดของกระบวนการคำนวณแสดงอยู่ในภาคผนวก ก.

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการแลบข้ามกลับของเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้า นั้นเกิดขึ้นได้เมื่อแรงดันเกินที่ตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนมีค่าสูงเกินกว่าที่ลูกถ้วยฉนวนจะทนได้ แรงดันเกินที่ตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนแสดงอยู่ในรูปที่ 2.8 โดยค่าตัวแปรต่าง ๆ สามารถคำนวณได้โดยใช้กระบวนการคำนวณในภาคผนวก ก. ซึ่งสรุปได้ ดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2.8 แรงดันที่เสา และ แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวน

$$V_{TT} = (K_{SP} K_{TT}) I \tag{2.14}$$

$$V_{TA} = (K_{SP} K_{TA}) I \tag{2.15}$$

$$V_F = R_e I \tag{2.16}$$

และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานดินของฐานเสา คือ

$$I_R = \frac{R_e}{R_i} I$$

เมื่อ

$$K_{TT} = R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_f}$$

$$K_{TA} = R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_A}{t_f} \quad (2.17)$$

$$K_{SP} = 1 - \alpha_R (1 - \alpha_T) \left[\left(1 - 2 \frac{T_S}{t_f}\right) + \alpha_R \alpha_T \left(1 - 4 \frac{T_S}{t_f}\right) + (\alpha_R \alpha_T)^2 \left(1 - 6 \frac{T_S}{t_f}\right) + \dots \right]$$

สำหรับชุดสมการ (2.17)

$$R_e = \frac{Z_g R_i}{Z_g + 2R_i} \quad \alpha_T = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i} \approx \frac{Z_g - 2R_i}{Z_g + 2R_i} \quad \alpha_R = \frac{Z_g}{Z_g + 2R_i} \quad (2.18)$$

จากรูปที่ 2.8 ส่วนหางคลื่นของแรงดันอินเป็นผลที่เกิดจากคลื่นสะท้อนจากเสาต้นถัด ๆ ไปจากเสาต้นที่ถูกฟ้าผ่าผ่านนั้นประมาณได้จากค่าคงที่เวลา τ [9] โดย

$$\tau = \frac{Z_g}{R_i} T_s \quad (2.19)$$

โดยที่สมการของแรงดันส่วนหางคลื่นนี้คือ

$$e_{TT} = V_F e^{-(t-t_f)/\tau} \quad (2.20)$$

ตัวแปรต่าง ๆ ในรูปที่ 2.8 และในชุดสมการ (2.14) - (2.20) มีความหมายดังต่อไปนี้

- t_f : เวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่า (μs)
- C : แฟกเตอร์คัปปลิง
- Z_T : เสรีจิมพีแดนซ์ของเสา (Ω)
- Z_g : เสรีจิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้า (Ω)
- T_T : เวลาที่เสิร์จเดินทางในเสา (μs)
- T_A : เวลาที่เสิร์จเดินทางในเสาไปยังตำแหน่ง A ใด ๆ (μs)
- T_S : เวลาที่เสิร์จเดินทางในสายล่อฟ้าจากยอดเสาหนึ่งถึงอีกยอดเสาหนึ่ง (μs)
- I_0 : ค่ายอดของกระแสฟ้าผ่า (kA)
- I_R : กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานดินของฐานเสาต้นที่ถูกฟ้าผ่า (kA)
- R_i : ความต้านทานดินของฐานเสา เมื่อมีกระแสเสิร์จค่าสูงไหลผ่าน (kA)
- τ : ค่าคงที่เวลาของหางคลื่น (μs)

แรงดันเสิร์จในสายล่อฟ้าเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันเสิร์จที่สายเฟส มีค่าเท่ากับค่าแฟกเตอร์คัปปลิง (coupling factor) C คูณกับค่าของแรงดันเสิร์จในสายล่อฟ้า ในรูปที่ 2.8 แรงดัน V_{TA} เป็น

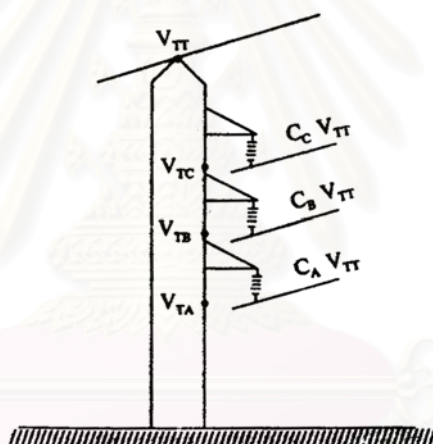
แรงดันบนเสาบนเสาที่ตำแหน่งซึ่งอยู่ตรงข้ามกับสายเฟสพอดี ดังนั้นแรงดันสูงสุดที่คร่อมลูกถ้วย
ฉนวน V_I คือ

$$V_I = I_0 (K_{TA} - CK_{TT}) K_{SP} \quad (2.21)$$

โดยค่า แฟกเตอร์ค้ำปลิงสามารถหาได้จากภาคผนวก ข.

เมื่อพิจารณาสายทั้ง 3 เฟส ที่มีแฟกเตอร์ค้ำปลิงของเฟส A, B และ C เป็น C_A , C_B และ C_C ตามลำดับในรูปที่ 2.9 จะได้แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนของทั้ง 3 เฟส เป็น

$$\begin{aligned} V_{IA} &= (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP} I \\ V_{IB} &= (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP} I \\ V_{IC} &= (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP} I \end{aligned} \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.9 สายส่ง 3 เฟสที่มีแฟกเตอร์ค้ำปลิงและแรงดันยอดเสาแตกต่างกัน

และเมื่อพิจารณาแรงดันของระบบสายส่ง ถ้าให้แรงดันเฟสค้ำยอดคือ V_{LN} จะได้

$$\begin{aligned} V_{IA} &= (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{sp} I + V_{LN} \sin(\omega t) \\ V_{IB} &= (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{sp} I + V_{LN} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ V_{IC} &= (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{sp} I + V_{LN} \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.23)$$

ลูกถ้วยฉนวนจะทนต่อแรงดันเกินไม่ได้เมื่อแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ CFO ของฉนวน ดังนั้น กระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ทำให้เกิดการแลบข้ามกลับได้ จึงหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned}
 I_{CA} &= \frac{CFO - V_{LN} \sin(\omega t)}{(K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP}} \\
 I_{CB} &= \frac{CFO - V_{LN} \sin(\omega t - 120^\circ)}{(K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP}} \\
 I_{CC} &= \frac{CFO - V_{LN} \sin(\omega t + 120^\circ)}{(K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP}}
 \end{aligned} \tag{2.24}$$

จากสมการ (2.24) กระแสฟ้าผ่าวิกฤติประมาณได้เป็น

$$I_C = \frac{CFO - K_{PF} V_{LN}}{K_{SP} (K_{TA} - C_A K_{TT})} \tag{2.25}$$

เมื่อ K_{PF} คือ power frequency factor ในกรณีสายส่งวางตัวในแนวตั้ง (vertical line configuration) ชนิดวงจรรู้นี้ (double circuit) K_{PF} มีค่าเท่ากับ 0.40 และในกรณีสายส่งวางตัวในแนวราบ (horizontal line configuration) K_{PF} มีค่าเท่ากับ 0.70 C_A คือ แฟกเตอร์ค้ำปลิงค่าต่ำสุด

สำหรับ K_{TA} ให้ใช้ค่าของเฟสเดียวกันกับที่มีค่าแฟกเตอร์ค้ำปลิงต่ำสุด

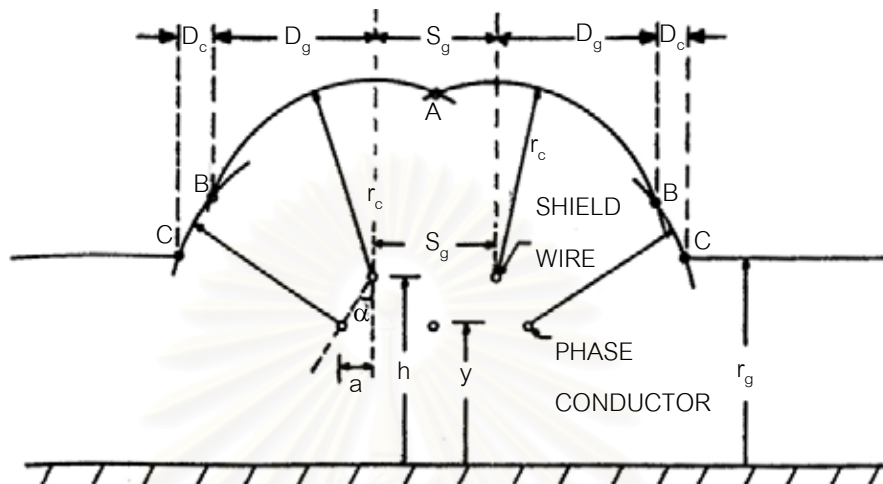
2.2.5 ระบบชิลด์และ electrogeometric model

ในการศึกษาและวิเคราะห์การชิลด์ล้มเหลวและการแลบข้ามกลับเนื่องจากฟ้าผ่านี้ กระทำได้โดยอาศัยหลักการของ electrogeometric model [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.10 อัตราการเกิดการชิลด์ล้มเหลว (Shielding Failure Flashover Rate, SFR) เนื่องจากฟ้าผ่าลงสายเฟสและอัตราการเกิดการแลบข้ามกลับ (Back-Flashover Rate, BFR) จากสายล่อฟ้าไปยังสายเฟส เนื่องจากฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้า เป็นค่าที่นำไปหาอัตราการเกิดความผิดพลาด (Fault Rate, FR)

พิจารณารูปที่ 2.10 ที่ค่ากระแสฟ้าผ่าค่าหนึ่ง ส่วนโค้งของวงกลมที่มีรัศมี r_c มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่สายเฟสและสายล่อฟ้า คือ ระยะฟ้าผ่า (striking distance) ถ้าฟ้าผ่าลงมาอยู่ในระยะฟ้าผ่าของสายล่อฟ้า (โค้ง AB) ฟ้าผ่าจะผ่าลงที่สายล่อฟ้า อาจทำให้เกิดการแลบข้ามกลับ และถ้าฟ้าผ่าลงมาอยู่ในระยะฟ้าผ่าของสายเฟส (โค้ง BC) ฟ้าผ่าจะผ่าลงที่สายเฟส ซึ่งเป็นกรณีของการชิลด์ล้มเหลว แต่ถ้าฟ้าผ่าลงไกลเกินกว่าจุด A ฟ้าผ่าจะผ่าลงสู่ดินหรือพื้นโลก เส้นเพิ่มส่วนโค้ง AB และ BC นี้จะแคบลงถ้ารัศมี r_c สั้นลง นอกจากนี้ความยาวของส่วนโค้ง AB และ BC ยังขึ้นอยู่กับมุมชิลด์ (shielding angle) หรือมุม γ ในรูปที่ 2.10 อีกด้วย รัศมี r_c หรือระยะฟ้าผ่าขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฟ้าผ่าหาได้จากความสัมพันธ์

$$r = Al^b \tag{2.26}$$

มีผู้เสนอค่าคงที่ A และ B มากมาย สรุปได้ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.10 electrogeometric model

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ A และ B สำหรับคำนวณระยะฟ้าผ่า $r = Al^b$ เมื่อ h คือความสูงของสายเฟส และ h_t คือ ความสูงของเสา [10]

ที่มา	r_g ฝ่าลงสู่ดินหรือพื้นโลก		R_c ฝ่าลงสายเฟสและสายล่อฟ้า	
	A	b	A	b
Young et al.	27.0	0.32	$12000/(46^{2-h})$ เมื่อ $A > 27.0$	0.32
Armstrong	6.0	0.80	6.7	0.80
Brown	6.4	0.75	7.1	0.75
Love	10	0.65	10.0	0.65
Anderson	6.4, 8 หรือ 10	0.65	10.0	0.65
IEEE WG	5.12, 6.4 หรือ 8	0.65	8.0	0.65
Eriksson	-	-	$0.67 h_t^{0.6}$	0.74
Rizk	-	-	$1.57 h^{0.45}$	0.69

ในกรณีกระแสฟ้าผ่ามากขึ้น ระยะฟ้าผ่าก็จะมากกว่าที่แสดงในรูปที่ 2.10 ระยะส่วนโค้งของ BC จะลดลง นั่นหมายถึง ความล้มเหลวของการป้องกันด้วยสายล่อฟ้าจะน้อยลงเมื่อกระแสฟ้าผ่ามีค่าสูงถึงระดับหนึ่ง กำหนดให้เป็น I_m ที่ทำให้จุด B และ C ทับกันดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงว่าสายล่อฟ้าจะป้องกันสายเฟสจากฟ้าผ่าได้สมบูรณ์ที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่า I_m เมื่อกระแสฟ้าผ่ามีค่าสูงกว่า I_m ระยะที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสู่สายล่อฟ้าจะกลายเป็นระยะ D_g' ในรูปที่ 2.12 ในทางตรงข้ามถ้ากระแสฟ้าพ้าน้อยลง ระยะฟ้าพ้าน้อยลง ระยะส่วนโค้ง BC และความกว้าง D_c จะเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ้ากระแสมีค่าต่ำกว่า ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติ แรงดันที่เกิดจากกระแสค่านี้ หรือต่ำกว่านี้ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวลูกถ้วยฉนวนได้ ดังนั้นการชิลด์ล้มเหลว จะเกิดขึ้นเมื่อกระแสฟ้าผ่าอยู่ในช่วง $I_c < I < I_m$ ซึ่งโอกาสจะเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับสถิติความน่าจะเป็นของการเกิดของกระแสฟ้าผ่าขนาดนั้น ๆ และถ้าเราสามารถทำให้ $I_m \leq I_c$ ได้การชิลด์ล้มเหลวก็จะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย ซึ่งทำได้โดยการปรับค่ามุมชิลด์ให้เหมาะสม มุมชิลด์ที่เหมาะสมนี้เรียกว่า มุมชิลด์ที่สมบูรณ์ (perfect shielding angle)

อย่างไรก็ดีถึงแม้ว่าฟ้าผ่าจะผ่าลงสายล่อฟ้า ถ้าแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนมากกว่าค่า CFO ก็จะทำให้เกิดการแลบข้ามกลับและเกิดความเสียหายเช่นเดียวกับฟ้าผ่าลงบนสายเฟสเช่นกัน การป้องกันปัญหานี้ก็คือ จะต้องทำระบบสายดินให้มีความต้านทานดินของฐานเสาไฟฟ้ามีค่าต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ ตัวอย่างการคำนวณเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าความต้านทานดินของฐานเสาที่ต่ำจะช่วยลดแรงดันที่ยอดเสาได้แสดงอยู่ในภาคผนวก ก. ค่า D_c , D_g ในรูปที่ 2.10, ค่า I_m และค่ามุมชิลด์ที่สมบูรณ์คำนวณได้ดังนี้

1) การคำนวณระยะ D_c , D_g

รูปที่ 2.13 แสดงไดอะแกรมของสายล่อฟ้าและสายเฟสในรูปที่ 2.10 เพียงซีกเดียว จากรูปที่ 2.13 มุม β หาได้จาก

$$\beta = \sin^{-1} \frac{c}{2r_c} = \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{a^2 + (h-y)^2}}{2r_c} \right] = \sin^{-1} \left[\frac{(h-y)\sqrt{1+\tan^2 \alpha}}{2r_c} \right] \quad (2.27)$$

มุม θ และ α คือ

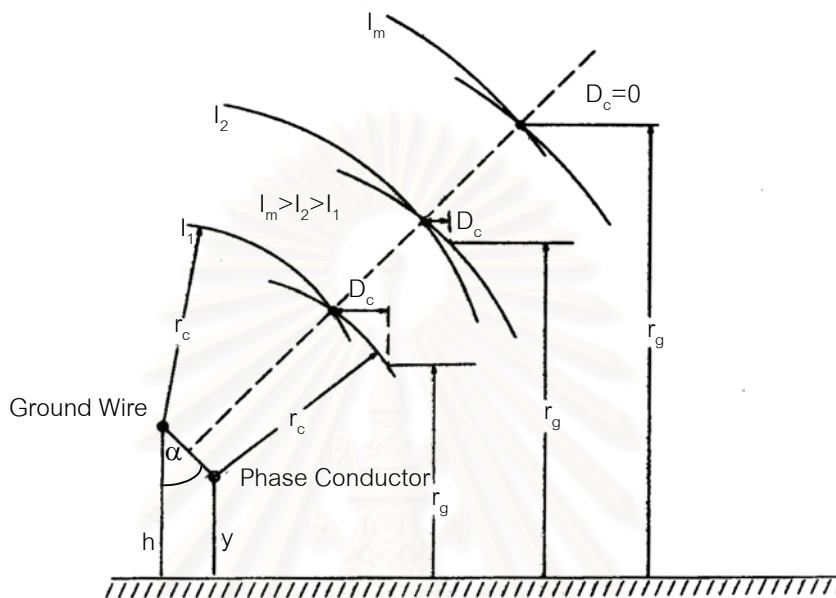
$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{r_g - y}{r_c} \right), \quad \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{a}{h-y} \right) \quad (2.28)$$

จากรูป

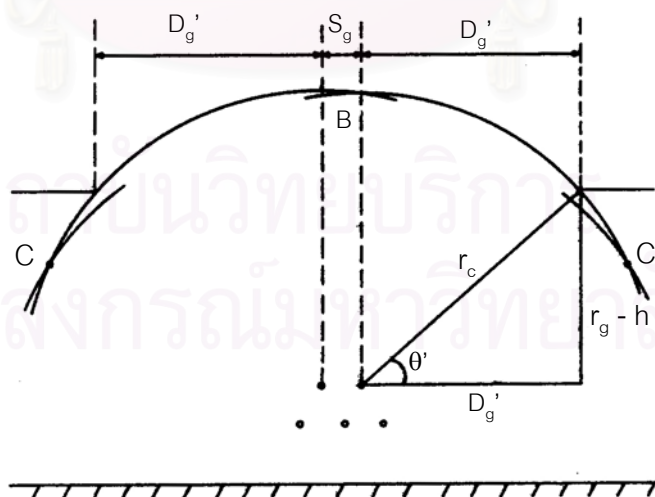
$$D_c = r_c [\cos\theta - \cos(\alpha + \beta)]$$

$$D_g = r_c \cos(\alpha - \beta) \tag{2.29}$$

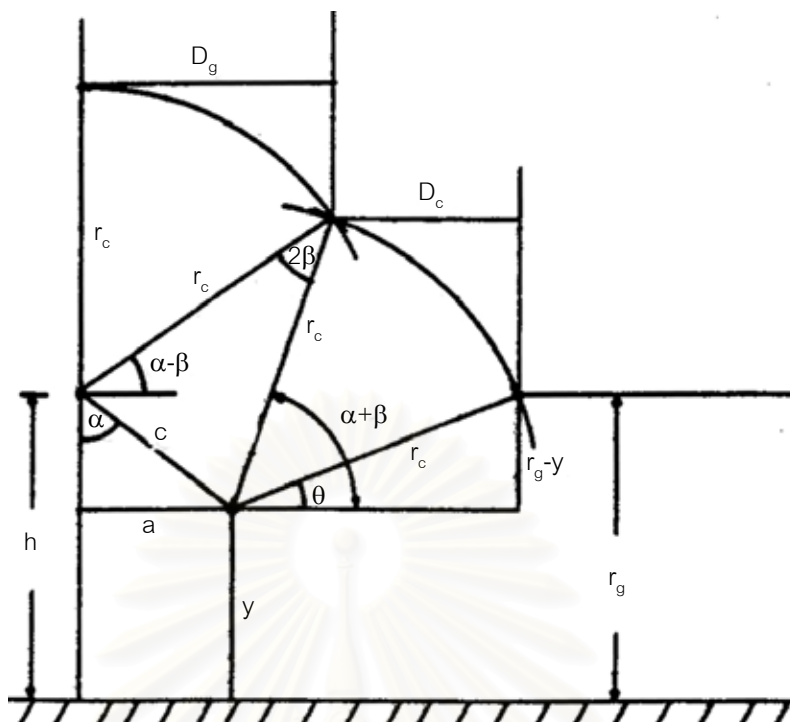
ถ้า r_g น้อยกว่าหรือเท่ากับ y ให้ $\theta = 0$ ในสมการ (2.28)



รูปที่ 2.11 $D_c = 0$ เมื่อ $I = I_m$



รูปที่ 2.12 ระยะ D_g' เมื่อ $I > I_m$



รูปที่ 2.13 ส่วนขยายของรูปที่ 2.10

2) การคำนวณค่า I_m

รูปที่ 2.14 แสดงไดอะแกรมของรูปที่ 2.11 ในกรณีที่ $I = I_m$ ค่าของ r_g ที่กระแสม I_m หรือ r_{gm} หาได้ดังนี้

$$a = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \tag{2.30}$$

$$r_{gm} = \frac{h+y}{2k_0} \left\{ 1 + \sqrt{1 - k_0 \left[1 + \left(\frac{a}{h+y} \right)^2 \right]} \right\} \tag{2.31}$$

เมื่อ $k_0 = 1 - \gamma^2 \sin^2 \alpha$ $\gamma = \frac{r_c}{r_g}$

และจากรูป

$$\sin \alpha = \frac{r_{gm} - \frac{h+y}{2}}{\sqrt{r_{cm}^2 - \frac{c^2}{4}}} \tag{2.32}$$

โดยทั่วไป

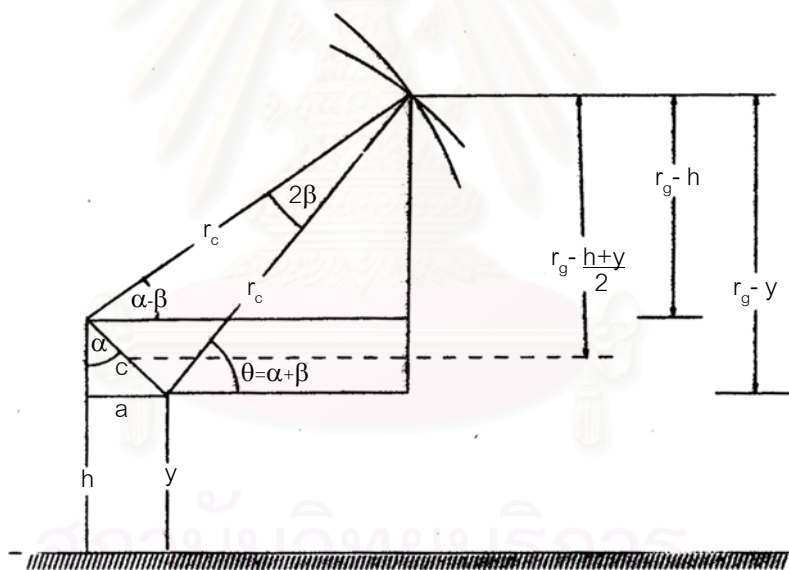
$$r_{cm}^2 = \frac{c^2}{4} \quad (2.33)$$

ค่า r_{gm} จึงประมาณได้เป็น

$$r_{gm} = \frac{(h+y)/2}{1 - \gamma \sin \alpha} \quad (2.34)$$

จากสมการ (2.26) จะได้

$$I_m = \left(\frac{r_{gm}}{A} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2.35)$$



รูปที่ 2.14 ไดอะแกรมสำหรับคำนวณ I_m

3) การคำนวณมุมซีลด์ที่สมบรูณ์

พิจารณารูปที่ 2.14 ถ้ากำหนด ให้ $I_m = I_c$ เพื่อไม่ให้เกิดการซีลด์ล้มเหลว มุมซีลด์ที่สมบรูณ์ α_p หาได้ดังนี้

$$\alpha_p - \beta = \sin^{-1} \left(\frac{r_g - h}{r_c} \right) \quad (2.36)$$

$$\alpha_p + \beta = \sin^{-1}\left(\frac{r_g - y}{r_c}\right) \quad (2.37)$$

จาก (2.12) และ(2.13) จะได้

$$\alpha_p = \frac{1}{2} \left[\sin^{-1}\left(\frac{r_g - h}{r_c}\right) + \sin^{-1}\left(\frac{r_g - y}{r_c}\right) \right] \quad (2.38)$$

หรืออาจคำนวณ α_p ได้จาก

$$\alpha_p = \tan^{-1}\left(\frac{a}{h-y}\right) \quad (2.39)$$

เมื่อ a คำนวณได้จากสมการที่ (2.30) หรือ อาจคำนวณ α_p จาก

$$\alpha_p = \sin^{-1}\left(\frac{r_g - \frac{h+y}{2}}{\sqrt{r_c^2 - \frac{c^2}{4}}}\right) \quad (2.40)$$

เนื่องจาก $c/2 \ll r_c$ ดังนั้น

$$\alpha_p = \sin^{-1}\left(\frac{r_g - \frac{h+y}{2}}{r_c}\right) \quad (2.41)$$

2.2.6 การคำนวณอัตราการชิลด์ลัมเหลว (SFR) และ อัตราการแลบข้ามกลับ (BFR)

การคำนวณค่า SFR และ BFR อาศัยข้อมูลทางสถิติและข้อมูลของระบบสายส่ง ข้อมูลของระบบสายส่งใช้เพื่อนำไปคำนวณหาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่า และคำนวณหาระยะ D_c , D_g เมื่อกระแสฟ้าผ่ามีขนาดเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤติ ส่วนข้อมูลทางสถิติได้แก่ข้อมูลของโอกาสการเกิดฟ้าผ่าและจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่งกระบวนการคำนวณ SFO และ BFO มีดังต่อไปนี้

- 1) เลือกสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาโอกาสการเกิดฟ้าผ่า $P(I)$
- 2) คำนวณจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง (N_L) จาก

2.1) จำนวนวันที่เกิดฟ้าผ่าต่อปี (TD) หรือ ความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน (N_g)

2.2) shadow width (W) ของระบบสายส่งซึ่งคำนวณได้จากความสูงและระยะหย่อนของสาย หรืออาจคำนวณจากความสูงของเสา

3) ค่าความค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติ (I_c) ที่ก่อให้เกิดความผิดปกติ

3.1) กรณีคำนวณหา SFR ค่าความค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติของกรณีฟ้าผ่าลงบนสายเฟสแต่ละเส้น

3.2) กรณีคำนวณหา BFR ค่าความค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติของกรณีฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า

4) ค่าความค่ากระแสฟ้าผ่าต่ำสุดที่ไม่ก่อให้เกิดการช็อตล้มเหลว (I_m) แล้วนำไปเปรียบเทียบกับ I_c (ใช้เพื่อคำนวณ SFR เท่านั้น)

4.1) ถ้า $I_c \geq I_m$ ให้หยุดการคำนวณ SFR

4.2) ถ้า $I_c < I_m$ ให้คำนวณหาความกว้างส่วนที่ฟ้าผ่าสามารถผ่าลงที่สายเฟสแต่ละเส้น ในกรณีสายส่งวงจรเดี่ยววางตัวในแนวราบ ความกว้างนี้คือ D_c ในรูปที่ 2.10

5) ค่าความระยะ D_c ของสายเฟสแต่ละเส้น ในรูปฟังก์ชันของกระแสฟ้าผ่า I

6) ค่าความค่า SFR และ BFR

6.1) SFR คำนวณได้จาก

$$SFR = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{N_g}{10} \int_{I_{ci}}^{I_{mi}} D_{ci} P(I) dI \quad (2.42)$$

เมื่อ

N_c คือ จำนวนเส้นของสายเฟส

D_{ci} คือ ความกว้าง D_c ของสายเฟสเส้นที่ i

I_{ci} คือ กระแสฟ้าผ่าวิกฤติของสายเฟสเส้นที่ i

I_{mi} คือ กระแสฟ้าผ่าต่ำสุดที่ไม่ก่อให้เกิดการช็อตล้มเหลวของสายเฟสเส้นที่ i

$P(I)$ คือ โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสฟ้าผ่าค่า I

ในกรณีของสายส่งวงจรเดี่ยววางตัวในแนวราบ SFR คำนวณได้ง่าย ๆ จาก

$$SFR = 2 \frac{N_g}{10} \int_{I_c}^{I_m} [D_c \cdot P(I)] dI \quad (\text{กรณีสายเฟสสมมาตรกัน 2 ข้าง}) \quad (2.43)$$

เมื่อ D_c คือ ระยะความกว้างในรูปที่ 2.10

6.2) ในการคำนวณ BFR เนื่องจากระยะความกว้างที่ฟ้าผ่าสามารถผ่าลงที่สายล่อฟ้าได้เป็นระยะที่คิดจาก shadow width และ โดยปกติสายล่อฟ้ามีความสมมาตรกันอยู่แล้ว ไม่ว่าจะคำนวณหา I_c ที่สายล่อฟ้าเส้นใด ก็จะได้ค่า I_c ที่เท่ากัน ดังนั้น ค่า BFR สามารถคำนวณได้จาก

$$BFR = N_L \cdot \int_{I_c}^{\infty} f(I) dI \quad (2.44)$$

2.2.7 อัตราการเกิดความผิดพลาด

ผลรวมของค่า BFO และ SFO ของระบบสายส่ง คือค่าสูงสุดที่อาจเป็นอัตราการเกิดความผิดพลาด (FR) เนื่องจากฟ้าผ่า อัตราการเกิดความผิดพลาดนี้ ขึ้นอยู่กับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกัน เช่น กับดักฟ้าผ่าที่ต่ออยู่กับระบบสายส่งด้วย เนื่องจากเมื่อเกิดฟ้าผ่าขึ้นในระบบสายส่งกับดักฟ้าผ่าจะทำหน้าที่ดักเสิร์จฟ้าผ่าไว้ ทำให้กระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดมีค่าสูงขึ้นกว่ากรณีที่ไม่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า อันจะเป็นผลทำให้อัตราการเกิดความผิดพลาดต่ำลงได้

2.2.8 กับดักฟ้าผ่า

กับดักฟ้าผ่าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินได้ทั้งที่เป็นเสิร์จสวิตชิง และ แรงดันเสิร์จฟ้าผ่า ใช้สำหรับป้องกันอุปกรณ์สำคัญ และราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า รีแอกเตอร์ หรืออุปกรณ์ทั้งหลายในสถานีไฟฟ้าย่อย กับดักฟ้าผ่าจะต่อคร่อมอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกันแรงดันเกิน คือ ต่ออยู่ระหว่างเฟสกับดิน กับดักฟ้าผ่าจะประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear resistor) โดยทั่วไปทำด้วย SiC และ ZnO ถ้าเป็นชนิด SiC จะมีสปาร์กแกปต่ออนุกรมกับความต้านทาน แต่ถ้าเป็นชนิด ZnO อาจมีหรือไม่มีสปาร์กแกปก็ได้ กับดักฟ้าผ่าทำหน้าที่เป็นฉนวนกันมิให้กระแสผ่านลงดินที่แรงดันปกติ อันเป็นเงื่อนไขของคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน เมื่อได้รับแรงดันเกินเสิร์จ ตัวต้านทานไม่เชิงเส้นในกับดักฟ้าผ่าจะทำหน้าที่ดักเสิร์จฟ้าผ่าไว้ แรงดันที่เหลือคร่อมความต้านทานไม่เชิงเส้นของกับดักฟ้าผ่าจะเรียกว่า แรงดันเหลือค้าง (residual voltage) ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนอยู่ได้ของการฉนวนของอุปกรณ์หรือระบบ

เนื่องจากความก้าวหน้าในการพัฒนาวัสดุที่ใช้ทำตัวความต้านทานไม่เชิงเส้น แบบ zinc oxide ที่นำมาใช้แทน silicon carbide ทำให้กับดักฟ้าผ่ามีคุณสมบัติในการนำกระแสเสิร์จและป้องกันแรงดันเกินมีประสิทธิภาพมากขึ้น [13] กับดักฟ้าผ่าแบบ zinc oxide เรียกว่า MOA (Metal

Oxide Arrester) เป็นกับดักฟ้าผ่าที่นำมาใช้ได้ดี เป็นที่นิยมมากขึ้น การพัฒนา MOA เริ่มขึ้นนับตั้งแต่ปี พ.ศ. 2513 ในอนาคตก็อาจจะมียุคที่ได้รับการพัฒนาให้ดียิ่ง ๆ ขึ้น

การใช้ช่องว่างอากาศหรือแกปในกับดักฟ้าผ่าก็เพื่อช่วยในการตัดกระแสรั่วที่เกิดจากแรงดันปกติของระบบและผ่านตัวความต้านทานไม่เชิงเส้นเป็นวิธีที่ได้ผลดี แต่การใช้แกปมีข้อเสียอยู่หลายประการที่สำคัญ ๆ ได้แก่

1) แกปอากาศทำให้เกิดแรงดันสปาร์กผ่าน (sparkover voltage) ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการป้องกันแรงดันเสิร์จ เนื่องจากทำให้เกิดค่ายอดแหลมขึ้น

2) แกปอากาศอาจทำงานผิดพลาดและมีการกระจายของแรงดันไม่สม่ำเสมอเนื่องจากมลภาวะบนผิวของกับดักฟ้าผ่า

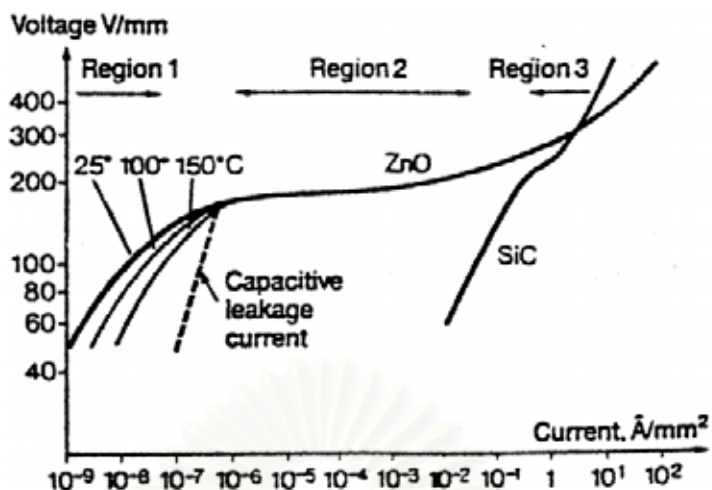
3) แกปอากาศจำเป็นต้องมีระบบ grading ที่ทำให้การผลิตซ์ข้อขึ้น หากเปรียบเทียบกับการใช้แท่ง zinc oxide อย่างเดียว

2.2.8.1 ลักษณะสมบัติของสารผสมของ zinc oxide

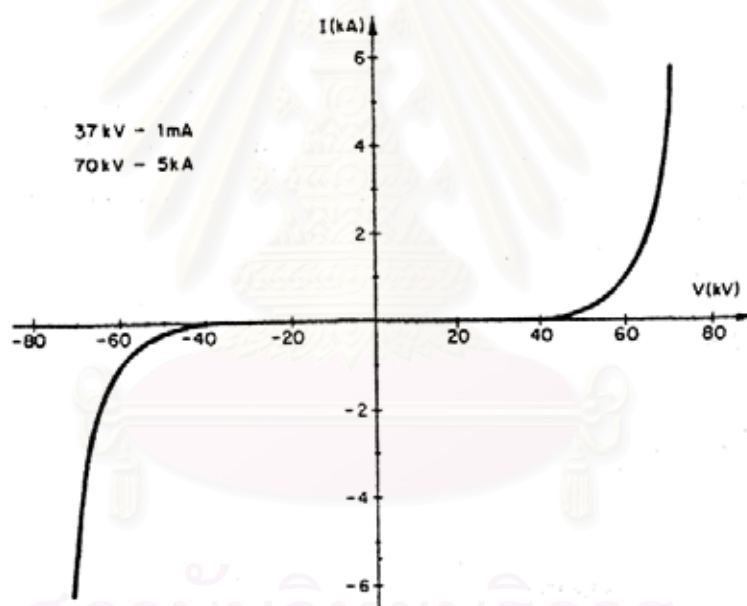
สารผสม zinc oxide มีลักษณะสมบัติไม่เชิงเส้นมาก และสามารถนำกระแสได้ดีจึงมีขนาดความยาวของแท่งน้อยลงและช่วยให้แรงดันคร่อมตัวมันมีขนาดต่ำลงด้วย อันเป็นผลดีต่อการลดระดับแรงดันเกินลงได้อีก ในรูปที่ 2.15 แสดงลักษณะสมบัติของการนำกระแสและแรงดันที่คร่อมตัวความต้านทาน zinc oxide ในรูปนี้ได้แสดงเปรียบเทียบเกี่ยวกับตัวความต้านทาน silicon carbide ด้วย ตัวความต้านทาน zinc oxide สามารถนำกระแสได้ถึง 200 A/cm^2 สำหรับแรงดันชนิด $8/20 \text{ } \mu\text{s}$ ที่มีขนาด 3 kV/cm ในภาวะชั่วคราว แต่ที่สถานะอยู่ตัวและให้แรงดันคงที่ที่ค่าต่ำลงเป็น 1.5 kV/cm จะนำกระแสเพียง 0.1 A/cm^2 โดยสามารถรับพลังงานเข้าไปได้ถึง 4.5 kWs/kV (DC) ต่อขนาดแท่งที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 80 mm

ลักษณะสมบัติของ zinc oxide (ZnO) มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานกับดักฟ้าผ่า โดยสามารถสรุปออกได้เป็นข้อ ๆ ได้ 4 ข้อ ดังนี้

1) ทำให้การกำหนดระดับแรงดันเกินที่ต้องการป้องกันมีความเที่ยงตรงยิ่งขึ้นเนื่องจากสามารถรักษาระดับแรงดันได้ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่นำกระแสที่เกิดจากแรงดันเกินฟ้าผ่า และแรงดันเกินสวิตชิง ตัวอย่างการนำกระแสเป็นดังรูปที่ 2.16

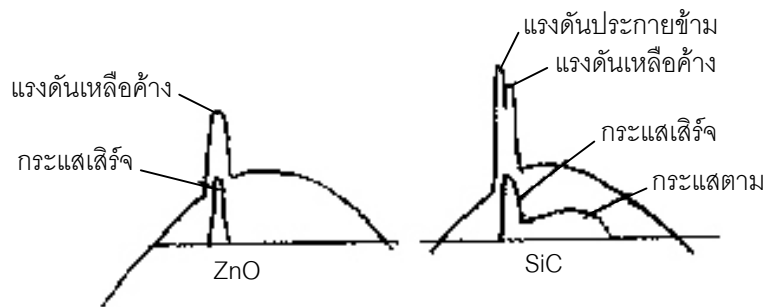


รูปที่ 2.15 ลักษณะสมบัติของ zinc oxide เปรียบเทียบกับ silicon carbide



รูปที่ 2.16 การนำกระแสของ ZnO ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 mm

2) ในขณะที่นำกระแสเสิร์จสามารถช่วยมิให้เกิดแรงดันกระชาก เนื่องจากไม่เกิดสปาร์กผ่าน ทำให้แรงดันเกินในช่วงหน้าคลื่นค่อนข้างเรียบ รูปที่ 2.17 แสดงข้อเปรียบเทียบลักษณะรูปคลื่นแรงดันและกระแสเสิร์จของกับดักฟ้าผ่าที่เป็น ZnO ชนิดไร้แกนและแบบ SiC ที่มีแกน



รูปที่ 2.17 รูปคลื่นแรงดันและกระแสเสิร์จของกับดักฟ้าผ่า ZnO และ SiC

3) การตัดกระแสตามให้เป็นศูนย์ใช้เวลาน้อยกว่าแบบ SiC มาก จึงช่วยลดการรบกวนระบบของภาวะชั่วคราว คุณสมบัตินี้มาจากความไม่เป็นเชิงเส้นมากของ ZnO

4) ความต้านทานของ ZnO มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิแบบลบ ดังในรูปที่ 2.15 แต่มีผลของอุณหภูมิน้อยมากในขณะนำกระแสค่าสูง จึงทำให้กับดักฟ้าผ่า ZnO สามารถนำกระแสสูงสุดินและถ่ายเทพลังงานของเสิร์จได้มากกว่าชนิด SiC

การนำกับดักฟ้าผ่าชนิด ZnO มาใช้ในระบบแรงสูงจึงช่วยลดระดับของฉนวนให้ต่ำลงไปได้อีก ทำให้สัดส่วนในการลงทุนในด้านฉนวนต่ำลง

2.2.8.2 ส่วนประกอบของ ZnO

Metal oxide ที่เป็นชนิด ZnO มีส่วนประกอบที่เติมเข้าไปในเนื้อสารอีกหลายชนิดโดยผสมกันเป็นผงละเอียดก่อนที่จะนำไปอัดขึ้นรูปเป็นแท่งและนำเข้าเตาเผาในสภาพเปิดสัมผัสกับอากาศที่อุณหภูมิ 1200 °C หลังจากนั้นจึงนำมาเคลือบแผ่นนำไฟฟ้าและขั้วต่อ ส่วนประกอบที่สำคัญที่เติมเข้าไป ได้แก่ ออกไซด์ของ bismuth (Bi_2O_3) ซึ่งหลอมละลายเข้ากับ ZnO ที่อุณหภูมิ 750°C ในสภาวะเป็นของเหลว และเมื่อเย็นตัวลงจะเกิดเป็นลักษณะของ bare-grain boundary ที่มีช่องว่างที่เป็นส่วนของ bismuth ประมาณ 50 °Å ทำให้เกิดการสร้าง Schottky barrier ทำให้คุณสมบัติของความไม่เป็นเชิงเส้นมาก นอกจากนี้ยังมีออกไซด์ของโคบอลผสม เพื่อช่วยลดความต้านทานของ ZnO ให้เหมาะกับการใช้งานยิ่งขึ้น

ส่วนประกอบของ ZnO ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน จำเป็นต้องมีเนื้อสารที่สม่ำเสมอโดยตลอดแนวที่กระแสไหล ภายในของ grain มีลักษณะต่อเป็นแถว ๆ แบบขนาน โดยแต่ละแถวมี grain ที่ต่อเนื่องกัน ลักษณะเช่นนี้จะไม่มีจุดใดที่เกิดความร้อนสูงเกินไป และมีการกระจายของกระแสได้ค่อนข้างสม่ำเสมอ บริเวณริม ๆ ของ grain เป็น barrier ที่ทำให้เกิดแรงดันคร่อมรอยต่อประมาณ 2.5 V ในขณะที่มีกระแสไหลมากกว่า 10^{-4} A/cm² และขนาดความหนาโดยเฉลี่ยของ

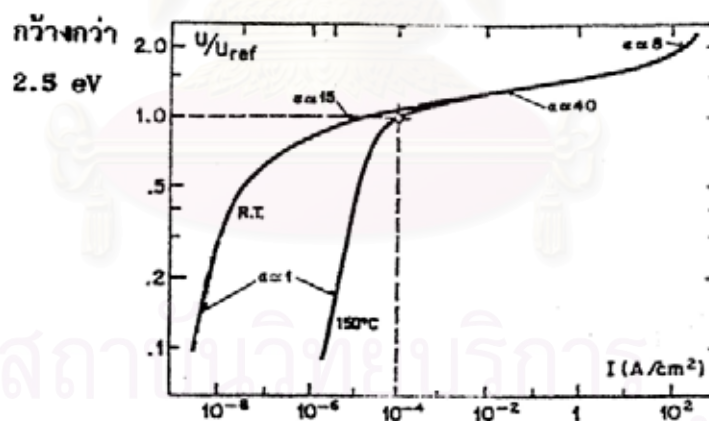
grain ประมาณ 10 ถึง 20 μm ทำให้แรงดันคร่อม ZnO ขณะนำกระแสมีค่าประมาณ 250 V/mm

ลักษณะสมบัติของ ZnO ที่เกี่ยวกับแรงดันและกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.15 เป็นดังสมการ

$$I = KV^\alpha \quad (2.45)$$

ค่า α ในช่วงใช้งานมีค่าแตกต่างกัน ดังในรูปที่ 2.18 ในช่วงกระแสต่ำ ๆ เช่น 10^{-8} ถึง 10^{-6} A/cm² ZnO ให้ค่าความต้านทานสูงและแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ แต่เนื่องจากขนาดกระแสต่ำ จึงไม่เกิดความร้อนสูงมากจนเป็นอันตราย α ในช่วงนี้มีค่าต่ำ α เริ่มมีค่ามากขึ้นและถึง 40 ที่แรงดันค่าสูง ๆ จนเกิดการนำกระแสมาก แต่ในช่วงกระแสสูงยิ่งขึ้น α มีค่าต่ำลง เนื่องจากมีแรงดันคร่อม grain ของ ZnO สูงขึ้น

ในการพัฒนา ZnO ให้มีลักษณะเหมาะสมในการใช้งานจำเป็นต้องพิจารณาถึงความไม่เป็นเชิงเส้นที่มากขึ้น การลดความแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิที่กระแสต่ำ การรักษาระดับแรงดันคร่อม ZnO และความสามารถในการถ่ายเทพลังงานได้สูงขึ้น



รูปที่ 2.18 ลักษณะสมบัติของ ZnO และค่า α

2.2.8.3 การนำไปใช้งานและการทดสอบกับดักฟ้าผ่า

กับดักฟ้าผ่าสามารถนำมาใช้ป้องกันแรงดันเกินที่อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น หม้อแปลง ตัวเก็บประจุที่ใช้เพิ่มค่าตัวประกอบกำลัง ตัวเหนี่ยวนำที่ต่อปลายสายส่งทั้งสองด้านเพื่อทดแทน MVAR ของสายส่ง เครื่องกำเนิดไฟฟ้า มอเตอร์ และเคเบิลแรงสูง เป็นต้น

ข้อกำหนดทางไฟฟ้าที่ต้องการทราบ เพื่อกำหนดขนาดของกั๊บดักฟ้าผ่า ได้แก่ แรงดันของระบบ ข้อมูลสถิติเกี่ยวกับขนาดและรูปคลื่นของแรงดันเกิน สภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิ พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของวงจร เช่น เสรีจิมพีแดนซ์ของสายส่ง เป็นต้น ขนาดของกั๊บดักฟ้าผ่าที่ต้องกำหนดขึ้น ได้แก่ ค่าแรงดันพิคก์ของกั๊บดักฟ้าผ่าซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันเกินชั่วคราวที่อาจเกิดขึ้นในระบบ ข้อมูลของความต้านทานไม่เชิงเส้นของ ZnO ซึ่งกำหนดเป็นค่าแรงดันคร่อม ZnO และกระแสที่ไหลผ่าน ZnO ตารางที่ 2.2 เป็นตัวอย่างของข้อมูลของการนำกระแสเสิร์จและแรงดันคร่อมกั๊บดักฟ้าผ่าชนิด ZnO

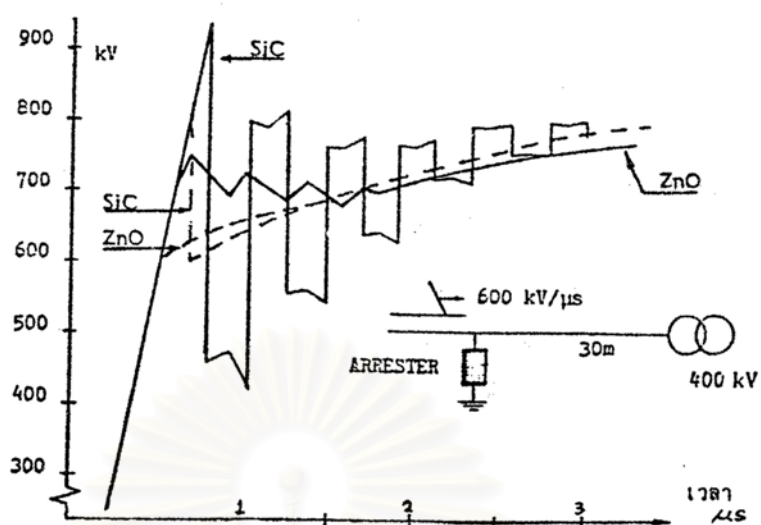
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลของแรงดันและกระแสของกั๊บดักฟ้าผ่า

แรงดันพิคก์ ของกั๊บดักฟ้าผ่า (kV)	ขนาดสูงสุดของแรงดันเกิน (kV) ขณะที่มีกระแสเสิร์จ 8/20 μ s					
	1.5 kA	5.0 kA	10.0 kA	15.0 kA	20.0 kA	40.0 kA
18	28.9	37.1	41.8	44.8	47.8	58.5
192	300	382	427	457	482	585
468	707	913	1018	1100	1171	1427

การทดสอบกั๊บดักฟ้าผ่า ตามมาตรฐาน เช่น IEC ได้แก่

- การทดสอบที่แรงดันความถี่กำลัง (50 Hz) ตามพิคก์ที่กำหนดไว้
- การทดสอบแรงดันเหลือค้าง
- การทดสอบกระแสอิมพัลส์ที่กั๊บดักฟ้าผ่าทนกระแสได้
- การทดสอบการทำงานปกติทุกนาที่เป็นจำนวนเท่าที่กำหนด เช่น 24 ครั้ง
- การทดสอบการทำงานภายใต้มลภาวะ
- การทดสอบระบายความดันภายใน ที่ใช้ป้องกันการเกิดความดันสูงภายใน
- การทดสอบอายุการใช้งาน
- การทดสอบทางกลเกี่ยวกับฉนวนพอร์ซเลนที่นำมาใช้งาน

การใช้กั๊บดักฟ้าผ่าแบบ ZnO ช่วยลดระดับฉนวนไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ได้รับการป้องกันได้ รูปที่ 2.19 เป็นข้อสรุปถึงผลในการลดระดับแรงดันเกินสวิตชิง และทำให้ระดับความทนของฉนวน (BIL) ห่างจากระดับแรงดันเกินมากยิ่งขึ้น อันเป็นการเพิ่ม safety margin ในการป้องกันแรงดันเกิน



รูปที่ 2.19 การเปรียบเทียบแรงดันเกินสวิตชิงกับ BIL กรณีใช้กับดักฟ้าผ่า ZnO และ SiC

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

โปรแกรม EMTP และการจำลองอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบสายส่ง

3.1 โปรแกรม EMTP

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง นอกจากในสถานะอยู่ตัว ซึ่งได้แก่ การวิเคราะห์โหลดโฟลว์ (Load Flow) และการคำนวณกระแสลัดวงจร ยังมีการวิเคราะห์ในสภาวะทรานเซียนต์ที่สามารถแบ่งออกได้ตามเวลาที่พิจารณา ได้แก่ ทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Transients) ที่มีช่วงเวลาเป็นไมโครวินาที ถึงวินาที และทรานเซียนต์กลไฟฟ้า (Electromechanical Transients) ที่นำมาพิจารณาในการศึกษาเสถียรภาพ (Stability Studies) ของเครื่องจักรกลไฟฟ้า ซึ่งจะมีช่วงเวลาเป็นมิลลิวินาที และวินาที Electro-Magnetic Transients Program หรือที่เรียกกันย่อ ๆ ว่า EMTP เป็นโปรแกรมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยในการคำนวณระบบไฟฟ้าในสภาวะทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า ในตัวโปรแกรม EMTP ประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน R, ตัวเหนี่ยวนำ L, ตัวเก็บประจุ C และ อุปกรณ์ต่าง ๆ สำหรับจำลองระบบไฟฟ้า และ ส่วนประกอบต่าง ๆ รวมทั้งวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ระบบควบคุมโดยผ่านองค์ประกอบสำหรับการวิเคราะห์ระบบควบคุม ได้แก่ TACS (Transient Analysis of Control System) และ ภาษา MODELS และ ยังสามารถวิเคราะห์ระบบเครื่องกลไฟฟ้า เช่น มอเตอร์, เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ได้อีกด้วยจึงเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวาง

การวิเคราะห์สภาวะทรานเซียนต์ของ EMTP นั้นทำในโดเมนเวลา ทำให้สามารถนำผลการวิเคราะห์ช่วงเวลาที่ผ่านมา ๆ ไปแล้ว มาใช้ในการคำนวณค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการได้ โดยอาจนำมาคำนวณผ่าน TACS หรือ MODELS ก็ได้ นอกจากนี้ การวิเคราะห์ในโดเมนเวลา ยังสามารถดำเนินการกับอุปกรณ์ไม่เชิงเส้นได้ง่ายเมื่อเทียบกับวิธีการวิเคราะห์ในโดเมนความถี่อีกด้วย

ในการจำลองระบบไฟฟ้าด้วย EMTP อาจทำโดยสร้างองค์ประกอบจำลองจากแบบโดยประมาณ ไปจนถึงแบบที่ละเอียดถูกต้องดังตัวอย่างเช่น แหล่งจ่ายพลังงานขนาดใหญ่ซึ่งมีเครื่องไฟฟ้าหลาย ๆ เครื่อง อาจสร้างองค์ประกอบจำลองโดยประมาณเป็นแหล่งจ่ายแรงดันอนุกรมกับอิมพีแดนซ์เท่านั้น การเลือกใช้อุปกรณ์จำลองจะขึ้นอยู่กับชนิดของงาน การวิเคราะห์และที่ตั้งขององค์ประกอบ ซึ่งอาจอยู่ในโซนที่มีความสำคัญต่อการวิเคราะห์มากน้อยไม่เท่ากัน เช่น โหลดทางด้านแรงต่ำอาจมีความสำคัญไม่มากนักในการวิเคราะห์ทางด้านแรงสูง จึงใช้วงจรสมมูลแบบง่าย ๆ ได้ เช่น เป็นค่าอิมพีแดนซ์ตัวเดียว หลังจากสร้างองค์ประกอบจำลองต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว

ก็สามารถนำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นระบบไฟฟ้าเพื่อนำมาวิเคราะห์ได้ ซึ่งในการวิเคราะห์อาจมีความจำเป็นที่จะต้องนำระบบควบคุม เข้ามาควบคุมระบบไฟฟ้าให้ทำงานได้ตามต้องการ เช่น ในงานวิจัยนี้จำลองการเกิดความผิดพลาดที่เกิดจากฟ้าผ่าในระบบสายส่ง ในการจำลองการเกิดเบรกดาวนของ arcing horn ทำได้โดยใช้ TACS หรือ MODELS มาควบคุม โดยพิจารณาว่าในขณะนั้นสามารถเกิดการเบรกดาวนตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้หรือไม่ ถ้าสามารถเกิดได้ก็สั่งให้สวิตช์ควบคุมด้วยสัญญาณ TACS (TACS switch) ปิดลงมา TACS และ MODELS มีหลักการทำงาน และความสามารถดังนี้

3.1.1 TACS [14]

TACS ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อเป็นองค์ประกอบจำลองแบบบล็อกไดอะแกรม โดยผู้ใช้งานสามารถนำฟังก์ชันสำเร็จรูปที่มีการสร้างเอาไว้ใน EMTP อยู่แล้วมาประกอบกันเพื่อใช้ได้ทันที แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ TACS ไม่ได้รับการออกแบบมาเพื่อสร้างอัลกอริทึม จึงค่อนข้างลำบากในการออกแบบวงจรควบคุมในลักษณะที่ต้องใช้อัลกอริทึมที่ซับซ้อน

การเชื่อมต่อ (interface) ระหว่าง TACS และ วงจรไฟฟ้าเป็นการเชื่อมต่อแบบทางเดียว ผลการคำนวณจากวงจรไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านไปยัง TACS แล้ว TACS จะคำนวณได้ผลลัพธ์ออกมาส่งต่อให้แก่วงจรไฟฟ้าในรอบการคำนวณถัดไป ทำให้เกิดความล่าช้าในการส่งผลการคำนวณจาก TACS เข้าสู่วงจรไฟฟ้าเป็นเวลา Δt เวลาล่าช้าของสัญญาณควบคุมจาก TACS นี้ อาจส่งผลให้เกิดความไม่เสถียรในการคำนวณได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของ Δt และธรรมชาติของระบบที่ทำการจำลอง แต่ถ้านำ TACS มาใช้เป็นส่วนประกอบของระบบควบคุม เวลาล่าช้านี้จะส่งผลดีในการจำลอง เพราะในระบบจริง มักจะมีความล่าช้าของระบบควบคุมอยู่แล้ว อย่างไรก็ตาม ควรจะลดค่า Δt ให้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความไม่เสถียรในการคำนวณ

3.1.2 MODELS [14]

MODELS เป็นภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมที่สร้างขึ้นมาเพื่อใช้ร่วมกับงานซิมูเลชันที่ใช้กับโดเมนเวลา ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและมีความซับซ้อนสูง โดยไม่มีปัญหาเรื่องความล่าช้าในการส่งผลการคำนวณ

MODELS ใน EMTP ได้รับการพัฒนาขึ้นมาเพื่อ

1) ใช้เป็นเครื่องมือในการพัฒนาแบบจำลองของวงจรไฟฟ้า หรือ วงจรควบคุมที่ไม่สามารถสร้างได้โดยง่ายด้วยองค์ประกอบที่มีอยู่แล้วใน EMTP และ TACS

- 2) มีความยืดหยุ่นในการใช้เป็นภาษาในการเขียนโปรแกรมอย่างสมบูรณ์ โดยไม่ต้องติดต่อกับ EMTP อีกในระหว่างกระบวนการคำนวณด้วยโปรแกรม
- 3) สามารถใช้กำหนดค่าเริ่มต้น (initial state) ให้กับองค์ประกอบวงจรไฟฟ้าได้
- 4) ใช้เป็นโปรแกรมมาตรฐานที่เป็นตัวเชื่อมต่อกับ EMTP จากในรูปของแรงดัน กระแส และสัญญาณควบคุม ไปเป็นตัวแปรนำไปใช้ใน MODELS เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่วัดได้จากวงจรโต้ตอบกับวงจรไฟฟ้า โดยไม่ต้องมีความรู้เกี่ยวกับการทำงานภายในของ EMTP และไม่ต้องดัดแปลง source code ของ ATP เลย

3.2 การจำลองอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบสายส่ง

ในการวิเคราะห์แรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบสายส่งให้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้นั้น จำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลอง เพื่อจำลองลักษณะสมบัติของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบ โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะแบบจำลองที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้เท่านั้น

3.2.1 แบบจำลองเสาไฟฟ้า [15]

เมื่อมีฟ้าผ่าลงระบบส่งพลังงานไฟฟ้า surge characteristic ของเสาไฟฟ้าเป็นพารามิเตอร์สำคัญอย่างยิ่ง เพราะมีผลต่อศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมลูกถ้วย และการเกิด flashover โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่สูง ๆ อย่างระบบ EHV และ UHV เวลาในการเดินทางไปและสะท้อนกลับของเล็รจ์นั้นมีค่าใกล้เคียงกับช่วงเวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่า จึงมีผลเป็นอย่างยิ่งต่อแรงดันที่ตกคร่อมลูกถ้วย

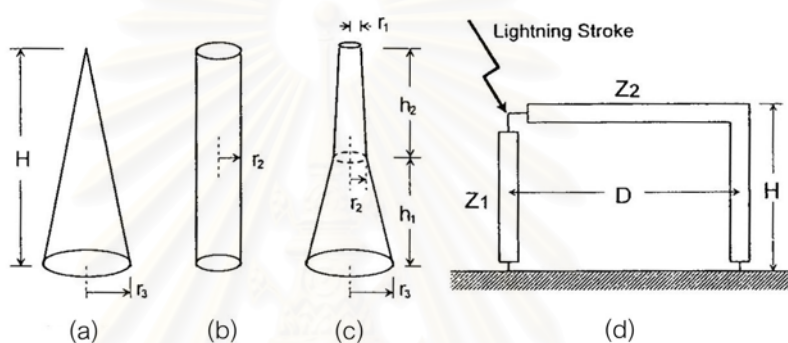
การจำลองโครงสร้างของเสาไฟฟ้า และการคำนวณหา surge characteristic นั้นไม่ใช่เรื่องง่าย แบบจำลองที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเป็นเพียงแบบจำลองง่าย ๆ เพื่อการคำนวณเล็รจ์เท่านั้น แบบจำลองเสาไฟฟ้าที่ดีนั้นต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- (1) อิมพีแดนซ์ที่ยอดเสาในตอนเริ่มต้นมีค่า 100-200 Ω
- (2) คลื่นสะท้อนจากโคนเสามีการลดทอนขนาดลง
- (3) เมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ ค่าอิมพีแดนซ์ของยอดเสาจะเท่ากับค่าของความต้านทานดินของฐานเสา
- (4) คลื่นสะท้อนจากโคนเสามีการเปลี่ยนรูปไป (distortion)
- (5) สามารถคำนวณด้วย EMTP ได้

3.2.1.1 แบบจำลองชนิดไม่มีการสูญเสียและเป็นเนื้อเดียว (lossless•homogeneous line model)

แบบจำลองนี้จำลองเสาไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองของสายที่ไม่มี การสูญเสีย และเป็นเนื้อเดียว มีความยาวเท่ากับ ความสูงของเสาไฟฟ้า มีการนำไปใช้ในโปรแกรม FLASH ของ IEEE เพื่อ คำนวณหาอัตราการเกิด ความผิดพร่องของสายส่ง แบบจำลองนี้มีคุณสมบัติตามข้อ (1), (3) และ (5)

ในโปรแกรม FLASH นั้นมีแบบจำลองของเสาอยู่ 4 แบบดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยสามารถ คำนวณหาเสิร์จ อิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าแบบ (a) - (d) ได้จากสมการ (3.1) - (3.4)



รูปที่ 3.1 แบบจำลองเสาไฟฟ้าของ IEEE

$$Z_{(a)} = 60 \ln \left(\frac{\sqrt{2(H^2 + r_3^2)}}{r_3} \right) \quad (3.1)$$

$$Z_{(b)} = 60 \ln \left(\frac{2\sqrt{2H}}{r_2} \right) - 60 \quad (3.2)$$

$$Z_{(c)} = \sqrt{\frac{\pi}{4}} \cdot 60 \cdot \left\{ \ln \left[\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{r_{avg}}{h_1 + h_2} \right) \right] - \ln \sqrt{2} \right\} \quad (3.3)$$

$$\text{โดย } r_{avg} = \frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{h_1 + h_2}$$

$$Z_{(d)} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.4)$$

$$\text{โดย } Z_1 = 60 \ln \left(\frac{2\sqrt{2H}}{r} \right) - 60$$

$$Z_2 = \frac{D \cdot 60 \ln \left(\frac{2H}{r} \right) + HZ_1}{H+D}$$

โดยให้ความเร็วของคลื่นที่เดินทางในเสาไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 0.85 เท่าของความเร็วแสง

เสาไฟฟ้าแบบ (a) – (c) เป็นเสาไฟฟ้าสำหรับสายส่ง 2 วงจร ขณะที่แบบ (d) เป็นเสาไฟฟ้าสำหรับสายส่งวงจรเดี่ยววางตัวในแนวราบ โดยพิจารณากรณีที่ฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้าด้านหนึ่ง จึงมีเสิร์จอิมพีแดนซ์รวมอันเกิดจากการขนานกันของเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาฝั่งหนึ่ง Z_1 กับเสิร์จอิมพีแดนซ์ส่วนขวางและส่วนเสาอีกฝั่งหนึ่ง Z_2

3.2.2 ความต้านทานดินของฐานเสาไฟฟ้า [15]

ความต้านทานดินของฐานเสาในสภาวะคงตัวขึ้นอยู่กับรูปแบบของตัวนำที่ต่อลงดิน และคุณสมบัติของดินโดยรอบ แต่ในกรณีของกระแสฟ้าผ่าผ่านนั้น ค่าอิมพีแดนซ์มีการเปลี่ยนแปลงก่อนจะเข้าสู่ค่าที่สภาวะคงตัว นอกจากนี้ถ้ากระแสมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดการเบรกดาวนภายในดิน ลักษณะการไหลของกระแสในดินจะเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ที่สภาวะคงตัวเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย แบบจำลองที่สร้างขึ้นมาเพื่อจำลองปรากฏการณ์ที่กล่าวมาจึงแยกออกได้เป็นแบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่ และ แบบจำลองชนิดขึ้นกับกระแส หรือ แบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้น

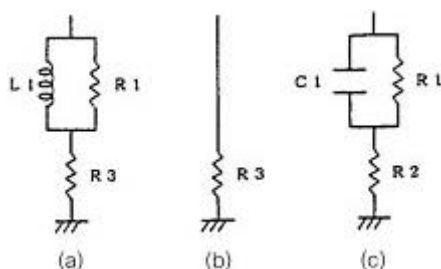
3.2.2.1 แบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่

แบบจำลองนี้แสดงคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของความต้านทานของฐานเสา โดยใช้คุณสมบัติการเหนี่ยวนำ (inductive characteristic) หรือ คุณสมบัติการเก็บประจุ (capacitive characteristic) หรือทั้งสองอย่างคุณสมบัติดังกล่าวขึ้นอยู่กับสภาพของดิน นอกจากนี้ถ้าสายนำจากขาของเสาไฟฟ้ามีความยาวมากจะไม่สามารถละเลยเวลาในการเดินทางของคลื่นได้ จะต้องพิจารณาคูณสมบัติทางความถี่ด้วย รูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่ และแบบจำลองชนิดที่ใช้ค่าความต้านทานคงที่เพียงอย่างเดียว

สำหรับแบบจำลองในรูปที่ 3.2 ค่า R_1 , R_2 , R_3 , L_1 และ C_1 มีความสัมพันธ์กันดังต่อไปนี้

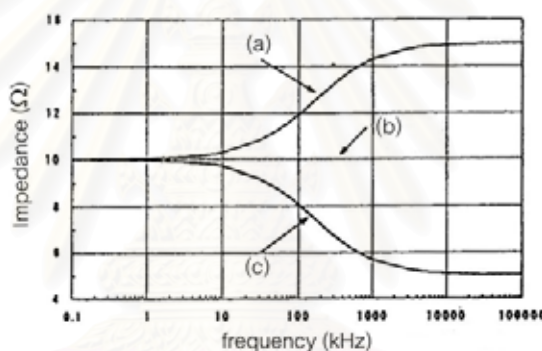
$$\frac{L_1}{R_1} = R_1 C_1 = \text{time constant} \quad (3.5)$$

$$R_3 = 2R_1 = 2R_2 \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.2 แบบความต้านทานดินของฐานเสาชนิดขึ้นกับความถี่ (a,c) และ ชนิดที่ใช้ค่าความต้านทานคงที่ (b)

ถ้ากำหนดให้ $R_1 = R_2 = 5 \Omega$, $R_3 = 10 \Omega$, $L_1 = 5 \mu\text{H}$, และ $C_1 = 0.2 \mu\text{F}$ เพื่อให้ค่าคงที่เวลาเท่ากับ $1 \mu\text{s}$ จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ ของแบบจำลองในรูปที่ 3.2 ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ ของแบบจำลองในรูปที่ 3.2

จากรูปที่ 3.3 จะเห็นว่าที่ความถี่แรงดันใช้งาน (50 Hz) ค่าอิมพีแดนซ์ของแบบจำลอง (a) และ (c) ยังคงใกล้เคียงกับ 10Ω ดังนั้น เมื่อกำหนดให้แบบจำลองทั้งสามมีค่าความต้านทานดินของฐานเสาเท่า ๆ กันที่ความถี่แรงดันใช้งาน หรือที่ความถี่ก่อนเกิดการดีสชาร์จ (discharge) แล้วจะต้องกำหนดให้ R_3 มีค่าเท่ากับค่าความต้านทานดินของฐานเสาก่อนการเกิดดีสชาร์จ และจากความสัมพันธ์ตามสมการ (3.5) และ (3.6) ก็จะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลอง (a) และ (c) ได้

3.2.2.2 แบบจำลองชนิดขึ้นกับกระแส

Korsunteer ได้เสนอความสัมพันธ์ของความต้านทานดินของฐานเสากับกระแส ดังนี้

$$\Pi_1 = \frac{Rl}{\rho} \quad \text{และ} \quad \Pi_2 = \frac{\rho l}{E_g l^2} \quad (3.7)$$

- โดย R = ความต้านทานของอิเล็กโทรดที่ต่อลงดิน
 ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (ground resistivity)
 l = ความยาวของอิเล็กโทรด
 E_g = สนามไฟฟ้าที่ทำให้ดินเกิดการเบรกดาวน (soil ionization gradient)
 I = กระแสอิมพัลส์

รูปที่ 3.4 แสดงกราฟที่ plot ระหว่าง Π_1 กับ Π_2 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Π_1 และ Π_2 โดยประมาณเป็น

$$\Pi_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Pi_2}} \quad (3.8)$$

กำหนดให้ค่าของ Π_1 และ Π_2 ที่ค่ากระแสวิกฤต I_g ซึ่งก่อให้เกิดดีสชาร์จของดินเป็น Π_{1g} และ Π_{2g} ตามลำดับ และจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง Π_{1g} และ Π_{2g} เป็น

$$\Pi_{1g} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Pi_{2g}}} \quad (3.9)$$

เทียบกับสมการ (3.8) และ (3.9) จะได้

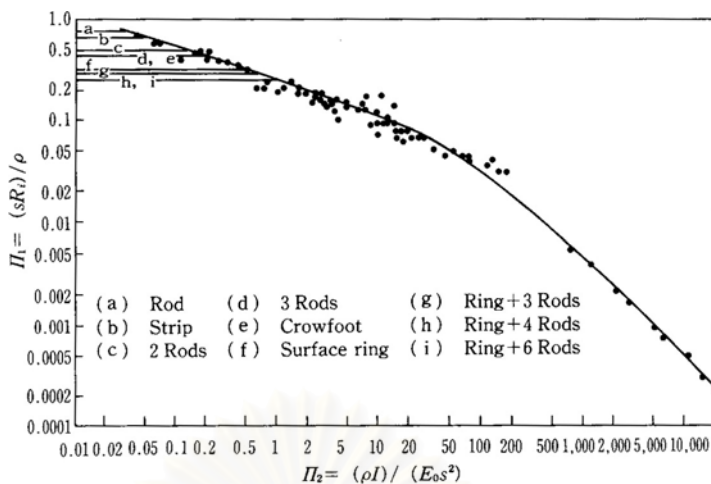
$$\frac{\Pi_1}{\Pi_{1g}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\Pi_2}{\Pi_{2g}}}} \quad (3.10)$$

แทนสมการ (3.7) ลงในสมการ (3.10) จะได้

$$\frac{R}{R_g} = \frac{1}{\sqrt{\frac{l}{l_g}}} \quad (3.11)$$

โดย R_g คือ ค่าความต้านทานของอิเล็กโทรดที่ต่อลงดินเมื่อมีกระแส I_g ไหลผ่าน ค่า R_g นั้นมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานก่อนที่จะเกิดดีสชาร์จ R_0 ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (3.11) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{R}{R_0} = \frac{1}{\sqrt{\frac{l}{l_g}}} \quad (l > l_g) \quad (3.12)$$



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Π_1 กับ Π_2

ก่อนที่จะเกิดดีสชาร์จ

$$\frac{R}{R_0} = 1 \quad (l \leq l_g) \tag{3.13}$$

CIGRE รวมความสัมพันธ์ของสมการ (3.12) และ (3.13) โดยประมาณเป็น

$$\frac{R}{R_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{l}{l_g}}} \tag{3.14}$$

โดยค่า l_g สามารถหาได้จาก

$$l_g = \frac{E_g \rho}{2\pi R_0^2} \tag{3.15}$$

3.2.3 แบบจำลองสายส่ง [15]

การจำลองสายส่งมีผลเป็นอย่างยิ่งต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์เสิร์จในระบบไฟฟ้าสายส่งที่ขึงในอากาศ, สายเคเบิล ตลอดจนพื้นดินนั้นไม่ใช่ตัวเหนี่ยวนำชนิดสมบูรณแบบจึงมีค่าอิมพีแดนซ์อยู่ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์นี้จะแปรเปลี่ยนไปตามความถี่ โดยทั่วไปแล้ว ค่าความต้านทานจะเพิ่มขึ้นตามความถี่ แต่ในทางตรงกันข้าม ค่าความเหนี่ยวนำจะลดลง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองของสายที่ใช้ในโปรแกรม EMTP ซึ่งมีอิมพีแดนซ์ที่ขึ้นและไม่ขึ้นกับความถี่

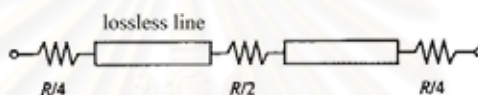
3.2.3.1 แบบจำลองชนิดพารามิเตอร์คงที่ (Constant - parameter model)

แบบจำลองชนิดพารามิเตอร์คงที่ที่เป็นแบบจำลองซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความต้านทานสูญเสีย $R = R(f_t) =$ เสรีจิมพีแดนซ์ $Z_0 = Z_0(f_t)$ และ ความเร็วเสรีจ $v = v(f_t)$ โดย f_t คือ ความถี่หลักที่สถานะทรานเซียนต์ (dominant transient frequency) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ (3.16)

$$\left. \begin{aligned} f_t &= 1/4 \tau : \text{สายส่งปลายเปิด} \\ f_t &\approx 1/3 \tau : \text{มีอิมพีแดนซ์ต่อที่ปลายสาย} \\ f_t &= 1/2 \tau : \text{ลัดวงจรที่ปลายสาย} \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

โดย $\tau = x/v(f_t)$, $x =$ ความยาวสาย

แบบจำลองนี้คิดขึ้นโดย Prof. H.W. Dommel มีวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 3.5 ในแบบจำลองนี้ถ้าให้ $R = 0$ ก็จะกลายเป็นแบบจำลองแบบไม่มีการสูญเสีย



รูปที่ 3.5 แบบจำลองชนิดพารามิเตอร์คงที่

3.2.3.2 แบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่ (Frequency-dependent model)

แบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่เป็นแบบจำลองซึ่งคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของเสรีจิมพีแดนซ์ Z_0 และ propagation constant Γ แต่เดิมนั้นมี Weighting function model, Ametani model, Hauer model บรรจุอยู่ในโปรแกรม EMTP แต่ในปัจจุบันแบบจำลองที่นิยมใช้กันคือ Semlyen model และ J. Marti model ซึ่งแบบจำลองทั้งสองนี้ทำการ convolution ที่ time domain เหมือนกัน แต่วิธีการ convolution นั้นแตกต่างกัน ทั้งสองแบบจำลองนี้ใช้ node theory ในการแยกสาย n เฟสออกเป็น n ตัวที่อิสระจากกัน จึงมีข้อดีตรงที่ทำการ convolution Z_0 และ Γ เพียงแค่ n ครั้ง แทนที่จะต้องทำถึง n^2 ครั้งถ้าทำใน phase domain แต่มีข้อเสียตรงที่สมมติให้ constant matrix เป็น transformation matrix ทำให้การสะสม error เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากการทำการ convolution แต่ละครึ่ง ตัวอย่างเช่น transformation matrix ของสายส่ง 2 วงจรที่วางเรียงกันในแนวตั้งนั้น มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่อย่างมาก ไม่สามารถประมาณให้เป็น constant matrix ได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าช่วงความถี่ของสถานะทรานเซียนต์นั้นแคบก็พอจะสมมติให้เป็น constant matrix ได้ในช่วงความถี่นั้น เช่น ในกรณีวิเคราะห์สวิตช์เสรีจซึ่งสามารถสมมติให้แหล่งจ่ายเป็นไฟกระแสตรง หรือในกรณีวิเคราะห์เสรีจฟ้าผ่าที่ไม่มีการป้อนแหล่งจ่ายกระแสกลับ

3.2.4 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า

โดยทั่วไปการจำลองกับดักฟ้าผ่าทำได้โดยใช้ความต้านทานแบบไม่เชิงเส้นซึ่งแสดง V-I characteristic จากการป้อนกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน 8/20 μ s อย่างไรก็ตามในกรณีของกระแสเล็กรที่มีหน้าคลื่นชันอย่างเช่นเล็กรจากฟ้าผ่าผ่านนั้น แรงดันเหลือค้างของกับดักฟ้าผ่าจะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์ที่เล็กรจากฟ้าผ่าให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้นนั้นต้องคำนึงถึงความชันของเล็กรด้วย ในส่วนนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองชนิดต่าง ๆ ของกับดักฟ้าผ่า

3.2.4.1 แบบจำลองของ IEEE [15]

Working group ของ IEEE ได้ทำการศึกษากับดักฟ้าผ่า และนำเสนอแบบจำลองสำหรับกระแสอิมพัลส์ในช่วง 0.5 – 45 μ s ดังแสดงในรูปที่ 3.6 แบบจำลองนี้แบ่งความต้านทานแบบไม่เชิงเส้นออกเป็น 2 ส่วน คือ A_0 และ A_1 โดย A_0 มีแรงดันสูงกว่า A_1 ที่ค่ากระแสเท่ากัน และมีฟิลเตอร์ RL (R_1 และ L_1) แยก A_0 ออกจาก A_1 ฟิลเตอร์จะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่น้อยลงสำหรับเล็กรที่มีหน้าคลื่นไม่ชัน ดังนั้นฟิลเตอร์จะมีผลมากสำหรับเล็กรที่มีหน้าคลื่นชัน L_0 แทนความเหนี่ยวนำที่มีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กใกล้ ๆ กับกับดักฟ้าผ่า R_0 ใช้เพื่อไม่ให้เกิดออสซิลเลชันเมื่อจำลองด้วย EMTP และ C_0 แทนค่าตัวเก็บประจุภายนอกที่สัมพันธ์กับความสูงหรือความยาวทั้งหมดของกับดักฟ้าผ่า การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทำได้ดังต่อไปนี้

ก) ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบ

d : ความยาวทั้งหมดของกับดักฟ้าผ่า (m)

n : จำนวนของแถวของ ZnO ที่วางขนานกัน

V_{10} : แรงดันเหลือค้าง (kV) ที่เกิดจากการป้อนแรงดันอิมพัลส์มาตรฐาน 8/20 μ s ขนาด 10 kA

V_{ss} : แรงดันเหลือค้าง (kV) ที่เกิดจากกระแสลัดซึ่ง

ข) สูตรในการหาค่า L_0 , R_0 , L_1 , R_1 , C

$$L_0 = (0.2d)/n \quad (\mu\text{H}) \quad (3.17)$$

$$L_1 = (15d)/n \quad (\mu\text{H}) \quad (3.18)$$

$$R_0 = (100d)/n \quad (\Omega) \quad (3.19)$$

$$R_1 = (65d)/n \quad (\Omega) \quad (3.20)$$

$$C = (100n)/d \quad (\text{pF}) \quad (3.21)$$

ค) การหาแรงดันเหลือค้างของ A_0 และ A_1 ที่กระแสต่าง ๆ ในช่วง 0.01-20 kA

$$\text{แรงดันเหลือค้างของ } A_0 \text{ (kV)} = \text{แรงดันเหลือค้างของ } A_0 \text{ (p.u.)} \cdot (V_{10}/1.6) \quad (3.22)$$

$$\text{แรงดันเหลือค้ำของ } A_1 \text{ (kV)} = \text{แรงดันเหลือค้ำของ } A_1 \text{ (p.u.)} \cdot (V_{10}/1.6)$$

$$(3.23)$$

โดยค่าแรงดันเหลือค้ำของ A_0 และ A_1 (p.u.) หาได้จากตารางที่ 3.1

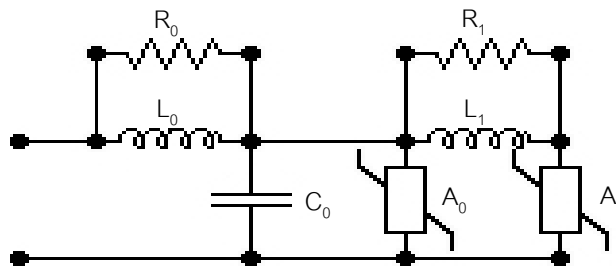
ง) ใช้ค่า V_{ss} ปรับค่า A_0 และ A_1

จ) ปรับค่า L_1 เพื่อให้ได้ค่าแรงดันเหลือค้ำเท่ากับ V_{10} เมื่อป้อนกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน

8/20 μ s

ตารางที่ 3.1 ค่าแรงดันเหลือค้ำของ A_0 และ A_1 (p.u.) ของแบบจำลองของ IEEE

กระแส (kA)	แรงดันเหลือค้ำ (p.u.) ของอิมพัลส์ 10 kA, 8/20 μ s สำหรับ	
	A_0	A_1
0.01	1.40	-
0.1	1.54	1.23
1	1.68	1.36
2	1.74	1.43
4	1.80	1.48
6	1.82	1.50
8	1.87	1.53
10	1.90	1.55
12	1.93	1.56
14	1.97	1.58
16	2.00	1.59
18	2.05	1.60
20	2.10	1.61



รูปที่ 3.6 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่าของ IEEE

3.2.4.2 แบบจำลองของ Pinceti [15]

แบบจำลองนี้นำเสนอวิธีการง่าย ๆ ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกับดักฟ้าผ่า โดยอาศัยข้อมูลเพียงเล็กน้อยจากการทดสอบกับดักฟ้าผ่าของผู้ผลิต วงจรสมมูลของแบบจำลองนี้ปรับปรุงมาจากแบบจำลองของ IEEE ดังแสดงในรูปที่ 3.7 แบบจำลองนี้ไม่มีตัวเก็บประจุอยู่ในแบบจำลองของ IEEE เพราะตัวเก็บประจุนี้ไม่ค่อยมีผลต่อคุณสมบัติของแบบจำลอง และใช้ตัวต้านทานขนาด $1 \text{ M}\Omega$ ต่อระหว่างขั้วทั้งสองของกับดักฟ้าผ่าแทนตัวต้านทานสองตัวซึ่งขนานกับตัวเหนี่ยวนำ การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทำได้ดังนี้

ก) ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบ

V_n : แรงดันพิกัด (rated voltage) (kV)

$V_{r1/T2}$: แรงดันเหลือค้าง (kV) กรณีป้อนกระแสอิมพัลส์ขนาด 10 kA หน้าคลื่น $1 \mu\text{s}$ ส่วนเวลาหลังคลื่นนั้นจะเป็นเท่าไรก็ได้

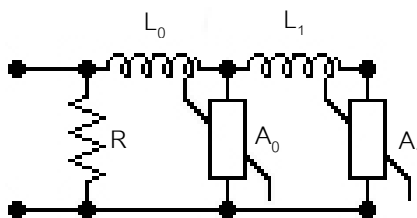
$V_{r8/20}$: แรงดันเหลือค้าง (kV) กรณีป้อนกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน $8/20 \mu\text{s}$ ขนาด 10 kA

ข) สูตรในการหาค่า L_0 และ L_1

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n \quad (\mu\text{H}) \quad (3.24)$$

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \cdot V_n \quad (\mu\text{H}) \quad (3.25)$$

ค) ค่าแรงดันเหลือค้างของ A_0 และ A_1 ที่กระแสต่าง ๆ ในช่วง $0.01 \text{ A} - 10 \text{ kA}$ แสดงในตารางที่ 3.2 ถ้าต้องการให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น อาจทำโดยปรับค่า A_0 และ A_1



รูปที่ 3.7 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่าของ Pinceti

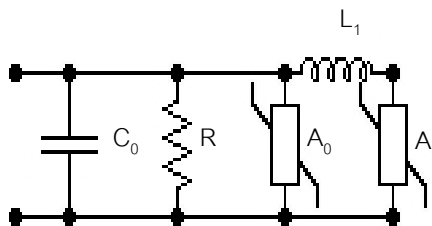
ตารางที่ 3.2 ค่าแรงดันเหลือค้างของ A_0 และ A_1 (p.u.) ของแบบจำลองของ Pinceti

กระแส (kA)	แรงดันเหลือค้าง (p.u.) ของอิมพัลส์ 10 kA, 8/20 μ s สำหรับ	
	A_0	A_1
$2 \cdot 10^{-6}$	0.810	0.623
0.1	0.974	0.788
1	1.052	0.866
3	1.108	0.922
10	1.195	1.009
20	1.277	1.091

แบบจำลองนี้ไม่ได้พิจารณาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของกับดักฟ้าผ่า ใช้เพียงแต่ข้อมูลทางไฟฟ้าในการสร้างแบบจำลอง โดยมีจุดสนใจอยู่ที่การหาค่าแรงดันเหลือค้างของกับดักฟ้าผ่า

3.2.4.3 แบบจำลองของ Fernandez [16]

แบบจำลองนี้ปรับปรุงมาจากแบบจำลองของ IEEE เช่นกัน มีข้อดีคือไม่ต้องทำการปรับค่า A_0 และ A_1 เนื่องจาก A_0 และ A_1 หาได้จากข้อมูลของผู้ผลิตโดยตรง ทำให้มีความง่ายต่อการหาค่าพารามิเตอร์ รูปที่ 3.8 แสดงวงจรสมมูลของแบบจำลองนี้ เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองของ IEEE จะเห็นว่ามี การตัดตัวต้านทาน R_1 ออกไปเช่นเดียวกับแบบจำลองของ Pinceti และ ตัด R_0 กับ L_0 ออกไป C_0 แสดงค่าตัวเก็บประจุระหว่างปลายทั้งสองด้านของกับดักฟ้าผ่า ความต้านทาน R วางขนานกับ A_0 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดออสซิลเลชันเมื่อจำลองด้วย EMTP ความต้านทานไม่เชิงเส้น A_0 และ A_1 ได้รับการปรับแต่งใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับ V-I characteristic จากผู้ผลิต โดยมีเงื่อนไขคืออัตราส่วนของกระแส I_0 ต่อ I_1 (γ) ซึ่งผ่าน A_0 และ A_1 ตามลำดับ เป็นค่าคงที่ตลอดช่วงการป้องกัน



รูปที่ 3.8 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่าของ Fernandez

เมื่อพิจารณาเฉพาะที่กระแสไอพัลส์หน้าคลื่นชั้นที่มีหน้าคลื่นเร็วกว่า $8 \mu\text{s}$ ค่าเปอร์เซ็นต์ของแรงดันที่เพิ่มระหว่างปลายทั้งสองของกับดักฟ้าผ่าจะขึ้นกับตัวเหนี่ยวนำ L_1 เท่านั้น การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ทำได้ดังต่อไปนี้

ก) ค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบ

$U_{In,8/20}$: แรงดันเหลือค้าง (kV) กรณีบ่อนกระแสไอพัลส์มาตรฐาน $8/20 \mu\text{s}$

$U_{In,T1}$: แรงดันเหลือค้าง (kV) กรณีบ่อนกระแสไอพัลส์หน้าคลื่น T_1 ส่วนเวลาหลังคลื่นจะเป็นเท่าไรก็ได้

d : ความยาวทั้งหมดของกับดักฟ้าผ่า (m)

นอกจากนี้ ยังต้องทราบข้อมูลของ V-I characteristic กรณีบ่อนกระแสไอพัลส์มาตรฐาน $8/20 \mu\text{s}$ จากผู้ผลิตด้วย

ข) การหาค่า L_1

พิจารณา elementary valve block ที่มีแรงดันพิกัด 1 kV ที่กระแสดีสชาร์จ 5 และ 10 kA ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนระหว่าง I_0 กับ I_1 (γ) เท่ากับ 0.02 โดยที่ I_0 และ I_1 คือกระแสที่ไหลผ่าน A_0 และ A_1 ตามลำดับ และผลบวกระหว่าง I_0 กับ I_1 มีค่าเท่ากับกระแสไอพัลส์ที่กับดักฟ้าผ่ารับเข้ามา ตารางที่ 3.3 แสดง V-I characteristic ของ valve block และกระแสที่ไหลผ่าน A_0 และ A_1

แบบจำลองสำหรับ elementary valve block ที่กระแส 5 kA และ 10 kA นี้ นำไปจำลองใน EMTP ด้วยกระแสเสิร์จที่มีเวลาหน้าคลื่น และค่า L_1' ต่าง ๆ กัน เพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของแรงดันเหลือค้าง แล้วนำมาพล็อตกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยเปอร์เซ็นต์การเพิ่มของแรงดันเหลือค้างคำนวณได้จาก

$$\Delta U_{res} \% = \frac{U_{In,T1} - U_{In,8/20}}{U_{In,8/20}} \cdot 100 \quad (3.26)$$

จากรูปที่ 3.9 สามารถนำไปใช้หาค่า L_1' ที่เหมาะสมได้เมื่อรู้ค่า ΔU_{res} จากผู้ผลิต

ตารางที่ 3.3 แรงดันเหลือค้างสูงสุดของ elementary valve block ที่มีแรงดันพิกัด 1 kV กระแส
ดีสชาร์จ 5 และ 10 kA, $\gamma = 0.02$

แรงดันเหลือค้างสูงสุด (kV)		กระแสดีสชาร์จอิมพัลส์ฟ้าผ่า 8/20 μ s (A)		
5 kA block	10 kA block	I	I ₀	I ₁
2.87	2.73	1500	30	1470
3.07	2.90	3000	60	2940
3.27	3.07	5000	100	4900
3.60	3.33	10000	200	9800
4.27	3.77	20000	400	19600
5.30	4.53	40000	800	39200

เพื่อที่จะจำลองกับดักฟ้าผ่าที่สมบูรณ์ โดยอาศัยข้อมูลจากการจำลอง elementary value block จึงมีการกำหนดแฟกเตอร์ n ขึ้นมา โดยที่

$$n = \frac{U_{in,8/20} \text{ for the complete arrester}}{U_{in,8/20} \text{ for the 1 kV valve block}} \quad (3.27)$$

โดยที่ การหาค่า $U_{in,8/20}$ ในกรณีของกับดักฟ้าผ่าที่สมบูรณ์จะใช้ข้อมูลจากผู้ผลิต และ กรณีของ 1 kV valve block จะใช้ข้อมูลจากตารางที่ 3.3

รูปที่ 3.10 แสดงการลดรูปของวงจรสมมูลเพื่อนำไปใช้เป็นแบบจำลองของกับดักฟ้าผ่าที่สมบูรณ์ โดยที่ชื่อส่วนประกอบที่มีเครื่องหมาย apostrophes แสดงถึงส่วนประกอบของ 1 kV valve block เมื่อพิจารณาที่รูป (a) เนื่องจากไม่มีกระแสไหลระหว่าง A_0' และ A_1' ที่จุดเชื่อม P_1, P_2, \dots, P_n จึงสามารถลดรูปได้ดังแสดงในรูป (b) และสุดท้ายจะลดรูปลงไปดังแสดงในรูป (c) จะได้

$$L_1 = nL' \quad (3.28)$$

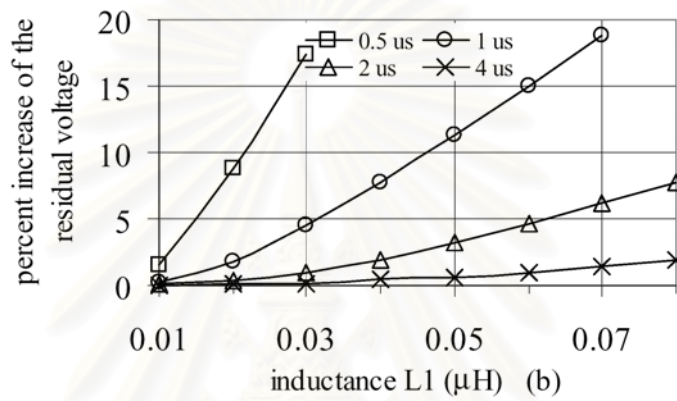
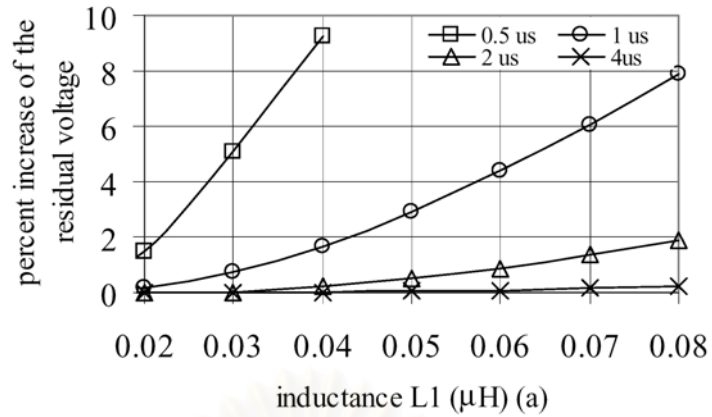
โดย n เป็นแฟกเตอร์จากสมการ (3.27) และ L_1' หาได้จากกราฟในรูปที่ 3.9

ง) การหาค่า C_0

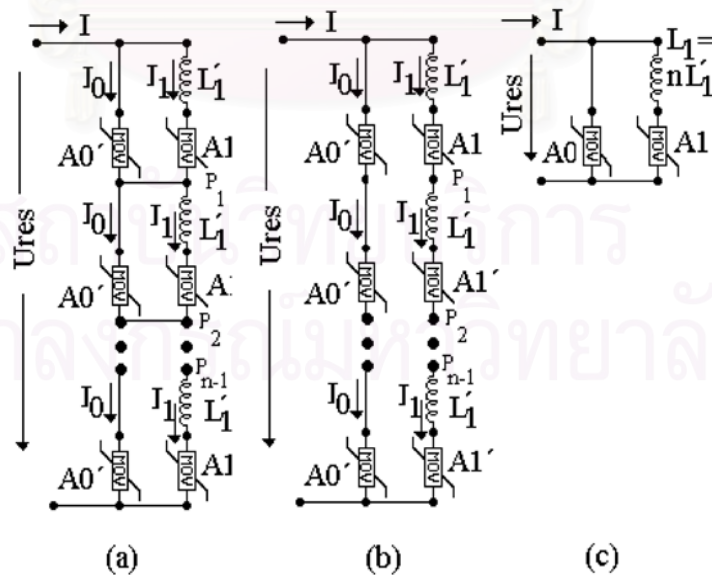
ค่าความเก็บประจุระหว่างปลายทั้งสองข้างของกับดักฟ้าผ่า C_0 หาได้จาก

$$C_0 = \frac{100}{d} \quad (\text{pF}) \quad (3.29)$$

เมื่อ d คือความสูงของกับดักฟ้าผ่า (m)



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของตัวเหนี่ยวนำ L_1 กับ เปอร์เซ็นต์การเพิ่มของแรงดันเหลือค้างเมื่อป้อนกระแสอิมพัลส์ (a) 5 kA, (b) 10 kA



รูปที่ 3.10 การลดรูปของวงจรสมมูลเพื่อนำไปใช้เป็นแบบจำลองของกับดักฟ้าผ่าที่สมบูรณ์

จ) การหาค่า R

กำหนดให้ค่า R เท่ากับ $1\text{ M}\Omega$ สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่ใช้กับแรงดันปานกลาง และ $10\text{ M}\Omega$ สำหรับกับดักฟ้าผ่าที่ใช้กับแรงดันสูง

ฉ) การหาค่าแรงดันเหลือค้างของตัวต้านทานไม่เชิงเส้น A_0 และ A_1

ค่าแรงดันเหลือค้างของตัวต้านทานไม่เชิงเส้น A_0 และ A_1 หาได้โดยตรงจาก V-I characteristic ของกับดักฟ้าผ่า เมื่อป้อนกระแสอิมพัลส์มาตรฐาน $8/20\ \mu\text{s}$ ที่ได้จากผู้ผลิต โดยกำหนดให้ค่าอัตราส่วนระหว่าง I_0 ต่อ I_1 เป็น γ มีค่าเท่ากับ 0.02

3.2.5 แบบจำลองเบรกดาวนซ์ของแกปอากาศระหว่าง arcing horn

การนำอิเล็กโตรดแบบ rod-rod มาใช้เป็น arcing horn ติดตั้งคร่อมระหว่างลูกถ้วยฉนวน นั้นจะทำให้เกิดการเบรกดาวนซ์ที่แกปอากาศก่อนที่จะเกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน ทำให้ลูกถ้วยไม่ได้รับความเสียหาย แบบจำลองเบรกดาวนซ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีดังนี้

3.2.5.1 แบบจำลองสวิตช์ควบคุมด้วยแรงดัน [15]

เมื่อแรงดันที่ตกคร่อม arcing horn มีค่าสูงเกินกว่าค่าแรงดันที่กำหนด (โดยทั่วไปใช้ค่า $V_{50\%}$ ของแกปอากาศ ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่ทำให้แกปอากาศมีโอกาสเบรกดาวนซ์ โดยมีจำนวนครั้งที่เบรกดาวนซ์เป็นครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันทั้งหมด) สวิตช์ซึ่งจำลอง arcing horn จะปิดทำให้เกิดการลัดวงจร ข้อดีของแบบจำลองชนิดนี้คือ ความง่ายในการสร้าง แต่ข้อเสียที่สำคัญคือไม่สามารถแสดง v-t curve ของ arcing horn ได้

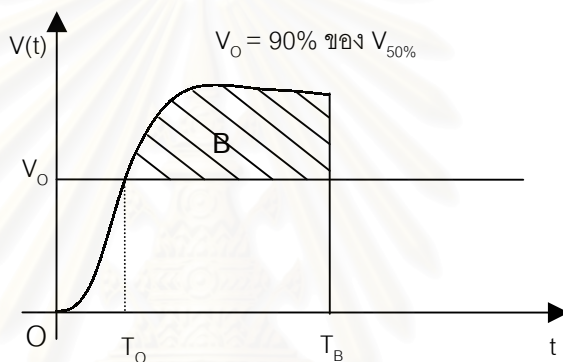
3.2.5.2 แบบจำลองอินทิเกรชัน (Integration model) [15]

หลักการทำงานของแบบจำลองชนิดนี้คือเมื่อแรงดันที่ตกคร่อม arcing horn มีค่าเกินกว่าค่าแรงดันวิกฤติ V_0 ก็จะทำให้แกปอากาศเริ่มสูญเสียสภาพความเป็นฉนวนจนในที่สุดก็เกิดเบรกดาวนซ์ขึ้น สภาพความทนได้ของแกปอากาศที่เกิดจากการรับรูปคลื่นแรงดันใด ๆ สามารถแทนได้ด้วยค่าคงที่ B ซึ่งจะมีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการอินทิเกรทแรงดันส่วนที่มีค่าเกินกว่าค่าแรงดันวิกฤติ ตั้งแต่เวลาที่ค่าแรงดันที่ตกคร่อมแกปอากาศมากกว่าค่าแรงดันวิกฤติจนถึงเวลาที่เกิดการเบรกดาวนซ์ขึ้น นั่นคือ การเบรกดาวนซ์ของแกปอากาศเกิดขึ้นเมื่อค่าอินทิเกรทของแรงดันส่วนที่เกินค่าแรงดันวิกฤติมีค่ามากกว่าค่าคงที่ B นั่นเอง ค่าแรงดันวิกฤติ V_0 สมมุติให้เป็น 90% ของค่า $V_{50\%}$ ของแกปอากาศ และค่า B ในกรณีอิเล็กโตรดแบบ rod-rod สามารถหาได้จาก

$$B = \begin{cases} 0.65 D - 0.04 & \text{(แรงดันชั่ววอก)} \\ 0.61 D - 0.15 & \text{(แรงดันชั่วลบ)} \end{cases} \quad (V \cdot s) \quad (3.30)$$

โดย D คือ ความยาวแถบ (m)

การทำงานของแบบจำลองชนิดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.11 เมื่อ T_0 คือ เวลาที่แรงดันที่ตกคร่อม arcing horn มีค่าเกินกว่าค่า V_0 และ T_B คือ เวลาที่ค่าอินทิเกรตของแรงดันส่วนที่เกินมีค่าเท่ากับค่าคงที่ B แบบจำลองนี้สามารถสร้างได้ง่ายโดยใช้ TACS หรือ MODELS ใน EMTP



รูปที่ 3.11 แบบจำลองอินทิเกรชัน

3.2.5.3 แบบจำลองลีดเดอร์ (Leader model) [15]

แบบจำลองลีดเดอร์เป็นแบบจำลองที่พัฒนามาจากลักษณะการเกิดลีดเดอร์ก่อนที่จะเกิดการเบรกดาวน มีกระบวนการคำนวณ ดังนี้

- 1) ค่าเวลาที่ลีดเดอร์เริ่มเติบโต t_s เป็นเวลาที่แรงดันคร่อม arcing horn มีค่าเท่ากับ $V_{50\%}$ ของแถบอากาศพอดี
- 2) ในขณะที่ลีดเดอร์กำลังเติบโต ความเร็วในการเติบโตของลีดเดอร์และค่ากระแสก่อนจะเกิดการเบรกดาวนนั้นมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$v = K_1 \cdot \frac{V^2}{D-2x} + K_2 \cdot \frac{V \cdot i}{D-2x} \cdot \frac{x}{D} \quad (3.31)$$

$$i = C \cdot V \cdot v \quad (3.32)$$

โดย	v	คือ	ความเร็วในการเติบโตของลีดเดอร์ (m/s)
	x	คือ	ความยาวของลีดเดอร์ที่วัดจากอิเล็กโทรดหนึ่งข้าง (m)
	V	คือ	แรงดันคร่อม arcing horn (V)
	D	คือ	ระยะแกป (m)
	i	คือ	กระแสก่อนการเบรกดาวน (A)
	K_1, K_2	คือ	ค่าคงที่ที่ไม่ขึ้นกับรูปร่างของแรงดัน มีค่าดังแสดงในตารางที่ 3.4
	C	คือ	ค่าความจุไฟฟ้าสมมูลของ arcing horn (F/m)

ใช้สมการ (3.31), (3.32) และ สมการของวงจรไฟฟ้าจะสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์, ค่ากระแส และ สภาพของลีดเดอร์ ขณะเวลาใด ๆ ได้

ตารางที่ 3.4 ค่าคงที่ K_1 และ K_2 ในกรณีอิเล็กโทรดแบบ rod-rod

ขั้วแรงดันอิมพัลส์	K_1 (m^2/V^2s)	K_2 (m^2VAs)
+	1×10^{-7}	2.5×10^{-3}
-	0.5×10^{-7}	5×10^{-3}

เมื่อได้ความเร็วและกระแสลีดเดอร์แล้ว สามารถคำนวณหาความยาวของลีดเดอร์ได้จาก

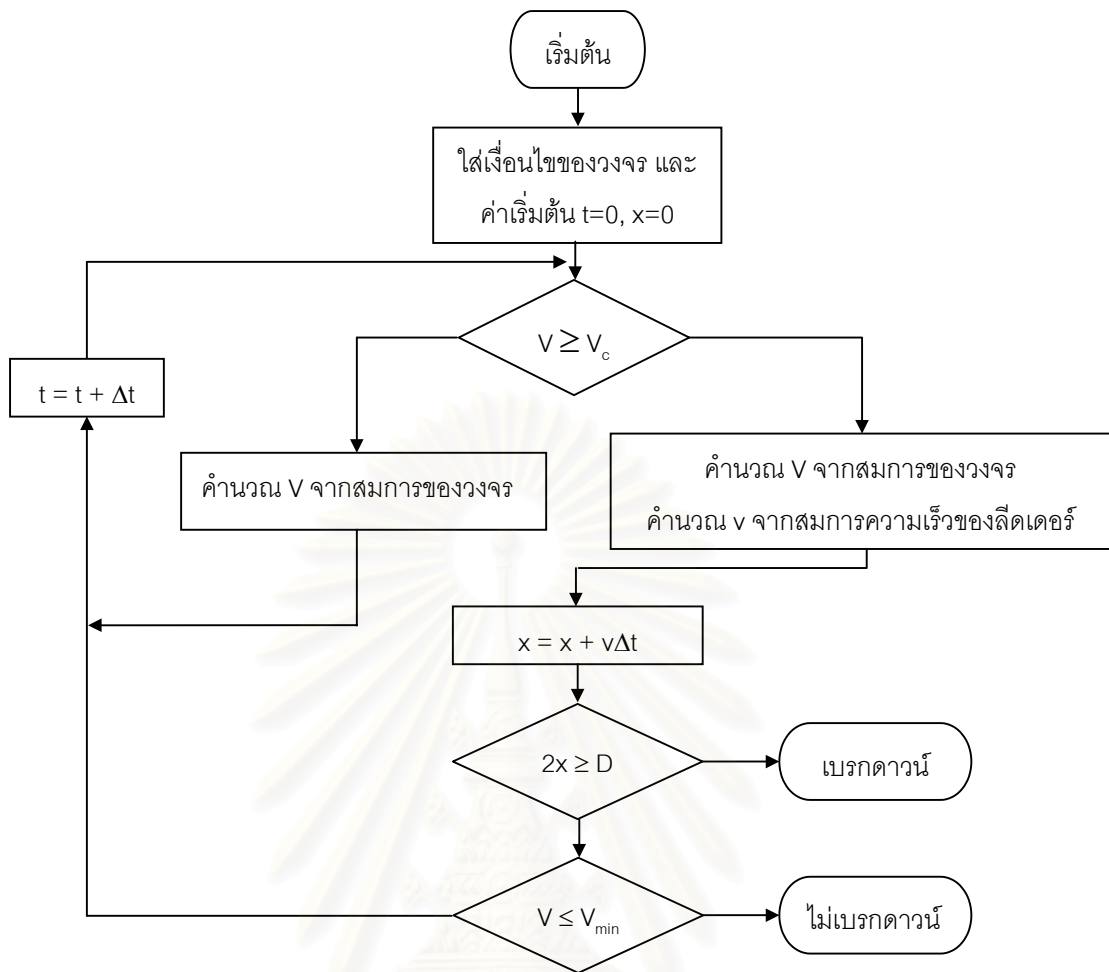
$$x(t+\Delta t) = x(t) + v\Delta t \quad (3.33)$$

โดย v คือ ความเร็วของลีดเดอร์ที่ได้จากการคำนวณที่เวลา t
 $x(t+\Delta t)$ คือ ความยาวลีดเดอร์ที่เวลา Δt ถัดมา

3) เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน สามารถพิจารณาได้ 2 กรณี คือกรณีที่เกิดเบรกดาวน กับ กรณีที่ไม่เกิดเบรกดาวน กรณีแรกเกิดเมื่อความยาวของลีดเดอร์มีค่าเท่ากับระยะแกป โดยความยาวลีดเดอร์กรณีอิเล็กโทรดแบบ rod-rod คือ $2x$ ส่วนกรณีที่สองคือแรงดันคร่อมแกปมีค่าน้อยกว่า V_{min} เพราะจะทำให้ค่าสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแกปมีค่าไม่สูงพอที่สตริมเมอร์บริเวณส่วนหัวของลีดเดอร์จะดำเนินต่อไปได้ ลีดเดอร์ก็จะหยุดลงซึ่งก็จะไม่เกิดการเบรกดาวน และยุติการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 3.12 ค่า V_{min} สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_{min} = E_0 (D - 2x) \quad (V) \quad (3.34)$$

โดย E_0 มีค่าเท่ากับ 450 kV/m, D คือระยะแกป (m)



รูปที่ 3.12 บล็อกไดอะแกรมของแบบจำลองลีดเดอร์

บทที่ 4

กระบวนการประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่า

การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่ง 500 kV แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. จำลองสายส่งด้วยโปรแกรม EMTP เพื่อประเมินค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดของสายส่ง ทั้งในกรณีเกิดการช็อตล้มเหลวและกรณีเกิดการแลบข้ามกลับ แบบจำลองของระบบสายส่งประกอบด้วย สายส่ง เสาไฟฟ้า ลูกถ้วยฉนวน ความต้านทานดินของฐานเสา และกับดักฟ้าผ่า รวมถึงแบบจำลองกระแสฟ้าผ่า และแบบจำลองการเกิดเบรกดาวนของแกปอากาศระหว่าง arcing horn งานวิจัยนี้ศึกษาเปรียบเทียบผลของแบบจำลองการเกิดเบรกดาวน แบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสา และแบบจำลองกับดักฟ้าผ่า รวมทั้งศึกษาถึงการเลือกติดตั้งกับดักฟ้าผ่าอย่างเหมาะสมด้วย

2. ประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าจากค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ประเมินได้จากส่วนแรกด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจากทฤษฎีของ Armstrong-Whitehead และเปรียบเทียบผลที่ได้กับโปรแกรม FLASH และ LPDW

4.1 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม EMTP

แบบจำลองระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย EMTP เพื่อประเมินหาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดประกอบไปด้วยแบบจำลองเสิร์จฟ้าผ่า แบบจำลองสายส่ง แบบจำลองเสาไฟฟ้า แบบจำลองลูกถ้วยฉนวน แบบจำลองเบรกดาวน แบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสาไฟฟ้า และแบบจำลองกับดักฟ้าผ่า นำมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นระบบสายส่ง โดยค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ สรุปได้ดังตารางที่ 4.1

แบบจำลองต่าง ๆ มีเงื่อนไข และ รายละเอียดดังต่อไปนี้

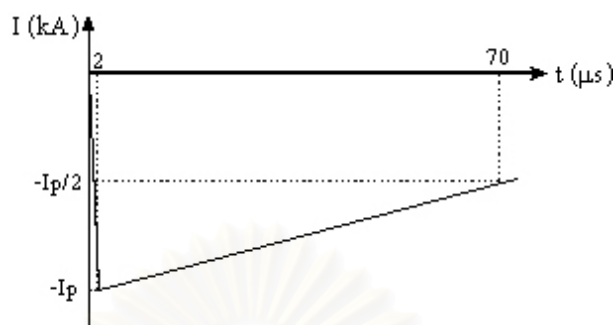
4.1.1 แบบจำลองเสิร์จฟ้าผ่า

จากการบันทึกรวบรวมข้อมูลฟ้าผ่าจะพบว่าประมาณร้อยละ 80 ของฟ้าผ่าลงสู่พื้นโลกเป็นฟ้าผ่าลบ ร้อยละ 20 เป็นฟ้าผ่าบวก [4] ดังนั้นแบบจำลองเสิร์จฟ้าผ่าที่ใช้จึงกำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ชั่วเวลา $2/70 \mu\text{s}$ [23] ต่อขนานอยู่กับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของลัมฟ้าผ่าขนาด 400Ω เพื่อความง่ายในการจำลอง จึงกำหนดให้รูปคลื่นของแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการ

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ และเงื่อนไขในการวิเคราะห์

Item		Data	Model		
Wave shape of lightning current		2/70 μ s negative	Ramp		
Tower	Surge impedance	100 Ω	Distributed parameters		
	Surge propagation speed	300 m/ μ s			
	Attenuation coefficient	0.9 (50 m)			
	Span length	325 m			
Conductor	Inside diameter	0.590 cm	J.Marti		
	Outside diameter	2.776 cm			
	GMR	1.658 cm			
	AC resistance	0.084 Ω /km			
	DC resistance	0.072 Ω /km			
	Maximum sag	18.4 m			
Ground wire	Outside diameter	0.914 cm	J.Marti		
	GMR	0.00487 cm			
	AC resistance	4.260 Ω /km			
	DC resistance	3.867 Ω /km			
	Maximum sag	10 m			
Footing resistance	Ground resistivity	100 Ω ·m	Frequency dependent, Current dependent		
	Soil ionization gradient	400 kV/m			
Lightning arrester	Rated voltage		396 kV	IEEE, Pinceti, Fernandez	
	Maximum voltage with current wave	8/20 μ s	1 kA		780 kV
			3 kA		829 kV
			5 kA		856 kV
			10 kA		901 kV
			15 kA		951 kV
			20 kA		987 kV
			40 kA		1086 kV
	1/(2-20) μ s	5 kA	919 kV		
		10 kA	983 kV		
		15 kA	1041 kV		
20 kA		1086 kV			
Height		5.751 m			
Insulator string		D = 4.3 m, $V_{50\%} = 2.595$ MV			

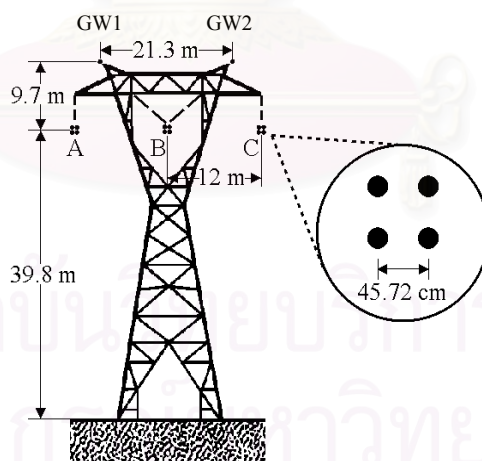
วิเคราะห์หามีค่าเพิ่มขึ้น และ ลดลงแบบเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 แบบจำลองนี้ จะตรงกับแหล่งจ่ายแบบ slope ramp (type 13)



รูปที่ 4.1 รูปคลื่นของแหล่งจ่ายกระแสไอพัลส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

4.1.2 แบบจำลองสายส่ง

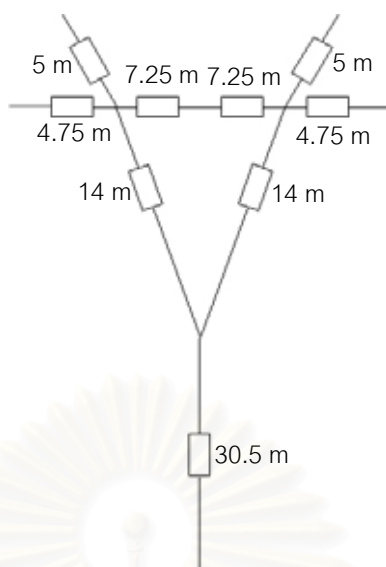
แบบจำลองสายส่งที่ใช้เป็นแบบจำลองพารามิเตอร์ขึ้นกับความถี่ของ J. Marti จำลองสายส่งวงจรเดี่ยววางตัวเรียงกันในแนวราบ (horizontal single-circuit) ประกอบด้วยสายเฟส 3 เส้น และสายล่อฟ้า 2 เส้น รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของเสา และ รูปแบบการวางตัวของสายส่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ รายละเอียดของสายเฟสและสายล่อฟ้าแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของเสา 500 kV และรูปแบบการวางตัวของสายส่งที่ใช้ในการวิเคราะห์

4.1.3 แบบจำลองเสาไฟฟ้า

แบบจำลองนี้เสาไฟฟ้าแต่ละต้นได้รับการแบ่งออกเป็นส่วนตัวต่าง ๆ หลายส่วน และแทนแต่ละส่วนด้วยสายส่งแบบ distributed parameters ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 แบบจำลองเสาไฟฟ้า

4.1.4 แบบจำลองลูกถ้วยฉนวน

กำหนดให้แบบจำลองลูกถ้วยฉนวนเป็นตัวเก็บประจุขนาด 80 pF [17] ต่ออนุกรมกัน 27 ลูก จะได้ค่าตัวเก็บประจุรวมประมาณ 3 pF

4.1.5 แบบจำลองเบรกดาวน

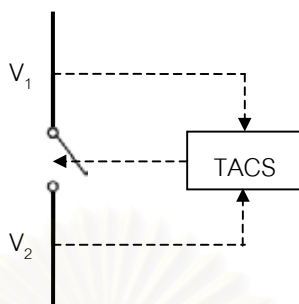
4.1.5.1 แบบจำลองสวิตช์ควบคุมด้วยแรงดัน

แบบจำลองนี้สร้างใน EMTP ได้โดยตรง โดยใช้ voltage-controlled switch ค่าแรงดันที่ใช้ควบคุมการเปิดปิดของสวิตช์คือค่า $V_{50\%}$ ในตารางที่ 4.1

4.1.5.2 แบบจำลองอินทิเกรชัน

แบบจำลองนี้สร้างจาก TACS เพราะแบบจำลองอินทิเกรชันมีหลักการทำงานไม่ซับซ้อน สามารถใช้องค์ประกอบใน TACS สร้างขึ้นได้โดยง่าย ทำได้โดยการแทนแกับด้วยสวิตช์ควบคุมด้วย TACS (TACS-controlled switch, type 13) แล้วใช้องค์ประกอบใน TACS สร้างแบบจำลองอินทิเกรชันแบบที่ใช้กับแรงดันชั่วลบ โดยรับแรงดันแกับ V_1 และ V_2 เข้ามา แล้วทำงานตามหลักการทำงานในหัวข้อ 3.2.5.2 เพื่อควบคุม TACS สวิตช์ให้ปิดเมื่อเกิดเบรกดาวนตามเงื่อนไขของแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.4

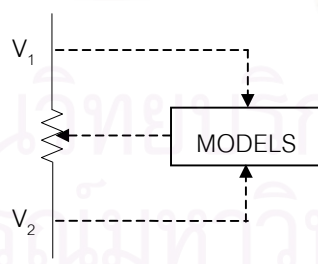
ในการจำลองใช้ค่าความกว้างแถบ D เท่ากับความสูงของลูกถ้วยฉนวน และใช้ค่า $V_{50\%}$ ในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.4 การใช้ TACS ควบคุมการเกิดเบรกดาวนของแบบจำลองอินทิเกรชัน

4.1.5.3 แบบจำลองลีดเดอร์

แบบจำลองนี้สร้างจาก MODELS เพราะแบบจำลองลีดเดอร์มีความซับซ้อนสูงกว่าแบบจำลองอินทิเกรชันมาก ไม่สามารถจำลองด้วย TACS ได้โดยง่าย ทำได้โดยการแทนแอมป์ด้วยตัวต้านทานควบคุมด้วย TACS (TACS-controlled time-dependent resistor, type 91) แล้วใช้ MODELS สร้างแบบจำลองลีดเดอร์แบบที่ใช้กับแรงดันชั่วคราว โดยรับแรงดันแถบ V_1 และ V_2 เข้ามา แล้วทำงานตามหลักการทำงานในหัวข้อ 3.2.5.3 เพื่อควบคุมตัวต้านทานควบคุมด้วย TACS ให้มีค่าเท่ากับแรงดันคร่อมแถบ ทารด้วยกระแสลีดเดอร์ที่เวลานั้น ๆ และมีค่าเป็นศูนย์เมื่อเกิดเบรกดาวนตามเงื่อนไขของแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การใช้ MODELS ควบคุมการเกิดเบรกดาวนของแบบจำลองลีดเดอร์

ในการจำลองใช้ค่าความกว้างแถบ D เท่ากับความสูงของลูกถ้วยฉนวน และใช้ค่า $V_{50\%}$ ในตารางที่ 4.1

4.1.6 แบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสาไฟฟ้า

4.1.6.1 แบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่

สำหรับค่า R_1 , R_2 , R_3 , L_1 และ C_1 หาได้จากสมการ (3.5) และ (3.6) โดย R_3 มีค่าเท่ากับ ค่าความต้านทานดินของฐานเสา ก่อนเกิดดีสชาร์จ และค่าคงที่เวลา L_1/R_1 และ R_1C_1 มีค่าเท่ากับ $1 \mu\text{s}$

4.1.6.2 แบบจำลองชนิดขึ้นกับกระแส

แบบจำลองนี้คำนวณหาความต้านทานดินของฐานเสาด้วย TACS โดยใช้องค์ประกอบใน TACS รับค่ากระแสที่ผ่านลงดินเข้ามา แล้วคำนวณค่าความต้านทานดินของฐานเสาจากสมการ (3.14) และ (3.15) โดยที่ $E_g = 400 \text{ kV/m}$ และ $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ จากนั้นส่งค่าความต้านทานดินของฐานเสาที่คำนวณได้ผ่านไปยังตัวต้านทานควบคุมด้วย TACS

4.1.7 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า

ข้อมูลของกับดักฟ้าผ่าที่ใช้เป็นข้อมูลจาก ABB แบบ EXLIM P396-GH420 ZnO ชนิดไร้แก๊ป มีข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4.1 และสำหรับแบบจำลองกับดักฟ้าผ่าทุกแบบ ตัวต้านทานไม่เชิงเส้น A_0 และ A_1 ใน EMTP จะใช้ ZnO - exponential current-dependent resistor (type 92)

4.1.7.1 แบบจำลองของ IEEE

ในการจำลองให้ $n = 1$ และจากตารางที่ 4.1 จะได้ $d = 5.751 \text{ m}$, $V_{10} = 901 \text{ kV}_{\text{crest}}$ ส่วน V_{ss} เปลี่ยนเป็นค่าแรงดันเหลือค้างที่เกิดจากกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น $V_{1/T2}$ แทน เพื่อให้สอดคล้องกับกระแสอิมพัลส์ที่ใช้ จะได้ $V_{1/T2} = 983 \text{ kV}$

จากสมการ (3.17)-(3.23) จะได้

$$L_0 = (0.2) (5.751) / (1) = 1.150 \mu\text{H}$$

$$L_1 = (15) (5.751) / (1) = 86.265 \mu\text{H}$$

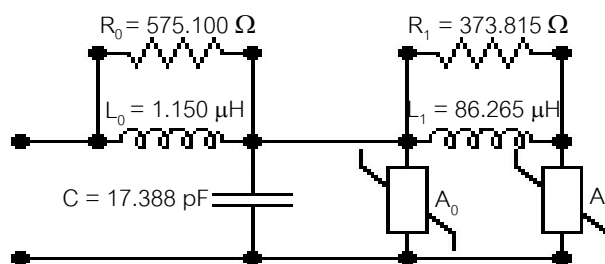
$$R_0 = (100) (5.751) / (1) = 575.100 \Omega$$

$$R_1 = (65) (5.751) / (1) = 373.815 \Omega$$

$$C = (100) (1) / (5.751) = 17.388 \text{ pF}$$

ค่าแรงดันเหลือค้างของ A_0 และ A_1 หาได้จากตารางที่ 3.1 และสมการ (3.22)-(3.23) มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2

รูปที่ 4.6 แสดงแบบจำลองของ IEEE และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้



รูปที่ 4.6 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า EXLIM P396-GH550 ของ IEEE

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันเหลือค้างของ A_0 และ A_1 (kV) ของกับดักฟ้าผ่า EXLIM P396-GH550 แบบจำลอง IEEE

กระแส (kA)	แรงดันเหลือค้าง (kV) ของอิมพัลส์ 10 kA, 8/20 μ s สำหรับ	
	A_0	A_1
0.01	788.375	-
0.1	867.213	692.644
1	946.050	765.850
2	979.838	805.269
4	1013.625	833.425
6	1024.888	844.688
8	1053.044	861.581
10	1069.938	872.844
12	1086.831	878.475
14	1109.356	889.738
16	1126.250	895.369
18	1154.406	901.000
20	1182.563	906.631

4.1.7.2 แบบจำลองของ Pinceti

ค่าพารามิเตอร์ V_n , $V_{r1/T2}$ และ $V_{r8/20}$ หาได้จากตารางที่ 4.1 จะได้ $V_n = 396$ kV, $V_{r1/T2} = 983$ kV และ $V_{r8/20} = 901$ kV

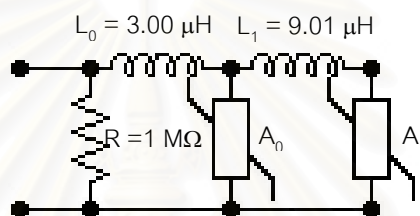
จากสมการ (3.25) และ (3.24) จะได้

$$L_0 = \frac{1}{12} \cdot \frac{983-901}{901} \cdot 396 = 3.00 \mu\text{H}$$

$$L_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{983-901}{901} \cdot 396 = 9.01 \mu\text{H}$$

ค่าแรงดันเหลือค้างของ A_0 และ A_1 หาได้จากการนำค่าในตารางที่ 3.2 มาคูณด้วยค่าแรงดันเหลือค้าง (kV) ของอิมพัลส์ 10 kA, 8/20 μs ($V_{r8/20}$) จะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.3

รูปที่ 4.7 แสดงแบบจำลองของ Pinceti และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้



รูปที่ 4.7 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า EXLIM P396-GH550 ของ Pinceti

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันเหลือค้างของ A_0 และ A_1 (kV) ของกับดักฟ้าผ่า EXLIM P396-GH420 แบบจำลอง Pinceti

กระแส (kA)	แรงดันเหลือค้าง (kV) ของอิมพัลส์ 10 kA, 8/20 μs สำหรับ	
	A_0	A_1
$2 \cdot 10^{-6}$	729.810	561.323
0.1	877.574	709.988
1	947.852	780.266
3	998.308	830.722
10	1076.695	909.109
20	1150.577	982.991

4.1.7.3 แบบจำลองของ Fernandez

ก) ค่า L_1

จากตารางที่ 4.1 จะได้ $U_{In,8/20} = 901$ kV, $U_{In,T1} = 983$ kV และ $d = 5.751$ m และจากสมการ (3.26) จะได้

$$\Delta U_{res} = \frac{983-901}{901} \cdot 100 = 9.10 \%$$

นำค่า ΔU_{res} ที่คำนวณได้มาหาค่า L_1' จากรูปที่ 3.9 จะได้ $L_1' = 0.044$ μ H และจากสมการ (3.27) และตารางที่ 3.3 จะได้ค่าแฟกเตอร์ n เป็น

$$n = \frac{901}{3.33} = 270.57$$

จากนั้นจะได้

$$L_1 = n L_1' = 270.57 \times 0.044 = 11.91 \mu\text{H}$$

ข) ค่า C_0

จากสมการ (3.29) จะได้ค่า C_0 เป็น

$$C_0 = \frac{100}{5.751} = 17.388 \text{ pF}$$

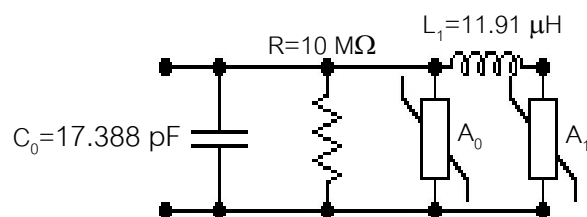
ค) ค่า R

เนื่องจากระบบแรงดันที่ใช้คือ 500 kV ค่า R ที่เลือกใช้จึงกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 10 M Ω

ง) ค่าแรงดันเหลือค้ำของ A_0 และ A_1

ค่าแรงดันเหลือค้ำของ A_0 และ A_1 หาได้จาก V-I characteristic ของอิมพัลส์ 8/20 μ s ในระหว่าง I_0 ต่อ I_1 (γ) เท่ากับ 0.02 ดังแสดงในตารางที่ 4.4

รูปที่ 4.8 แสดงแบบจำลองของ Fernandez และค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้



รูปที่ 4.8 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า EXLIM P396-GH550 ของ Fernandez

ตารางที่ 4.4 V-I characteristic ของ A_0 และ A_1

U 8/20 (kV)	I 8/20 (A)	I_0 (A)	I_1 (A)
780	1,000	20	980
829	3,000	60	2940
856	5,000	100	4900
901	10,000	200	9800
951	15,000	300	14700
987	20,000	400	19600
1086	40,000	800	39200

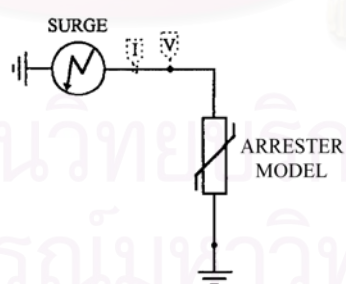
4.1.7.4 การจำลองหาแรงดันเหลือค้างของกับดักฟ้าผ่า

เพื่อให้มีความมั่นใจได้ว่าแบบจำลองกับดักฟ้าผ่าทำงานได้อย่างถูกต้อง จึงได้นำแบบจำลองทั้ง 3 แบบมาจำลองด้วย EMTP ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เพื่อหา

ก) แรงดันเหลือค้างสำหรับเสิร์จฟ้าผ่า 8/20 μ s, 10 kA

ข) แรงดันเหลือค้างสำหรับเสิร์จฟ้าผ่าหน้าคลื่นขั้น 1/5 μ s, 10 kA

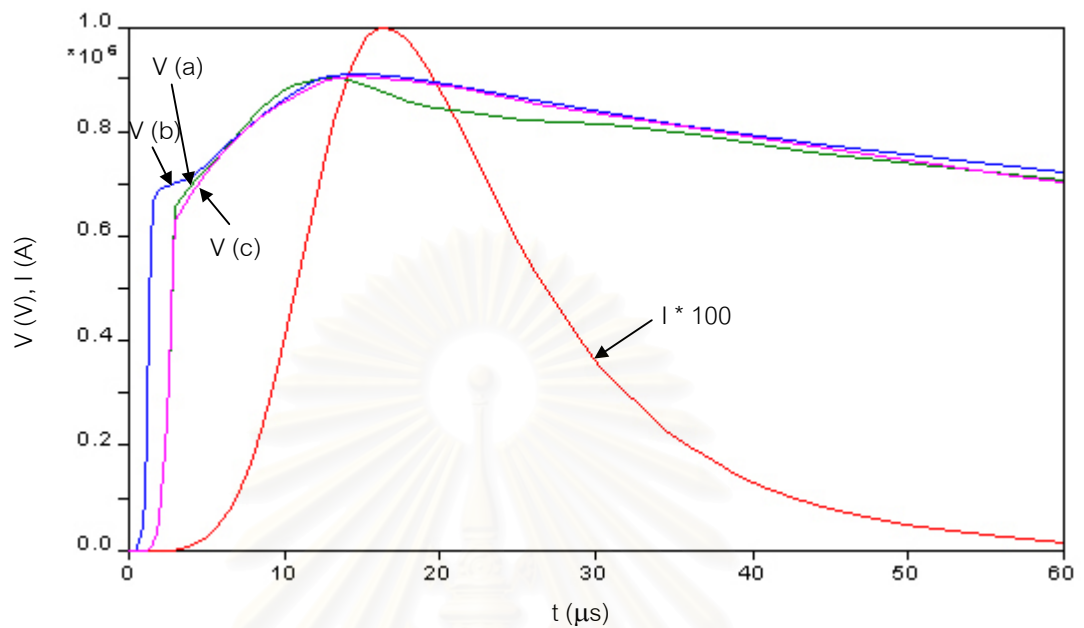
เสิร์จฟ้าผ่าจำลองด้วยแหล่งจ่ายกระแสเสิร์จ (type 15) ค่าพารามิเตอร์ของแหล่งจ่ายกระแสได้มาจากการรันโปรแกรม iec.exe [22] ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับสร้างรูปคลื่นแรงดัน/กระแสอิมพัลส์ตามมาตรฐาน IEC 60-1 เพื่อนำไปใช้กับแหล่งจ่ายแรงดัน/กระแสเสิร์จ type15 ใน EMTP



รูปที่ 4.9 วงจรที่ใช้จำลองด้วย EMTP เพื่อหาแรงดันเหลือค้างของกับดักฟ้าผ่า

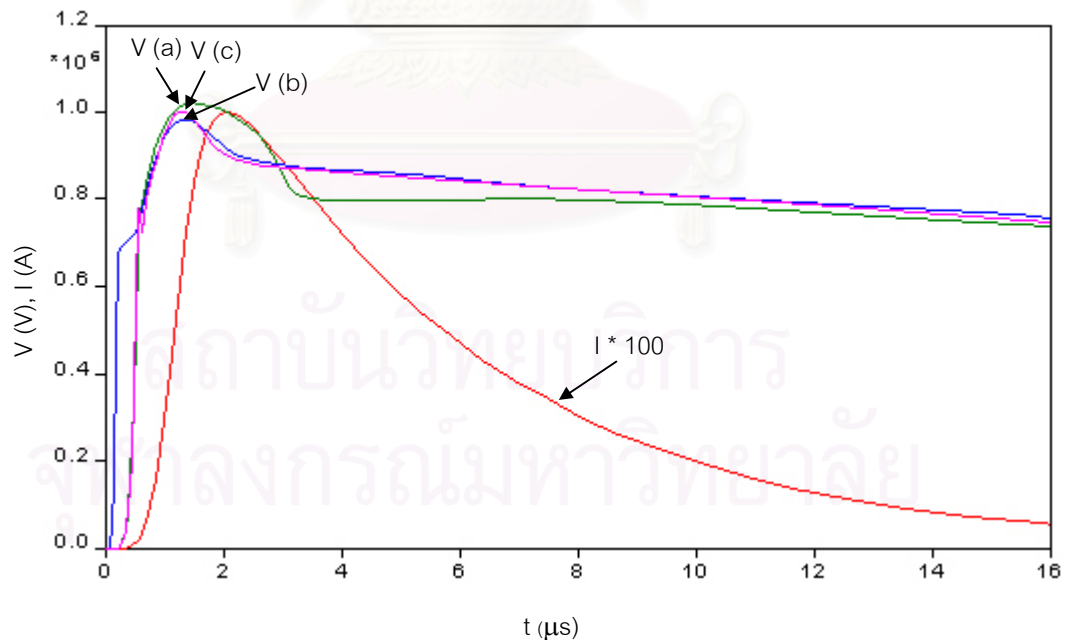
สำหรับแบบจำลอง IEEE จะต้องทำการปรับค่า L_1 ด้วยเพื่อให้ค่าแรงดันเหลือค้างสำหรับเสิร์จฟ้าผ่า 8/20 μ s, 10 kA (V_{10}) มีค่าตรงตามข้อมูลจากผู้ผลิต ในกรณีนี้เพื่อให้ $V_{10} = 901$ kV จึง

เปลี่ยนค่า L_1 จาก 86.265 μH เป็น 35.685 μH ผลการทดสอบค่าแรงดันเหลือค้างเป็นดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 และ ตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.10 แรงดันเหลือค้างสำหรับกระแสอิมพัลส์ 8/20 μs , 10 kA ของแบบจำลอง

(a) IEEE, (b) Pinceti และ (c) Fernandez



รูปที่ 4.11 แรงดันเหลือค้างสำหรับกระแสอิมพัลส์ 1/2 μs , 10 kA ของแบบจำลอง

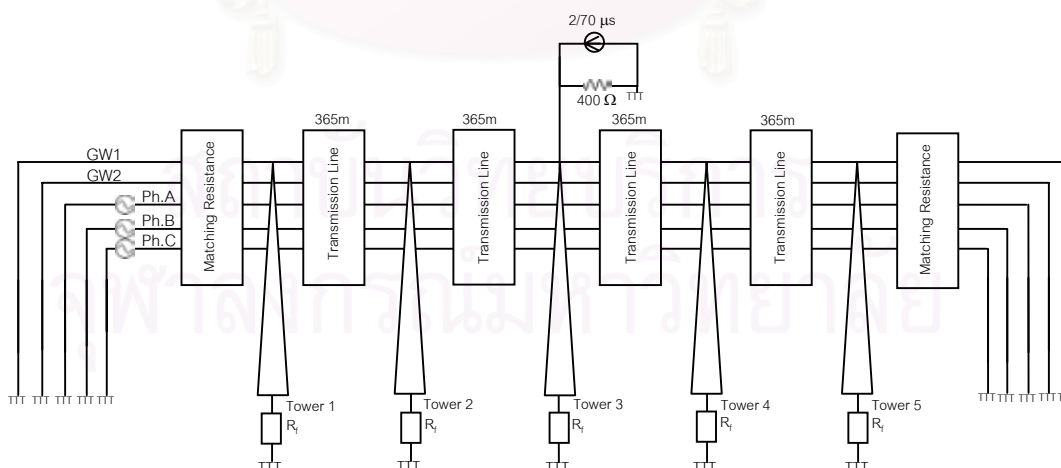
(a) IEEE, (b) Pinceti และ (c) Fernandez

ตารางที่ 4.5 แรงดันเหลือค้างของแบบจำลองต่าง ๆ

แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า	เสิร์จฟ้าผ่า 8/20 μ s, 10 kA		เสิร์จฟ้าผ่า 1/2 μ s, 10 kA	
	แรงดันเหลือค้าง (kV)	คลาดเคลื่อนจาก 901 kV (%)	แรงดันเหลือค้าง (kV)	คลาดเคลื่อนจาก 983 kV (%)
IEEE	901.01	0.001	1022.50	4.02
Pinceti	910.39	1.042	983.90	0.09
Fernandez	904.33	0.370	1001.50	1.88

4.1.8 แบบจำลองระบบสายส่ง

การจำลองระบบสายส่ง 500 kV ทำได้โดยนำแบบจำลองต่าง ๆ ที่กล่าวถึงในหัวข้อ 4.1.1-4.1.7 มาประกอบเข้าด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ประกอบด้วยเสาไฟฟ้า 5 ต้น แต่ละต้นห่างกัน 325 เมตร โดยมีปลายของสายส่งทั้งสองด้านต่ออยู่กับความต้านทานแมตซิ่ง (matching resistance) เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของเสิร์จฟ้าผ่า และมีแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 500 kV_{line-to-line} ต่ออยู่เพื่อจำลองแรงดันระบบที่กำลังใช้งานอยู่ แรงดันระบบนี้จะส่งผลให้อัตราการเกิดความผิดพลาดมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากแรงดันระบบส่งผลให้กระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดมีค่าต่ำลง ดังได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 ดังนั้นในการจำลองแต่ละครั้งจะกำหนดให้แรงดันระบบไปเสริมกับแรงดันเกินฟ้าผ่ามากที่สุด ก่อให้เกิดการเบรกดาวนที่ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติต่ำที่สุด เพื่อจำลองกรณีที่เลวร้ายที่สุดที่อาจเกิดขึ้นได้ ซึ่งทำได้โดยเปลี่ยนมุมเฟสของแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่า



รูปที่ 4.12 แบบจำลองระบบสายส่ง

4.2 การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม A-W

โปรแกรม A-W พัฒนาขึ้นมาจากทฤษฎีของ Armstrong-Whitehead [5] ด้วยภาษา Delphi เวอร์ชัน 6 โปรแกรมนี้คำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าโดยไม่คำนึงถึงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดพลาด แต่จะสมมุติว่ากระแสฟ้าผ่าทุก ๆ ค่า ตั้งแต่ค่าต่ำสุดจนถึงค่าสูงสุดที่กำหนดให้โปรแกรมเป็นค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติ ดังนั้น ในการคำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดจึงไม่มีความยุ่งยากในส่วนของการคำนวณกระแสฟ้าผ่าวิกฤติในกรณีเกิดการชิลด์ลัมเพลว และการแลบข้ามกลับ ซึ่งต่างกับโปรแกรม FLASH และ LPDW ที่จะต้องคำนวณค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติก่อน ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้โปรแกรม A-W ไม่ใช้ข้อมูลในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณกระแสฟ้าผ่าวิกฤติ แต่อย่างไรก็ตามจะต้องประเมินค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติมาจากการจำลองระบบสายส่งด้วยโปรแกรม EMTP จากนั้นจึงใช้กระแสฟ้าผ่าวิกฤติค่านี้ไปประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดจากผลการคำนวณของโปรแกรม

4.2.1 พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบ

ก) ระยะห่างจากเส้นกึ่งกลางเสาในแนวราบและความสูงของสายล่อฟ้าและสายเฟสแต่ละเส้น (m)

ข) ค่าคงที่ m ในสมการ (4.3)

ง) ค่าคงที่ K_o และ K_c เมื่อกำหนดให้

$$\left. \begin{aligned} r_c &= K_o \cdot A I^b \\ r_g &= K_c \cdot A I^b \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{เมื่อ } A \text{ และ } b \text{ เป็นค่าคงที่ ในตารางที่ 2.1} \\ \text{กรณีฟ้าผ่าลงสายเฟสและสายล่อฟ้า} \end{array}$$

ง) กระแสฟ้าผ่าค่ายอดต่ำสุดและสูงสุดที่จะนำไปใช้คำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาด (kA)

จ) ΔI ที่จะนำไปใช้คำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาด (kA)

ฉ) จำนวนวันที่เกิดฟ้าผ่า (day/year)

ช) สมการที่ใช้ในการคำนวณระยะฟ้าผ่า ใช้สมการจากตารางที่ 2.1

ซ) ข้อมูลเพิ่มเติม จะป้อนหรือไม่ป้อนให้กับโปรแกรมก็ได้ ได้แก่

1) มุมเอียงของพื้นดิน ในกรณีต้องการป้อนข้อมูลมุมเอียงของพื้นดินให้คิดว่ามีมุมเอียงของพื้นดินเท่าไรบ้าง (สูงสุด 4 มุม) และแต่ละมุมมีเปอร์เซ็นต์เป็นเท่าไรของมุมเอียงของพื้นดินที่เป็นไปได้ทั้งหมด

2) กระแสฟ้าผ่าวิกฤติ หากผู้ใช้เลือกที่จะป้อนเข้าไปเอง โปรแกรมจะคำนวณ SFR และ BFR ที่กระแสฟ้าผ่าวิกฤติค่าที่ระบุเท่านั้น (แทนที่ผลการคำนวณจะเป็น SFR และ BFR ที่กระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่เป็นไปได้ทั้งหมดตั้งแต่ค่า I_{min} ไปจนถึง I_{max}) ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ป้อนให้กับโปรแกรมได้แก่ กระแสฟ้าผ่าวิกฤติในกรณีเกิดการช็อตลัมเหลว (ฟ้าผ่าลงที่สายเฟส) และกระแสฟ้าผ่าวิกฤติในกรณีเกิดการแลบข้ามกลับ (ฟ้าผ่าลงที่สายล่อฟ้า)

4.2.2 กระบวนการคำนวณของโปรแกรม A-W

โปรแกรม A-W ใช้ electrogeometric model เพื่อหาเส้นโค้งที่บ่งชี้ว่าฟ้าผ่าลงที่สายล่อฟ้าหรือ สายเฟสเส้นใด ที่ตำแหน่งใด ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เนื่องจากทฤษฎีของ Armstrong-Whitehead ใช้ระยะที่ฟ้าผ่าสามารถผ่าลงสู่สายเฟสได้เป็นระยะตามเส้นโค้ง ไม่ใช่ระยะในแนวราบ เพราะคิดว่าฟ้าผ่าอาจผ่าลงมาทำมุมเอียงกับพื้นโลกได้ ดังนั้นอัตราการเกิดความผิดพลาดจาก SFR และ BFR มีกระบวนการคำนวณดังต่อไปนี้

โอกาสการเกิดฟ้าผ่า มีสูตรการคำนวณดังสมการ (4.1)

$$P(I) = 0.0475e^{(-I/20)} + 0.001e^{(-I/50)} \quad (4.1)$$

เมื่อ I คือ ค่ายอดของกระแสฟ้าผ่า (kA)

กำหนดให้ โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มุมเอียง θ ใด ๆ (angle probability density function) มีค่าเป็น

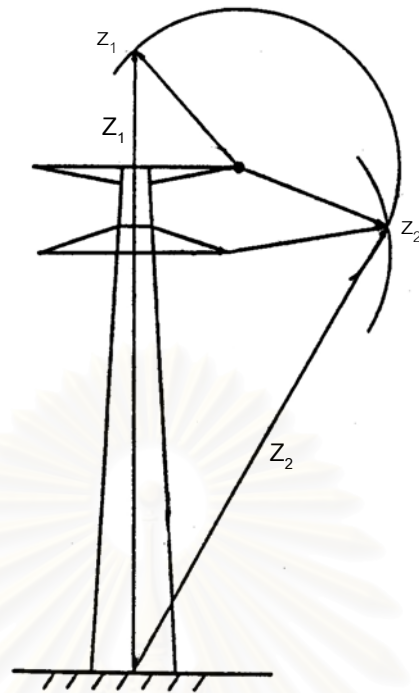
$$p(\theta, m) = K_m \cos^m \theta \quad (4.2)$$

เมื่อ

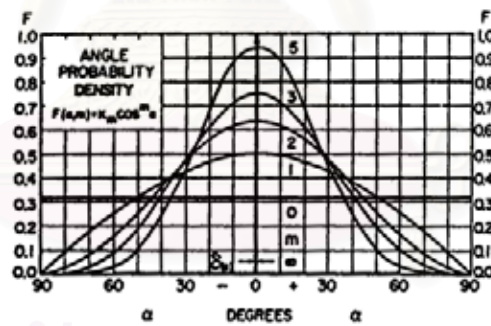
$$K_m = \frac{1}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \cos^m \theta \, d\theta} \quad (4.3)$$

ค่าของ $p(\theta, m)$ ที่ค่า $K_m = 1$ ถึง 5 เป็นดังรูปที่ 4.14

ให้ Z เป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับจุดตัดของส่วนโค้ง ในรูปที่ 4.13 คือจุด z_1 และ z_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.15, P เป็นเวกเตอร์แทนการผ่าลงมาของฟ้าผ่าซึ่งทำมุม θ กับแกน y ซึ่งตั้งฉากกับพื้นผิวโลก ดังแสดงในรูปที่ 4.16 แสดงเป็นสมการได้ดังสมการ (4.4)



รูปที่ 4.13 ระยะฟ้าผ่าลงที่สายล่อฟ้า และสายเฟส

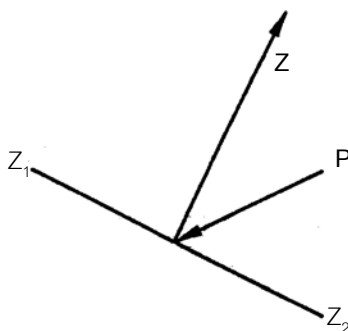


รูปที่ 4.14 โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มุมเอียง θ ใด ๆ

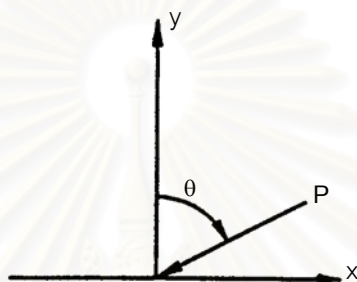
$$P = e^{-j\left(\frac{\pi-\theta}{2}\right)} \cdot p(\theta, m) \Delta\theta \tag{4.4}$$

และกำหนดให้

$$\delta P = Z \cdot P \tag{4.5}$$



รูปที่ 4.15 เวกเตอร์ Z



รูปที่ 4.16 เวกเตอร์ P

SFR คำนวณได้จาก

$$SFR = 0.1 N_g \sum_{i=1}^{N_c} \left\{ \int_{I_{ci}}^{I_{mi}} \left[\int_{\theta_{1i}}^{\theta_{2i}} \delta P \right] P(I) dI \right\} \quad (4.6)$$

- เมื่อ N_g คือ ความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน (flashes/100km-year)
- N_c คือ จำนวนเส้นของสายเฟส
- θ_{1i}, θ_{2i} คือ มุมของลำฟ้าผ่าที่สามารถผ่าลงมายังส่วนโค้งระยะฟ้าผ่าของสายเฟสเส้นที่กำลังพิจารณาอยู่ (rad)
- I_{ci} คือ กระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดการชัตต์ลัมเพลวของสายเฟสเส้นที่ i (kA)
- I_{mi} คือ กระแสฟ้าผ่าต่ำสุดที่ไม่ก่อให้เกิดการชัตต์ลัมเพลวของสายเฟสเส้นที่ i (kA)
- $P(I)$ คือ โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสฟ้าผ่าค่ายอด I

และ BFR คำนวณได้จาก

$$BFR = N_{gw} \cdot 0.1 N_g \int_{I_c}^{I_{max}} \left[\int_{\theta_1}^{\theta_2} \delta P \right] P(I) dI \quad (4.7)$$

เมื่อ	N_{gw}	คือ จำนวนเส้นของสายล่อฟ้า
	I_c	คือ กระแสฟ้าผ่าวิกฤติของสายล่อฟ้าที่ก่อให้เกิดการแลบข้ามกลับ (kA)
	I_{max}	คือ กระแสฟ้าผ่าสูงสุดที่ป้อนให้โปรแกรมคำนวณ (kA)
	$P(I)$	คือ โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสฟ้าผ่าค่ายอด I

เนื่องจากโดยทั่วไปสายล่อฟ้าจะสมมาตรซึ่งกันและกันและติดตั้งไม่เกิน 2 เส้น ดังนั้นในการคำนวณ BFR โปรแกรมจะคำนวณเพียงเฟสเดียว แล้วนำมาคูณด้วยจำนวนเฟสเข้าไปภายหลัง หนึ่ง ค่า I_{max} ที่ป้อนให้กับโปรแกรม ควรเป็นค่าสูง ๆ เพื่อให้ครอบคลุมถึงโอกาสที่จะเกิดฟ้าผ่าที่กระแสค่ายอดสูง ๆ แต่อย่างไรก็ตาม ยิ่งค่ายอดกระแสฟ้าผ่ามีค่าสูง โอกาสที่จะเกิดฟ้าผ่าก็จะยิ่งน้อยลง จากรูปที่ 2.3 ในบทที่ 2 จะเห็นว่าโอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสค่ายอดมากกว่า 200 kA จะมีค่าต่ำ (ประมาณ 0.3) และ ถ้าป้อนค่า I_{max} สูงมาก ๆ โปรแกรมก็จะใช้เวลาคำนวณมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน ดังนั้น ถ้ากำหนด I_{max} เท่ากับ 600 kA ก็น่าจะให้ผลแทบไม่แตกต่างกับเมื่อให้ I_{max} มีค่าสูงกวานี้

4.3 การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม FLASH

โปรแกรม FLASH ใช้กระบวนการคำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าของระบบสายส่งตามวิธีการของ IEEE [6], [10] FLASH ได้รับการพัฒนามาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1985 จนถึงปัจจุบันเป็นเวอร์ชัน 1.8 พัฒนาด้วยภาษา C รันบน DOS การใช้งาน โปรแกรมจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับ EMTP คือ จะต้องสร้างไฟล์ข้อมูล (.dat ไฟล์) ที่จะนำไปใช้รันโปรแกรมก่อน แต่เนื่องจากไม่มีตัวสร้างไฟล์ข้อมูล (editor) การสร้างไฟล์ข้อมูลอาจเป็นไปได้ด้วยความยากลำบากถ้าไม่มีความชำนาญในการใช้โปรแกรม งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาสร้างโปรแกรมสร้างไฟล์ข้อมูลที่จะนำไปใช้รันโปรแกรม พร้อมทั้งสั่งรันโปรแกรมหลังจากสร้างไฟล์ข้อมูลแล้ว โปรแกรมนี้พัฒนาด้วยภาษา Delphi เวอร์ชัน 6 ดังได้กล่าวมาแล้วว่าโปรแกรมนี้จะคำนวณค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดก่อนนำไปคำนวณ SFR และ BFR ข้อมูลที่จะต้องป้อนให้กับโปรแกรมจึงมีมากขึ้นตามไปด้วย

4.3.1 พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบ

ก) ความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน (N_g) หรือ จำนวนวันที่เกิดฟ้าผ่าต่อปี (TD) ใดๆอย่างหนึ่ง

ข) รายละเอียดของสายเฟส ดังนี้

1) ระยะห่างจากเส้นกึ่งกลางเสาในแนวราบของสายเฟสแต่ละเส้น (m) ใช้เครื่องหมายลบเมื่อสายเฟสอยู่ทางด้านซ้ายของจุดเส้นกึ่งกลาง

- 2) ความสูงของสายเฟสแต่ละเส้น (m)
 - 3) ประเภทของแรงดันที่ใช้ AC/DC และแรงดันใช้งาน (kV) กรณี AC แรงดันใช้งานเป็นค่า line-to-line กรณี DC แรงดันใช้งานเป็นค่าที่วัดเทียบกับกราวด์
 - 4) จำนวน bundle ในสายเฟส
 - 5) ระยะห่างของสายตัวนำใน bundle (mm)
 - 6) ระยะหย่อนของสายเฟส (m)
- ค) รายละเอียดของสายล่อฟ้า ดังนี้
- 1) ระยะห่างจากเส้นกึ่งกลางเสาในแนวราบของสายล่อฟ้าแต่ละเส้น (m)
 - 2) ความสูงของสายล่อฟ้าแต่ละเส้น (m)
 - 3) เส้นผ่าศูนย์กลางของสายล่อฟ้า (mm)
 - 4) ระยะหย่อนของสายล่อฟ้า (m)
- ง) รายละเอียดของเสาไฟฟ้า ดังนี้
- 1) รูปร่างของเสา มี 4 แบบ ดังแสดงในหัวข้อ 3.2.1.1 คือ แบบ Conical (a), Cylindrical (b), Waist (c) และ H-frame (d)
 - 2) dimension ของส่วนต่าง ๆ ของเสา ดังแสดงในรูปที่ 3.1
 - 3) ระยะห่างของเสาแต่ละต้น (tower span)
- จ) ความสูงของลูกถ้วยฉนวน (m)
- ฉ) ความต้านทานดินของฐานเสา (Ω) สามารถเลือกได้ว่าต้องการให้ความต้านทานดินเป็นเพียงค่าเดียว หรือใส่หลาย ๆ ค่า ตั้งแต่ค่าเดียวไปจนถึง 50 ค่า เพื่อแสดงการกระจายของความต้านทานดิน

4.3.2 กระบวนการคำนวณของโปรแกรม FLASH

การคำนวณของโปรแกรม FLASH แยกออกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

4.3.2.1 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าและโอกาสการเกิดฟ้าผ่า

FLASH กำหนดให้ฟ้าผ่าเป็นแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ $2/50 \mu\text{s}$ ขั้วลบ มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเชิงเส้นและมีโอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ากระแสเกินกว่า I_0 เป็นดังสมการประมาณค่าของ IEEE Working Group [6] คือ

$$P(I > I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{31}\right)^{2.6}} \quad (4.8)$$

เมื่อ I_0 คือ กระแสฟ้าผ่าค่ายอด (kA)

4.3.2.2 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง

จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง (N_L) ขึ้นกับความสูงของเสาและความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน (N_g) ดังสมการ (2.10) ของ Eriksson คือ

$$N_L = \frac{N_g}{10} (28h_t^{0.6} + b) \quad (4.9)$$

เมื่อ h_t คือ ความสูงของเสา (m)

b คือ ระยะห่างระหว่างสายล่อฟ้า (m)

4.3.2.3 ระยะฟ้าผ่า

ระยะฟ้าผ่าใช้สมการต่อไปนี้ในการคำนวณ

$$r_c = 10 I^{0.65} \quad (4.10)$$

$$r_g = \beta r_c \quad (4.11)$$

โดย $\beta = 0.55$; $y_{av} > 40$ m

และ $\beta = 0.1[3.6 + 1.7 \ln(43 - y_{av})]$; $y_{av} \leq 40$ m (4.12)

เมื่อ $y_{av} = y - \frac{2}{3} S_y$ (4.13)

โดย y_{av} คือ ความสูงเฉลี่ยของสายเฟส

y คือ ความสูงของสายเฟส

S_y คือ ระยะหย่อนของสายเฟส

4.3.2.4 เสรีจิมพีแดนซ์ของเสา

FLASH จะคำนวณเสรีจิมพีแดนซ์ของเสาตามรูปแบบและ dimension ต่าง ๆ ที่ป้อนให้ตามสมการในหัวข้อ 3.2.2.1

4.3.2.5 ผลของโคโรนา (corona)

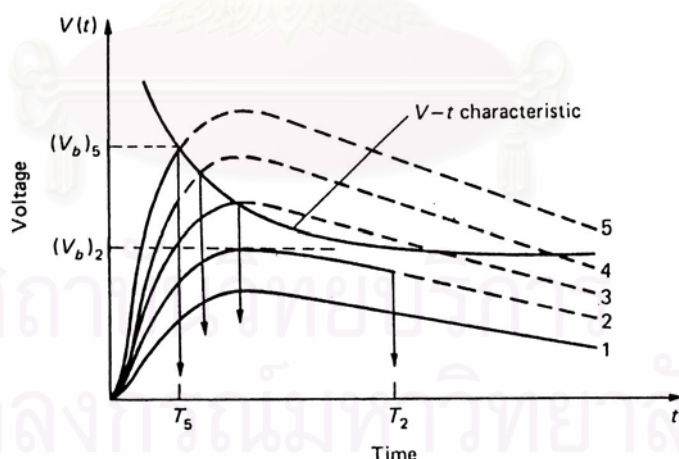
FLASH คำนึงถึงผลของโคโรนาในการคำนวณด้วย โดยรัศมีโคโรนาของสายเฟสจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ใช้ ที่ระดับแรงดันสูง สายเฟสจะมีรัศมีสมมูลสูง ดังนั้นโคโรนาจะมีผลมากที่หน้าคลื่นของเสิร์จ

4.3.2.6 ผลของแรงดันระบบ

FLASH พิจารณาแรงดันของระบบในการคำนวณ BFO โดยพิจารณาแรงดันของระบบของแต่ละเฟสในช่วง 1 รูปคลื่น คือ 360° เริ่มตั้งแต่มุมเฟสเป็น 0° FLASH จะคำนวณค่าแรงดันที่ตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนของทุกเฟส จากนั้นจะเพิ่มมุมเฟสครั้งละ 10° ไปเรื่อย ๆ จนครบ 360°

4.3.2.7 เงื่อนไขการเกิด flashover

FLASH ใช้เส้นโค้งแรงดัน-เวลา (V-t curve) เป็นเงื่อนไขการเกิด flashover ของลูกถ้วยฉนวน เส้นโค้งแรงดัน-เวลา แสดงความคงทนของฉนวนเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ที่มีรูปคลื่นเหมือนเดิมแต่เปลี่ยนขนาดค่ายอดแรงดัน สามารถแสดงได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนกับเวลาเบรกดาวน หรือเวลาที่คลื่นตัดถ้าคลื่นตัดบริเวณหางคลื่น ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนคือค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ กรณีที่คลื่นตัดบริเวณหน้าคลื่น ค่าแรงดันอิมพัลส์เบรกดาวนคือแรงดัน ณ เวลาที่เกิดเบรกดาวน ดังแสดงในรูปที่ 4.17



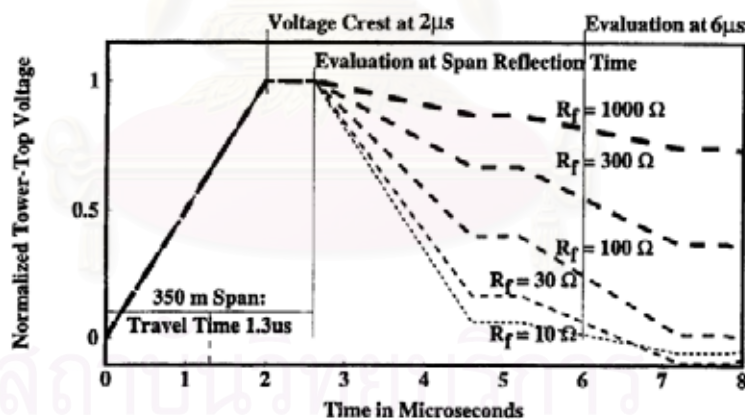
รูปที่ 4.17 เส้นโค้งแรงดัน-เวลา

เส้นโค้งแรงดัน-เวลาสำหรับรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐานของ FLASH [18] เป็นดังสมการ

$$V_{\text{FLASH}}(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0.75}} \right) w \quad (4.14)$$

- เมื่อ V คือ แรงดันที่เกิด flashover (kV)
 t คือ เวลาที่เกิด flashover (μs)
 w คือ ความกว้างแถบอากาศหรือความสูงของลูกถ้วยฉนวน (m)

รูปที่ 4.18 แสดงแรงดันที่ยอดเสาที่ค่าความต้านทานดินของฐานเสาต่างกัน เมื่อเสาอยู่ห่างกันเป็นระยะ 350 m และเวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่าเท่ากับ $2 \mu\text{s}$ ที่เวลา $2 \mu\text{s}$ แรงดันยอดเสามีค่าสูงสุด ถ้ากำหนดให้เสิร์จเดินทางด้วยความเร็ว 0.9 เท่าของความเร็วแสง ที่เวลา $2.6 \mu\text{s}$ เสิร์จที่สะท้อนมาจากเสาดันถัดไปจะเดินทางมาถึงยอดเสาพอดี จากนั้นแรงดันที่ยอดเสาจะมีค่าลดลงและลดลงมากขึ้นอีกเมื่อเสิร์จที่สะท้อนมาจากเสาดันถัด ๆ ไป เดินทางมาถึงยอดเสาอีกครั้ง FLASH ใช้ค่าแรงดัน flashover ที่ $2 \mu\text{s}$ และ $6 \mu\text{s}$ [18] ในการคำนวณ ที่ $6 \mu\text{s}$ แรงดันที่ยอดเสาจะได้รับผลกระทบจากคลื่นสะท้อนจากเสา 4 ต้น หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างเสา สำหรับการคำนวณ SFR ใช้แรงดัน flashover ที่ $6 \mu\text{s}$ เพียงจุดเดียวและในการคำนวณ BFR ใช้ทั้งที่ $2 \mu\text{s}$ และ $6 \mu\text{s}$ แต่ถ้าเวลาที่เสิร์จใช้เดินทางใน 1 ช่วงเสา (span travel time, T_s) มีค่ามากกว่า $1 \mu\text{s}$ (เสิร์จเดินทางไป-กลับใช้เวลามากกว่า $2 \mu\text{s}$) ก็ให้คำนวณ BFR ที่ $2 T_s$ และ $6 \mu\text{s}$ แทน จากสมการ (4.14) แรงดัน flashover มีค่าเท่ากับ 820 kV/m ที่ $2 \mu\text{s}$ และ 585 kV/m ที่ $6 \mu\text{s}$



รูปที่ 4.18 แรงดันยอดเสาเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเป็น 350 m ที่ความต้านทานดินของฐานเสาต่าง ๆ

4.3.2.8 การคำนวณ SFR และ BFR

1) SFR คำนวณได้จาก

$$\text{SFR} = 0.1 N_g \sum_{i=1}^{N_{\text{exp}}} D_{ci} \left(\frac{P(I > I_{ci}) - P(I > I_{mi})}{2} \right) \quad (4.15)$$

- เมื่อ N_g คือ ความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน (flashes/100 km-year)
- N_{exp} คือ จำนวนเฟสที่ยื่นโผล่ออกมา (exposed phase) และสามารถก่อให้เกิดการช็อตลัมเหลวได้
- D_{ci} คือ ความกว้าง D_c ของเฟสที่ i (m)
- I_{ci} คือ กระแสฟ้าผ่าวิกฤติของเฟสที่ i (kA)
- I_{mi} คือ กระแสฟ้าผ่าที่ไม่ก่อให้เกิดการช็อตลัมเหลว (kA)
- $P(I > I_{ci})$ คือ โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสฟ้าผ่าค่ายอดมากกว่า I_{ci} คำนวณได้จากสมการ (4.8)
- $P(I > I_{mi})$ คือ โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสฟ้าผ่าค่ายอดมากกว่า I_{mi} คำนวณได้จากสมการ (4.8)

2) BFR คำนวณได้จาก

$$BFR = N_L \cdot P(I > I_c) \quad (4.16)$$

- เมื่อ N_L คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่งในสมการ (2.10) (flashes/100 km-year)
- $P(I > I_c)$ คือ โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสฟ้าผ่าค่ายอดมากกว่า I_c ในสมการ (4.8)

ถ้าสมมุติว่าระบบสายส่งแบ่งออกได้เป็นช่วง ๆ ซึ่งแต่ละช่วงอาจมีค่าความต้านทานดินแตกต่างกัน โปรแกรมจะคำนวณ BFR เป็นช่วง ๆ แล้วแต่ว่าจะป้อนค่าความต้านทานให้อยู่ที่เปอร์เซ็นต์ของสายบ้าง เมื่อคำนวณครบ 100 เปอร์เซ็นต์ของสายก็จะนำค่า BFR มาเฉลี่ยดังสมการ

$$BFR = \frac{\sum BFR_n L_n}{\sum L_n} \quad (4.17)$$

- เมื่อ BFR คือ ค่า BFR รวม
- BFR_n คือ ค่า BFR ของสายช่วงที่ n
- L_n คือ ความยาวสายช่วงที่ n

4.4 การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม LPDW

โปรแกรม Lightning Protection Design Workstation หรือที่เรียกกันว่า LPDW เป็นโปรแกรมสำหรับออกแบบระบบการป้องกันฟ้าผ่าของสายส่งและสายจำหน่าย รวมทั้งสายเคเบิลใต้ดิน พัฒนาโดย Electric Power Research Institute (EPRI) หลักการคำนวณของ LPDW ใช้หลักการของคลื่นเดินทาง (traveling wave) เช่นเดียวกับหลักการคำนวณที่ใช้ใน EMTP ต่างกันตรงที่ LPDW มีแบบจำลองในการศึกษาเกี่ยวกับฟ้าผ่าโดยเฉพาะและสามารถใช้ข้อมูลฟ้าผ่า

จากหน่วยงาน National Lightning Detection Network (NLDN) ครอบคลุมตั้งแต่ปี ค.ศ. 1988 จนถึง 1997 LPDW เวอร์ชันที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้คือเวอร์ชัน 5 ซึ่งมีความสามารถดังนี้ [19]

- จำลองการเกิดฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง
- ออกแบบซีลด์ป้องกันระบบสายส่ง
- ศึกษาผลของกราวด์ที่มีต่อการวิเคราะห์ฟ้าผ่า
- ศึกษาผลของการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่มีต่อการวิเคราะห์ฟ้าผ่า
- การออกแบบป้องกันหม้อแปลงไฟฟ้า
- การออกแบบป้องกันสายเคเบิล
- มีฐานข้อมูลของสายส่ง, ลูกถ้วยฉนวน และกับดักฟ้าผ่าให้เลือกใช้มากมาย

สำหรับ LPDW ในเวอร์ชันนี้ ได้แบ่งออกโปรแกรมออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ

- 1) CFlash ใช้สำหรับเคเบิลใต้ดิน
- 2) DFlash ใช้สำหรับระบบที่มีระดับแรงดันไม่เกิน 34.5 kV
- 3) TFlash ใช้สำหรับระบบที่มีระดับแรงดันไม่ต่ำกว่า 69 kV

งานวิจัยนี้ต้องการวิเคราะห์ระบบสายส่ง 500 kV จึงมุ่งเน้นที่การใช้งาน TFlash เท่านั้น

4.4.1 พารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องทราบ [20]

ก) ความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน (N_g) ในกรณีที่ไม่มีทราบค่า สามารถหา N_g ได้จากการคลิกแผนที่ ณ ตำแหน่งที่ต้องการศึกษา ในกรณีที่ทราบค่าแล้วก็สามารถใส่ค่า N_g ได้โดยตรง

ข) รายละเอียดของสายเฟส ดังนี้

1) ประเภทของสายเฟส เลือกได้จากฐานข้อมูลในโปรแกรม หรือถ้ามีรายละเอียดของสายเฟสได้แก่ ขนาดสาย, เส้นผ่าศูนย์กลาง, ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดเต็มที่ (AC resistance at full load) และ รีแอกแตนซ์กระแสสลับที่โหลดเต็มที่ (AC reactance at full load) ก็สามารถป้อนข้อมูลเข้าไปเองได้

2) ระยะห่างจากเส้นกึ่งกลางของสายเฟสแต่ละเส้น (m) ใช้เครื่องหมายลบเมื่อสายเฟสอยู่ทางด้านซ้ายของจุดเส้นกึ่งกลางเสาในแนวราบ

3) ความสูงของสายเฟสแต่ละเส้น (m)

4) ประเภทของแรงดันที่ใช้ AC/DC และแรงดันใช้งาน (kV) กรณี AC แรงดันใช้งานเป็นค่า line-to-line กรณี DC แรงดันใช้งานเป็นค่าที่วัดเทียบกับกราวด์

5) จำนวน bundle ในสายเฟส

6) ระยะห่างของสายตัวนำใน bundle (mm)

7) ระยะหย่อนของสายเฟส (m)

ค) รายละเอียดของสายล่อฟ้า ดังนี้

1) ประเภทของสายล่อฟ้า เลือกได้จากฐานข้อมูลในโปรแกรม หรือถ้ามีรายละเอียดของสายล่อฟ้า ได้แก่ ขนาดสาย, เส้นผ่าศูนย์กลาง, ความต้านทานไฟฟ้ากระแสสลับที่โหลดเต็มที่ (AC resistance at full load) และ รีแอกแตนซ์กระแสสลับที่โหลดเต็มที่ (AC reactance at full load) ก็สามารถป้อนข้อมูลเข้าไปเองได้

2) ระยะห่างจากเส้นกึ่งกลางเสาในแนวราบของสายล่อฟ้าแต่ละเส้น (m)

3) ความสูงของสายล่อฟ้าแต่ละเส้น (m)

4) เส้นผ่าศูนย์กลางของสายล่อฟ้า (mm)

5) ระยะหย่อนของสายล่อฟ้า (m)

ง) รายละเอียดของเสาไฟฟ้า ดังนี้

1) รูปร่างของเสา เลือกได้จากฐานข้อมูลของโปรแกรม

2) ระยะห่างของเสาแต่ละต้น (tower span)

จ) ข้อมูลลูกถ้วยฉนวน สามารถเลือกได้จากฐานข้อมูลของโปรแกรม หรือถ้ามีข้อมูลของลูกถ้วยฉนวน ได้แก่ CFO ขั้วบวก, CFO ขั้วลบ, เส้นผ่าศูนย์กลางของลูกถ้วย และ รูปแบบการวางตัวของลูกถ้วย ก็สามารถป้อนข้อมูลเข้าไปเองได้

ฉ) ความต้านทานดินของฐานเสา (Ω) สามารถเลือกได้ 4 แบบ ได้แก่ Driven Rod, Continuous CP, Radial CP และ Concrete Foundation

4.4.2 กระบวนการคำนวณของโปรแกรม LPDW [21]

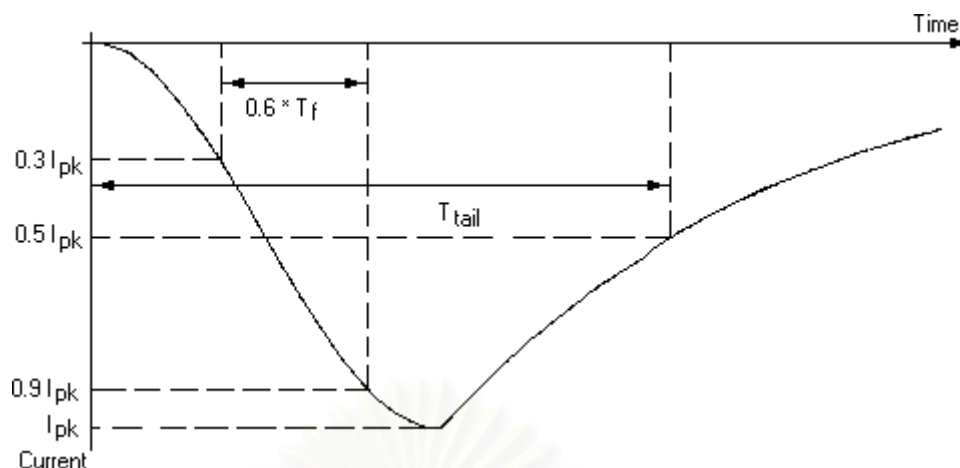
การคำนวณของโปรแกรม LPDW แยกออกเป็นส่วน ๆ ได้ดังนี้

4.4.2.1 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าและโอกาสการเกิดฟ้าผ่า

LPDW กำหนดให้ฟ้าผ่าเป็นแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ขั้วลบ มีหน้าคลื่นเพิ่มขึ้นเป็นฟังก์ชัน 1- cosine และมีหลังคลื่นลดลงแบบ exponential ดังแสดงในรูปที่ 4.19 และมีโอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าค่ายอดเกินกว่า I_0 เป็นดังสมการ (4.8)

4.4.2.2 จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่ง

LPDW คำนวณจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่งด้วยสมการเดียวกันกับสมการ (4.9) ของ Eriksson ที่ใช้ใน FLASH



รูปที่ 4.19 รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่ใช้ใน LPDW

4.4.2.3 ระยะฟ้าผ่า

ระยะฟ้าผ่าใช้สมการ (4.18) ในการคำนวณ

$$r_c = r_g = 1.00 I^{0.74} y^{0.6} \quad (4.18)$$

เมื่อ y คือ ความสูงของสายเฟส

4.4.2.4 ผลของโคโรนา

LPDW คำนึงถึงผลของโคโรนาในการคำนวณเช่นเดียวกับ FLASH โดยรัศมีโคโรนาของสายเฟสจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันที่ใช้ ที่ระดับแรงดันสูง สายเฟสจะมีรัศมีสมมูลสูง ดังนั้นโคโรนาจะมีผลมากที่หน้าคลื่นของเสิร์จ

4.4.2.5 ผลของแรงดันระบบ

แรงดันระบบทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนกลับเกิดได้ง่ายขึ้นเนื่องจากแรงดันระบบมีผลทำให้กระแสฟ้าผ่าวิกฤติมีค่าลดลง กระบวนการวิเคราะห์ที่โดยคำนึงถึงแรงดันระบบของ LPDW เป็นดังแสดงในหัวข้อ 2.2.4.2 บทที่ 2

4.4.2.6 เงื่อนไขการเกิด flashover

LPDW ใช้แบบจำลองลีดเดอร์จำลองเงื่อนไขการเกิด flashover ของลูกถ้วยฉนวน ความเร็วของลีดเดอร์ เป็นดังสมการ

$$\frac{dx}{dt} = Ke(t) \left[\frac{e(t)}{X} - E_0 \right] \quad (4.19)$$

- เมื่อ K คือ ค่าคงที่การแพร่ (propagation constant)
 E_0 คือ สนามไฟฟ้าเบรกดาวน (kV/m)
 x คือ ผลต่างของระยะแกปกับความยาวลีดเดอร์ (m)
 $e(t)$ คือ แรงดันคร่อมแกป (kV)

สำหรับฉนวนพอร์ซเลน $E_0 = 535.0$ kV/m และ $K = 7.785 \times 10^{-7}$ และสำหรับฉนวนของอุปกรณ์ $E_0 = 551.3$ kV/m และ $K = 1.83 \times 10^{-6}$ กระบวนการคำนวณเริ่มจากคำนวณหาความเร็วลีดเดอร์ จากนั้นคำนวณหาความยาวลีดเดอร์แล้วนำไปลบออกจากระยะแกปจะได้ค่า x ต่อมาที่ Δt ถัดไป ก็จะได้ค่า x ค่าใหม่ การคำนวณจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง x มีค่าเป็นศูนย์ก็จะเกิดเบรกดาวนขึ้นจึงยุติการคำนวณ

4.4.2.7 การคำนวณ SFR และ BFR

1) SFR คำนวณได้จาก

$$SFR = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{N_g}{10} \int_{l_{ci}}^{l_m} [D_{ci} \cdot P(I)] dl \quad (4.20)$$

- เมื่อ N_g คือ ความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน (flashes/100 km-year)
 N_c คือ จำนวนเส้นของสายเฟส
 D_{ci} คือ ความกว้าง D_c ของสายเฟสเส้นที่ i (m)
 l_{ci} คือ กระแสฟ้าผ่าวิกฤติของสายเฟสเส้นที่ i (kA)
 l_m คือ กระแสฟ้าผ่าที่ไม่ก่อให้เกิดการชัตต์ลัมเพลว (kA)
 $P(I)$ คือ โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสฟ้าผ่าค่ายอด I

$P(I)$ คำนวณได้จากสมการ (4.8) ดังนี้

จาก

$$P(I > I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{31}\right)^{2.6}}$$

จะได้ $P(I > 19 \text{ kA}) = 0.7812$, $P(I > 21 \text{ kA}) = 0.7335$ ดังนั้น $P(I = 20 \text{ kA}) = 0.7812 - 0.7335 = 0.0477$

2) BFR คำนวณได้จาก

$$\text{BFR} = N_L \cdot P(I > I_c) \quad (4.21)$$

เมื่อ N_L คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่ระบบสายส่งในสมการ (2.10)

$P(I > I_c)$ คือ โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสฟ้าผ่าค่ายอดมากกว่า I_c ในสมการ (4.8)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

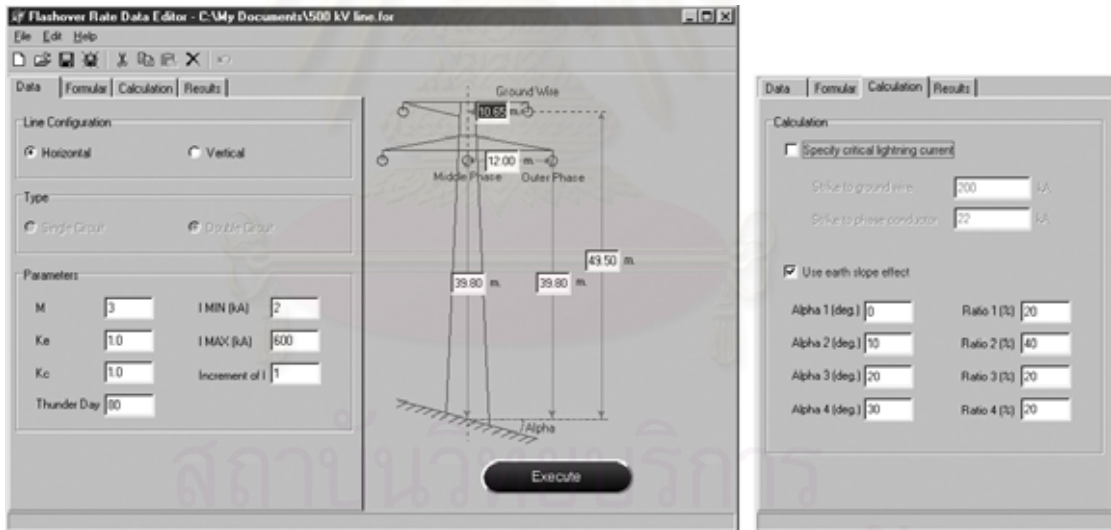
บทที่ 5

ผลการจำลองและการวิเคราะห์

5.1 การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดด้วยโปรแกรม EMTP และ A-W

การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม A-W ทำได้โดยคำนวณความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าโดยสมมติว่ากระแสฟ้าผ่าคายอดทุกค่าที่อยู่ในช่วงที่มีโอกาสเกิดฟ้าผ่าได้เป็นค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติ ผลการคำนวณที่ได้จะเป็นตารางแสดงค่า SFR และ BFR ที่ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติตั้งแต่กระแสค่าต่ำสุดจนถึงค่าสูงสุด (ตามที่ใช้ป้อนให้กับโปรแกรม) จากนั้นนำตารางมาเทียบกับค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ประเมินด้วย EMTP ก็จะทราบได้ว่าอัตราการเกิดความผิดพลาดมีค่าเป็นเท่าไร

รูปที่ 5.1 แสดงข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม A-W ในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 5.1 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม A-W

5.1.1 การศึกษาผลของแบบจำลองการเกิดเบรกดาวน

การศึกษาผลของแบบจำลองการเกิดเบรกดาวนแบบต่าง ๆ ที่มีต่อเสิร์จฟ้าผ่าทำได้โดยหาค่ากระแสวิกฤติที่ก่อให้เกิดการเบรกดาวน ในกรณีฟ้าผ่าลงบนสายเฟสการเบรกดาวนเกิดขึ้นที่เฟสที่ถูกฟ้าผ่า ส่วนในกรณีฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า การแลบข้ามกลับอาจก่อให้เกิดการเบรกดาวนเฟสเดียวหรือสองเฟส แบบจำลองเบรกดาวนที่ใช้ ได้แก่ แบบสวิตช์ควบคุมด้วยแรงดัน, แบบจำลอง

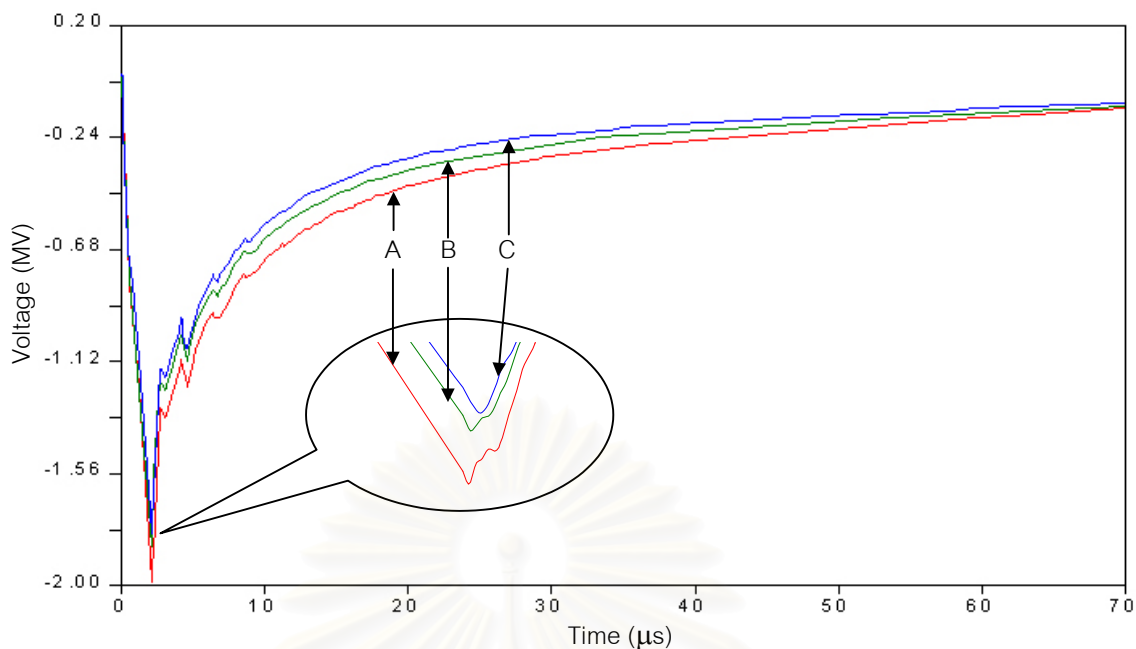
อินทิเกรชัน และ แบบจำลองลิตเตอร์ ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสา กำหนดให้เป็นตัวต้านทานขนาด 10Ω เนื่องจาก EMTP จำลองแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับ 500 kV (line-to-line) เป็นฟังก์ชัน cosine ดังนั้นเพื่อให้แรงดันระบบไปเสริมกับแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นมากที่สุด ในกรณีฟ้าผ่าลงบนสายเฟส (กำหนดให้เป็นเฟส A เนื่องจากโอกาสที่ฟ้าผ่าที่เฟส A มีเท่ากับเฟส C และมากกว่าเฟส B) เนื่องจากขณะเกิดฟ้าผ่า (ชั่วลบ) แรงดันเกินที่เฟส A มีค่าเป็นลบ จึงกำหนดมุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A (ดูรูปที่ 4.2) เป็น 180° และในกรณีฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า (กำหนดให้เป็น GW1) การกำหนดมุมเฟสเริ่มต้นของแหล่งจ่ายแรงดันจะต้องตรวจสอบก่อนว่าในขณะที่ไม่ได้มีแหล่งจ่ายแรงดันจากระบบ เมื่อฟ้าผ่าลงที่ GW1 แล้ว เฟสใดเกิดแรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยฉนวนสูงที่สุด (สามารถเกิดเบรกดาวน์ได้ที่แรงดันเกินฟ้าผ่าต่ำกว่าเฟสอื่นๆ) การกำหนดมุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A เป็นดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 มุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A ที่ใช้ในการจำลองกรณีฟ้าผ่าลงที่ GW1

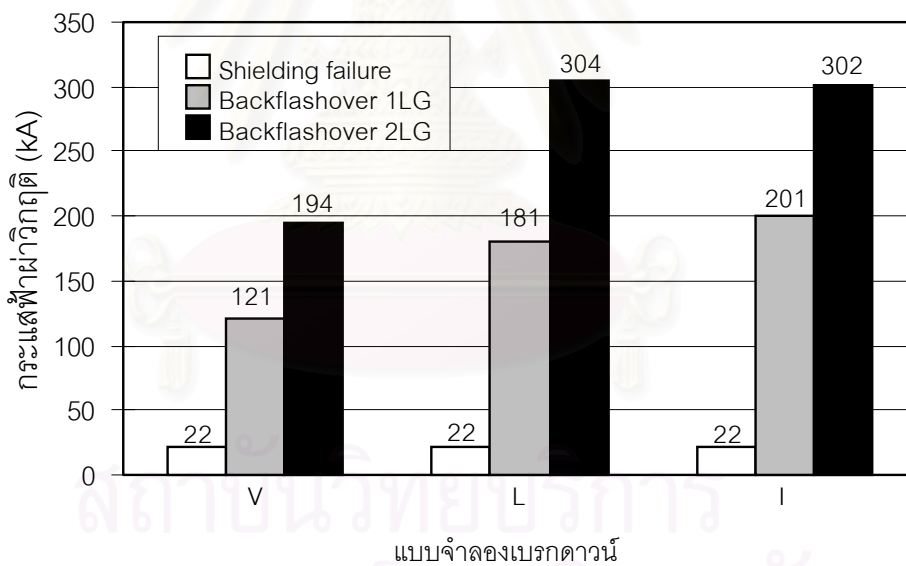
เฟสที่เกิดแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนสูงที่สุด	A	B	C
มุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A	0°	120°	240°

จากการจำลองหาแรงดันเกินของเฟส A, B และ C ในขณะที่ไม่ได้มีแหล่งจ่ายแรงดันจากระบบ เมื่อกำหนดให้แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่ามีค่ายอดเป็น 100 kA ฟ้าผ่าลงที่ GW1 จะได้รูปคลื่นแรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยฉนวนของแต่ละเฟสเป็นดังแสดงในรูปที่ 5.2 จากรูปพบว่าแรงดันเกินเกิดขึ้นสูงสุดที่เฟส A ดังนั้น จากตารางที่ 5.1 จะได้ว่ามุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A มีค่าเป็น 0°

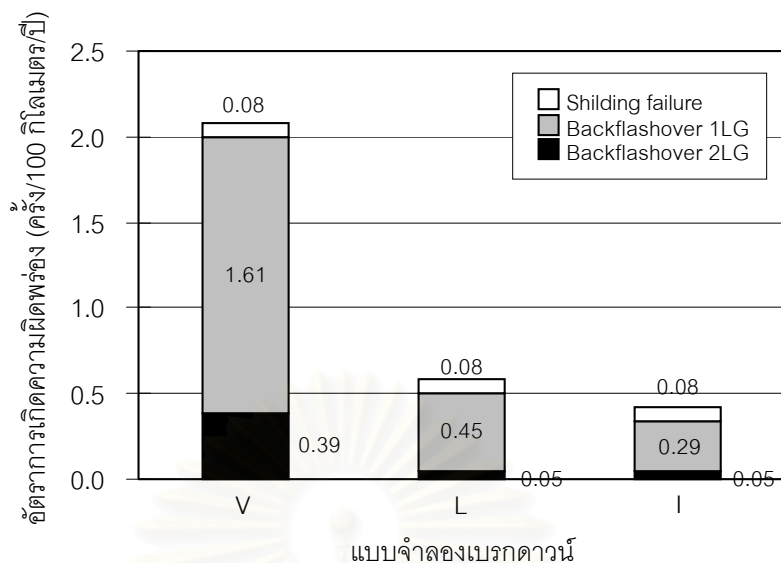
รูปที่ 5.3 แสดงผลการจำลองในการศึกษาผลของแบบจำลองการเกิดเบรกดาวน์ในกรณีเกิดการช็อตล้มเหลว และ แล็บข้ามกลับเฟสเดียวและสองเฟส เมื่อ V คือ แบบจำลองสวิตช์ควบคุมด้วยแรงดัน, L คือ แบบจำลองลิตเตอร์ และ I คือ แบบจำลองอินทิเกรชัน และรูปที่ 5.4 แสดงอัตราการเกิดความผิดพลาดซึ่งคำนวณจากกระแสฟ้าผ่าวิกฤติในรูปที่ 5.3 ด้วยโปรแกรม A-W



รูปที่ 5.2 แรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยฉนวนของแต่ละเฟสเมื่อฟ้าผ่าลงที่ GW1 กรณีไร้แหล่งจ่ายแรงดันระบบ



รูปที่ 5.3 กระแสฟ้าผ่าวิกฤติของแบบจำลองเบรกดาวน์แบบต่าง ๆ

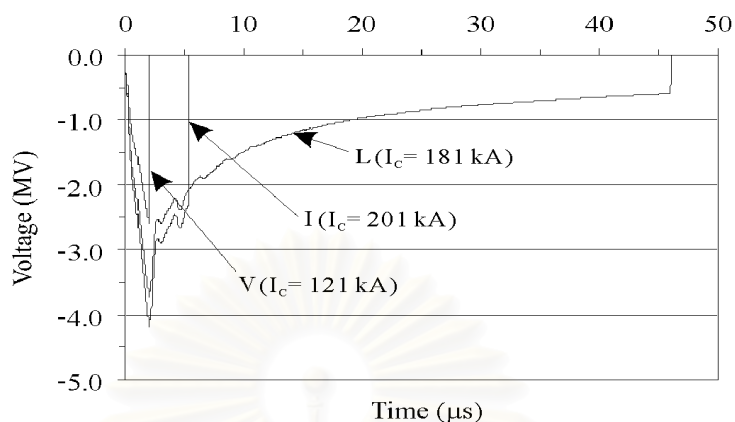


รูปที่ 5.4 อัตราการเกิดความผิดปกติของแบบจำลองเบรกดาวนีย์แบบต่าง ๆ

ในกรณีเกิดการแลบข้ามกลับ (ฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า) แบบจำลองสวิตช์ควบคุมด้วยแรงดันให้ค่ากระแสวิกฤติต่ำที่สุด ส่งผลให้มีค่าอัตราการเกิดการแลบข้าม (BFR) สูงที่สุด แบบจำลองลีดเดอร์ให้ค่ากระแสวิกฤติสูงขึ้น, BFR ต่ำลง และแบบจำลองอินทิเกรชันให้ค่ากระแสวิกฤติสูงที่สุด, BFR ต่ำที่สุด

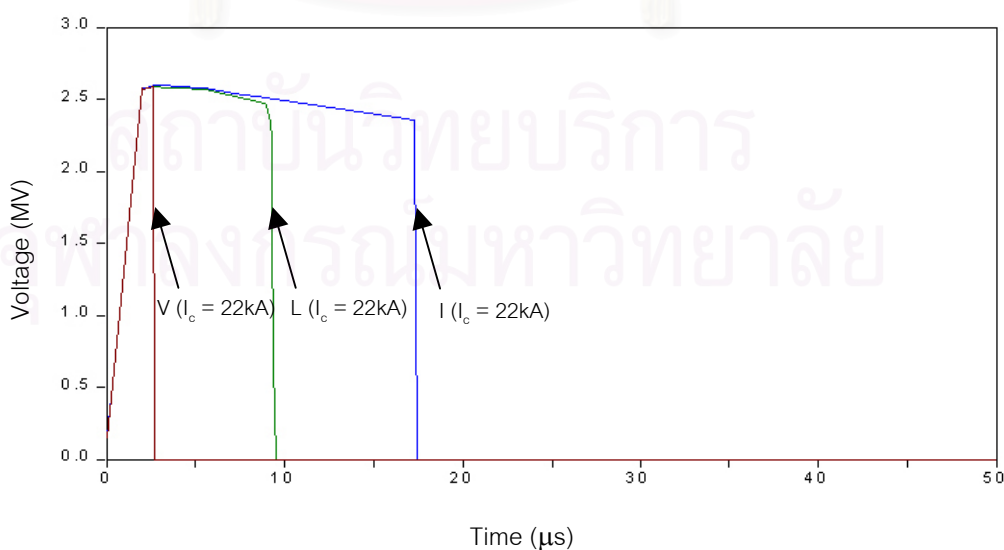
รูปที่ 5.5 แสดงแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนเมื่อฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้าที่เสียดด้วยค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดปกติหนึ่งเฟสของแบบจำลองเบรกดาวนีย์แบบต่าง ๆ เมื่อ V คือแบบจำลองสวิตช์ควบคุมด้วยแรงดัน, L คือ แบบจำลองลีดเดอร์ และ I คือ แบบจำลองอินทิเกรชัน ในกรณีของแบบจำลองสวิตช์ควบคุมด้วยแรงดันจะเกิดการเบรกดาวนีย์ที่ช่วงหน้าคลื่นของแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนเพราะสวิตช์ทำงานเมื่อแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนมีค่าสูงกว่า 2.595 MV แบบจำลองนี้ไม่สามารถจำลองเส้นโค้งแรงดัน-เวลาเบรกดาวนีย์ได้ ในกรณีของแบบจำลองอินทิเกรชันแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนที่มีค่ามากกว่า 2.336 MV จะถูกอินทิเกรตตามเวลาจนกระทั่งค่าที่ได้จากการอินทิเกรตมีค่ามากกว่า 2.473 V·s ก็เกิดเบรกดาวนีย์ หรือเมื่อแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนมีค่าน้อยกว่า 2.336 MV จะไม่เกิดเบรกดาวนีย์เนื่องจากหางคลื่นของแรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยฉนวนลดลงอย่างรวดเร็ว แบบจำลองนี้จึงให้ค่ากระแสวิกฤติสูงที่สุดในกรณีของแบบจำลองลีดเดอร์ การคำนวณเริ่มจากการก่อดำของลีดเดอร์เมื่อแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันวิกฤติ 2.595 MV การคำนวณจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งความยาวของลีดเดอร์มีค่าเท่ากับความยาวของแกน ก็เกิดเบรกดาวนีย์ขึ้น หรือถ้าแรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนมีค่าน้อยกว่าค่าแรงดันต่ำสุดที่ยังคงสามารถรักษาการดีสชาร์จได้ก็จะไม่เกิดเบรกดาวนีย์ ค่าแรงดันต่ำสุดนี้จะลดลงเมื่อความยาว

ของลีดเดอร์เพิ่มขึ้นตามเวลา ผลที่ตามมาคือสามารถเกิดเบรกดาวนที่หางคลื่นของแรงดันคร่อม
 ลูกถ้วยฉนวนที่มีค่ากระแสต่ำเมื่อเทียบกับแบบจำลองอินทิเกรชันได้



รูปที่ 5.5 แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดการเบรกดาวนหนึ่งเฟสของ
 แบบจำลองเบรกดาวนแบบต่าง ๆ ในกรณีเกิดการแลบข้ามกลับ

ในกรณีเกิดการช็อตล้มเหลว (ฟ้าผ่าลงมายังสายเฟส) หางคลื่นของแรงดันคร่อมลูกถ้วย
 ฉนวนที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ เมื่อเทียบกับกรณีเกิดการแลบข้ามกลับ (ฟ้าผ่าลงมายังสาย
 ล่อฟ้า) ดังแสดงในรูปที่ 5.6 เมื่อพิจารณาแบบจำลองอินทิเกรชันและแบบจำลองลีดเดอร์ แม้ว่า
 แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนจะมีค่ามากกว่าค่าแรงดันวิกฤติเพียงเล็กน้อยก็สามารถเกิดเบรกดาวน
 ได้ถ้าแรงดันค่าสูงนี้คงค่าอยู่เป็นระยะเวลาสั้น ดังนั้นในกรณีที่พิจารณาการช็อตล้มเหลว แบบ
 จำลองอินทิเกรชันและแบบจำลองลีดเดอร์จะให้ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่มีค่าเท่า ๆ กันกับแบบ
 จำลองสวิตช์ควบคุมด้วยแรงดัน



รูปที่ 5.6 แรงดันคร่อมลูกถ้วยฉนวนที่มีค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดการเบรกดาวนของ
 แบบจำลองเบรกดาวนแบบต่าง ๆ ในกรณีเกิดการช็อตล้มเหลว

5.1.2 การศึกษาผลของแบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสา

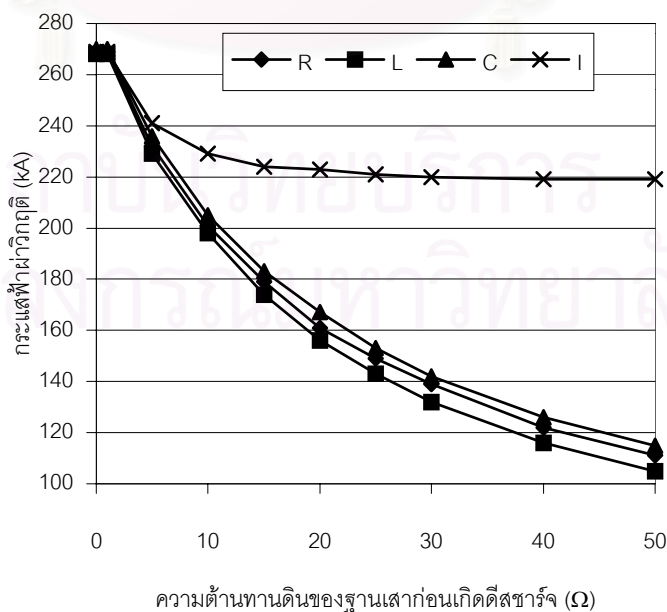
การศึกษาผลของแบบจำลองความต้านทานของฐานเสาที่มีต่อเสิร์จฟ้าผ่าที่ใช้แบบจำลองความต้านทานของฐานเสาชนิดขึ้นกับความถี่และชนิดขึ้นกับกระแส สำหรับแบบจำลองเบรกดาวร์ที่ใช้แบบจำลองอินทิเกรชันซึ่งมีความสะดวกในการคำนวณเพียงแบบเดียว กระบวนการศึกษามีดังนี้

1) หาค่ากระแสวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดเมื่อมีฟ้าผ่าลงบนสายส่ง ทั้งในกรณีฟ้าผ่าลงที่สายเฟส และ สายล่อฟ้า โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานดินของฐานเสา ก่อนเกิดดีส์ชาร์จ เป็น 1Ω

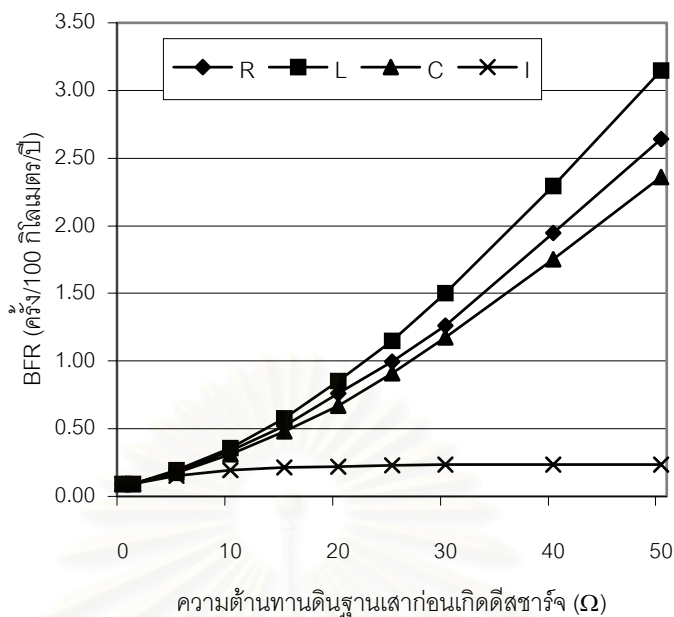
2) เปลี่ยนค่าความต้านทานดินของฐานเสา ก่อนเกิดดีส์ชาร์จ เป็น 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 และ 50Ω ตามลำดับ

จากการจำลองพบว่าในกรณีเกิดซีลด์ลัมเพลว (ฟ้าผ่าลงที่สายเฟส) จะได้ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติประมาณ 22 kA โดยไม่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินของฐานเสา ที่กระแสฟ้าผ่าวิกฤติค่านี้นำไปคำนวณค่าอัตราการเกิดซีลด์ลัมเพลว (SFR) ได้ 0.08 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี

รูปที่ 5.7 แสดงค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติต่อค่าความต้านทานดินของฐานเสา ก่อนเกิดดีส์ชาร์จ ในกรณีเกิดการแลบข้ามกลับ (ฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า) โดย R คือ แบบจำลองที่มีตัวต้านทานคงที่เพียงอย่างเดียว (รูปที่ 1(b)), L คือ แบบจำลองที่มีตัวเหนี่ยวนำต่อขนานอยู่กับตัวต้านทาน (รูปที่ 1(a)), C คือ แบบจำลองชนิดที่มีตัวเก็บประจุต่อขนานอยู่กับตัวต้านทาน (รูปที่ 1(c)) และ I คือ แบบจำลองชนิดขึ้นกับกระแส ที่กระแสวิกฤติเหล่านี้ นำไปคำนวณ BFR ด้วยโปรแกรม A-W ได้ดังแสดงในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 กระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ความต้านทานดินของฐานเสา ก่อนเกิดดีส์ชาร์จค่าต่าง ๆ กัน



รูปที่ 5.8 BFR ที่ความต้านทานดินของฐานเสาก่อนเกิดดีสซาร์จค่าต่าง ๆ กัน

จากรูปที่ 5.7 และ 5.8 พบว่าในกรณีฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า เมื่อค่าความต้านทานดินของฐานเสาก่อนเกิดดีสซาร์จ (R_0) เพิ่มขึ้น ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติจะลดลง ส่งผลให้ BFR เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลอง L กับแบบจำลอง R พบว่าที่ค่า R_0 เท่า ๆ กัน ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติของแบบจำลอง L จะน้อยกว่า และ BFR ของแบบจำลอง L จะมีค่ามากกว่า เนื่องจากที่ความถี่สูงค่าความต้านทานดินของฐานเสาของแบบจำลอง L มีค่าสูงขึ้นนั่นเอง (ดูรูปที่ 3.3) ในทำนองกลับกัน เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลอง C กับ แบบจำลอง R พบว่าที่ค่า R_0 เท่า ๆ กัน ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติของแบบจำลอง C จะมากกว่า และ อัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าของแบบจำลอง C จะน้อยกว่า เนื่องจากค่าความต้านทานดินของฐานเสาของแบบจำลอง C ในกรณีที่ความถี่สูงมีค่าต่ำลง (ดูรูปที่ 3.3) อย่างไรก็ตามทั้งแบบจำลอง R, L และ C ให้ค่ากระแสวิกฤติ และ BFR ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก

เมื่อเปรียบเทียบแบบจำลอง I กับแบบจำลอง R พบว่าที่ค่า R_0 เท่า ๆ กัน ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติของแบบจำลอง I จะมากกว่า และ ค่า BFR ของแบบจำลอง I จะน้อยกว่า และ เนื่องจากเมื่อเพิ่มค่า R_0 ค่าผลต่างของกระแสวิกฤติของแบบจำลอง I กับ กระแสวิกฤติของแบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสาจะมากขึ้น เพราะจากสมการ (3.15) เมื่อค่า R_0 เพิ่มสูงขึ้น จะมีผลทำให้ค่า I_0 ลดต่ำลง ซึ่งเป็นผลให้ค่าความต้านทานดินของฐานเสาในสมการ (3.14) มีค่าลดต่ำลง ดังนั้น ค่ากระแสวิกฤติของแบบจำลองชนิดขึ้นกับกระแสจึงมีความแตกต่างกับแบบจำลองอื่น ๆ อยู่มาก เมื่อ R_0 มีค่าสูง เป็นผลให้ BFR มีค่าต่ำ

5.1.3 การศึกษาผลของการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

กับดักฟ้าผ่าที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นกับดักฟ้าผ่า zinc oxide EXLIM P396-GH550 ชนิดไร้แก๊ป มีค่าแรงดันพิกัด (rated voltage) 396 kV และมี V-I characteristic ดังแสดงในตารางที่ 4.1 การศึกษาผลของกับดักฟ้าผ่าทำได้โดยติดตั้งกับดักฟ้าผ่าขนานกับลูกถ้วยฉนวนในรูปแบบต่าง ๆ กันเปรียบเทียบกับเมื่อไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า จากหัวข้อ 4.1.1 เนื่องจากแบบจำลองเสิร์จฟ้าผ่าที่ใช้กำหนดให้เป็นแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น 2/70 μ s และจากหัวข้อ 4.1.7.4 แบบจำลองกับดักฟ้าผ่าของ Pinceti มีความคลาดเคลื่อนของแรงดันเหลือค้ำกรณีสิร์จหน้าคลื่นชั้น (1/5 μ s) น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองของ IEEE และ Fernandez ดังนั้น แบบจำลองกับดักฟ้าผ่าที่นำมาใช้จำลองได้แก่ แบบจำลองกับดักฟ้าผ่าของ Pinceti และ แบบจำลองกับดักฟ้าผ่า MOV type 92 ใน EMTP ในการจำลองนี้ใช้แบบจำลองอินทิเกรชันเพียงแบบเดียวจำลองการเกิดเบรกดาวร์ และใช้แบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสาเป็นตัวต้านทานขนาด 10 Ω

ในการจำลอง กำหนดให้ฟ้าผ่าลงที่ GW1 (ดูรูปที่ 4.2) และติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่เสาทุกต้นที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้แก่ ที่เฟสนอกข้างใดข้างหนึ่ง (A, C ในรูปที่ 4.2), ที่เฟสนอกข้างใดข้างหนึ่งกับเฟสกลาง (AB, BC) และ ที่เฟสด้านนอกทั้งสองข้าง (AC) เทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า เพื่อให้แรงดันระบบไปเสริมกับแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นมากที่สุด จะต้องตั้งค่ามุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A ในการจำลองแต่ละครั้ง ซึ่งขึ้นกับขนาดแรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยฉนวนที่เกิดขึ้นในแต่ละเฟสเมื่อไม่มีแหล่งจ่ายแรงดันระบบ เมื่อกำหนดมุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A ในการจำลองแต่ละครั้งได้แล้วจึงสามารถจำลองระบบเพื่อประเมินค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติต่อไป

จากการจำลอง เฟสที่เกิดแรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยฉนวนสูงสุดและมุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A สรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 เฟสที่เกิดแรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยฉนวนและมุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A เมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ตำแหน่งต่าง ๆ กรณีฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า, ไม่มีแหล่งจ่ายแรงดัน

ตำแหน่งที่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า	เฟสที่เกิดแรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยฉนวนสูงสุด	มุมเฟสแรงดันขณะเกิดฟ้าผ่าของเฟส A
A	C	240°
C	A	0°
AB	C	240°
BC	A	0°
AC	B	120°

การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ A, AB และ AC เมื่อมีฟ้าผ่าลงที่เฟส A จะไม่เกิดเบรกดาวน ส่วนกรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ C และ BC เมื่อมีฟ้าผ่าลงที่เฟส A จะเกิดเบรกดาวนเมื่อกระแสฟ้าผ่าค่ายอดมีค่าเท่ากับ 22 kA เท่ากันทั้งแบบจำลอง MOV type 92 ของ EMTP และ แบบจำลอง Pinceti รูปที่ 5.9 แสดงกระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ได้จากการจำลองติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของแบบจำลอง MOV type 92 ของ EMTP (E) และ แบบจำลอง Pinceti (P) จะเห็นได้ว่าทั้งแบบจำลอง E และ แบบจำลอง P ให้ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติเมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ตำแหน่งต่าง ๆ ใกล้เคียงกัน ดังนั้นเพื่อความง่าย จึงเลือกใช้ผลจากการใช้แบบจำลอง E เพียงอย่างเดียว จากค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ประเมินได้ นำไปประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดด้วยโปรแกรม A-W ได้ดังนี้

① กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่เฟสด้านนอกข้างใดข้างหนึ่ง (แบบที่ 1)

ก) SFR คำนวณจากกระแสฟ้าผ่ากรณีฟ้าผ่าลงบนสายเฟส (ที่เฟส A) เมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ A และ C ซึ่งมี SFR เท่ากับ 0 และ 0.077 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี ตามลำดับ เมื่อนำมาเฉลี่ยจะได้ SFR ในกรณีนี้เป็น 0.034 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี

ข) BFR คำนวณจากกระแสฟ้าผ่ากรณีฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า (ที่ GW1) เมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ A และ C ซึ่งมี BFR เท่ากับ 0.207 และ 0.077 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี ตามลำดับ เมื่อนำมาเฉลี่ยจะได้ SFR ในกรณีนี้เป็น 0.142 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี

② กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่เฟสด้านนอกข้างใดข้างหนึ่งกับเฟสกลาง (แบบที่ 2)

ก) SFR คำนวณจากกระแสฟ้าผ่ากรณีฟ้าผ่าลงบนสายเฟส (ที่เฟส A) เมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ AB และ BC ได้ SFR เท่ากับ 0 และ 0.077 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี ตามลำดับ เมื่อนำมาเฉลี่ยจะได้ SFR ในกรณีนี้เป็น 0.034 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี

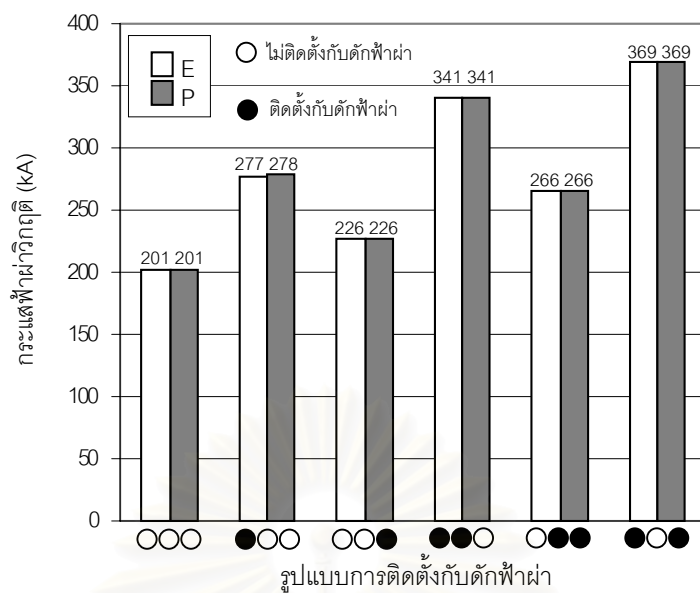
ข) BFR คำนวณจากกระแสฟ้าผ่ากรณีฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า (ที่ GW1) เมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ AB และ BC ได้ BFR เท่ากับ 0.097 และ 0.023 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี ตามลำดับ เมื่อนำมาเฉลี่ยจะได้ SFR ในกรณีนี้เป็น 0.060 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี

③ กรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่เฟสด้านนอกทั้งสองข้าง (แบบที่ 3)

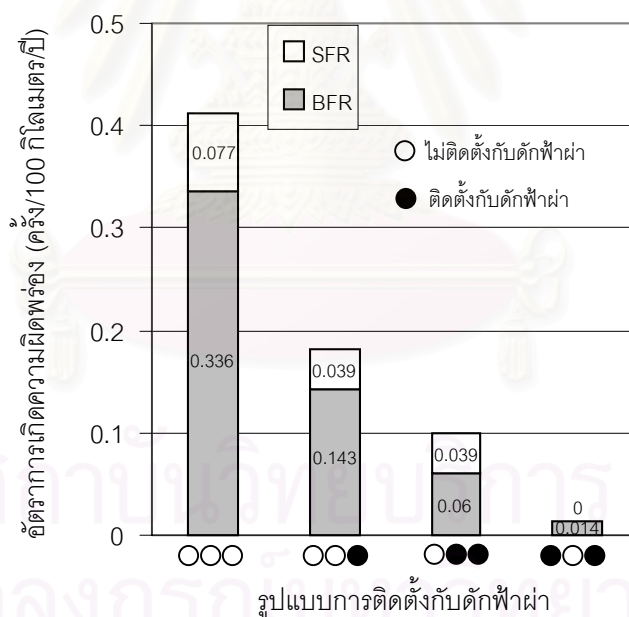
ก) SFR คำนวณจากกระแสฟ้าผ่ากรณีฟ้าผ่าลงบนสายเฟส (ที่เฟส A) เมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ AC ได้ SFR เท่ากับ 0 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี

ข) BFR คำนวณจากกระแสฟ้าผ่ากรณีฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า (ที่ GW1) เมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่ AC ได้ BFR เท่ากับ 0.014 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี

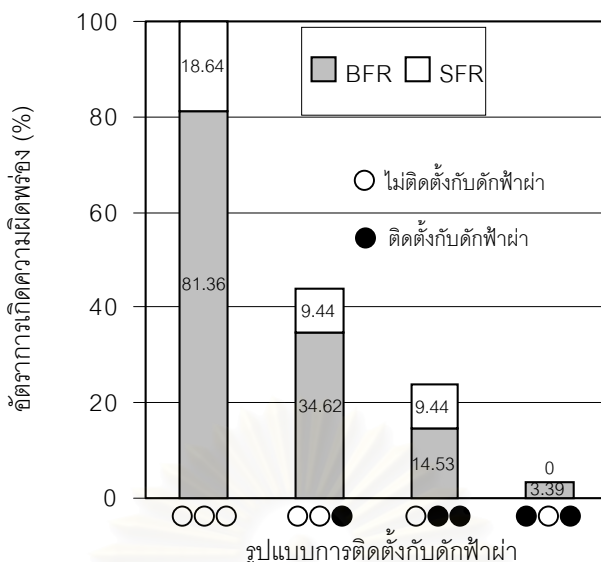
อัตราการเกิดความผิดพลาดเมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1, 2 และ 3 เปรียบเทียบกับเมื่อไม่ได้ติดตั้งกับดักฟ้าผ่าเป็นดังรูปที่ 5.10 และ จากรูปที่ 5.10 เมื่อคิดอัตราการเกิดความผิดพลาดกรณีไม่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ จะได้ผลเป็นดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.9 กระแสฟ้าผ่าวิกฤติกรณีเกิดการแลบข้ามกลับของแบบจำลอง MOV type 92 ของ EMTP (E) และ แบบจำลอง Pinceti (P)



รูปที่ 5.10 อัตราการเกิดความเสียหายเมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1, 2 และ 3 เทียบกับเมื่อไม่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าของแบบจำลอง MOV type 92 ของ EMTP



รูปที่ 5.11 เปอร์เซ็นต์อัตราการเกิดความผิดพลาดเมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าแบบที่ 1, 2 และ 3 เทียบกับเมื่อไม่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

จากรูปที่ 5.11 เมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่เฟสด้านนอกข้างใดข้างหนึ่ง และการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่เฟสด้านนอกข้างใดข้างหนึ่งกับเฟสกลางสามารถลดอัตราการเกิดความผิดพลาดได้ 56% และ 76% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า และ การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่เฟสด้านนอกทั้งสองข้างสามารถลดอัตราการเกิดความผิดพลาดได้มากถึง 97% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

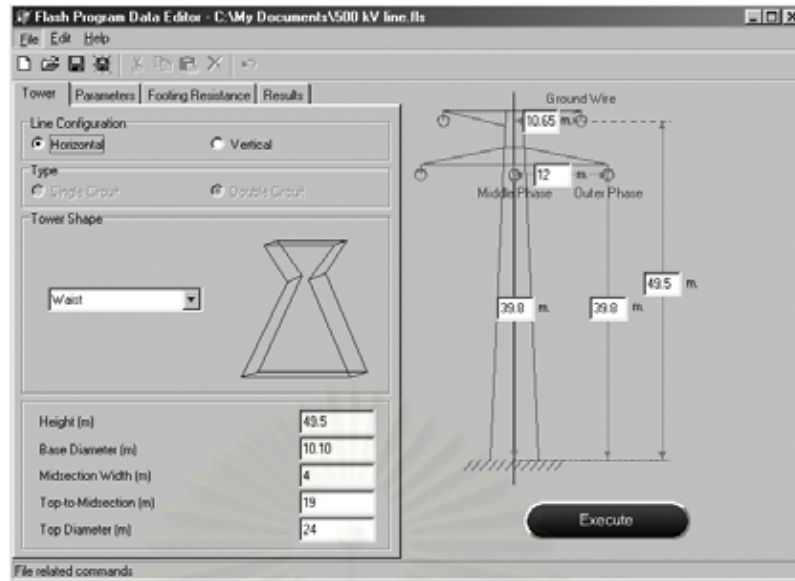
5.2 การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดด้วยโปรแกรม FLASH

กรณีที่ใช้ศึกษาด้วยโปรแกรม FLASH ใช้ความต้านทานดินของฐานเสา 10 Ω และเนื่องจากโปรแกรมไม่ได้ออกแบบให้สามารถติดตั้งกับดักฟ้าผ่าได้ จึงไม่มีการศึกษาการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าด้วยโปรแกรมนี้

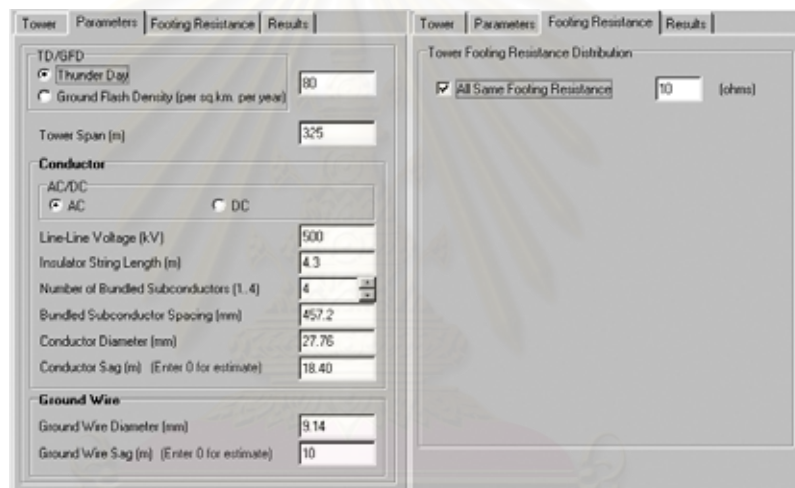
FLASH คำนวณค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดพลาดเพื่อคำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดด้วย ดังนั้นข้อมูลของระบบ 500 kV ที่ป้อนให้กับโปรแกรมสร้างไฟล์ข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณด้วยโปรแกรม FLASH จึงมีมากกว่าที่ป้อนให้กับโปรแกรม A-W ดังแสดงในรูปที่ 5.12 (a) และ (b)

จากบทที่ 2 หัวข้อ 2.2.5 ในกรณีระบบ 500 kV ที่ศึกษา คำนวณกระแสฟ้าผ่าค่ายอดที่มากที่สุดที่สามารถก่อให้เกิดการช็อตล้มเหลว I_m ได้ดังนี้

จากสมการ (2.28)



(a)



(b)

รูปที่ 5.12 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม FLASH

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{a}{h-y} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{12-10.65}{49.5-39.8} \right) = 0.138 \text{ rad}$$

จากสมการ (2.34)

$$r_{gm} = \frac{(h+y) / 2}{1 + \gamma \sin \alpha}$$

FLASH ใช้ค่า γ ในกรณีนี้เท่ากับ 0.55 (เสาสูงกว่า 40 m) ดังนั้น

$$r_{gm} = \frac{(49.5+39.8) / 2}{1 + 0.55 \sin(0.138)} = 41.51 \text{ m}$$

จากสมการ (2.35) คือ

$$I_m = \left(\frac{r_{gm}}{A} \right)^{\frac{1}{b}}$$

FLASH ใช้ A=10, b=0.65 ดังนั้น

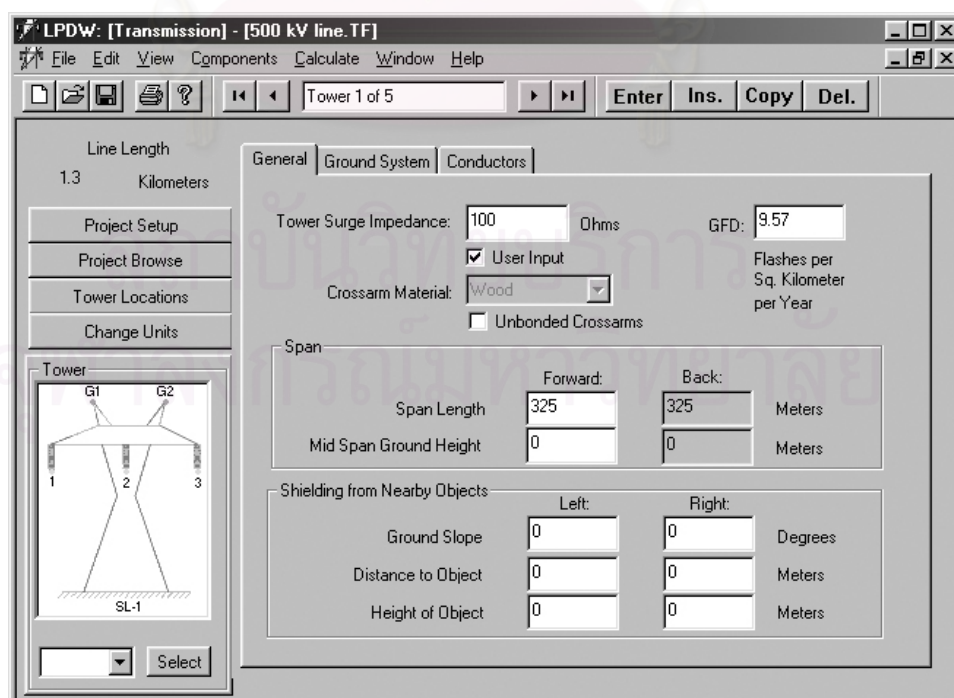
$$I_m = \left(\frac{r_{gm}}{A} \right)^{\frac{1}{b}} = \left(\frac{41.51}{10} \right)^{\frac{1}{0.65}} = 8.93 \text{ kA}$$

FLASH คำนวณกระแสฟ้าผ่าวิกฤติ (I_c) กรณีเกิดซีลด์ลัมเหลวได้เท่ากับ 16.49 kA ดังนั้น SFR จึงมีค่าเป็นศูนย์ ส่วน BFR คำนวณได้ 0.43 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี ดังนั้น อัตราการเกิดความผิดพลาดที่ประเมินได้จากโปรแกรม FLASH จึงมีค่าเท่ากับ 0.43 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี

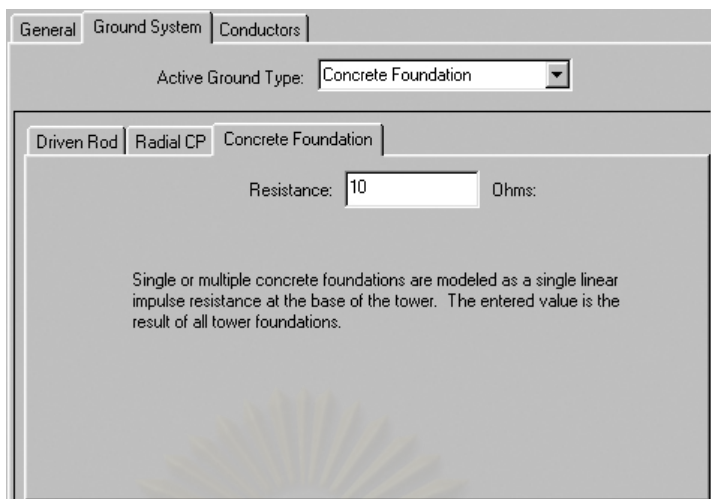
5.3 การประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดด้วยโปรแกรม LPDW

กรณีที่ใช้ศึกษาด้วยโปรแกรม FLASH ใช้ความต้านทานดินของฐานเสา 10 Ω และเนื่องจาก SFR และ BFR เป็นศูนย์ ดังจะได้กล่าวต่อไป ดังนั้นกรณีศึกษาผลของการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า จึงไม่สามารถทำได้

ข้อมูลของระบบ 500 kV ที่ป้อนให้กับโปรแกรม LPDW แสดงในรูปที่ 5.13-5.16



รูปที่ 5.13 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม LPDW - ข้อมูลทั่วไป



รูปที่ 5.14 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม LPDW - ความต้านทานดินของฐานเสา

	PHASE	CONDUCTOR NAME	X Position	Height	FORWARD SAG	HO. III BUNDLE	BUNDLE SPACING	DIAMETER
G1	S1	EHS : 3/8EHS / 1	-10.650 m.	49.500 m.	10.000 m.	1	0.000 cm	0.914 cm
G2	S2	EHS : 3/8EHS / 1	10.650 m.	49.500 m.	10.000 m.	1	0.000 cm	0.914 cm
1	A	ACSR : MCM / 750	-12.000 m.	39.800 m.	18.400 m.	4	45.720 c	2.776 cm
2	B	ACSR : MCM / 750	0.000 m.	39.800 m.	18.400 m.	4	45.720 c	2.776 cm
3	C	ACSR : MCM / 750	12.000 m.	39.800 m.	18.400 m.	4	45.720 c	2.776 cm

รูปที่ 5.15 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม LPDW - สายเฟสและสายล่อฟ้า

	CIRCUIT	PHASE	INSULATOR NAME	CFO	GEOMETRY
1	1	A	Defined CFO Vrt : 2595kV	2595.000	I-STRING
2	1	B	Defined CFO Vrt : 2595kV	2595.000	I-STRING
3	1	C	Defined CFO Vrt : 2595kV	2595.000	I-STRING

รูปที่ 5.16 ข้อมูลของระบบสายส่ง 500 kV ที่ใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม LPDW - ลูกถ้วย

ในกรณีเกิดซีลด์ลิมเฮลว LPDW ใช้หลักการคำนวณเดียวกันกับโปรแกรม FLASH ค่า I_c มีค่ามากกว่า I_m ดังนั้น SFR จึงมีค่าเป็นศูนย์

ในกรณีเกิดการแลบข้ามกลับ เมื่อใช้ LPDW ประเมินกระแสฟ้าผ่าวิกฤติ พบว่ามีค่าสูงถึง 690 kA และเนื่องจากโปรแกรม LPDW กำหนดกระแสฟ้าผ่าวิกฤติสูงสุดไว้ที่ 300 kA เท่านั้น ถ้ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ประเมินได้มีค่าสูงกว่านี้ก็จะให้ค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น BFR จึงมีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน ส่งผลให้อัตราการเกิดความผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์

จากการประเมินอัตราการเกิดความผิดพลาดของโปรแกรม EMTP (ใช้แบบจำลองอินทิเกรชันจำลองการเกิดเบรกดาวน) ควบคู่กับ A-W, FLASH และ LPDW ในกรณีที่ใช้ความต้านทานดินของฐานเสาเท่ากับ 10 Ω และไม่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า ได้ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าการอัตราการเกิดความผิดพลาดที่ประเมินจากโปรแกรม EMTP ควบคู่ไปกับ A-W และ FLASH มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5.3 อัตราการเกิดความผิดพลาด (FR) ในกรณีที่ใช้ความต้านทานดินของฐานเสาเท่ากับ 10 Ω และไม่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

โปรแกรม	SFR	BFR	FR
EMTP & A-W	0.08	0.34	0.42
FLASH	0	0.43	0.43
LPDW	0	0	0

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของแบบจำลองการเกิดเบรกดาวน, ผลของแบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสา และผลของการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1. จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP เพื่อเปรียบเทียบผลของแบบจำลองเบรกดาวนพบว่าแบบจำลองสวิตช์ควบคุมด้วยแรงดันให้อัตราการเกิดความผิดพลาดที่สูงเมื่อเทียบกับแบบจำลองอินทิเกรชัน และ แบบจำลองลีดเดอร์ แบบจำลองสวิตช์ควบคุมด้วยแรงดันเป็นแบบจำลองที่มีคุณสมบัติจำลองการวาบไฟได้ไม่ดีเพราะไม่สามารถจำลองคุณสมบัติแรงดัน-เวลาของการวาบไฟได้ และ แบบจำลองอินทิเกรชันให้ค่าอัตราการการเกิดความผิดพลาดที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองลีดเดอร์ อย่างไรก็ตาม ควรที่จะต้องมีการศึกษาเปรียบเทียบทั้งสองแบบจำลองนี้กับการทดลองหรือผลที่เกิดขึ้นจริง

2. ค่าความต้านทานดินของฐานเสามีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออัตราการเกิดความผิดพลาดของระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่า ยิ่งความต้านทานดินของฐานเสามีค่าเพิ่มมากขึ้นขนาดของกระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่จะก่อให้เกิดความผิดพลาดของระบบไฟฟ้าจะยิ่งมีค่าลดลง นั่นหมายถึงโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดมีมากขึ้น จากการศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองความต้านทานดินของฐานเสาแบบต่าง ๆ ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าเพื่อหาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติ และอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าพบว่า แบบจำลองชนิดขึ้นกับความถี่ให้ค่ากระแสวิกฤติ และอัตราการเกิดความผิดพลาดที่ใกล้เคียงกันกับแบบจำลองที่ใช้ค่าความต้านทานคงที่เพียงตัวเดียว ซึ่งเป็นแบบที่ง่าย และ นิยมใช้กัน โดยความแตกต่างจะเห็นได้ชัดขึ้นเมื่อความต้านทานดินของฐานเสามีค่าสูงขึ้น ในขณะที่แบบจำลองชนิดขึ้นกับกระแสให้ค่ากระแสวิกฤติ และ อัตราการเกิดความผิดพลาดที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองอื่น ๆ เฉพาะช่วงที่ความต้านทานดินของฐานเสามีค่าน้อย ๆ เมื่อค่าความต้านทานดินของฐานเสามีค่าเพิ่มสูงขึ้น แบบจำลองชนิดขึ้นกับกระแสจะให้ค่ากระแสวิกฤติที่สูงกว่า และอัตราการเกิดความผิดพลาดที่ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้น ในกรณีที่ความต้านทานดินของฐานเสามีค่าน้อย ๆ การเลือกใช้แบบจำลองที่ใช้ค่าความต้านทานคงที่เพียงตัวเดียวจะช่วยให้การวิเคราะห์คำนวณทำได้ง่าย และให้ผลที่ไม่ต่างจากการใช้แบบจำลองต่าง ๆ แต่ในกรณีที่ความต้านทานของฐานเสามีค่าสูงขึ้น ควรจะมีการทดสอบหาลักษณะสมบัติของความต้านทานดินของฐานเสา เพื่อที่จะเลือกใช้แบบจำลองได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

3. จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม EMTP ควบคู่ไปกับการคำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดด้วยโปรแกรม A-W ที่พัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาผลของการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าพบว่ากระแสฟ้าผ่า

วิกฤติที่ประเมินได้ในกรณีใช้กับดักฟ้าผ่าของ Pinceti (P) และในกรณีที่ใช้แบบจำลอง MOV type 92 ใน EMTP (E) มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงสามารถใช้แบบจำลอง E เพียงแบบเดียวเพื่อความง่ายในการจำลองได้ ในกรณีที่ใช้แบบจำลอง E การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่เฟสด้านนอกข้างใดข้างหนึ่ง และการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่เฟสด้านนอกข้างใดข้างหนึ่งกับเฟสกลางสามารถลดอัตราการเกิดความผิดพลาดได้ 56% และ 76% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า และการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่เฟสด้านนอกทั้งสองข้างสามารถลดอัตราการเกิดความผิดพลาดได้มากถึง 97% เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า ส่วนการคำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดด้วยโปรแกรม FLASH ในกรณีติดตั้งกับดักฟ้าผ่าไม่สามารถทำได้ ในกรณีของโปรแกรม LPDW นั้นสามารถติดตั้งกับดักฟ้าผ่าเข้าไปในระบบได้ แต่เนื่องจากโปรแกรมไม่สามารถคำนวณ BFR ที่กระแสฟ้าผ่าวิกฤติมากกว่า 300 kA ได้ และ โปรแกรม LPDW ให้กระแสฟ้าผ่าวิกฤติสูงกว่า 300 kA (690 kA) เมื่อไม่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า ดังนั้นจึงไม่สามารถนำ LPDW มาใช้ในการศึกษานี้ได้

4. การใช้โปรแกรม EMTP ควบคู่ไปกับโปรแกรม A-W เพื่อคำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าเทียบกับการใช้โปรแกรม FLASH ในกรณีระบบสายส่ง 500 kV พบว่า ค่าอัตราการเกิดความผิดพลาดที่ประเมินได้มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะทั้งโปรแกรม EMTP และ FLASH ใช้ทฤษฎีคลื่นเดินทางคำนวณค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติที่ก่อให้เกิดความผิดพลาด แต่อย่างไรก็ตาม ควรจะมีการตรวจสอบผลการคำนวณควบคู่กันไปด้วยเพื่อให้มีความแน่ใจว่าผลการจำลองระบบด้วยโปรแกรม EMTP มีความถูกต้องเชื่อถือได้

5. โปรแกรม A-W, FLASH, และ LPDW มีข้อดีข้อเสียสรุปได้ดังนี้

5.1 โปรแกรม A-W

ข้อดี

- ในกรณีที่สายส่งวางตัวอยู่ท่ามกลางพื้นที่ที่พื้นดินมีความลาดชัน สามารถป้อนข้อมูลความลาดชันของพื้นดินให้โปรแกรมคำนวณ SFR และ BFR โดยคิดผลของความลาดชันของพื้นดินได้

- ใช้ EMTP ประเมินกระแสฟ้าผ่าวิกฤติ โปรแกรมจึงมีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง สามารถจำลองแบบจำลองต่าง ๆ ให้เป็นไปตามที่ต้องการได้โดยใช้ TACS หรือ MODELS ทำให้สามารถจำลองแบบจำลองที่มีอัลกอริทึมที่ซับซ้อนได้ถ้าสามารถแทนลักษณะสมบัติของแบบจำลองด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ได้

ข้อเสีย

- สามารถป้อนข้อมูลระยะของสายเฟส และ สายล่อฟ้าได้เฉพาะกรณีที่สมมาตรกันเท่านั้น และรูปแบบการวางตัวของสายที่นำไปใช้คำนวณได้มีเฉพาะแบบสายส่งวงจรเดี่ยววางตัวในแนวราบ และ สายส่งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่วางตัวในแนวตั้ง

- มีความยุ่งยากในการจำลองระบบสายส่งด้วย EMTP เพื่อประเมินค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤติ ต้องมีความเข้าใจในการจำลองแบบจำลองต่าง ๆ เป็นอย่างดี

5.2 โปรแกรม FLASH

ข้อดี

- สามารถป้อนข้อมูลระยะของสายเฟสและสายล่อฟ้าได้ในกรณีที่ไม่สมมาตรกัน ได้ อย่างไรก็ตาม สำหรับโปรแกรมสร้างไฟล์ข้อมูลที่พัฒนาขึ้นยังไม่สามารถป้อนข้อมูลในกรณีไม่สมมาตรได้ แต่ผู้ใช้สามารถแก้ไขได้เองจากไฟล์ข้อมูลที่สร้างขึ้นจากโปรแกรมสร้างไฟล์ข้อมูลที่พัฒนาขึ้น นอกจากนี้รูปแบบการวางตัวของสายที่นำไปใช้คำนวณเป็นไปไม่ได้ไม่จำกัดรูปแบบ แต่มีข้อแม้ว่าสำหรับสายเฟสป้อนได้ไม่เกิน 12 เส้น และสำหรับสายล่อฟ้าป้อนได้ไม่เกิน 2 เส้น

ข้อเสีย

- ไม่สามารถสร้างแบบจำลองเองได้ จะต้องใช้การคำนวณที่โปรแกรมกำหนดมาให้เท่านั้น

5.3 โปรแกรม LPDW

ข้อดี

- ใช้งานได้ง่าย สะดวก และรวดเร็ว การจำลองระบบสายส่งไม่ยุ่งยาก มีฐานข้อมูลของรูปแบบเสา สายเฟส สายล่อฟ้า ลูกถ้วยฉนวน และกับดักฟ้าผ่าให้เลือกใช้มากมาย และยังสามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงฐานข้อมูลได้อีกด้วย

ข้อเสีย

- กระแสฟ้าผ่าวิกฤติสูงสุดที่สามารถนำไปใช้คำนวณ BFR ได้มีค่าไม่เกิน 300 kA ถ้าเกินกว่า 300 kA โปรแกรมจะให้ BFR มีค่าเป็นศูนย์

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในประเทศไทยยังไม่มีเก็บข้อมูลของโอกาสการเกิดฟ้าผ่า และความหนาแน่นของจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน ดังนั้นหากในอนาคตมีการเก็บข้อมูลเหล่านี้ เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย ก็ควรที่จะพัฒนาโปรแกรม A-W ให้สูตรการคำนวณที่ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงได้

2. ศึกษาการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าในระบบสายส่งที่อยู่ท่ามกลางพื้นที่ที่เป็นภูเขาสูงซึ่งมีความต้านทานดินของฐานเสาสูง เพื่อศึกษาว่าการใช้กับดักฟ้าผ่าสามารถป้องกันการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากฟ้าผ่าในกรณีนี้ได้ดีเพียงใด

3. ศึกษาเปรียบเทียบผลการคำนวณอัตราการเกิดความผิดพลาดพร้อมทั้งระบบที่มีข้อมูลของอัตราการเกิดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจริง เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ในโปรแกรมต่อไป

รายการอ้างอิง

1. สำรวย สังข์สะอาด. เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
2. สุรพล ดำรงกิตติกุล และ ประดิษฐ์พงษ์ สุขศิริถาวรกุล. Application of Electromagnetic Transients Program for Electrical Transients in Power System. เอกสารประกอบการอบรมทางวิชาการ. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
3. IEC 60-1. High-Voltage Test Techniques - Part2 : Measuring System, 1994-11.
4. สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์, 2528.
5. Armstrong, H.R., and Whitehead, E.R. Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, No. 1, pp. 270-281, 1968.
6. IEEE Working Group. A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems Vol. PAS-104, No. 4 (April 1985): 919-932.
7. Anderson, R. B., and Eriksson, A. J. Lightning Parameters for Engineering Applications. ELECTRA No. 69 (March 1980): 65-102.
8. Eriksson, A. J. The Incidence of Lightning Strikes to Transmission Lines. IEEE Trans. on Power Delivery (July 1987): 859-870.
9. Hileman, A. R. Insulation Coordination in Power Systems. New York: Marcel Dekker, 1999.
10. IEEE Working Group. Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models. IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 8, No. 3 (July 1993): 1254-1267.
11. Golde, R. H. (ed.). Lightning. London: Academic Press, 1977.
12. IEEE Std C62.22. IEEE Guide for the application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, 1997
13. สุรพล ดำรงกิตติกุล. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. พิมพ์ครั้งที่ 1. เชียงใหม่: ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2535.
14. Laurent Dube. Users Guide to MODELS in ATP, 1996.

15. ชาญณรงค์ บาลมงคล. Power System Transients and Simulation. เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการ. กรุงเทพมหานคร: ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
16. Fernandez F., and Diaz R. Metal-Oxide Surge Arrester Model for Fast Transient Simulations. International Conference on Power System Transients, 2001.
17. Tirado, C., and Rosa F. Application of Surge Arresters for Lightning Protection of Transmission Lines. 10th International Symposium on High Voltage Engineering (August 1997): 97-101.
18. IEEE Std 1243. Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, 1997.
19. McDermott, T. E., and Longo, V. J. Advance Computational Methods in Lightning Performance - The EPRI Lightning Protection Design Workstation. IEEE Trans. on Power Delivery Vol. 11, No. 2 (April 1996): 980-995.
20. Electric Power Research Institute, LPDW Version 5 Tutorial, 1999.
21. Electric Power Research Institute. LPDW Lightning Reference, 1999.
22. Hevia, O.P. Impulse Type Sources in ATP. EEUG News Vol. 4, No. 3-4 (August 1998): 56-62.
23. Yamamoto, Y., et al. A New Application Concept of Transmission Line Arresters to 500-kV Lines, IEEE Transmission and Distribution Conference, Vol. 2 (April 1999): 681-686.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

แรงดันเสิร์จที่สะท้อนจากฐานเสา และ แรงดันเสิร์จที่สะท้อนมาจากเสาต้นถัดไป

ก.1 แรงดันเสิร์จที่สะท้อนจากฐานเสา

สมมุติให้เกิดฟ้าผ่าที่ยอดของเสาโดยมีค่ายอดของกระแสฟ้าผ่าเป็น I_0 ดังแสดงในรูปที่ ก.1 แรงดันที่ยอดเสา e มีค่าตามสมการ

$$e = \frac{Z_T(Z_g/2)}{Z_T+(Z_g/2)} I_0 = \frac{Z_T Z_g}{Z_g+2Z_T} I_0 \quad (\text{kV}) \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ Z_g คือ อิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้า

Z_T คือ อิมพีแดนซ์ของเสา

โดยการประมาณค่า

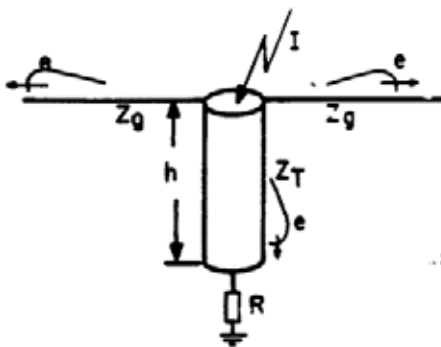
$$Z_T = \frac{Z_g}{2} \quad (\text{ก.2})$$

ดังนั้น จากสมการ (ก.1)

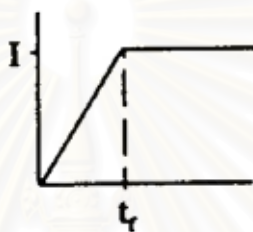
$$e = \frac{Z_T}{2} I_0 = \frac{Z_g}{4} I_0 \quad (\text{ก.3})$$

กำหนดให้เวลาที่คลื่นเดินทางจากยอดเสาถึงฐานเสาเป็น T_T (μs) และสมมุติให้เสิร์จฟ้าผ่ามีการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นในส่วนหน้าคลื่น แล้วมีค่าคงที่ในส่วนหลังคลื่น และมีเวลาหน้าคลื่นเท่ากับ t_f (μs) ดังแสดงในรูปที่ ก.2 ในการคำนวณแรงดันที่ยอดเสาหรือที่จุดใด ๆ ตามแนวของเสา จะใช้ lattice diagram ดังแสดงในรูปที่ ก.3 ที่จุดใด ๆ ของเสา แทนได้ด้วยจุด A ซึ่งแรงดันที่จุดนี้จะนำมาพิจารณาภายหลัง ถ้าสมมุติให้ Z_T มีค่าตามสมการ (ก.2) จะไม่เกิดการสะท้อนขึ้นที่ยอดเสา เนื่องจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ที่จุดรอยต่อของยอดเสามีค่าเท่ากัน สัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient) และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (transmission coefficient) มีค่าเป็นไปตามสมการ

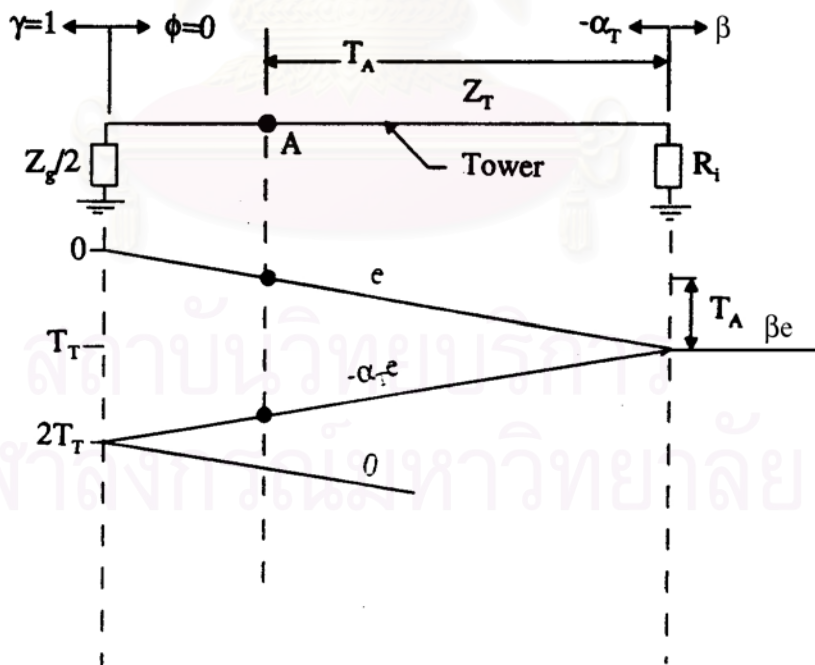
$$\alpha_T = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i} \approx \frac{Z_g - 2R_i}{Z_g + 2R_i} \quad \gamma = \frac{2Z_g}{Z_g + 2Z_T} \quad \phi = \frac{Z_g - 2Z_T}{Z_g + 2Z_T} \quad (\text{ก.4})$$



รูปที่ ก.1 ฟ้ายาลงบนยอดเสา



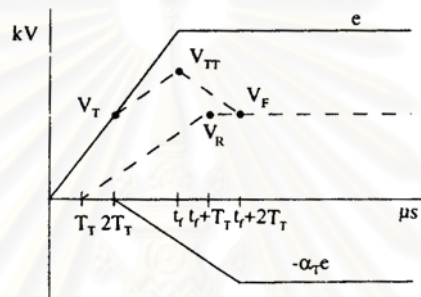
รูปที่ ก.2 รูปคลื่นเสิร์จฟ้ายาที่ใช้ในการวิเคราะห์



รูปที่ ก.3 Lattice diagram ที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเสิร์จที่สะท้อนจากฐานเสา

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน α_T ในสมการ (ก.4) ต้องเป็นค่าลบดังแสดงในรูปที่ ก.3 ค่าแรงดันที่ยอดเสาแสดงในรูปที่ ก.4 โดย V_{TT} คือแรงดันค่ายอด (kV) V_T คือ แรงดันที่ยอดเสาก่อนที่คลื่นที่สะท้อนจากฐานเสาจะเดินทางมาถึง (kV) และ V_F คือ แรงดันสุดท้าย (kV) สมการที่ใช้คำนวณ V_T คือ

$$\begin{aligned} V_T &= \frac{2T_T}{t_f} e = \frac{2T_T}{t_f} \cdot \frac{Z_T}{2} I_0 \\ &= Z_T \cdot \frac{T_T}{t_f} \cdot I_0 \end{aligned} \quad (\text{ก.5})$$



รูปที่ ก.4 แรงดันที่ยอดเสา

แรงดัน V_{TT} เป็นไปตามสมการ

$$\begin{aligned} V_{TT} &= e - \alpha_T e \frac{t_f - 2T_T}{t_f} = (1 - \alpha_T) e + \alpha_T e \cdot \frac{2T_T}{t_f} \\ &= \left[\frac{R_i Z_g}{Z_g + 2R_i} + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_f} \right] I_0 = \left[R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_f} \right] I_0 \\ &= K_{TT} I_0 \end{aligned} \quad (\text{ก.6})$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{R_i Z_g}{Z_g + 2R_i} \\ K_{TT} &= R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_f} \end{aligned} \quad (\text{ก.7})$$

แรงดันสุดท้าย V_F คือ

$$V_F = (1-\alpha_T)e = R_e I_0 \quad (\text{ก.8})$$

แรงดันคร่อมความต้านทานของฐานเสา, V_R และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานนี้, I_R

$$\begin{aligned} V_R = \beta e &= \frac{2R_i}{Z_T + R_i} \cdot e \\ &\approx \frac{4R_i}{Z_g + 2R_i} \cdot \frac{Z_g}{4} \cdot I_0 = \frac{R_i Z_g}{Z_g + 2R_i} \cdot I_0 \end{aligned} \quad (\text{ก.9})$$

$$\begin{aligned} &= R_e I_0 \\ I_R &= \frac{V_R}{R_i} \\ &= \frac{R_e}{R_i} I_0 \end{aligned} \quad (\text{ก.10})$$

โดยปกติ $R_i \ll Z_T$ ดังนั้น $\alpha_T < 1$ จะได้ว่าแรงดันค่ายอด (V_{TT}) คือ แรงดันที่ยอดเสาก่อนที่คลื่นที่สะท้อนจากฐานเสาจะเดินทางมาถึง (V_T) คูณกับสัมประสิทธิ์การสะท้อน (α_T) รวมกับแรงดันสุดท้าย (V_F)

$$V_{TT} = \alpha_T V_T + V_F \quad (\text{ก.11})$$

และจะได้ว่า V_F ต่อกระแสฟ้าผ่าค่ายอด (I_0) คือ ค่าความต้านทานดินของฐานเสานานกับครึ่งหนึ่งของเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้า

$$\frac{V_F}{I_0} = \frac{R_i Z_T}{R_i + Z_T} \quad (\text{ก.12})$$

กำหนดให้ $Z_g = 350 \, \Omega$, $Z_T = 200 \, \Omega$, $R_i = 20 \, \Omega$, $h = 30 \, \text{m}$, และ $t_f = 2 \, \mu\text{s}$ จะได้ T_T มีค่าเป็น

$$T_T = \frac{30 \, \text{m}}{300 \, \text{m}/\mu\text{s}} = 0.1 \, \mu\text{s}$$

จาก (ก.4)

$$\alpha_T = \frac{200-20}{200+20} = 0.818$$

จาก (ก.5)

$$\frac{V_T}{I_0} = 200 \cdot \frac{0.1}{2} = 10 \ \Omega$$

จาก (ก.6)

$$\begin{aligned} \frac{V_{TT}}{I_0} &= \frac{(20)(350)}{350+2(20)} + \left(\frac{200-20}{200+20} \right) (200) \left(\frac{0.1}{2} \right) \\ &= 17.95 + 8.18 = 26.13 \ \Omega \end{aligned}$$

จาก (ก.7) และ (ก.8)

$$\frac{V_F}{I_0} = 17.95 \ \Omega$$

จาก (ก.9)

$$\frac{V_R}{I_0} = 17.95 \ \Omega$$

จาก (ก.10)

$$\frac{I_R}{I_0} = \frac{17.95}{20} = 0.898$$

จะเห็นว่า แม้ว่าความต้านทานดินของฐานเสาจะต่ำเพียง 20 Ω ก็ตาม แรงดันตกคร่อมตัวมันยังมีค่าสูงถึง 69% ของ V_{TT} แต่ V_T มีค่าเพียง 38% ของ V_{TT} และกระแสที่ไหลผ่านความต้านทานดินมีค่าสูงถึง 90% ของกระแสฟ้าผ่าคายยอด เพียง 10% เท่านั้นที่เสิร์จฟ้าผ่าเดินทางไปตามสายล่อฟ้า

จากตัวอย่างที่ผ่านมา จะเห็นว่าค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไม่ได้มีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้าอย่างที่ตั้งสมมุติไว้ แต่โดยทั่วไป เมื่อค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์เป็นค่าทั่วไปที่นำมาใช้งานและ t_f มีค่ามากกว่า 1 μs ความผิดพลาดของการคำนวณจะมีประมาณ 5% และความผิดพลาดจะมีมากขึ้นเมื่อ t_f มีค่าสั้น ๆ

ในการทำงานเดียวกันกับการคำนวณที่ผ่านมา แรงดันคายยอดที่จุด A ซึ่งหมายถึงจุดใด ๆ ของเสา จะมีค่าเป็น

$$V_{TA} = \left[R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_A}{t_f} \right] I = K_{TA} I \quad (\text{ก.13})$$

เมื่อ T_A เป็นแรงดันที่จุด A ของเสาก่อนที่คลื่นที่สะท้อนมาจากฐานเสาจะเดินทางมาถึง (μs) และ

$$K_{TA} = R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_A}{t_f} \quad (\text{ก.14})$$

ก.2 ผลของเสิร์จที่สะท้อนมาจากเสาต้นถัดไป

ในหัวข้อ ก.1 ได้มีการสมมติว่าสายล่อฟ้ามีความยาวเป็นอนันต์ นั่นคือ ละเลยผลของเสิร์จที่สะท้อนมาจากเสาต้นถัดไป ผลจากคลื่นที่สะท้อนกลับมากกระทบนี้จะมีผลให้แรงดันของเสาต้นที่ถูกฟ้าผ่ามีค่าลดลง รูปที่ ก.5 แสดง lattice diagram และวงจรสมมูลที่ใช้ โดยพิจารณาเสาต้นถัดไปทั้ง 2 ข้าง เสาต้นที่ถูกฟ้าผ่า เมื่อกำหนดให้ความต้านทานดินของฐานเสาของเสาต้นถัดไปคือ R_0 , $Z_T = Z_g/2$ และพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหมือนกับใน ก.1

$$\alpha_T = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i} \approx \frac{Z_g - 2R_i}{Z_g + 2R_i} \quad (\text{ก.15})$$

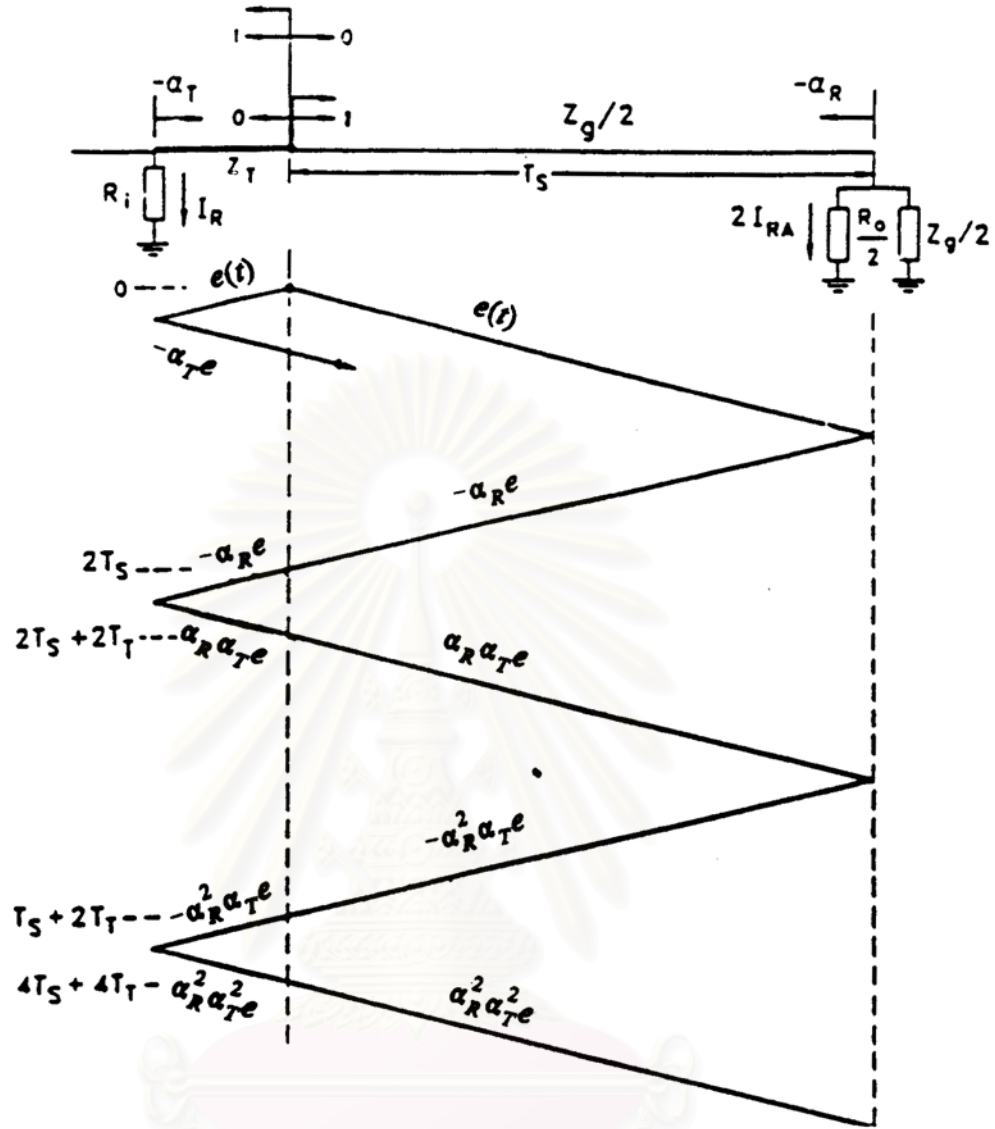
$$\begin{aligned} \alpha_F &= \frac{\left(\frac{Z_g}{2}\right) - \left[\left(\frac{R_0}{2}\right) // \left(\frac{Z_g}{2}\right)\right]}{\left(\frac{Z_g}{2}\right) + \left[\left(\frac{R_0}{2}\right) // \left(\frac{Z_g}{2}\right)\right]} \\ &= \frac{Z_g}{Z_g + 2R_0} \end{aligned} \quad (\text{ก.16})$$

ให้ T_T เป็นเวลาที่คลื่นเดินทางในเสา และ T_S เป็นเวลาที่คลื่นเดินทางจากยอดเสาต้นที่ถูกฟ้าผ่าไปยังยอดเสาต้นถัดไป จาก lattice diagram แรงดันที่ยอดเสาต้นที่ถูกฟ้าผ่า, V_{TT} คือ

$$\begin{aligned} V_{TT} &= [1 - \alpha_T (t - 2T_T)] e^{\{[1 - \alpha_R (t - 2T_S) + \alpha_R \alpha_T [t - (2T_S + 2T_T)] \\ &\quad - \alpha_R^2 \alpha_T [t - (4T_S + 2T_T)] + (\alpha_R \alpha_T)^2 [1 - (4T_S + 4T_T)] \\ &\quad - \alpha_R^3 \alpha_T [t - (6T_S + 6T_T)] + (\alpha_R \alpha_T)^3 [t - (6T_S + 8T_T)] - \dots\}} \end{aligned} \quad (\text{ก.17})$$

เมื่อเทอม $(t - 2T)$ หมายถึง เสิร์จที่ถูกสะท้อนมาถึงล่าช้าเป็นเวลา 1 รอบการเดินทางนับตั้งแต่เวลาเท่ากับศูนย์ นั่นคือ จะนำเทอมนั้นเข้ามาคำนวณแรงดันที่เวลาตั้งแต่ $t = 2T$ เป็นต้นไป จากสมการ (ก.17) ถ้าละเลยค่าเวลาคลื่นเดินทางของเสาต้นที่ถูกฟ้าผ่า จะได้

$$\begin{aligned} V_{TT} &= [1 - \alpha_T (t - 2T_T)] e^{\{1 - \alpha_R (1 - \alpha_T) [(t - 2T_S) + \alpha_R \alpha_T (t - 4t_s)] \\ &\quad + (\alpha_R \alpha_T)^2 (t - 6T_S) - \dots\}} \end{aligned} \quad (\text{ก.18})$$



รูปที่ ก.5 Lattice diagram ที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเสิร์จที่สะท้อนมาจากเสาต้นถัดไป

เทอม $[1 - \alpha_T (t - 2T_T)]e$ คือ ค่าของ V_{TT} ในกรณีที่ละเลยผลจากการสะท้อนของเสิร์จที่มาจากเสาต้นถัดไป ซึ่งเป็นพจน์เดียวกันกับในสมการ (ก.6) ดังนั้น พจน์นี้สามารถแทนได้ด้วย $K_{TT} I_0$ จากนั้นจะได้ V_{TT} จะมีค่าเป็น

$$V_{TT} = K_{SP} K_{TT} I_0 \tag{ก.19}$$

เมื่อ

$$K_{SP} = 1 - \alpha_R (1 - \alpha_T) \left[\left(1 - \frac{2T_s}{t_f} \right) + \alpha_R \alpha_T \left(1 - \frac{4T_s}{t_f} \right) + (\alpha_R \alpha_T)^2 \left(1 - \frac{6T_s}{t_f} \right) + \dots \right] \tag{ก.20}$$

สมการ (ก.20) นี้ใช้ได้เฉพาะเมื่อเทอม $(1-nT_s/t_f)$ มีค่าเป็นบวก ตัวอย่างเช่น ถ้า $T_s = 0.5 \mu\text{s}$ และ $t_f = 4 \mu\text{s}$ แล้วการสะท้อนจะเกิดขึ้น 4 ครั้ง นั่นคือ $n = 8$

เมื่อกำหนดให้ $t_f = 6 \mu\text{s}$, $T_s = 1 \mu\text{s}$, $T_T = 0.1 \mu\text{s}$, $Z_g = 300 \Omega$, $Z_T = 150 \Omega$, $R_0 = 40 \Omega$, $R_i = 20 \Omega$, จะได้ $K_{TT} = 19.56$, $\alpha_T = 0.7647$, $\alpha_R = 0.7985$ และ $K_{SP} = 0.8388$ ดังนั้น

$$V_{TT} = 0.8388(19.56) I_0 = 16.41 I_0$$

ถ้าไม่คิดผลของการสะท้อนจากเสาต้นที่อยู่ถัดไป จะได้ $K_{SP} = 1$ นั่นคือ $V_T = 19.56 I_0$ นั่นคือกรณีคิดผลของการสะท้อนจากเสาต้นที่อยู่ถัดไป จะได้ค่ายอดของแรงดันยอดเสาดำกว่ากรณีที่ไม่คิดผลของการสะท้อนประมาณ 20%

ถ้าจะพิจารณาถึงผลการสะท้อนจากเสาต้นอื่น ๆ ด้วย เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้งานทั่ว ๆ ไปในการคำนวณ การสะท้อนนี้จะส่งผลให้แรงดันยอดของเสาต้นที่ถูกฟ้าผ่าลดลงน้อยกว่า 1 % ดังนั้น โดยทั่ว ๆ ไปแล้วพิจารณาผลของการสะท้อนจากเสาต้นถัดไปเพียงต้นเดียวก็เพียงพอแล้ว

แฟกเตอร์ K_{SP} สามารถนำมาใช้หาค่า V_{TA} และ V_F ได้เป็น

$$V_{TA} = K_{SP} K_{TA} I \quad (\text{ก.21})$$

$$V_F = K_{SP} R_e I \quad (\text{ก.22})$$

ภาคผนวก ข.

แพ็กเตอร์คัปปลิง

สายตัวนำเดี่ยวที่มีรัศมี r มีความสูงเหนือพื้นดิน ดังแสดงในรูปที่ ข.1 และ ข.2 เมื่อสมมติว่าโลกมีความนำไฟฟ้าเป็นศูนย์ ความเหนี่ยวนำไฟฟ้าและความจุไฟฟ้าจะมีค่าเป็น

$$L = 0.20 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad (\mu\text{H/m}) \quad (\text{ข.1})$$

$$C = \frac{10^{-3}}{18 \ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \quad (\mu\text{F/m}) \quad (\text{ข.2})$$

ดังนั้นเสิร์จอิมพีแดนซ์ของตัวนำเส้นนี้มีค่าเป็น

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = 60 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad (\text{ข.3})$$

$$Z_1 = 60 \ln\left(\frac{2h_1}{r_1}\right) \quad (\text{ข.4})$$

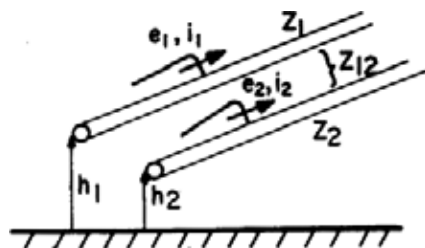
$$Z_2 = 60 \ln\left(\frac{2h_2}{r_2}\right)$$

เสิร์จอิมพีแดนซ์ร่วม (mutual surge impedance) ระหว่างสายตัวนำ คือ

$$Z_{12} = 60 \ln\left(\frac{D_{12}}{d_{12}}\right) \quad (\text{ข.5})$$

สมการของคลื่นเดินทางในตัวนำ 2 เส้น คือ

$$\begin{aligned} e_1 &= i_1 Z_1 + i_2 Z_{12} \\ e_2 &= i_1 Z_{12} + i_2 Z_2 \end{aligned} \quad (\text{ข.6})$$



รูปที่ ข.1 สายตัวนำ 2 เส้น และ เสรีจิมพีแดนซ์ร่วม



รูปที่ ข.2 ระยะห่างระหว่างตัวนำ 2 เส้น

ดังนั้น

$$i_1 = \frac{Z_2 e_1 - Z_{12} e_2}{D} \quad (ข.7)$$

$$i_2 = \frac{Z_1 e_2 - Z_{12} e_1}{D}$$

เมื่อ

$$D = Z_1 Z_2 - Z_{12}^2 \quad (ข.8)$$

ข.1 เสรีจิมพีแดนซ์สมมูล

ในการหาค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของสายล่อฟ้า 2 เส้น ใช้ในการคำนวณแรงดันยอดเสา จะต้องหาค่าเสรีจิมพีแดนซ์รวมก่อน (combined surge impedance) ในตอนแรกพิจารณากรณีของสายตัวนำ 2 เส้น ที่มีค่าเสรีจิมพีแดนซ์เท่ากันเท่ากับ Z มีแรงดันที่ตัวนำแต่ละเส้นเท่ากันเท่ากับ e ดังแสดงในรูปที่ ข.3 เสรีจิมพีแดนซ์รวมของตัวนำทั้ง 2 เส้น, Z_e มีค่าเท่ากับแรงดันเสรีจิมหารด้วยผลบวกของกระแสที่ไหลในตัวนำแต่ละเส้น, i_T

$$Z_e = \frac{e}{i_T} = \frac{e}{i_1 + i_2} \quad (ข.9)$$

แต่เนื่องจากเซลฟ์เสิร์จิมพีแดนซ์และแรงดันเสิร์จของตัวนำแต่ละเส้นมีค่าเท่ากัน กระแสที่ไหลในตัวนำจึงมีค่าเท่ากัน และจากสมการ (ข.7)

$$i = i_1 = i_2 = \frac{Z - Z_{12}}{D} e \quad (\text{ข.10})$$

ดังนั้น

$$Z_e = \frac{e}{Z_i} = \frac{Z^2 - Z_{12}^2}{2(Z - Z_{12})} = \frac{Z + Z_{12}}{2} \quad (\text{ข.11})$$



รูปที่ ข.3 เสิร์จิมพีแดนซ์รวมของสายตัวนำ 2 เส้น

โดยทั่วไปแล้ว สำหรับสายตัวนำ n เส้น ถ้า $Z = Z_1 = Z_2 = Z_3 = \dots$ และ $Z_m = Z_{12} = Z_{13} = Z_{23} = \dots$ จะได้

$$Z_n = \frac{Z + (n - 1)Z_m}{n} \quad (\text{ข.12})$$

ถ้าเซลฟ์เสิร์จิมพีแดนซ์ของตัวนำแต่ละเส้นมีค่าไม่เท่ากันและค่าเสิร์จิมพีแดนซ์รวมของตัวนำแต่ละเส้นก็ไม่เท่ากันด้วย สมการ (ข.12) ยังคงใช้ได้โดยมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 2% เมื่อ

Z คือ เซลฟ์เสิร์จิมพีแดนซ์เฉลี่ยของสายตัวนำทั้งหมด

Z_m คือ เสิร์จิมพีแดนซ์รวมเฉลี่ยของสายตัวนำทั้งหมด

ข.2 แฟกเตอร์คัปปลิง

ในกรณีที่มีกระแสไหลในสายตัวนำเพียงเส้นเดียว แรงดันในสายตัวนำที่มีกระแสไหลจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันที่สายตัวนำอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ ข.4 แฟกเตอร์คัปปลิง C คือ

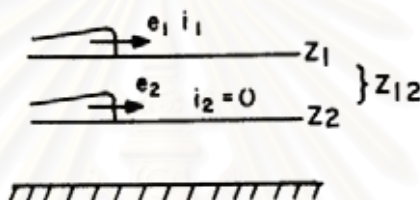
$$C = \frac{e_2}{e_1} \quad (\text{ข.13})$$

เนื่องจาก $i_2 = 0$ จะได้

$$\begin{aligned} e_1 &= i_1 Z_1 \\ e_2 &= i_1 Z_{12} \\ e_2 &= \frac{Z_{12}}{Z_1} e_1 \end{aligned} \quad (ข.14)$$

และแฟกเตอร์คัปปลิง คือ

$$C = \frac{Z_{12}}{Z_1} \quad (ข.15)$$



รูปที่ ข.4 แฟกเตอร์คัปปลิง e_2/e_1

ข.3 แฟกเตอร์คัปปลิงระหว่างสายล่อฟ้า 2 เส้นและสายเฟส

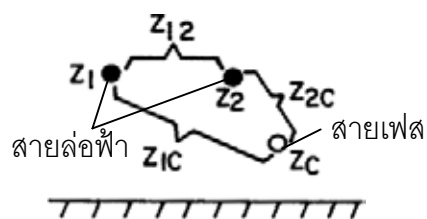
รูปที่ ข.5 แสดงสายล่อฟ้า 2 เส้นและสายเฟส 1 เส้น พร้อมเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสาย ให้แรงดันที่สายล่อฟ้าเป็น e กระแสในสายล่อฟ้าเป็น i_1 และ i_2 และ กระแสในสายเฟสมีค่าเป็นศูนย์จะได้

$$\begin{aligned} e &= e_1 = i_1 Z_1 + i_2 Z_{12} \\ e &= e_2 = i_1 Z_{12} + i_2 Z_2 \\ e_c &= i_1 Z_{1c} + i_2 Z_{2c} \end{aligned} \quad (ข.16)$$

เมื่อ Z_{1c} และ Z_{2c} คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ร่วมระหว่างสายล่อฟ้าและสายเฟส ให้ $Z = Z_1 = Z_2$ จะได้

$$i_1 = i_2 = \frac{e}{Z + Z_{12}} \quad (ข.17)$$

ดังนั้น



รูปที่ ข.5 สายล่อฟ้า 2 เส้น และสายเฟส 1 เส้นที่นำไปใช้หาแฟกเตอร์คัปปลิง

$$\begin{aligned}
 e_c &= \frac{Z_{1c} + Z_{2c}}{Z + Z_{12}} e \\
 &= \frac{(Z_{1c} + Z_{2c})/2}{(Z + Z_{12})/2} e \\
 &= \frac{(Z_{1c} + Z_{2c})/2}{Z_e} e \\
 &= \frac{\text{average mutual surge impedance}}{\text{combined self-surge impedance}}
 \end{aligned} \tag{ข.18}$$

เมื่อเสิร์จอิมพีแดนซ์รวมของสายล่อฟ้า 2 เส้น คือ Z_e ในสมการ (ข.11)

โดยทั่วไปแล้วแฟกเตอร์คัปปลิง คือ ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์รวมเฉลี่ยหารด้วยเสิร์จอิมพีแดนซ์รวมของสายล่อฟ้า

$$C = \frac{\text{average mutual surge impedance}}{\text{equivalent ground wire surge impedance}} \tag{ข.19}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกรินทร์ พงศ์ไพพัฒน์ เกิดเมื่อวันที่ 15 มิถุนายน พ.ศ. 2521 จังหวัดสุพรรณบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย