



การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบส่งกำลังไฟฟ้า

นัฐโชติ รักษ์ไทยเจริญชีพ
สุรสิทธิ์ ประกอบกิจ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณผลประโยชน์ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558
สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



Assessment of Lightning Protection Performance in Transmission System

Nattachote Rugthaicharoencheep
Surasit Prakobkit

This Research is Funded by Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Phra Nakorn
Year 2015

ชื่อเรื่อง : การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบส่งกำลังไฟฟ้า
ผู้วิจัย : ผศ.ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร
นายสุรสิทธิ์ ประกอบกิจ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.พระนคร
พ.ศ. : 2558

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบส่ง 69 kV ในกรณีเกิดฟ้าผ่าที่หัวเสาส่ง เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาความคงทนอยู่ได้ของการเป็นฉนวนของลูกถ้วย และเพื่อปรับปรุงระบบป้องกันฟ้าผ่าในอนาคต โดยวิธีการวิเคราะห์จะดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program (ATP-EMTP) สำหรับสร้างแบบจำลองระบบส่ง 69 kV เพื่อต้องการทราบผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ก่อนและหลังจากติดตั้งสายดินนอกเสา จากการศึกษาทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน คือ ความต้านทานอิมพัลส์ ระยะห่างระหว่างเสา รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาหน้าคลื่น

การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ถือว่ามีความสำคัญ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ เนื่องจากการรวบไฟตามฉนวนย้อนกลับ เพื่อจะทำการวิเคราะห์จุดคุ้มทุนของการติดตั้ง จากการศึกษาพบว่า เมื่อทำการปรับปรุงระบบส่งโดยการติดตั้งสายดินนอกเสา ระยะเวลาในการคืนทุนของการติดตั้งจะใช้ระยะเวลา 9 ปีนับจากการติดตั้งในปีแรก สามารถสรุปได้ว่าสายดินนอกเสาไฟฟ้าช่วยลดอัตราความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับให้มีมูลค่าลดลง



Title : Assessment of Lightning Protection Performance in Transmission System
Researcher : Assistant Professor Dr.Nattachote Rugthaicharoencheep
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, RMUTP
Mr.Surasit Prakobkit, Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering, RMUTP
Year : 2015

Abstract

This Research purposes assessment of lightning performance on transmission system 69 kV in Metropolitan Electricity Authority (MEA). The case studies illustrated the lightning strike to direct top pole in order to guideline considering the critical flashover voltage value of insulator is able to withstand it and improvement lightning protection in the future. This solution analyzes using the Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program (ATP-EMTP). The result found that voltage across insulator before and after improvement lightning protection by external ground wire. Factor effect to voltage across the insulators is the tower footing resistance, wave of lightning current and interval between towers. It depends on relation with front time of wave.

The analysis economics is very important. This Research is studying interruption cost of outage since back flashover so analysis the break even point of the installation external ground. The result found upon improvement lightning protection by installed external ground. The pay back period of that is 9 years installed ago. This result can conclusion is external ground able reduction interruption costs of outage.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่องการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบส่งกำลังไฟฟ้านี้ ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินผลประโยชน์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558 ของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามในที่นี้ ที่ให้ความช่วยเหลือตลอดมา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากงานวิจัยในครั้งนี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาทุกท่าน คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยขอมอบบูชาแด่คณาจารย์ทุกท่านที่ประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้วิจัย

คณะผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 ฟิวส์	4
2.3 ทฤษฎีแรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟิวส์	11
2.4 ดัชนีสมรรถนะป้องกันฟิวส์	14
2.5 แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ	21
2.6 อันตรายจากฟิวส์ที่เกิดแก่คน	22
2.7 อันตรายจากแรงดันช่วงก้ำวและแรงดันสัมผัส	22
2.8 หลักการฟิวส์ลงที่ตำแหน่งใด	22
บทที่ 3 การออกแบบและสร้าง	23
3.1 บทนำ	23
3.2 หลักการทั่วไปและความสามารถของโปรแกรม ATP-EMTP	24
3.3 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า	27
3.4 แผนผังการทำงานของโปรแกรม	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	46
4.1 บทนำ	46
4.2 ขั้นตอนการทดลอง	46
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	68
5.1 บทนำ	68
5.2 สรุปผลการวิจัย	68
5.3 ข้อเสนอแนะ	70
บรรณานุกรม	71
ภาคผนวก	73
คณะผู้วิจัย	74



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สถิติจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของประเทศไทยเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2536-2540	14
3.1	ช่วงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า	26
3.2	ข้อมูลตัวแปรสายที่ใช้สร้างแบบจำลอง	34
3.3	ความถี่ของความยาวสายที่พิจารณา	35
3.4	ความเร็วคลื่นภายในคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่	37
3.5	คุณลักษณะวาบไฟตามผิวของฉนวนลูกถ้วยแขวนเพื่อรองรับระบบส่ง	38
3.6	พารามิเตอร์สำหรับหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสา	43
4.1	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s	48
4.2	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 1/100 μ s	48
4.3	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 2/100 μ s	48
4.4	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 3/100 μ s	49
4.5	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 4/100 μ s	49
4.6	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s	49
4.7	ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย (kA) ของแต่ละรูปคลื่น ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร	50
4.8	ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%) ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร	50
4.9	ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร	50
4.10	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/350 μ s	52
4.11	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 1/100 μ s	52
4.12	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 2/100 μ s	53
4.13	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 3/100 μ s	53
4.14	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 4/100 μ s	53
4.15	แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s	54
4.16	ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย (kA) ของแต่ละรูปคลื่น ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร	54
4.17	ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%) ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร	54

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.18 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร	55
4.19 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s	56
4.20 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 1/100 μ s	57
4.21 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 2/100 μ s	57
4.22 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 3/100 μ s	57
4.23 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 4/100 μ s	58
4.24 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s	58
4.25 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวาทไฟตามผิวของลูกถ้วย (kA) ของแต่ละรูปคลื่น ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร	58
4.26 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%) ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร	59
4.27 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร	59
4.28 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน (kV) รูปคลื่น 0.25/100 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอก เสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร	61
4.29 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน (kV) รูปคลื่น 10/350 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอก เสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร	61
4.30 กระแสฟ้าผ่าวิกฤต (kA) กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร	61
4.31 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร กรณีติดตั้งสายดินนอกเสา	62
4.32 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร	62
4.33 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s	64
4.34 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน (kV) รูปคลื่น 0.25/100 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอก เสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร	64
4.35 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s	65
4.36 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน (kV) รูปคลื่น 10/350 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอก เสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร	65
4.37 รายละเอียดของการลงทุนติดตั้งสายดินนอกเสา (บาท/ต้น)	66
4.38 อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ รูปคลื่น 0.25/100 μ s	67

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	อากาศเริ่มเกิดไอออไนเซชัน	5
2.2	การเกิดฟ้าผ่าที่สมบูรณ์	5
2.3	ฟ้าผ่าขึ้น ฟ้าผ่าลง	6
2.4	การเกิดไอออไนเซชันจากก้อนเมฆ	7
2.5	การเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วระหว่างประจุบวกและประจุลบ	7
2.6	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าบวก	7
2.7	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลบ	8
2.8	ตัวอย่างสถิติของกระแสฟ้าผ่า	8
2.9	การเกิดลำฟ้าผ่าซ้ำ	9
2.10	การเกิดแรงดันเกินเมื่อฟ้าผ่าลงสายดินของระบบส่ง 69 kV	13
2.11	การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเมื่อฟ้าผ่าลงสายดินของระบบส่ง 69 kV	13
2.12	การกระจายความน่าจะเป็นสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย	15
2.13	ระยะฟ้าผ่าและระยะแนวราบระหว่างการกระจายและจุดศูนย์กลางทรงกลมกึ่งที่จุด C	19
2.14	ระยะฟ้าผ่า	20
2.15	ระยะฟ้าผ่าสั้น	20
2.16	ระยะฟ้าผ่ายาว	21
3.1	EMTP-ATP Module	27
3.2	การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวงที่มีทั้งระบบ 69 kV และ 24 kV	29
3.3	แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 20 เมตร 14 ต้น-เมตร	30
3.4	แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 22 เมตร 18 ต้น-เมตร	31
3.5	แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 22 เมตร 25 ต้น-เมตร	32
3.6	แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 23 เมตร 18 ต้น-เมตร	33
3.7	การปักเสาพาดสายของสายส่งย่อยกรณีข้ามถนน	34
3.8	แสดงการป้อนข้อมูลแบบจำลองสายส่งย่อย 69 kV และสายป้อน 24 kV	35
3.9	แสดงรูปแบบการจำลองสายแบบจำลองสายส่งย่อย 69 kV และสายป้อน 24 kV	35
3.10	การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตส่วนบน	37
3.11	การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตส่วนล่าง	38
3.12	ลูกถ้วยแขวน 52-3	39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.13	วงจรมุมลของรากสายดิน	41
3.14	การสร้างแบบจำลองความต้านทานของรากสายดินแบบแท่ง	41
3.15	การสร้างแบบจำลองตัวเหนี่ยวนำของรากสายดินแบบแท่ง	42
3.16	การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุของรากสายดินแบบแท่ง	42
3.17	รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์	44
3.18	การสร้างแบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า	44
3.19	แผนผังการทำงานของโปรแกรม	45
4.1	แสดงอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร	51
4.2	แสดงอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร	55
4.3	แสดงอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร	59
4.4	แสดงอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร	62



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าได้กลายเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการดำรงชีวิต และมีบทบาทความสำคัญมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจและสังคม ล้วนแล้วแต่ต้องการพลังงานด้านไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานด้วยกันทั้งสิ้น การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าจึงต้องอาศัยความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพของระบบส่งเพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายทางเศรษฐกิจ และผลกระทบต่อชีวิตประจำวันของคนเราเนื่องจากฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ ที่เกิดจากการดิสชาร์จหรือการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ ก้อนเมฆกับอากาศ หรือจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดิน การเกิดฟ้าผ่าจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดินจะส่งผลกระทบต่อชีวิตประจำวันของคนเรา และสามารถก่อให้เกิดอันตรายอย่างร้ายแรง การเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าขึ้นกับระบบส่ง เป็นปัญหาที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากสร้างความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้า โดยผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่าในระบบส่ง สามารถก่อให้เกิดแรงดันเกินที่เป็นอันตราย ทำให้การส่งจ่ายพลังงานต้องเสียเสถียรภาพ เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบส่ง สร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ป้องกัน อีกทั้งยังสามารถพัฒนาความรุนแรงเป็นผลให้เกิดไฟฟ้าดับชั่วคราว หรือไฟฟ้ากับชั่วคราว โดยผลกระทบทั้งหมดนี้ล้วนแล้วที่จะสร้างความเสียหายให้กับเศรษฐกิจ อีกทั้งยังสามารถก่อให้เกิดอันตรายแก่ตัวบุคคล

เนื่องจากผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่าในระบบส่งนั้น ได้สร้างความเสียหายเกิดขึ้นต่อระบบไฟฟ้า และสามารถทำให้เกิดอันตรายแก่ตัวบุคคล รวมทั้งเศรษฐกิจที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยพื้นฐานในปัจจุบัน ดังนั้นเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่ากับระบบส่ง การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าจะช่วยให้สามารถทราบถึงผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่ากับระบบส่ง โดยสามารถนำผลกระทบไปวิเคราะห์ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบส่ง หรือปรับปรุงสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบส่งเดิมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังสามารถทราบจุดคุ้มทุนในการที่จะปรับปรุงสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบส่ง การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบส่ง จะใช้โปรแกรม ATP-EMTP ในการช่วยประเมินสมรรถนะฟ้าผ่า โดยสามารถทราบการเปลี่ยนแปลงของกระแสวิกฤต แรงดันตกคร่อมพวงลู่กล้วย และอัตราการเกิดควาไฟตามผิวย้อนกลับ เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่ากับระบบส่งได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าจำลองระบบส่ง 69 kV
2. เพื่อเป็นการนำแบบจำลองระบบส่ง มาประมวลผลงานโครงการ โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP
3. เพื่อทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ในการลงทุนสำหรับการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบส่ง ดำเนินการประเมินในระดับแรงดัน 69 kV
2. การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบส่งจะดำเนินการโดยใช้โปรแกรมจำลองการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง ในการประเมิน
3. การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบส่ง จะดำเนินการประเมินในกรณีฟ้าผ่าหัวเสาส่ง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่ใช้ในระบบส่ง
2. ศึกษาทฤษฎีแรงดันเกินเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟ้าผ่า
3. ศึกษาข้อมูลกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย และจำนวนวันที่ฝนฟ้าคะนองในกรุงเทพมหานคร และข้อมูลสถิติไฟฟ้าดับเนื่องจากฟ้าผ่าที่เกิดในพื้นที่
4. ใช้โปรแกรมจำลอง ATP-EMTP แรงดันตกคร่อมพวงลู่ถ้วย และกระแสวิกฤต ของโครงสร้างปัจจุบัน และโครงสร้างที่ทำการปรับปรุง
5. รวบรวมเรียบเรียง ตรวจสอบข้อมูล และจัดทำรายงานผลการศึกษาและเผยแพร่ที่เกี่ยวข้องกับโครงการ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. สามารถประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบส่งก่อนและหลังทำการปรับปรุงได้
2. สามารถใช้โปรแกรมจำลองระบบวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังได้
3. สามารถวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์จุดคุ้มทุนในการปรับปรุงสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบส่งได้
4. สามารถนำผลกระทบฟ้าผ่าไปใช้เป็นแนวทางการออกแบบของระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบส่ง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ปัจจุบันการเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและมีอิทธิพลต่อระบบจำหน่ายนั้น เป็นปัญหาที่สำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากสร้างความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้าซึ่งกลายเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิตในปัจจุบัน ผลกระทบจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย สามารถทำให้เกิดไฟฟ้าดับชั่วคราว หรือไฟฟ้าดับถาวร ทำให้เกิดความผิดปกติในระบบจำหน่าย ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่เป็นอันตราย ทำให้การส่งพลังงานต้องเสียเสถียรภาพ และสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ป้องกัน โดยปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมดส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือได้ และเสถียรภาพในการจ่ายไฟของระบบไฟฟ้า และส่งผลกระทบโดยตรงต่อการใช้ชีวิตประจำวันของประชาชน

การสนองความต้องการของผู้ใช้ไฟที่นับวันจะมีต้องการมากขึ้น การให้บริการพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงจึงต้องบรรลุวัตถุประสงค์ในด้านของคุณภาพ และความน่าเชื่อถือได้ โดยการไฟฟ้านครหลวงมีระบบส่งกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่าย ประกอบไปด้วย ระบบสายส่ง และระบบจำหน่ายที่เป็นสายอากาศ และสายใต้ดิน โดยมีระดับแรงดันของสายส่งคือ 230 kV, 115 kV, และ 69 kV ในส่วนของระบบจำหน่าย จะมีระดับแรงดันของสายป้อนคือ 12 kV, 24 kV โดยส่วนใหญ่แล้ว ระบบสายส่งและระบบจำหน่าย จะเป็นสายอากาศเหนือดิน และเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องขอบเขตทางที่จะทำการปักเสาพาดสาย มีเสาและสายไฟฟ้าเดิมอยู่ สาธารณูปโภคต่างๆ รวมทั้งกฎระเบียบข้อบังคับของเจ้าของพื้นที่ เช่น กรุงเทพมหานคร (กทม.) กรมทางหลวง (กทล.) กรมทางหลวงชนบท (กทช.) การทางพิเศษ (กทพ.) องค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) เป็นต้น เพราะฉะนั้นแล้ว จึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบจำหน่ายอยู่บนเสาไฟฟ้าต้นเดียวกันกับระบบส่ง โดยมีสายตัวนำในเสาเป็นส่วนหนึ่งของระบบดินทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างสายดินเหนือศีรษะและแท่งหลักดิน เพื่อทำหน้าที่นำกระแสผิดปรong หรือกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน

ระบบสายอากาศบนดิน นับว่าโอกาสที่จะเกิดปัญหาไฟฟ้าขัดข้องนั้นมีสูงและเกิดขึ้นได้ง่าย หากเปรียบเทียบกับระบบสายใต้ดิน โดยสาเหตุของการเกิดมีหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น ต้นไม้ สัตว์ อุปกรณ์ชำรุด และฟ้าผ่า ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ ถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่ง เพราะฟ้าผ่านอกจากจะทำให้เกิดความขัดข้องขึ้นในระบบไฟฟ้า ยังส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบอีกด้วย

การเกิดไฟฟ้าขัดข้องเนื่องจากฟ้าผ่านั้น โดยส่วนใหญ่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายดินเหนือศีรษะโดยตรง หากว่ากระแสฟ้าผ่าทำให้แรงดันที่ตกคร่อมลูกถ้วยมากกว่าที่แรงดันที่พวงลูกถ้วยสามารถที่ทนได้ เนื่องมาจากกระแสฟ้าผ่าที่มีค่ามาก หรือความต้านทานของรากสายดินมีค่ามาก ซึ่งเป็นสาเหตุให้แรงดันระหว่างสายเฟสของตัวนำ และสายดินเหนือศีรษะมีค่ามากกว่าแรงดันวาบไฟวิกฤต ก็จะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การเกิดวาบไฟตามผิวนวนย้อนกลับ (Back flashover) โดยจะเป็นดัชนีที่สำคัญในการประเมินสมรรถภาพฟ้าผ่าของระบบส่ง

2.2 ฟาผ่า

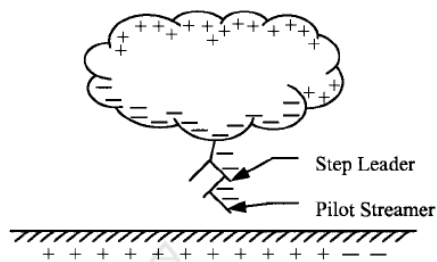
ฟาผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศ ซึ่งนับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง สามารถสร้างความเสียหายให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งได้กลายเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิตในปัจจุบัน โดยผลกระทบจากฟาผ่าที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลัง สามารถทำให้เกิดไฟฟ้าดับชั่วคราว หรือไฟฟ้าดับถาวร ทำให้เกิดความผิดปกติในระบบ ก่อให้เกิดแรงดันเกินที่เป็นอันตราย ทำให้การส่งจ่ายพลังงานต้องเสียเสถียรภาพ และสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ป้องกัน

ฟาผ่าเกิดขึ้นเนื่องจากการคายประจุหรือดิสชาร์จของประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ ซึ่งการดิสชาร์จของฟาผ่าเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องพึ่งอิเล็กทรอนิกส์ การสะสมของประจุที่มีขั้วต่างกันส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างกลุ่มประจุเหล่านั้น หากประจุสะสมกันและมีปริมาณมากขึ้น และทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆ และดินมีค่าสูงมากจนอากาศแตกตัวแล้วเกิดไอออไนเซชันแบบสมบูรณจากก้อนเมฆลงสู่ดิน

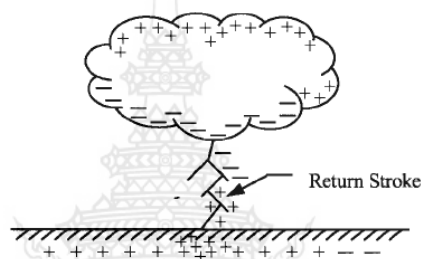
การเกิดประจุบนก้อนเมฆเกิดขึ้นเนื่องจากมีลมพัดเม็ดฝนจากด้านล่างของก้อนเมฆขึ้นไปด้านบนที่เย็นมากจนจับตัวเป็นเกล็ดน้ำแข็ง และเกิดการเสียดสีของอากาศและหยดน้ำทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต โดยส่วนมากด้านล่างของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบ และมีส่วนน้อยเป็นประจุบวก โดยมีค่าประมาณ 10 - 15 % โดยในส่วนที่เป็นประจุบวกนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากหยดน้ำมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่ลมจะพัดพาขึ้นไปได้ และส่วนบนของก้อนเมฆซึ่งห่างขึ้นไปด้านบนอาจเป็น 10 กม.

การเกิดประจุที่ก้อนเมฆทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆและดิน หากสนามไฟฟ้าสูงมากเกินกว่าค่าที่อากาศทนได้ จะทำให้เกิดการแตกตัวของอากาศและเปลี่ยนสภาพของอากาศจากฉนวนเป็นตัวนำ และถ้าสนามไฟฟ้าสูงมาก การเกิดแตกตัวของอากาศก็จะขยายถึงพื้นดินจนเกิดฟาผ่า

เมื่อสนามไฟฟ้าใต้ก้อนเมฆเกินกว่าที่อากาศจะทนได้ (สนามไฟฟ้าวิกฤตใต้ก้อนเมฆประมาณ 10 kV/cm) ก็เกิดไอออไนเซชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แต่เนื่องจากสภาพอากาศในแต่ละบริเวณมีความดันและอุณหภูมิของอากาศไม่เท่ากัน เพราะฉะนั้นการเอื้ออำนวยต่อการเกิดไอออไนเซชันต่างกัน ทำให้เห็นการเกิดการแตกตัวของอากาศเป็นเหมือนรากต้นไม้ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ด้านบนของหัวฟาผ่า เรียกว่า “ฟาผ่านำทาง” (Pilot Streamer) และแต่ละแยกของฟาผ่าเรียกว่า Step Leader ช่วงดังกล่าวประจุบนก้อนเมฆจะเคลื่อนที่ลงมาไม่รวดเร็วนัก และจะเกิดขนาดกระแสไม่กีร้อยแอมแปร์ และในช่วงนี้ยังไม่เห็นแสงหรือได้ยินเสียง โดยเมื่อฟาผ่าลงถึงพื้นดินจะเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วระหว่างประจุบวกและลบทำให้เกิดกระแสรุนแรงมีทั้งแสงและเสียง กระแสเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุ การเคลื่อนที่ของประจุจากพื้นดินเพื่อขึ้นไปรวมตัวกับประจุบนก้อนเมฆ เรียกฟา “ลำฟาผ่าย้อนกลับ”



รูปที่ 2.1 อากาศเริ่มเกิดไอออไนเซชัน



รูปที่ 2.2 การเกิดฟ้าผ่าที่สมบูรณ์.....

การเกิดฟ้าผ่าลงมาและเกิดลำฟ้าฟ้าย้อนกลับ เรียกว่า เกิดฟ้าผ่าขึ้นลงหนึ่งรอบ โดยฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป จะมีการเกิดขึ้นฟ้าผ่าขึ้นลงเฉลี่ย 2-3 รอบต่อการเกิดฟ้าผ่าหนึ่งครั้ง ดังนั้นการที่เห็นฟ้าผ่าแต่ละครั้งอาจเกิดฟ้าผ่าขึ้นลง 2-3 รอบ และที่เคียวัดการเกิดฟ้าผ่าขึ้นลงสูงสุด ปรากฏว่ามีการเกิดฟ้าผ่าขึ้นลงทั้งหมด 42 รอบต่อฟ้าผ่าหนึ่งครั้ง

2.2.1 ลักษณะฟ้าผ่าพื้นโลก

ลักษณะของฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกสามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะต่อไปนี้

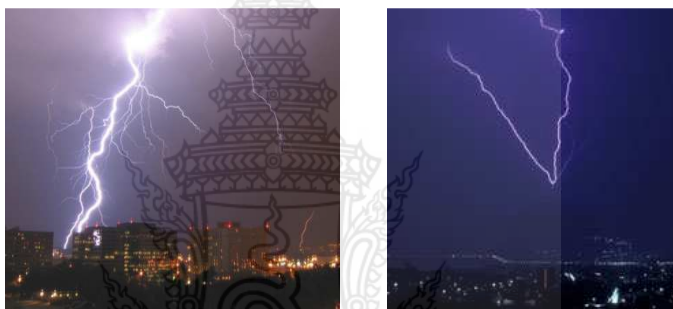
1. ฟ้าผ่าขึ้นหรือลง
2. ขั้วของกระแสฟ้าผ่า เป็นบวกหรือลบ
3. รูปลักษณ์กระแสฟ้าผ่า
4. ขนาดของกระแสฟ้าผ่า
5. จำนวนครั้งฟ้าผ่าต่อเนื่อง

2.2.2 ฟ้าผ่าขึ้นหรือลง

ฟ้าผ่าอาจเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 กรณี ทั้งฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลง หากฟ้าผ่าพื้นโลกเริ่มต้นจากก้อนเมฆที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤต เกิดไอออไนเซชันของอากาศขยายตัวออกไปเป็นลีดเดอร์วิ่งสู่พื้นโลก ทำให้เกิดการดิสชาร์จประจุลงสู่พื้นโลกเป็นลำฟ้าผ่า เรียกว่า ฟ้าผ่าลง

แต่ฟ้าผ่าเริ่มต้นจากพื้นโลกไปสู่ก้อนเมฆ ก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกัน โดยมากลิตเตอร์จะเริ่มต้นก่อตัวจากสิ่งก่อสร้างหรือวัตถุสูงๆ ในที่พื้นที่ราบจะเริ่มจากยอดที่สูงจากพื้นตั้งแต่ 100 เมตรขึ้นไป เช่น ยอดเสาหรือหอคอยสูง ๆ หรือสิ่งก่อสร้างที่อยู่บนยอดเขาสูง แต่กระแสฟ้าผ่าขึ้นจะมีค่าต่ำ เรียกว่า ฟ้าผ่าขึ้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะพบว่าฟ้าผ่าขึ้นมักเกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่าลง

ฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลงนั้นจะเกิดขึ้นและมีระยะเวลาที่สั้นและรวดเร็ว โดยไม่สามารถจะสังเกตแยกได้ว่าเป็นฟ้าผ่าขึ้น หรือฟ้าผ่าลง แต่อาจสังเกตดูจากลำแสงฟ้าผ่าซึ่งมีลักษณะของฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลง โดยลำแสงฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลงมีลักษณะต่างกัน อธิบายได้คือ หากฟ้าผ่าลงจะมีแขนงแตกจากลำฟ้าผ่ากระจายลงสู่พื้นโลกมีลักษณะคล้ายรากต้นไม้ โดยลิตเตอร์นั้นจะกระจายทางขยายตัวลงมาหลาย ๆ ทางแล้วแต่ว่าทางใดจะเกิดไอออโนเซชันได้ง่าย ในทางกลับกันหากเป็นฟ้าผ่าขึ้นจะสังเกตเห็นการขยายตัวของแขนงขึ้นไปสู่เบื้องบน



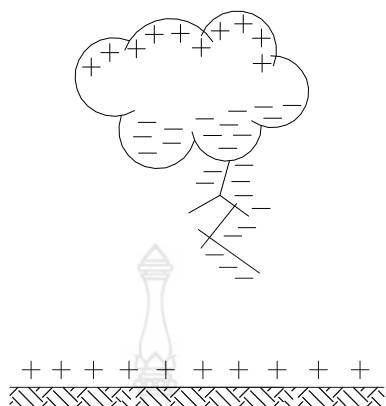
รูปที่ 2.3 ฟ้าผ่าขึ้น ฟ้าผ่าลง

2.2.3 ขั้วของกระแสฟ้าผ่า

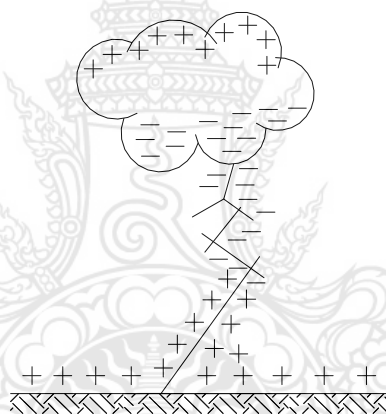
กระแสฟ้าผ่าเป็นกระแสที่ไหลทางเดียว (Unidirection) โดยอาจเป็นบวกหรือเป็นลบก็ได้ ฉะนั้นขั้วบวกหรือลบจึงเป็นลักษณะสมบัติอย่างหนึ่งของฟ้าผ่า กระแสฟ้าผ่าบวกหมายถึง ลำฟ้าพ่านำเอาประจุบวกจากก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลก กระแสฟ้าผ่าลบหมายถึง ลำฟ้าพ่านำเอาประจุลบจากก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลก

ประจุที่อยู่ส่วนล่างของก้อนเมฆมีสองกลุ่ม คือประจุบวกและประจุลบ แต่ส่วนใหญ่ 80-90 % เป็นประจุลบดังนั้นฟ้าผ่าที่เกิดส่วนใหญ่ก็เนื่องมาจากประจุลบ เรียกว่าฟ้าผ่าลบ หากการไอออโนเซชันเกิดขึ้นจากกลุ่มประจุบวกใต้ก้อนเมฆฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น เรียกว่า ฟ้าผ่าบวก

การเกิดไอออโนเซชันของอากาศแล้วกระจายทางลงมาเป็นขั้น ๆ (Stepped Leader) ลงมาถึงพื้นโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เกิดการรวมตัวอย่างรวดเร็วของประจุลบจากก้อนเมฆ และประจุบวกที่พื้นโลก เป็นผลให้เกิดแสง สี เสียง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 การเคลื่อนตัวของประจุดังแสดงในรูปที่ 2.5 ทำให้เกิดกระแสที่มีขนาด 200-300 แอมป์ แต่การรวมตัวอย่างรวดเร็วของประจุดังแสดงในรูปที่ 2.5 ทำให้เกิดกระแสสูงมากอย่างน้อย 1 - 2 หมื่นแอมป์ ฟ้าผ่าที่เริ่มจากประจุลบดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5 เรียกว่า ฟ้าผ่าลง



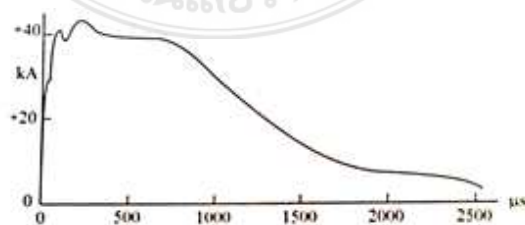
รูปที่ 2.4 การเกิดไอออนไนเซชันจากก้อนเมฆ



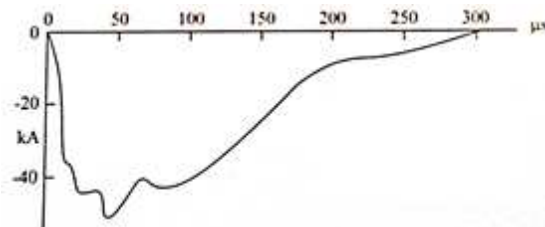
รูปที่ 2.5 การเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วระหว่างประจุบวกและประจุลบ

2.2.4 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าบวกและลบ มีลักษณะตามรูปที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



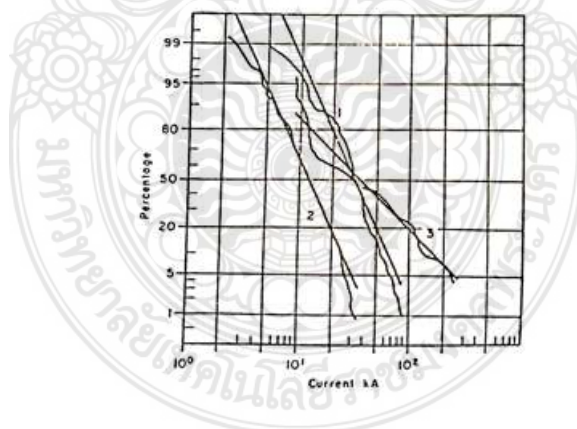
รูปที่ 2.6 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าบวก



รูปที่ 2.7 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลบ

2.2.5 ขนาดกระแสฟ้าผ่า

ขนาดกระแสฟ้าผ่า หมายถึง ค่ายอดของรูปคลื่นฟ้าผ่าโดยจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับว่าเป็นฟ้าผ่าขึ้นหรือฟ้าผ่าลง ปริมาณของประจุที่ติดสชาร์จ ขั้วบวกหรือขั้วลบ จากการบันทึกพบว่า กระแสฟ้าผ่าขั้วลบมีค่าสูงถึง 90 กิโลแอมแปร์ และขั้วบวกมีค่าสูงถึง 270 กิโลแอมแปร์ ในรูปที่ 2.8 แสดงถึงสถิติกระจายของกระแสฟ้าผ่าที่วัดได้จากสถานีวิจัยฟ้าผ่าบนยอดเขา San Salvatore ภาคใต้ของประเทศสวิตเซอร์แลนด์ระหว่างปี 1963 ถึง 1971 จากเส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.7 จะเห็นได้ว่ากระแสฟ้าผ่ามีค่าเฉลี่ย (ที่ความน่าจะเป็น 50 %) ขั้วลบประมาณ 30 กิโลแอมป์ สำหรับฟ้าผ่าลำแรก และลำฟ้าผ่าตามขั้วลบประมาณ 12 กิโลแอมป์ และโดยเฉลี่ยของฟ้าผ่าบวกประมาณ 35 กิโลแอมป์

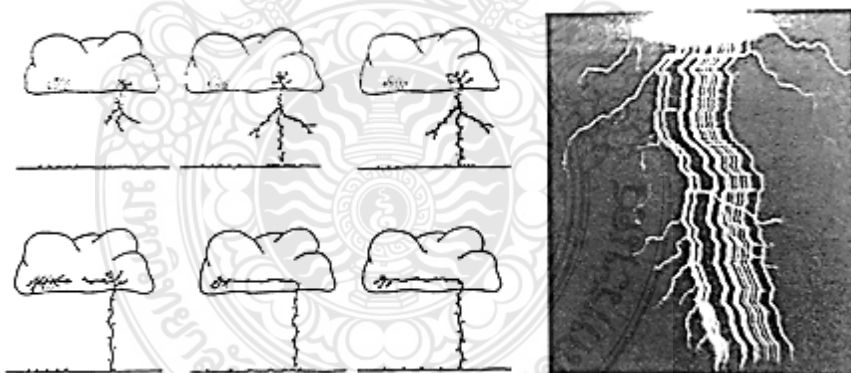


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างสถิติของกระแสฟ้าผ่า
 ลำฟ้าผ่าแรกขั้วลบ (ค่าที่ 50 % = 30 kA)
 ลำฟ้าผ่าตามขั้วลบ (ค่าที่ 50 % = 12 kA)
 ลำฟ้าผ่าขั้วบวก (ค่าที่ 50 % = 35 kA)

2.2.6 จำนวนครั้งฟ้าผ่าต่อเนื่อง

หากสังเกตดูลำฟ้าผ่าขณะที่เกิดฟ้าผ่า มักจะพบว่า มีลำฟ้าผ่าเกิดขึ้นซ้ำตามแนวลำฟ้าผ่าแรกๆ ซึ่งบางทีมีการผ่าซ้ำหลายครั้ง ปรากฏการณ์เช่นนี้ สามารถอธิบายได้ว่า ในก้อนเมฆนั้นอาจจะมีศูนย์กลางรวมกลุ่มของประจุหลายแห่ง และเมื่อประจุใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตก่อน ก็จะทำให้เกิดสตรีมเมอร์ระหว่างกลุ่มประจุในก้อนเมฆ และเกิดดิซชาร์จลงสู่พื้นตามแนวลำฟ้าผ่าแรก ที่เป็นเช่นนี้ เพราะอากาศในแนวลำฟ้าผ่าที่วิ่งลงมาก่อนนั้นยังคืนตัวกลับเป็นฉนวนได้ไม่ทันที กล่าวคือยังมีสภาพนำไฟฟ้า

ฟ้าผ่าซ้ำนี้จะมีช่วงเว้นระยะเกิดซ้ำระหว่างครั้งประมาณ 5-30 มิลลิวินาที ฟ้าผ่าตามนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีแขนง เพราะไม่มีการขยายตัวเป็นจิ้งหะกั้ว (Stepped leader) เวลาช่วงหน้าคลื่นของฟ้าผ่าซ้ำนี้จะมีความชันสูงมาก อาจถึง 120 กิโลแอมแปร์ต่อไมโครวินาที ซึ่งความชันของคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกจะมีค่าเพียง 32 กิโลแอมแปร์ต่อไมโครวินาที และความชันเฉลี่ยประมาณ 12 กิโลแอมแปร์ต่อไมโครวินาที จากการบันทึกพบว่าการเกิดฟ้าผ่าซ้ำหลายๆ ครั้ง จะมีหรือไม่มีขึ้นอยู่กับภูมิประเทศในประเทศโซนหนาวจะมีฟ้าผ่าลำเดี่ยวเป็นส่วนใหญ่ แต่ในประเทศโซนร้อนจะมีจำนวนฟ้าผ่าซ้ำมากกว่า 2 ครั้ง อย่างเช่น ในประเทศอังกฤษ จะมีฟ้าผ่าแต่ละครั้ง 1-2 ลำฟ้าผ่า ในแอฟริกาฟ้าผ่าซ้ำเฉลี่ย 4 ลำฟ้าผ่า และในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่าฟ้าผ่าซ้ำถึง 26 ลำต่อวาบฟ้าผ่า 1 ครั้ง ดังอย่างภาพถ่ายลำฟ้าผ่าซ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเกิดลำฟ้าผ่าซ้ำ

2.2.7 ผลจากฟ้าผ่า

ผลจากฟ้าผ่าสามารถก่อให้เกิดความเสียหายหรือเกิดอันตรายสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.2.7.1 ผลทางความร้อน

2.2.7.2 ผลทางแรงกล

2.2.7.3 ผลทางไฟฟ้า

2.2.7.1 ผลทางความร้อน

เมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า จะสามารถสังเกตลำแสงจ้าของฟ้าผ่า โดยลำแกนมืดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเซนติเมตร และมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 K อุณหภูมิสูงมากขนาดนี้ย่อมก่อให้เกิดเพลิงไหม้แก้วสตุติไฟได้ แม้ว่าช่วงระยะเวลาไหลของกระแสจะสั้นรวดเร็วก็ตาม

หากฟ้าผ่าลงบนโลหะ มักจะมีรอยรอยของการถูกฟ้าผ่าเกิดขึ้นตรงตำแหน่งที่ฟ้า ที่เป็นเช่นนี้เพราะกระแสฟ้าผ่า เมื่อแปลงเป็นพลังงานความร้อน จะมีค่ามากพอที่จะทำให้โลหะหลอมละลายได้ นั่นหมายถึงว่า โลหะบางทั้งหลาย มีโอกาสถูกฟ้าผ่าหลอมละลายทะลุตรงจุดที่ฟ้าผ่ากระทบได้ถ้าความหนาไม่พอ และหากเป็นถึงโลหะที่เก็บวัสดุไวไฟ เช่น ถังน้ำมันเชื้อเพลิง อาจจะทำให้เกิดการระเบิดขึ้นตามมาได้

เพราะฉะนั้นการออกแบบสายล่อฟ้า โดยต้องใช้เสาล่อฟ้าเป็นตัวล่อ หรือเป็นจุดที่ให้ฟ้าผ่าลง และมีสายตัวนำลงดินเป็นทางนำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดินโดยเร็วที่สุด และจะต้องไม่ทำให้สายตัวนำลงดินหลอมละลาย หรืออุณหภูมิสูงขึ้น จนเป็นเหตุให้เกิดเพลิงไหม้ นั่นหมายความว่า สายตัวนำลงดิน จะต้องมียุณหภูมิที่ภาคตัดขวางขนาดโตพอ

2.2.7.2 ผลทางแรงกล

นอกจากผลของทางความร้อนที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าแล้วนั้น ขณะเดียวกันยังเกิดแรงกลระเบิดสองแบบ คือ แบบหนึ่ง เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำแล้ว ทำให้เกิดแรงบิดขึ้นแก่ตัวนำนั้น เป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลัก ส่วนแรงกลแบบที่สองเป็นแรงระเบิด เนื่องจากลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมาก ทำให้อากาศรอบๆ ลำฟ้าผ่าขยายตัวออกอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้เกิดคลื่นความดันในย่านความเร็วเหนือเสียงแผ่กระจายออกไปรอบลำฟ้าผ่า เกิดเป็นเสียงดังสนั่นหวั่นไหว เรียกว่า ฟ้าร้องนั่นเอง

กรณีฟ้าผ่าลงบนวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า กระแสฟ้าผ่าจะวิ่งไปตามแนวที่มีความต้านทานน้อยที่สุด ถ้ามีความชื้นในวัสดุนั้น น้ำหรือความชื้นจะเปลี่ยนเป็นไอ เกิดความดัน อาจทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้

2.2.7.3 ผลทางไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่ามีหลายลักษณะ คือ

1. การรบกวนของแม่เหล็กไฟฟ้า
2. แรงดันสปาร์กด้านข้าง
3. แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย
4. แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ
5. อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดกับคน
6. อันตรายจากแรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัส

1. การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่า ประการแรก ก็คือ จะทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำ หากแรงดันเหนี่ยวนำสูงพอ ก็อาจเกิดสปาร์กได้

2. แรงดันสปาร์กด้านข้าง

ถ้ากระแสฟ้าผ่า i ไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ L และมีความต้านทานของดิน R_e จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ และความต้านทาน ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ

$$\Delta U = R_e i + L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ di/dt คือ ความชันของคลื่นกระแสฟ้าผ่า

ถ้าหากความต้านทานของรากสายดิน หรือความเหนี่ยวนำของสายตัวนำลงดินมีค่าสูง จะทำให้ศักย์ไฟฟ้า ΔU มีค่าสูง โดยอาจมากพอที่จะทำให้เกิดสปาร์กด้านข้าง หรือกระโดดเข้าหาส่วนที่ต่อลงดินอย่างดี ซึ่งการเกิดสปาร์กด้านข้างนี้ อาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ ถ้ามีสิ่งที่เป็นเชื้อเพลิงอยู่ในบริเวณนั้น

2.3 ทฤษฎีแรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่า

แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เกิดขึ้นจากสาเหตุใหญ่ 2 ประการ คือ เนื่องจากฟ้าผ่า และเนื่องจากสวิตชิง แรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าจะมีค่าสูงมากกว่าแรงดันเกินเนื่องจากสวิตชิง ดังนั้นการออกแบบฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า จึงพิจารณาจากแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าเป็นหลัก โดยแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าแบ่งได้ 4 กรณี คือ

1. กรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟส
2. กรณีฟ้าผ่าลงสายดิน และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายเฟส
3. กรณีฟ้าผ่าลงดิน และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายเฟส
4. กรณีฟ้าผ่าในแนวเฉียงใกล้สายส่ง ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

กรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟส จะทำให้เกิดแรงดันเกินมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่นๆ แต่สามารถป้องกันได้ โดยการติดตั้งสายดินเหนือสายเฟส เพื่อให้ฟ้าผ่าลงสายดิน จึงทำให้เกิดฟ้าผ่าลงสายดินแทน ซึ่งถ้าไม่พิจารณากรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟสแล้ว กรณีที่ทำให้เกิดแรงดันเกินในสายเฟสรุนแรงที่สุดคือ กรณีฟ้าผ่าลงสายดิน ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะแรงดันเกินที่จะเกิดขึ้นในสายเฟสเนื่องจากฟ้าผ่าลงสายดิน

2.3.1 แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยตรง นั้นย่อมทำให้มีแรงดันเกินขึ้นบนสายส่ง เนื่องจากลำฟ้าผ่าเปรียบเสมือนต้นกำเนิดของตัวจ่ายกระแส เมื่อมีกระแส I วิ่งในสายส่ง ซึ่งมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ Z_w จะเกิดแรงดันสูงเป็นคลื่นจร วิ่งไปบนสายส่งทั้งสองทางของจุดที่ฟ้าผ่าลง มีค่าเท่ากับ $\Delta U = IZ_w / 2$ แรงดันสูงคลื่นจรนี้ เมื่อวิ่งไปถึงจุดที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่ออยู่ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ได้ แรงดันเกินในสายเฟส คำนวณได้จาก

$$V_p = k \cdot V_1 \quad (2.2)$$

เมื่อ	V_p	คือ	แรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส(kV)
	V_1	คือ	แรงดันในสายดิน (Ω)
	K	คือ	Coupling Factor มีค่าประมาณ 0.2-0.3

สายดินที่ซึ่งอยู่เหนือสายส่งกำลัง ทำหน้าที่เป็นสายล่อฟ้า ป้องกันมิให้เกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังโดยตรง เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายดิน หากตัวนำลงดิน หรือเสาไฟฟ้ามีความเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานของรากสายดินมีค่าสูง จะทำให้เกิดแรงดันเกินซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 1 และอาจมีค่าสูงมากพอที่จะทำให้การเกิดวาบไฟตามผิวของพวกลูกถ้วยฉนวน ที่ใช้ยึดหรือรองรับสายไฟได้ เรียกว่า เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (back flashover) เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น อาจทำให้เกิดการเจาะทะลุบนลูกถ้วยฉนวน เกิดลัดวงจรลงดิน เกิดผิวดพร่องขึ้นในระบบ ล้วนแล้วแต่กระทบต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดิน ทำให้เกิดแรงดันในสายดิน V_1 และเกิดเหนี่ยวนำในสายเฟส V_p ซึ่งจะมีค่าประมาณ 20-30% ของแรงดันเกินในสายดิน แรงดันในสายดินสามารถคำนวณได้จาก

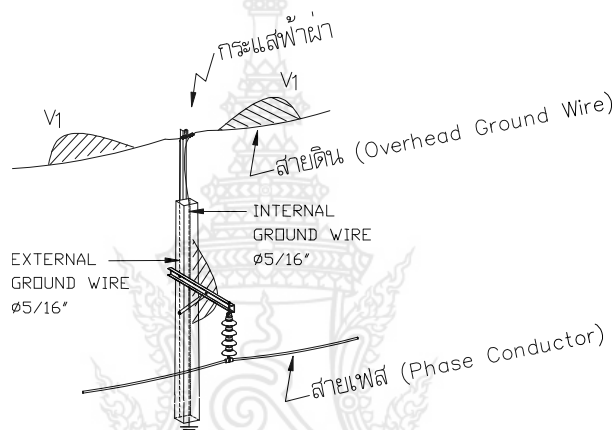
$$V_1 = Z_{total} \times I \quad (2.3)$$

เมื่อ	V_1	คือ	แรงดันในสายดิน (kV)
	Z_{total}	คือ	เสิร์จอิมพีแดนซ์รวม (Ω)
	I	คือ	กระแสฟ้าผ่า (kA)

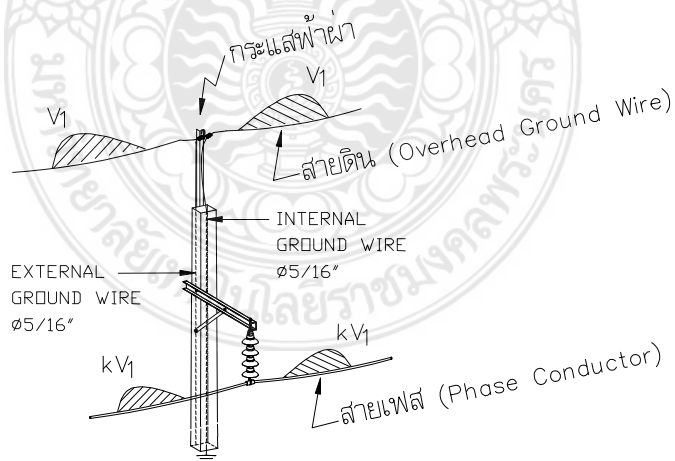
โดยเสิร์จอิมพีแดนซ์รวม คำนวณได้จากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินและเสาขนานกัน

$$Z_{\text{total}} = \frac{Z_G \cdot Z_T}{Z_G + 2Z_T} \quad (2.4)$$

เมื่อ Z_G คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน (Ω)
 Z_T คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา (Ω)



รูปที่ 2.10 การเกิดแรงดันเกินเมื่อฟ้าผ่าลงสายดินของระบบส่ง 69 KV



รูปที่ 2.11 การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเมื่อฟ้าผ่าลงสายดินของระบบส่ง 69 KV

แรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วย คำนวณได้จากสมการที่ (2.5) โดยแรงดันคร่อมฉนวน ขึ้นอยู่กับแรงดันเกินในสายดิน ซึ่งมีผลมาจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา และกระแสฟ้าผ่า

$$V_{ins} = V_1 - V_p = (1 - k) \cdot V_1 \quad (2.5)$$

เมื่อ V_{ins} คือ แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย

หากพิจารณาเฉพาะแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในสายดิน และแรงดันเกินเหนี่ยวนำในสายเฟส จะทำให้การเกิดวาบไปตามผิวฉนวนของลูกถ้วยนั้นเกิดขึ้นได้ง่าย ซึ่งในทางปฏิบัติ ผลของการเกิดแรงดันเกินยังมีในส่วนของความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาเป็นปัจจัยหนึ่งในการส่งผลต่อการเกิดด้วย เพราะฉะนั้นจึงคำนึงถึงความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาด้วย

2.4 ดัชนีสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Performance Indices)

สถิติจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (T_d) ของประเทศไทยเฉลี่ย ในพื้นที่ของจังหวัดกรุงเทพมหานคร ช่วงปี 2536-2540 ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้ T_d เท่ากับ 68 วัน ซึ่งค่าดังกล่าวจะนำไปใช้คำนวณค่าของความหนาแน่นของจำนวนลำฟ้าผ่าลงสู่ดิน (Ground Flash Density (GFD): N_g) ดังสมการที่ (2.6)

$$N_g = 0.0133T_d^{1.25} \quad (2.6)$$

เมื่อ N_g คือ ความหนาแน่นของจำนวนลำฟ้าผ่าลงสู่ดิน (flashes/km²/yr)
 T_d คือ จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (วัน/ปี)

ตารางที่ 2.1 สถิติจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของประเทศไทยเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2536-2540

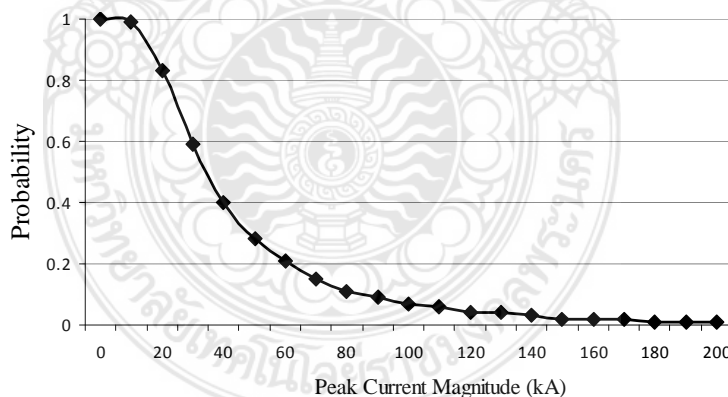
สถานีตรวจวัด	จำนวนวันฝนตกเฉลี่ยต่อปี(T_d)	ความหนาแน่นฟ้าผ่า (ครั้งต่อตารางกิโลเมตรต่อปี)
กรุงเทพฯ	68	2.604
ท่าเรือคลองเตย	56	2.043
สนามบินดอนเมือง	55	1.997

ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด โดยข้อมูลเหล่านี้ค่าที่ได้เป็นไปตามพื้นที่และวิธีการตรวจวัด แต่สามารถแสดงในรูปสมการอย่างง่ายของขนาดกระแสฟ้าผ่าได้ จากการวัดในภาคสนามเกินกว่ากระแสค่ายอด สำหรับในประเทศไทยจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ซึ่งการกระจายสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย เป็นไปตามรูปที่ 2.12 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 ได้ดังนี้

$$P(I) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{I}{M}\right)^B\right)} \quad (2.7)$$

- เมื่อ $P(I)$ คือ ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%)
 I คือ กระแสฟ้าผ่าค่ายอด (kA)
 M คือ กระแสฟ้าผ่าค่ามีฐานเท่ากับ 34.4 kA
 B คือ ค่าคงที่สำหรับประเทศไทยเท่ากับ 2.5

จากสมการที่ 2.7 เมื่อนำมาแสดงในรูปกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การกระจายความน่าจะเป็นสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย

การเกิดฟ้าผ่าที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นปัจจัยที่สำคัญ ที่จะใช้ในการคำนวณอัตราความล้มเหลวในระบบ ไฟฟ้ากำลัง สายส่งและสายป้อน สามารถป้องกันการถูกฟ้าผ่าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการติดตั้ง สายล่อฟ้าเหนือสายเฟส เพื่อลดแรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากฟ้าผ่า ในทางปฏิบัติ มุมป้องกันจะใช้ที่ 30 องศา สำหรับทาวเวอร์ที่มีความสูง 30 เมตรขึ้นไป มุมนี้เป็นมุมป้องกัน ถึงแม้การออกแบบการประสานสัมพันธ์ ทางฉนวนสำหรับสายส่งและสายป้อนอากาศในพื้นที่ของการไฟฟ้านครหลวง จะทำตามมาตรฐานของ การไฟฟ้านครหลวง ลูกถ้วยต้องสามารถทนแรงดันเนื่องจากฟ้าผ่าได้ กระแสสูงสุดที่ลูกถ้วยจะสามารถทน ได้ ก่อนที่จะเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ถูกเรียกว่ากระแสวิกฤต สำหรับอัตราการเกิดวาบไฟตามผิว ย้อนกลับ ถูกคำนวณจากสมการที่ (2.11) และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของ สายดินป้องกัน (Shielding Failure Flashover Rate: SFFOR) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.13)

2.4.1 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวทั้งหมด (Total Flashover Rate: TFOR)

2.4.1.1 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่ไม่มีสายดินซึ่งในอากาศ

อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่ไม่มีสายดินซึ่งในอากาศ ได้จากผลรวมของ สองส่วน คือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟสโดยตรง (Direct Lightning Failure Flashover Rate: DLFFOR) และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิว ที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส เนื่องจากฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่ง (Indirect Lightning Failure Flashover Rate: ILFFOR) โดย TFOR สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.8)

$$TFOR = DLFFOR + ILFFOR \quad (2.8)$$

เมื่อ	TFOR	คือ	อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวทั้งหมด (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
	DLFFOR	คือ	อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟสโดยตรง (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
	ILFFOR	คือ	การเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส เนื่องจาก ฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่ง (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)

2.4.1.2 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่มีสายดินซึ่งในอากาศ

อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่มีสายดินซึ่งในอากาศ ได้จากผลรวมของสาม ส่วน คือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายดินซึ่งในอากาศ ทำให้เกิดวาบไฟตามผิว ย้อนกลับ (Back Flashover Rate: BFOR) อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟส ซึ่งเกิด จากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (Shielding Failure Flashover Rate: SFFOR) อัตราการเกิดวาบไฟ ตามผิว ที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส เนื่องจากฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่ง (Indirect Lightning Failure Flashover Rate: ILFFOR) และ TFOR สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.9)

$$TFOR = BFOR + SFFOR + ILFFOR \quad (2.9)$$

เมื่อ BFOR คือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
 SFFOR คือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟส ซึ่งเกิดจากความ
 ล้มเหลวของสายดินป้องกัน (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)

แต่เนื่องจากค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส เนื่องจากฟ้าผ่าลง
 ดินใกล้แนวสายส่งในสมการที่ (2.9) นั้น โดยทั่วไปจะมีค่าน้อยมากจึงสามารถตัดทิ้งได้ดังนั้นสมการที่
 (2.9) จะลดรูปเป็นดังสมการที่ (2.10)

$$TFOR = BFOR + SFFOR \quad (2.10)$$

2.4.2 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate: BFOR)

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดินที่หัวเสาไฟฟ้าคอนกรีต กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะกระจายลงสู่ดิน และอีกส่วน
 หนึ่งจะไหลไปตามสายล่อฟ้าไปยังเสาข้างเคียงในลักษณะของคลื่น และเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งทำให้เกิด
 การหักล้าง หรือเสริมกันกับแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นบนยอดเสา ทำให้เกิดแรงดันในสายดิน (V_1) และเกิด
 เหนี่ยวนำในสายเฟส (V_p) ซึ่งจะมีค่าประมาณ 20-30 % ของแรงดันเกินในสายดิน ทำให้มีแรงดันคร่อม
 พวงฉนวนลูกถ้วย เกิดขึ้นตามสมการที่ (2.5) โดยแรงดันคร่อมฉนวนนี้ ขึ้นอยู่กับแรงดันเกินในสายดิน
 ซึ่งมีผลมาจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา และค่ากระแสฟ้าผ่า

ถ้าแรงดันเกินในสายดินและแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในสายเฟสมีค่าแตกต่างกันมากกว่าค่าความ
 คงทนของฉนวนลูกถ้วย จะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover) ของฉนวนลูกถ้วย และ
 อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดไฟฟ้าดับต่อมา ซึ่งในทางปฏิบัติ แรงดันเกินที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความต้านทาน
 ดิน และระยะห่างระหว่างเสาด้วย สำหรับสมการที่ใช้คำนวณหาอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ
 จะเป็นตามสมการที่ (2.11) ดังนี้

$$BFOR = P(I \geq I_c) \times N_L \quad (2.11)$$

$$N_L = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (2.12)$$

เมื่อ BFOR คือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
 $P(I \geq I_c)$ คือ ความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่า I สูงกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต (%)
 h คือ ความสูงเฉลี่ยของสายดินป้องกัน (เมตร)
 N_L คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกัน (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
 b คือ ระยะห่างระหว่างสายดิน (เมตร)

2.4.3 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (Shielding Failure Flashover Rate: SFFOR)

อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.12) โดยประกอบไปด้วย จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกัน คูณกับผลคูณของความน่าจะเป็นสะสม ที่กระแสฟ้าผ่า I น้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤตและความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่า I สูงกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต

$$SFFOR = N_f \times P(I \leq I_p) \times P(I > I_c) \quad 2.13$$

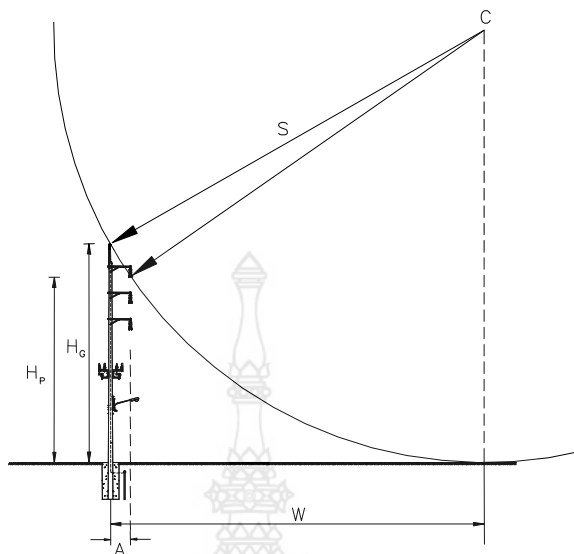
เมื่อ	SFFOR	คือ	อัตราการเกิดวาบไฟตามผิว เนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
	$P(I \leq I_p)$	คือ	ความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่า I น้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต
	h	คือ	ความสูงเฉลี่ยของสายดินป้องกัน (เมตร)
	b	คือ	ระยะห่างระหว่างสายดิน (เมตร)

2.4.3.1 การป้องกันสายเฟสอย่างมีประสิทธิภาพ (Effective Shielding)

การพิจารณาว่า สายดินป้องกันสามารถรับฟ้าผ่าได้หรือไม่นั้น อาจพิจารณาจากรูปแบบการติดตั้งสายดินป้องกันและสายเฟส สัมพันธ์กับระยะฟ้าผ่า (Striking Distance) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 รูปวงกลมในรูป จะมีรัศมีเท่ากับระยะฟ้าผ่า ถ้ากระแสฟ้าผ่ามีค่าสูง ระยะฟ้าผ่าก็จะมีค่ามาก ดังนั้น เมื่อเขียนวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะฟ้าผ่า ใ้ห้วงกลมสัมผัสกับดินและผ่านสายดิน ถ้าสายเฟสอยู่นอกวงกลม แสดงว่าไม่ถูกฟ้าผ่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า สายดินสามารถป้องกันไม่ให้ฟ้าผ่าลงสายเฟสได้ ถ้ากระแสฟ้าผ่ามีค่าต่ำ ระยะฟ้าผ่าก็มีค่าน้อย ขนาดรัศมีวงกลมก็มีค่าน้อย ทำให้โอกาสที่สายเฟสอยู่ในวงกลมมีมาก นั่นคือ แม้มีสายดินอยู่ด้านบนแล้ว ยังมีโอกาสที่จะเกิดฟ้าผ่าด้วยกระแสที่พิจารณาองสายเฟสได้

กระแสฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าวิกฤต (VCFO) ที่จะทำให้อนวนเกิดวาบไฟที่ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบนั้น เรียกว่า กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ในการวิเคราะห์หาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต สามารถทำได้โดยใช้สมการที่ 2.14 คำนวณหารัศมีวงกลมที่สัมผัสดิน และผ่านทั้งสายเฟสและสายดิน ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และหากระแสฟ้าผ่าที่มีระยะฟ้าผ่าดังกล่าวได้ ตามสมการที่ 2.16

ด้วยรูปแบบของเสาการจัดเรียงสายเฟสและสายดิน ระยะฟ้าผ่าและระยะแนวราบระหว่างระหว่างสายดินและศูนย์กลางของทรงกลมกำลัง



รูปที่ 2.13 ระยะฟ้าผ่าและระยะแนวราบระหว่างการกระจายและจุดศูนย์กลางทรงกลมกึ่งที่จุด C

$$S = \frac{1}{2} \left[H_G + H_P + A \left(\frac{2W - A}{H_G - H_P} \right) \right] \quad (2.14)$$

$$W = \frac{H_G A + \sqrt{H_G H_P \left(A^2 + (H_G - H_P)^2 \right)}}{H_G - H_P} \quad (2.15)$$

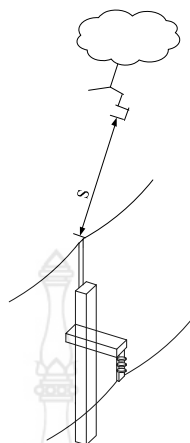
- เมื่อ S คือ ระยะฟ้าผ่าที่น้อยที่สุดที่ฟ้าจะผ่าลงสายดินแทนสายเฟส (เมตร)
W คือ ระยะห่างระหว่างสายดินและจุดศูนย์กลางทรงกลมกึ่ง (เมตร)
 H_G คือ ความสูงของสายดิน (เมตร)
 H_P คือ ความสูงของสายเฟส (เมตร)
A คือ ระยะห่างระหว่างสายดินกับสายเฟสตามแนวระดับ (เมตร)
S คือ ระยะฟ้าผ่าที่น้อยที่สุดที่ฟ้าจะผ่าลงสายดินแทนสายเฟส (เมตร)

2.4.3.2 ระยะเวลาฟ้าผ่า

ระยะเวลาฟ้าผ่า หมายถึง ระยะเวลาทางระหว่างลำฟ้าผ่านำทาง และจุดที่ภาคพื้นดินหรือวัตถุอื่นๆ เริ่มเกิดดิสชาร์จ แสดงในรูปที่ 2.13 ถึง 2.15 ระยะดังกล่าวขึ้นอยู่กับประจุบนก้อนเมฆหรือกล่าวในอีกแง่หนึ่งคือขึ้นอยู่กับกระแสฟ้าผ่า รูปที่ 2.13 แสดงระยะเวลาฟ้าผ่าเป็นระยะระหว่างลำฟ้าผ่านำทางและเสาส่ง ปกติฟ้าผ่าจะลงมาจากก้อนเมฆโดยยังไม่ทราบว่าจะลงตรงจุดใดที่พื้นดิน แต่จะเกิดดิสชาร์จและเคลื่อนที่ลงตามทางมาเรื่อยๆ เมื่อลำฟ้าผ่าใกล้พื้นดิน และจะเริ่มดิสชาร์จที่ภาคพื้นดินเนื่องจากสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดอื่น จึงจะทราบว่าฟ้าผ่าลงที่จุดใด รูปที่ 2.14 แสดงระยะเวลาฟ้าผ่าสั้นเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆมีน้อย ลำฟ้าพ่นำทางจึงเคลื่อนที่ลงมาจนเข้าใกล้ภาคพื้นดินจึงเริ่มเกิดดิสชาร์จที่หัวเสา ระยะ S1 ในรูปนี้มีค่าน้อยเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆที่มีค่าน้อยหรือกล่าวในอีกแง่หนึ่งได้ว่า กระแสฟ้าผ่ามีค่าต่ำ รูปที่ 2.15 ระยะเวลาฟ้าผ่ามากเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆมีค่ามาก ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่ภาคพื้นดินได้ง่ายกว่าจะเห็นได้จาก S2 ในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ระยะเวลาฟ้าผ่าสั้น



รูปที่ 2.16 ระยะฟ้าผ่ายาว

โดยทั่วไประยะฟ้าผ่าผ้านั้น อยู่ระหว่าง 20 เมตร ถึง 200 เมตร โดยระยะฟ้าผ่าสามารถนำมาหาค่ากระแสฟ้าผ่าที่ต่ำที่สุดที่สายดินสามารถป้องกันสายเฟสได้ โดยแทนค่าลงในสมการที่ (2.16)

$$S = F \times I_p^b \quad (2.16)$$

- เมื่อ S คือ ระยะฟ้าผ่า (เมตร)
 I_p คือ ระยะห่างระหว่างสายดินและจุดศูนย์กลางทรงกลมกึ่ง (เมตร)
 F, b คือ ค่าคงที่ที่ได้จากการทดสอบหรือการทดลองภาคสนามของนักวิจัย

2.5 แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ

แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า อาจเกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำได้เช่นกัน แรงดันดังกล่าวนี้ อาจจะมีค่าไม่สูงเหมือนเช่นที่เกิดในระบบสายส่งกำลังแรงสูง แต่ก็อาจมีค่าสูงมากพอที่จะทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านเรือน อาคารสำนักงาน หรือโรงงานอุตสาหกรรม เพราะอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าจำพวกนี้มีค่าการฉนวนที่ต่ำ ไม่อาจจะทนแรงดันเกินที่มีค่าเป็นสิบล้อ กิโลโวลต์ได้ โดยเฉพาะอุปกรณ์จำพวกอิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ยิ่งมีความไวต่อแรงดันเกินเป็นอย่างยิ่งย่อมก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เหล่านี้ได้ง่าย

2.6 อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คน

ตามธรรมชาติโดยมากแล้วฟ้าผ่าจะผ่าลงสู่ที่สูงเด่นกว่าสิ่งอื่น เช่น สิ่งก่อสร้างหรืออาคารสูง ต้นไม้สูงเด่น หรือแม้แต่กระท่อมปลายนาที่ไม่มีต้นไม้ หรือสิ่งอื่นในบริเวณใกล้เคียงที่สูงกว่า หรือคนที่ยืนในที่โล่งแจ้ง อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแก่คนที่อยู่นอกอาคารบ้านเรือนนั้น มีโอกาสที่จะเป็นไปได้หากไปยืนในที่กลางแจ้ง เช่น ท้องทุ่งนา สนามบริเวณกว้างปราศจากต้นไม้ ในแม่น้ำกว้างใหญ่ ในทะเล หรืออยู่ในเส้นทางผ่านของกระแสฟ้าผ่าได้โดยสะดวก เช่น ยืนพิงต้นไม้ที่ถูกฟ้าผ่า เนื่องจากฟ้าผ่าลงต้นไม้ กระแสฟ้าผ่าไหลลงมาตามต้นไม้ลงสู่ดินนั้น ทำให้ต้นไม้มีศักย์ไฟฟ้าสูงมากพอ จึงเกิดสปาร์กผ่านอากาศเข้าหาคนได้

2.7 อันตรายจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส

ผลของฟ้าผ่าที่มีอันตรายต่อคนและสัตว์ ซึ่งอันตรายจากฟ้าผ่านอกเหนือจะได้รับจากฟ้าผ่าโดยตรงแล้ว ในทางอ้อมยังสามารถได้รับอันตรายจาก แรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัส อันเป็นผลมาจากกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่พื้นดิน ซึ่งมีความต้านทาน การออกแบบระบบรากสายดินที่ดีและถูกต้อง จะต้องคำนึงถึงการป้องกันอันตรายจากแรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัสสองประการนี้แก่คนและสัตว์

เมื่อมีกระแสไหลลงสู่ดิน แผ่กระจายออกไปในดิน ซึ่งมีค่าความต้านทาน เป็นผลให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างสองจุดบนพื้นดิน โดยที่สองจุดมีระยะห่างเท่ากับช่วงก้าวของคน เกิดความต่างศักย์ระหว่างเท้าซ้ายกับเท้าขวาในขณะที่ก้าวเดิน กรณีคนจะคิดเท่ากับ 1 เมตร หรือระหว่างเท้าหน้ากับเท้าหลังของสัตว์ เรียกว่า แรงดันช่วงก้าว ส่วนแรงดันสัมผัส หมายถึง ความต่างศักย์ระหว่างตัวนำ หรือ โครงสร้างที่กระแสไหลผ่านลงไปสู่รากสายดิน ที่คนมีโอกาสไปสัมผัสถึงกับดินที่ยืนอยู่ แรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสจะเป็นอันตรายแก่คนและสัตว์หรือไม่ ก็ขึ้นอยู่กับแรงดันช่วงก้าวหรือแรงดันสัมผัสนั้น ทำให้กระแสไหลผ่านร่างกายเกินขีดกระแสอันตรายหรือไม่

2.8 หลักการฟ้าผ่าลงที่ตำแหน่งใด

เมื่อเกิดฟ้าผ่า ถ้าฟ้าผ่าจะวิ่งไปตามแนวที่หัวนําร่องได้กรุยทางไว้ ด้วยการเกิดแตกตัวของอากาศ และหัวนําร่องเคลื่อนที่เป็นจิ้งหะก้าวก้าวเข้าใกล้พื้นโลก จนถึงระยะหนึ่งจะทำให้เกิดสตรีมเมอร์จากวัตถุหรือสิ่งปลูกสร้างบนพื้นโลก มีแนวและทิศทางเข้าหาหัวนําร่องที่วิ่งลงมา เป็นการชักจูงหรือล่อให้หัวนําร่องวิ่งเข้าหา ระยะห่างช่วงสุดท้ายที่หัวนําร่องถูกล่อหรือชักจูงได้ด้วยลักษณะของวัตถุหรือสิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนดิน จนทำให้เกิดฟ้าผ่าลง ณ จุดนั้น คือ ฟ้าจะผ่าลงจุดที่ใกล้ที่สุดเมื่อหัวนําร่องมาอยู่ในระยะฟ้าผ่า จึงกล่าวได้ว่า ฟ้าจะผ่าลงจุดใดขึ้นอยู่กับระยะฟ้าผ่า หรือขนาดกระแสฟ้าผ่านั่นเอง

บทที่ 3

การออกแบบและสร้าง

3.1 บทนำ

การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบส่ง จะทำการประเมินสมรรถนะโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประเมิน เนื่องจากไม่สามารถทดสอบระบบส่งด้วยสถานการณ์ฟ้าผ่าจริงได้ เพราะไม่สามารถกำหนดหรือควบคุมสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นจริงที่ซึ่งจะนำมาใช้ในการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการที่จะประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบส่ง โดยการเริ่มนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้งานนั้น ในช่วงต้น ค.ศ.1960 ได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้งานอย่างกว้างขวางทั่วโลก การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า จึงเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากระบบอนาล็อกมาใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ Dr.Dommel แห่งมหาวิทยาลัย Munich ประเทศเยอรมัน ได้เริ่มพัฒนาโปรแกรมสำหรับการคำนวณภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้าแบบดิจิทัลขึ้น โดยอาศัยงานของ Schnyder-Bergeron เป็นวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกทาง Benneville Power Administration (BPA) ซึ่งจัดตั้งโดยกระทรวงพลังงานของสหรัฐ มีความสนใจในวิทยานิพนธ์นี้ จึงได้เชิญ Dr. Dommel มาเป็นนักวิจัย เพื่อทำการพัฒนาโปรแกรมหดงกล่าว จนในปี ค.ศ.1968 Transient Program Model ซึ่งมีประมาณ 4,000 บรรทัด ก็เสร็จสมบูรณ์ออกมาเผยแพร่

ต่อมาในปี ค.ศ. Dr.Dommel ลาออกจาก BPA โดยมี Dr.W.Scott-Meyer เป็นผู้รับผิดชอบช่วงต่อ ในการพัฒนาโปรแกรม จนในปี ค.ศ.1976 ก็มีนักวิจัยอีกหลายคนเข้าร่วมในการพัฒนาโปรแกรม เช่น Dr.Tse-Huei Liu และ Dr.Akihiro Ametani นอกจากนี้ Mr.L. Dube ผู้พัฒนา TACS/MODEL Dr.V. Brandwain ผู้พัฒนาโครงสร้างเครื่องจักรไฟฟ้า Prof. A. Semlyen ผู้พัฒนาโมเดลของสายส่งเข้าร่วมทำให้โปรแกรม EMTP มีความสามารถมากยิ่งขึ้น จนในช่วงทศวรรษ 1980 โปรแกรม EMTP M 31 ซึ่งมีประมาณ 100,000 บรรทัดก็เสร็จสมบูรณ์ และมีการนำไปใช้งานในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลก

การพัฒนาโปรแกรมหดงมาเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบัน โปรแกรม EMTP แตกออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ด้วยกันคือ EMTP ของ BPA DCG/EPRI และ ATP-EMTP ของ Dr.Scott-Meyer โดยโปรแกรมที่เราจะนำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบส่งในงานวิจัยนี้ คือ ATP-EMTP เป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมในการใช้วิเคราะห์สถานะชั่วคราว ซึ่งในงานวิจัยหลายๆด้านก็ได้ใช้โปรแกรมหดงนี้ในการศึกษาถึงผลกระทบต่างๆ ในสถานะชั่วคราวเช่นเดียวกัน

การใช้โปรแกรม EMTP วิเคราะห์สถานะชั่วคราว (Transient) ในระบบไฟฟ้าให้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้นั้น จำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองคุณสมบัติของอุปกรณ์และปรากฏการณ์ในระบบให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ในบางครั้งจึงมีความยุ่งยากและซับซ้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการวิเคราะห์ด้วย

3.2 หลักการทั่วไปและความสามารถของโปรแกรม ATP-EMTP

3.2.1 หลักการทั่วไป

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง หากจัดกลุ่มตามลักษณะของผลลัพธ์ที่ได้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม

3.2.1.1 การวิเคราะห์ในกรอบของความถี่ (Frequency Domain Analysis)

เป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้ผลตอบสนองแรงดัน หรือกระแสเป็นขนาด และมุมเฟส โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่จะใช้กับการวิเคราะห์ที่ระบบไฟฟ้า ที่อยู่ในสภาวะปกติ เช่น การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Analysis) หรือระบบไฟฟ้าที่กลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (Steady State) ภายหลังจากที่เกิดสภาวะชั่วคราว เช่น การคำนวณกระแสไฟฟ้าผิดพร่อง (Fault Current Analysis) เพื่อใช้ในการประสานสัมพันธ์อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า เป็นต้น

3.2.1.2 การวิเคราะห์ในกรอบของเวลา (Time Domain Analysis)

เป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้ผลตอบสนองของแรงดันหรือกระแสเป็นขนาด ในแต่ละช่วงเวลา การวิเคราะห์ในลักษณะดังกล่าวเหมาะสมกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า ที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดหรืออยู่ในสภาวะชั่วคราว เช่น การสับปลด (Switching Operation) การเกิดความผิดพร่อง (Fault) หรือการรบกวนภายนอกอื่นๆ เช่น ไฟผ่า ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถใช้แนวคิดของการวิเคราะห์เชิงความถี่ ในการวิเคราะห์หรือกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาได้

ในอดีตที่ผ่านมาเทคโนโลยียังไม่ก้าวหน้า รูปแบบของผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในเชิงเวลามักจะเป็นสมการในเชิงคณิตศาสตร์ ที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ หากระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่หรือปัญหาที่มีความซับซ้อน ก็จะต้องกำหนดสมมติฐานเป็นจำนวนมาก จนทำให้ผลตอบสนองที่ได้อาจไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวอีกแบบหนึ่งที่นิยมก็คือ Transient Network Analyzer (TNA) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่จำลองระบบไฟฟ้า โดยการย่อระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลง แล้วทำการจำลองความต้องการ แต่ TNA นั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก และการปรับเปลี่ยนมีข้อจำกัด การวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวในปัจจุบัน จึงได้ปรับเปลี่ยนไปสู่ดิจิทัลคอมพิวเตอร์มากขึ้น การวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวโดยใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์ เริ่มขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 โดยใช้เทคนิค Bewley's Lattice Diagram และวิธีของ Bergeron เทคนิคเหล่านี้สามารถใช้กับวงจรที่มีขนาดเล็ก ที่มีพารามิเตอร์ขององค์ประกอบเป็นแบบกระจาย (Distributed Parameter) หรือแบบกลุ่มก้อน (Lumped Parameter) ทั้งที่เป็นแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น ต่อมา H.W.Dommel ได้เสนอเทคนิคที่นำเอา Trapezoidal Rule และวิธีของ Bergeron สร้างเป็นอัลกอริทึมที่นำมาแก้ปัญหาภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถใช้กับวงจรข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น วิธีการดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Transient Program: EMTP) Trapezoidal Rule จะทำการแปลงสมการดิฟเฟอเรนเชียลขององค์ประกอบในวงจรข่าย ให้เป็นสมการทางพีชคณิต (Algebraic Equation) ที่เกี่ยวข้องกับแรงดัน กระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในสมการที่ (3.1)

$$[G][v(t)] = [I(t)] - [I] \quad (3.1)$$

เมื่อ	[G]	คือ	เมตริกของความนำ (Conductance)
	[V (t)]	คือ	เวกเตอร์ของแรงดัน
	[I (t)]	คือ	เวกเตอร์ของแหล่งจ่ายกระแส
	[I]	คือ	เวกเตอร์ของค่าในอดีต

แหล่งจ่ายแรงดันของวงจรขั้วส่วนมากจะต่อลงกราวด์ เพราะฉะนั้นจะสามารถแยกสมการออกเป็นสองส่วน คือ แรงดันที่ไม่ทราบค่า [ส่วน A] และแรงดันที่ทราบค่า [ส่วน B] ดังสมการที่ (3.2)

$$[V_A(t)] = [I_A(t)] - [I_A] - [G_{AB}][V_B] \quad (3.2)$$

คำตอบของภาวะชั่วคราวจะหาได้โดยใช้ Triangular Factorization ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถประยุกต์ใช้กับวงจรที่มีขนาดใหญ่ให้อยู่ในรูปอย่างง่าย อย่างไรก็ตาม พารามิเตอร์ในระบบจริง จะแปรตามความถี่ จึงต้องมีการสร้างแบบจำลองที่สามารถรองรับเงื่อนไขดังกล่าว และปัญหาอีกอย่างคือ คุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการแปรตามเวลาขององค์ประกอบ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า หรือกับดักฟ้าผ่า การแก้ปัญหาคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าว จะใช้การแทนแบบ Piecewise Linear

ในปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างจาก Trapezoidal Rule นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการจำลองภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเข้าใจอัลกอริทึมได้ง่าย แต่ข้อเสียของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างจาก Trapezoidal Rule คือ การใช้ขนาดของ Time Step ที่คงที่อาจทำให้เกิดการสั่นของสัญญาณ (Numerical Oscillation) ได้ เนื่องจากค่า Time Step กำหนดมาจากความถี่ที่ใช้ในการจำลองความถี่ของปรากฏการณ์ภาวะชั่วคราวที่เกิดขึ้น อาจเกิดทั้งความถี่สูงและความถี่ต่ำในเวลาเดียวกันแต่ต่างโหนด เพราะฉะนั้นการใช้ค่า Time Step เพียงค่าเดียว อาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดการแกว่งของสัญญาณในหลายกรณี เช่น การสวิตชิง หรือการเปลี่ยนช่วงการทำงานในขั้นตอนของ Piecewise Linear อาจทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณได้ เทคนิคต่างๆ ถูกนำมาใช้ เช่น ต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์หน่วง (Damping) เพื่อลดการเกิดการแกว่งของสัญญาณ โดยใช้ตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำ และอนุกรมกับตัวเก็บประจุ ต่อคร่อมอุปกรณ์สวิตชิงซึ่งเทคนิคที่ใช้กันอยู่มาก เช่น การต่อวงจร snubber เบอร์ (Snubber Circuit) ขนานกับสวิตซ์ ซึ่งวงจรดังกล่าวสามารถพบได้ทั่วไปในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่วนวิธีการลดการแกว่งของสัญญาณแบบอื่นๆ อาจทำได้อีกหลายวิธี เช่น ใช้เทคนิค Critical Damping Adjustment (CDA)

ขั้นตอนการแก้ปัญหาภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้าที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นหรือจุดที่เริ่มเกิดภาวะชั่วคราว การแก้ปัญหาจะเริ่มจากหาเงื่อนไขของสภาวะอยู่ตัว ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คำตอบของสภาวะอยู่ตัวของวงจรขั้วแบบเชิงเส้นที่ความถี่หนึ่งๆ หาได้จากการใช้สมการโหนดแอดมิแตนซ์ (Nodal Admittance Equation) ตามสมการที่ (3.3)

$$[Y][V] = [I] \quad (3.3)$$

เมื่อ $[Y]$	คือ	เมตริกของแอดมิตแตนซ์ (Admittance)
$[V]$	คือ	เวกเตอร์ของแรงดัน
$[I]$	คือ	เวกเตอร์ของแหล่งจ่ายกระแส

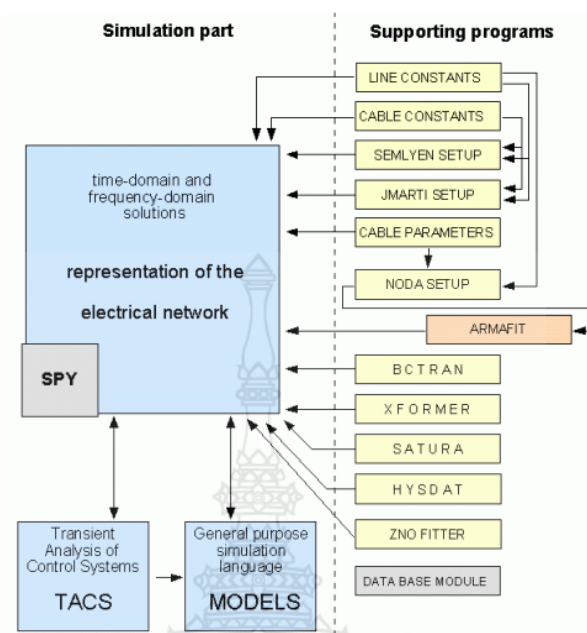
สำหรับการแทนองค์ประกอบของวงจรข่ายนั้น ในการวิเคราะห์ภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้าให้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ จำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลอง เพื่อจำลองคุณลักษณะและคุณสมบัติของอุปกรณ์และปรากฏการณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า ให้ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แต่การแทนองค์ประกอบของวงจรข่าย ให้มีความถูกต้องครอบคลุมความถี่ทุกช่วงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากคุณลักษณะทางกายภาพของแต่ละองค์ประกอบของวงจรข่าย จะมีผลโดยตรงกับภาวะชั่วคราวของปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีการจัดกลุ่มภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับการศึกษาดังกล่าวด้วยวิธี Time Domain โดยแบ่งตามช่วงความถี่ในแต่ละกลุ่มและความซับซ้อนที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ตามข้อเสนอแนะของ Cigre

3.2.2 ความสามารถของโปรแกรม ATP-EMTP

โปรแกรม ATP-EMTP พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการจำลองและวิเคราะห์เหตุการณ์ในสภาวะชั่วคราว และสภาวะอยู่ตัวในระบบไฟฟ้ากำลัง โครงสร้างหลักของโปรแกรมประกอบไปด้วย ส่วนที่ใช้ในการจำลอง (Simulation Part) และส่วนช่วยสนับสนุน (Supporting Programs) ในรูปแบบของการวิเคราะห์เชิง Time Domain และ Frequency Domain

ตารางที่ 3.1 ช่วงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า

ระดับ	ช่วงความถี่	ลักษณะรูปคลื่น	ปรากฏการณ์
1	0.1 Hz–3 kHz	Low Frequency Oscillation	แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage)
2	50/60 Hz–20 kHz	Slow Front Transient	แรงดันเกินสวิตชิง (Switching Overvoltage)
3	10 Hz–3 MHz	Fast Front Transient	แรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Overvoltage)
4	10 kHz–50 MHz	Very Fast Front Transient	การเกิดอาร์คซ้ำ (Restrike Overvoltage)



รูปที่ 3.1 EMTP-ATP Module

โปรแกรม EMTP-ATP ได้จัดเตรียมแบบจำลองอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญหลายชนิดไว้ในโปรแกรม ทำให้ผู้ใช้งานสะดวกในการสร้างแบบจำลองมากขึ้น อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิดที่มีมาให้ นั้น มีคุณสมบัติและเงื่อนไขการใช้งานที่ต่างกัน ผู้ใช้งานจำเป็นต้องเลือกใช้งานให้ถูกต้อง มิเช่นนั้นจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ผิดจากความเป็นจริง

3.3 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า

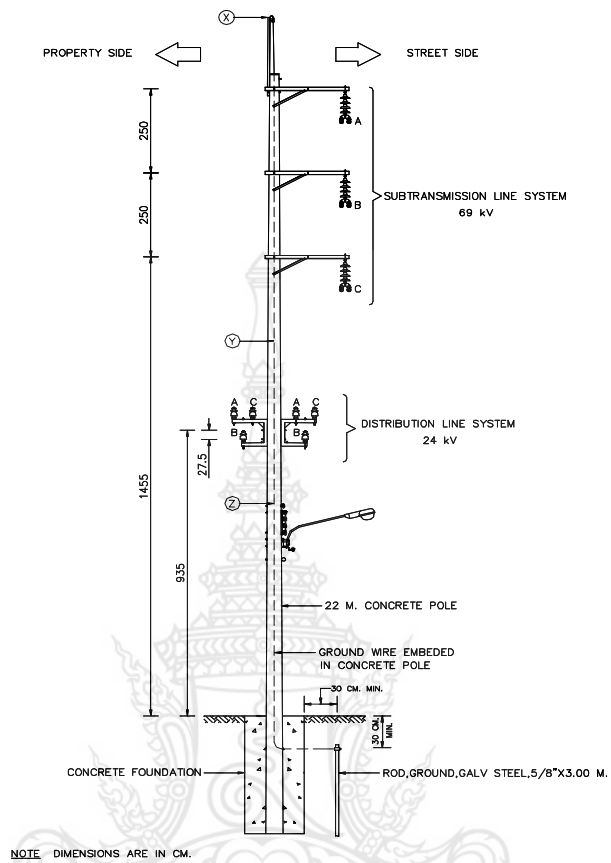
การศึกษานี้จะใช้โปรแกรม ATP-EMTP เป็นเครื่องมือจำลององค์ประกอบในระบบสายส่งและสายป้อน อันประกอบไปด้วยแบบจำลองสายส่ง แบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีต แบบจำลองลูกถ้วย แบบจำลองความต้านทานอิมพัลส์ที่ฐานเสา แบบจำลองสายตัวนำลงดินนอกเสา แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการทำวิจัยฉบับนี้ เป็นแบบจำลองที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั่วโลกสำหรับการนำแบบจำลองระบบไฟฟ้าไปใช้ในระบบของการไฟฟ้านครหลวงนั้น ยังไม่ได้มีข้อมูลการจัดทำที่ได้จากการวัดจริง เนื่องจากต้องใช้เครื่องมือและซอฟต์แวร์ที่ทันสมัย แต่ปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวง ยังไม่มีเครื่องมือดังกล่าว แต่ก็แน่ใจได้ว่าแบบจำลองที่ใช้มีความถูกต้อง เพราะได้รับการยอมรับกันทั่วโลก

3.3.1 แบบจำลองสายส่งย่อยและสายป้อนเหนือดิน

แบบจำลองสายส่งและสายป้อนเหนือดินแบบหลายตัวนำตามสภาพการใช้งานจริง สำหรับการศึกษารากฏการณ์ฟ้าผ่าผ่านนั้น แบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเหมาะสม คือ แบบจำลองที่แปรผันตามความถี่ (Frequency Dependent Line Model: J. Marti Model) อยู่ในโปรแกรม EMTP ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการใช้แบบจำลองสายส่งและสายป้อนเหนือดินแบบหลายตัวนำ แปรผันตามความถี่ในการวิเคราะห์ คือ การกำหนดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษา ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ช่วงด้วยกัน ตามตารางที่ 3.1 และค่าช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขในโปรแกรม จะต้องน้อยกว่า $1/10.f_{max}$ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดช่วงที่ทำการศึกษาไว้ที่ 10 Hz – 3 MHz ค่าช่วงเวลาไว้ที่ $1E-9$

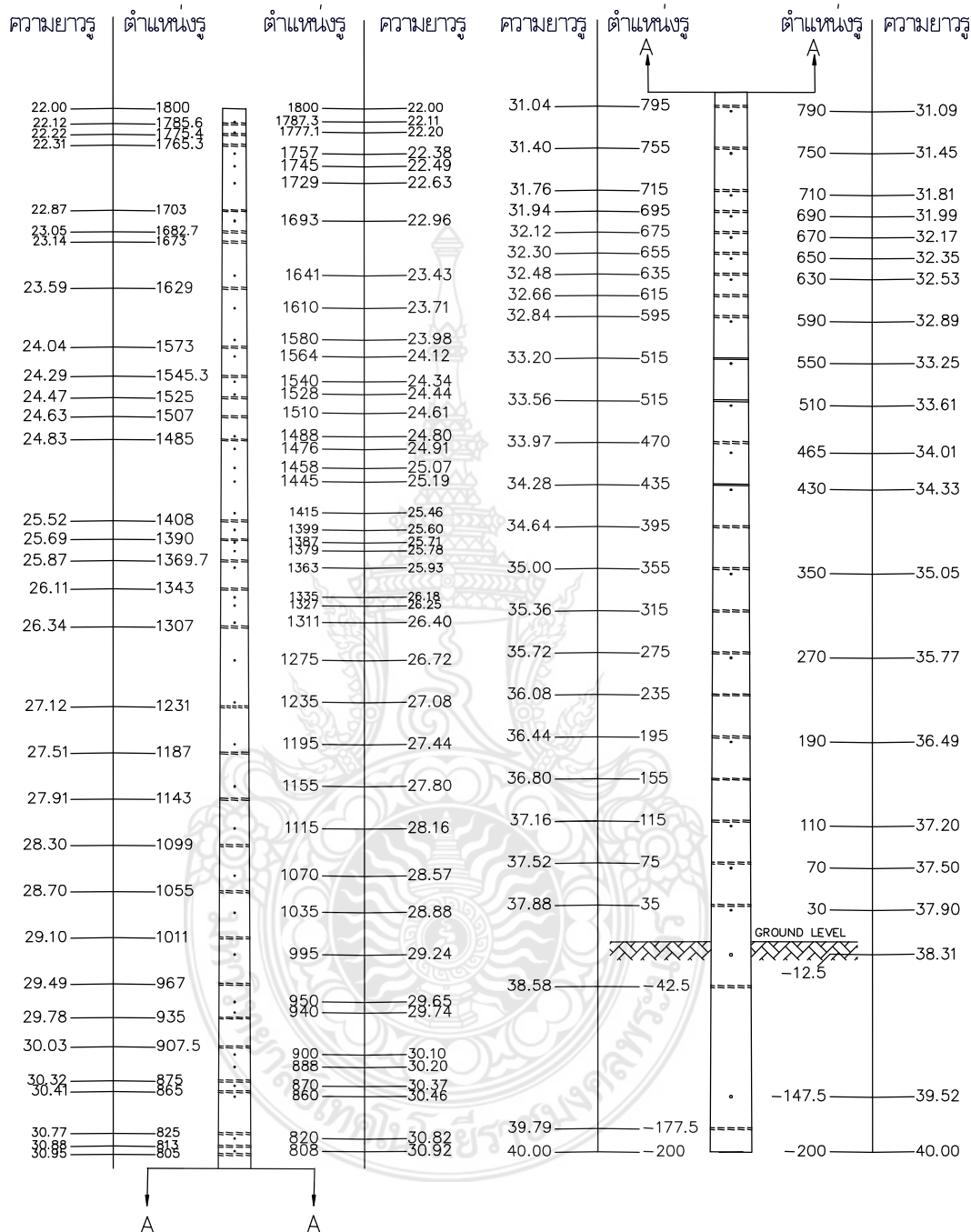
แบบจำลองสายส่งย่อยและสายป้อนเป็นแบบวงจรเดี่ยวตัวนำคู่ ที่มีการจัดวางสายเฟสในแนวตั้ง ประกอบด้วยสายตัวนำคู่ 3 เฟส และสายล่อฟ้า 1 เส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นโครงสร้างของระบบส่ง 69 kV และ 24 kV ที่ติดตั้งอยู่บนต้นเดียวกัน

สำหรับเสาคอนกรีตที่ใช้สำหรับสายส่งนั้น จะผลิตรองรับแรงดัน 69 kV จำนวน 1 วงจร สายเดี่ยวโดยมีขนาดความสูงของเสา 20 เมตร มีโมเมนต์ดัด (Bending Moment: BM) 14 ตัน-เมตร ตามรูปที่ 3.3 ต่อมาเมื่อความต้องการการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในพื้นที่ให้บริการของการไฟฟ้านครหลวง จึงจำเป็นต้องขยายระบบเพื่อรองรับความต้องการที่มากขึ้นดังกล่าว โดยการเพิ่มโมเมนต์ดัดเป็น 18 ตัน-เมตร เพื่อรองรับตัวนำของสายส่งแบบสายควบเป็น 2 ตัวนำต่อเฟส ต่อมาได้พัฒนารูปแบบของเสาไฟฟ้าคอนกรีตใหม่ เป็นขนาดความสูงของเสา 22 เมตร มีโมเมนต์ดัด 18 ตัน-เมตร ตามรูปที่ 3.4 โดยจะใช้ติดตั้งสายส่งทั้งระดับแรงดัน 115 kV และ 69 kV โดยจะใช้ปักเสาพาดสายในแนวทางตรง และเมื่อปักเสาพาดสายในแนวทางโค้งและหัวมุม ซึ่งจะต้องรับแรงดิ่งค่อนข้างมากกว่าปกติ ก็จะใช้ความสูงของเสาคอนกรีต 22 เมตรเท่าเดิม แต่มีโมเมนต์ดัด 25 ตัน-เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยต่อมาได้มีข้อบังคับของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ว่า หากปักเสาพาดสายในบริเวณที่ไม่มีทางเท้า ให้ใช้เสาคอนกรีตที่มีความสูง 23 เมตรและมีโมเมนต์ดัด 18 ตัน-เมตร ดังรูปที่ 3.6 โดยให้ปักลงดินเพิ่มอีก 1 เมตรเป็น 3 เมตรจากเดิม 2 เมตร แต่หากเป็นพื้นที่ของกรุงเทพมหานครหรือองค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) ก็จะกำหนดให้การไฟฟ้านครหลวงปักเสาที่มีความสูง 22 เมตร สำหรับในกรณีที่ต้องทำการพาดสายส่งย่อยเพื่อข้ามถนนนั้น จะใช้จำนวนเสาไฟฟ้าฝั่งละ 2 ต้น เพื่อให้โมเมนต์ดัดมีค่า 36 ตัน-เมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.2 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวงที่มีทั้งระบบ 69 kV และ 24 kV

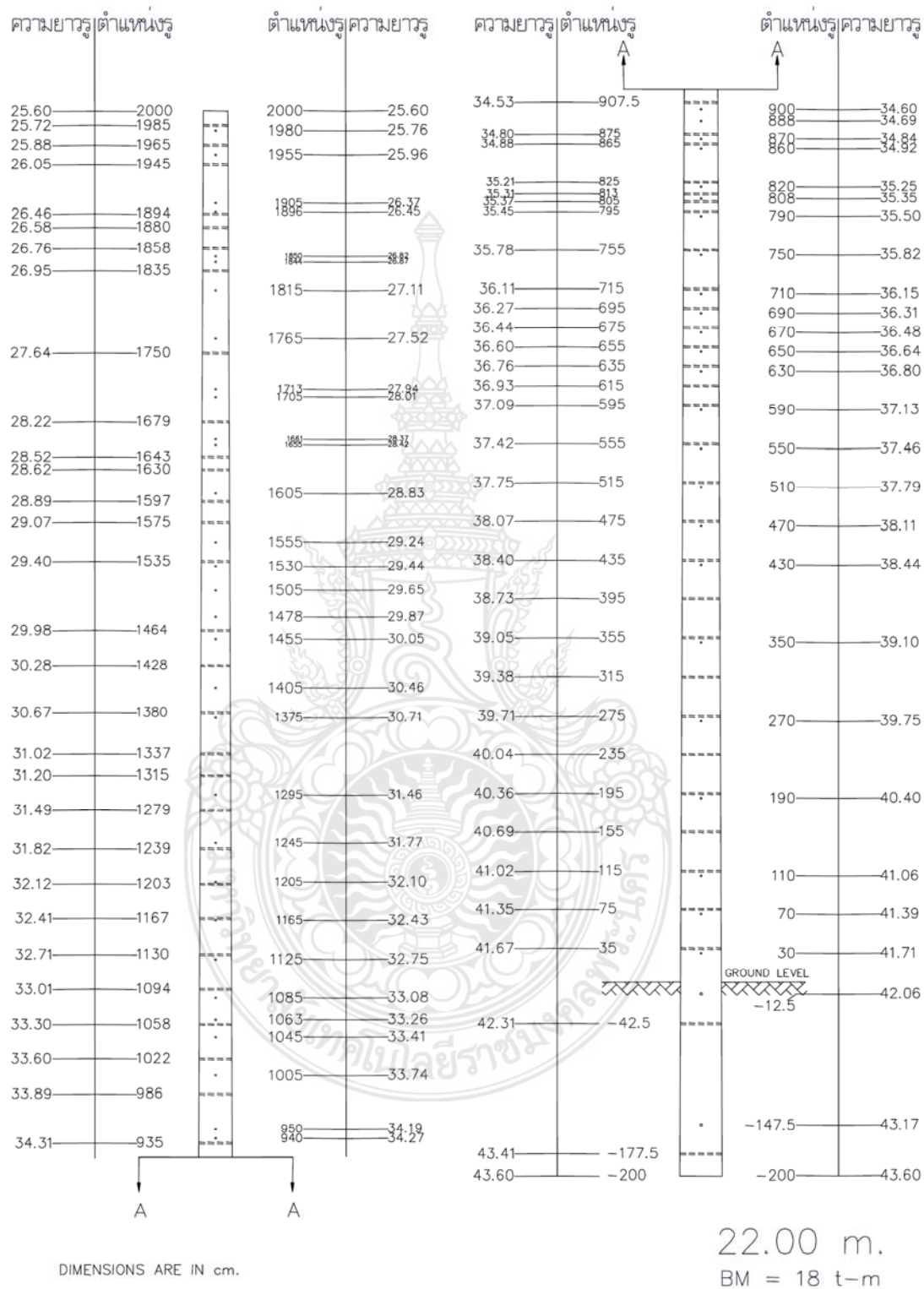




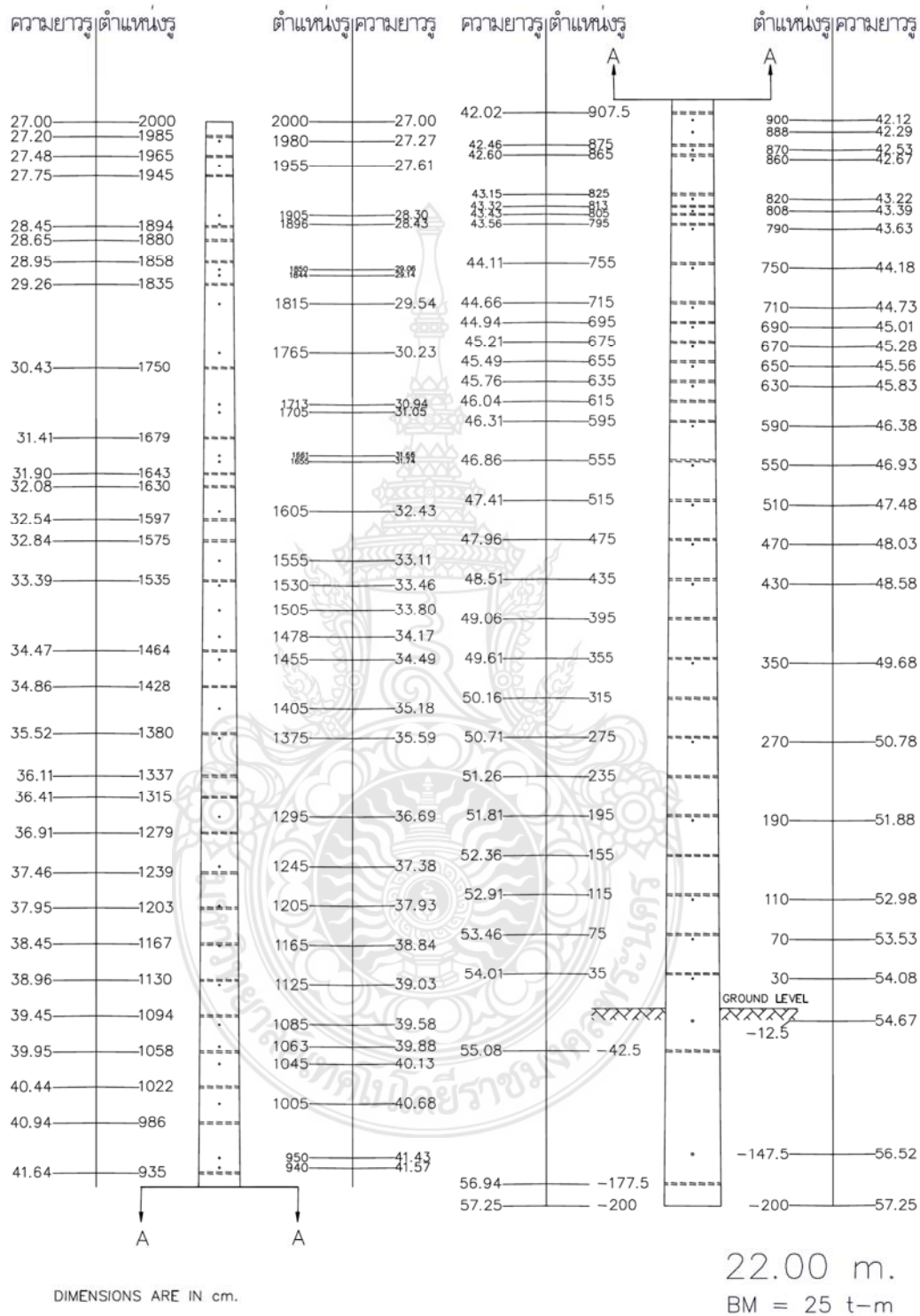
DIMENSIONS ARE IN cm.

20.00 m.
BM = 14 t-m

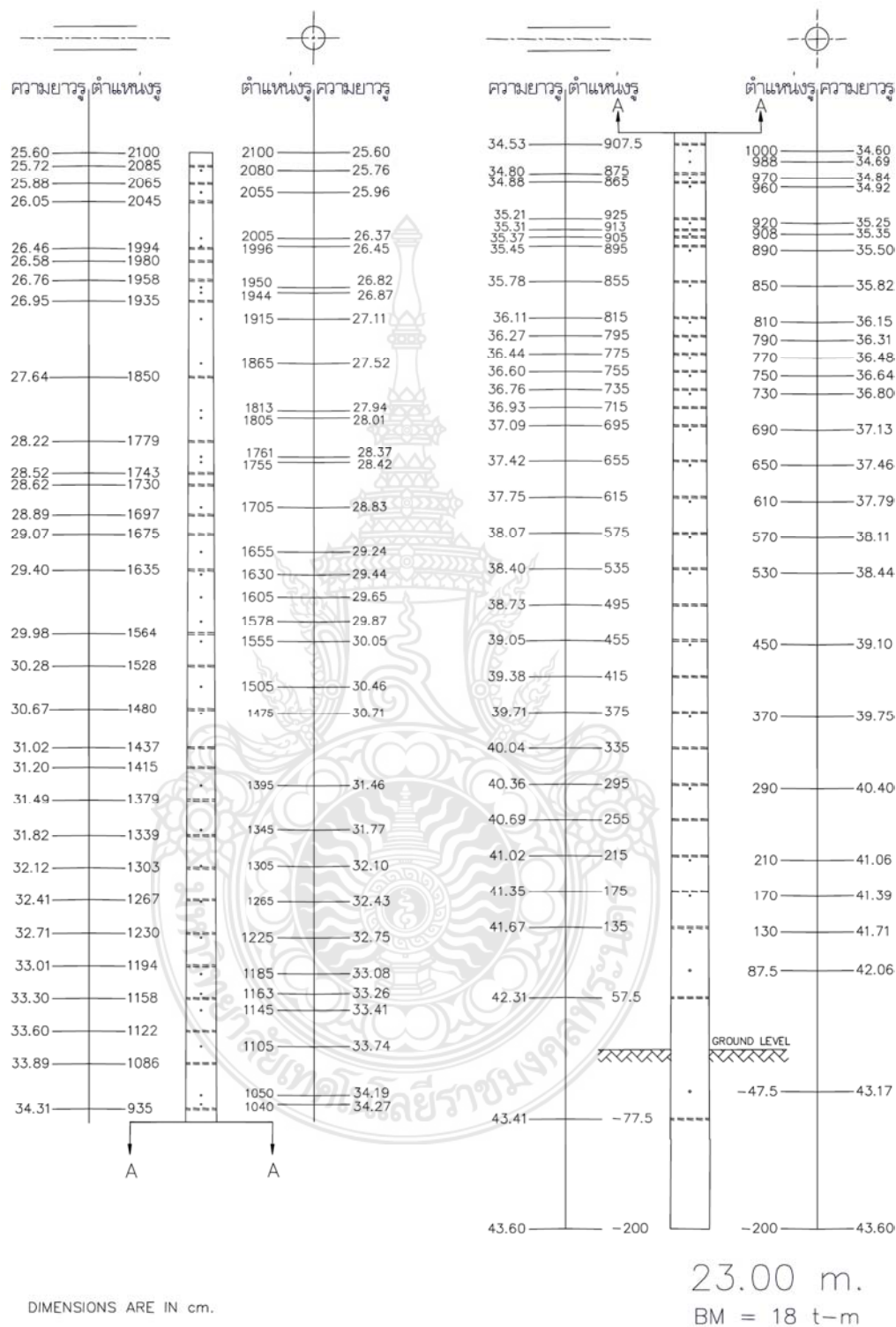
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 20 เมตร 14 ต้น-เมตร



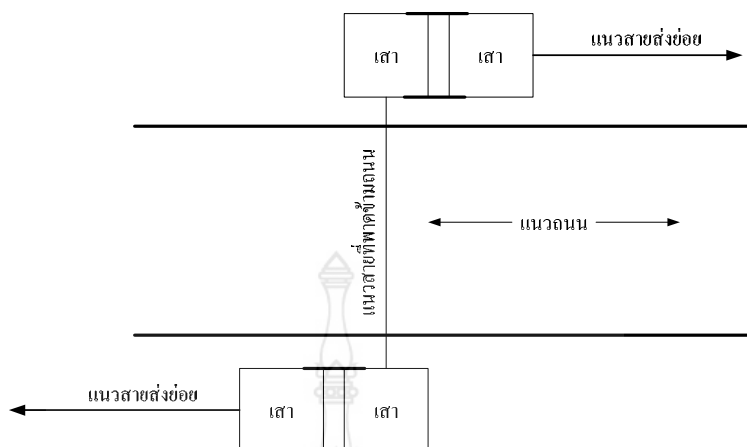
รูปที่ 3.4 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 22 เมตร 18 ตัน-เมตร



รูปที่ 3.5 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 22 เมตร 25 ต้น-เมตร



รูปที่ 3.6 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 23 เมตร 18 ต้น-เมตร



รูปที่ 3.7 การปักเสาพาดสายของสายส่งย่อยกรณีข้ามถนน

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลตัวแปรสายที่ใช้สร้างแบบจำลอง

ชนิด	ขนาด (ตร. ม.ม.)	จำนวนเส้นลวด (เส้น)	เส้นผ่านศูนย์กลาง ภายนอก (ม.ม.)	ความต้านทาน กระแสตรง (Ω /กม.)
สายล่อฟ้า	38.32	7	7.94	4.5733
สายตัวนำ 24 kV	185	30	16.8	0.16456
สายตัวนำ 69 kV	400	61	25.65	0.08883
สายตัวนำ 115 kV	400	61	25.65	0.08883

สายส่งนี้ถูกแทนด้วยแบบจำลองที่แปรผันกับความถี่ (frequency-dependent line model) โดยแต่ละช่วงความยาวสาย สามารถคำนวณหาความถี่ได้จากสมการที่ 3.4

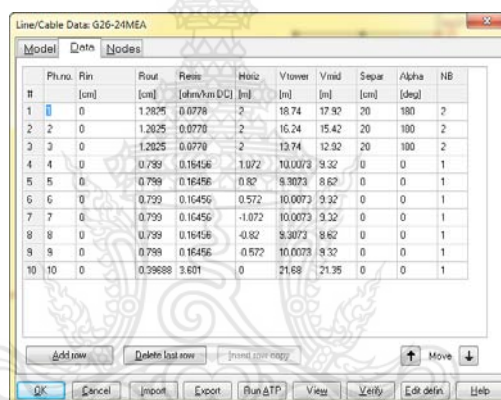
$$f = \frac{3 \times 10^8}{4l_{\text{line}}} \quad (3.4)$$

เมื่อ f คือ ความถี่สำหรับการจำลองสาย (เฮิรตซ์)
 l_{line} คือ ความยาวสาย (เมตร) [43]

ตารางที่ 3.3 ความถี่ของความยาวสายที่พิจารณา

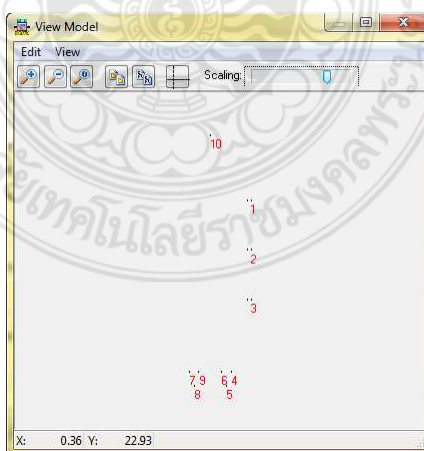
ความยาวระยะห่างเสา (เมตร)	ความถี่ที่พิจารณา (เฮิรตซ์)
40	1,875,000
80	937,500
120	625,000

ในการศึกษาเลือกใช้แบบจำลองแบบ J. Marti ลักษณะเป็นสายความสูญเสียต่ำที่ความถี่สูงโดยใช้โปรแกรม ATP Line Constant (ATPLCC) สร้างแบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยจะประกอบด้วยสายส่งย่อย 69 kV จำนวน 1 วงจร และสายป้อน 24 kV จำนวน 2 วงจร



#	Ph.no.	Rad.	Pos.	Pos.	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	0	1.2625	0.0776	2	18.74	17.92	20	180	?	
2	0	1.2625	0.0770	2	16.24	15.42	20	180	2	
3	0	1.2625	0.0770	2	13.74	12.92	20	180	2	
4	0	0.739	0.16456	1.072	10.0073	9.32	0	0	1	
5	0	0.739	0.16456	0.82	9.3073	8.62	0	0	1	
6	0	0.739	0.16456	0.572	10.0073	9.32	0	0	1	
7	0	0.739	0.16456	-1.072	10.0073	9.32	0	0	1	
8	0	0.739	0.16456	-0.82	9.3073	8.62	0	0	1	
9	0	0.739	0.16456	0.572	10.0073	9.32	0	0	1	
10	0	0.39688	3.601	0	21.68	21.35	0	0	1	

รูปที่ 3.8 แสดงการป้อนข้อมูลแบบจำลองสายส่งย่อย 69 kV และสายป้อน 24 kV



รูปที่ 3.9 แสดงรูปแบบการจัดวางสายแบบจำลองสายส่งย่อย 69 kV และสายป้อน 24 kV

จากแบบจำลองที่ผ่านการประมวลผลแล้ว ทำให้ได้ผลการคำนวณเป็นอิมพีแดนซ์เมตริก $[Z_{\text{surge-mode}}]$ และ Transformation Matrix ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาอิมพีแดนซ์เมตริก $[Z_{\text{surge-phase}}]$ ได้ตามสมการที่ (3.5)

$$Z_{\text{surge-phase}} = [T] \cdot [Z_{\text{surge-mode}}] \cdot [T]^t \quad (3.5)$$

3.3.2 แบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีต

มาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง กำหนดให้ใช้เสาคอนกรีตสูง 22 เมตร สายล่อฟ้าจะทำการต่อลงดิน โดยผ่านสายตัวนำเป็นลวดเหล็กเคลือบสังกะสี ที่ฝังอยู่ในเสาคอนกรีตทุกต้นลงดินไปยังระบบรากสายดิน ซึ่งจะมีตัวนำเป็นแท่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.875 มิลลิเมตร ความยาว 3 เมตร โดยอยู่ต่ำจากผิวดิน 0.3 เมตร รายละเอียดตามภาพที่ 3.2 และ 3.3

การหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีตนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (3.6)

$$Z_T = 60 \ln \left(\frac{H}{r} \right) + 90 \left(\frac{r}{H} \right) - 60 \quad (3.6)$$

เมื่อ Z_T คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีต (Ω)
 H คือ ความสูงของเสา (เมตร)
 R คือ รัศมีของตัวนำสายดิน (เมตร)

เมื่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีการสูญเสีย จะทำให้เกิดการหน่วง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากต้องมีงานส่วนหนึ่งที่จะต้องกระทำ เพื่อเอาชนะแรงหน่วงนี้ ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น ขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ และความนำไฟฟ้าของคอนกรีต และความถี่เป็นไปตามสมการที่ (3.7)

$$\mu = \frac{C}{\sqrt{\mu_r (\epsilon_r - j\sigma / \epsilon_0 \omega)}} \quad (3.7)$$

เมื่อ μ คือ ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในเสาไฟฟ้าคอนกรีต (เมตรต่อวินาที)
 C คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 (เมตรต่อวินาที)
 μ_r คือ Relative Permeability ของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1
 ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของตัวกลางคอนกรีตเท่ากับ 5.94

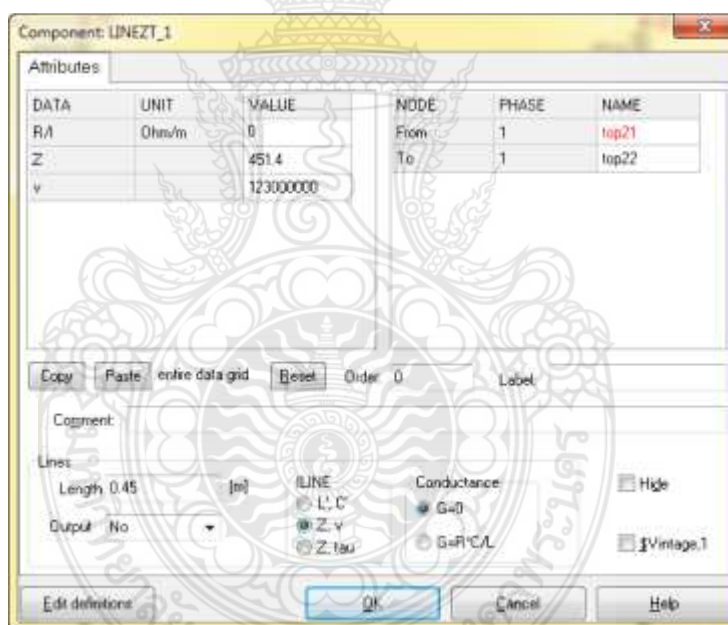
แบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีต จะทำการสร้างโดยใช้ฟังก์ชัน Line Distributed/Transp. Lines โดยมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ และความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นภายในเสาไฟฟ้าคอนกรีต สามารถคำนวณจากสมการที่ (3.6) และ สมการที่ (3.7) ตามลำดับ

งานวิจัยของ สำเร็จ ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความเร็วของคลื่นภายในคอนกรีต ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ในช่วง 25 kHz ถึง 1 MHz โดยพบว่ามีค่าตามในตารางที่ 3.4

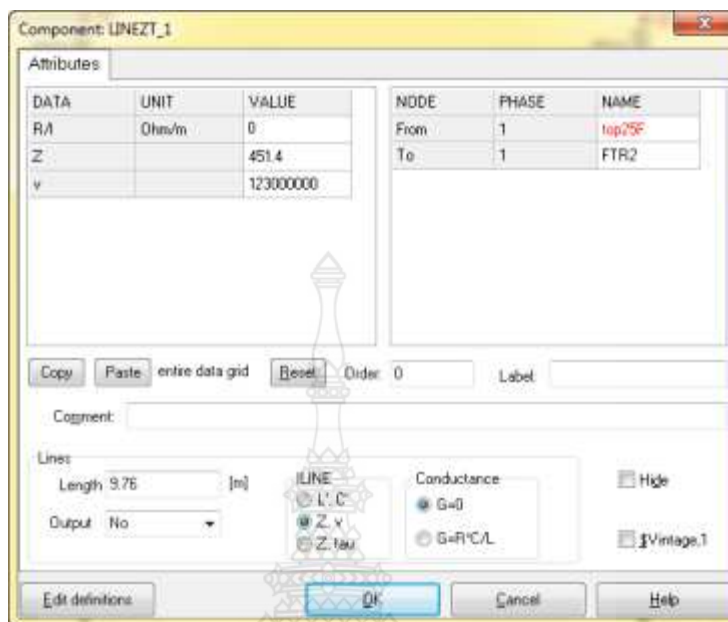
ตารางที่ 3.4 ความเร็วคลื่นภายในคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่

ความถี่ (kHz)	25	40	63	100	160	250	400	630	1,000
ความเร็วคลื่น m/ μ s)	96	100	105	109	112	115	118	120	123

การทำแบบจำลองในนี้ ความเร็วคลื่นภายในเสาคอนกรีตนี้ จะใช้ 123 m/ μ s



รูปที่ 3.10 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตส่วนบน



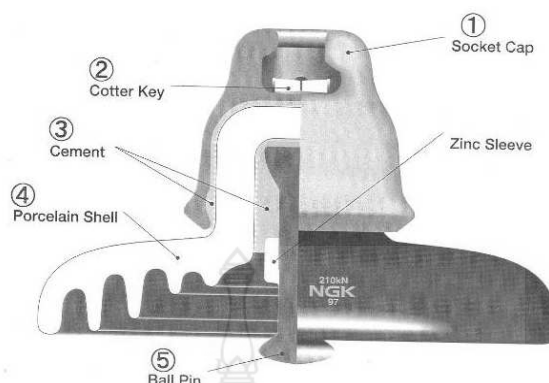
รูปที่ 3.11 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตส่วนล่าง

3.3.3 แบบจำลองพวงลูกถ้วย

มาตรฐานการก่อสร้างระบบสายส่ง 69 kV ของการไฟฟ้านครหลวง กำหนดให้ใช้ลูกถ้วยหมายเลข 52-3 ตามมาตรฐาน มอก.354 จำนวน 4 ลูก ส่วนระบบ 24 kV กำหนดให้ใช้ลูกถ้วยหมายเลข 56/57 ตามมาตรฐาน มอก.1251 จำนวน 1 ลูกโดยมีคุณลักษณะของการوابไฟตามผิว ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 คุณลักษณะวาบไฟตามผิวของฉนวนลูกถ้วยแขวนเพื่อรองรับระบบส่ง

จำนวน ลูกถ้วย	ค่าเฉลี่ยวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำ		ค่าเฉลี่ยวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต	
	ผิวแห้ง	ผิวเปียก	ผิวแห้ง	
1	80	50	1	80
2	155	90	2	155
3	215	130	3	215
4	270	170	4	270
5	325	215	5	325
6	380	255	6	380
7	435	295	7	435



รูปที่ 3.12 ลูกถ้วยแขวน 52-3

3.3.4 แบบจำลองความต้านทานอิมพัลส์

สำหรับการศึกษานี้ได้พิจารณาลักษณะของความต้านทานดิน เมื่อมีกระแสแพร่กระจายในดิน หากกระแสฟ้าผ่ามีขนาดสูงพอที่จะสนามไฟฟ้าสูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของดิน ณ จุดที่ติดตั้งตัวนำลงดินจะทำให้ดินรอบๆ ตัวนำนั้นเสียสภาพการเป็นฉนวน กลายเป็นตัวนำไฟฟ้าแทน เสมือนว่าตัวนำลงดินนั้นขยายใหญ่ขึ้น ออกเป็นรูปครึ่งทรงกลม

โดยทั่วไปค่าความต้านทานดินที่ฐานเสา ได้จากการวัดในภาคสนาม หรือได้จากการคำนวณโดยใช้สูตรตามมาตรฐาน ขึ้นอยู่กับรูปทรงของตัวนำลงดิน ค่าเหล่านี้เป็นค่าความต้านทานที่ความถี่กำลัง แต่ในความเป็นจริงความต้านทานดินที่ฐานเสาลดลง เมื่อมีกระแสฟ้าผ่าความถี่สูงไหล

มาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง ใช้ตัวนำลงดินเป็นชนิดแท่ง ความต้านทานดินที่ความถี่กำลังที่ฐานเสา หาได้จากสมการที่ (3.8)

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (3.8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง กับความต้านทานอิมพัลส์ สามารถหาได้จากสมการที่ (3.9)

$$R_i = \alpha R_0 \quad (3.9)$$

เมื่อ	R_i	คือ	ความต้านทานอิมพัลส์ (โอห์ม)
	R_0	คือ	ความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง (โอห์ม)
	A	คือ	สัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของความต้านทานดิน

เนื่องจากค่าความต้านทานดิน ขึ้นกับชนิดและลักษณะของดินเป็นหลัก และในการปฏิบัติงานภาคสนามมีความไม่แน่นอนของลักษณะของดิน ขึ้นอยู่กับพื้นที่ปฏิบัติงาน ดังนั้น ในการศึกษาโดยโปรแกรม ATP-EMTP จึงทำโดยการแปรผันค่าความต้านทานอิมพัลส์เป็นหลายค่า เพื่อพิจารณาผลของความต้านทานอิมพัลส์ ที่มีผลต่อแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า ในที่นี้แปรผันค่าดังนี้ 5, 25, 50, 75 และ 100 โอห์ม

เมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ระบบรากสายดิน จะแพร่กระจายไหลในดิน แรงดันที่รากสายดินจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้มีการนำกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นความจุของดินจะหาได้จากสมการที่ (3.10)

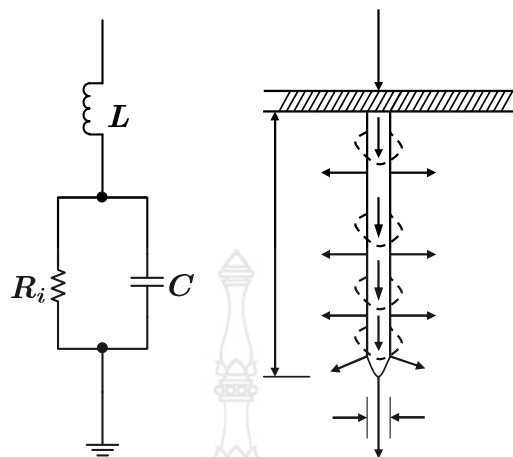
$$C = \frac{\epsilon_r l}{18 \ln \left(\frac{4l}{d} \right)} \times 10^{-9} \quad (3.10)$$

กระแสฟ้าผ่าไหลผ่านรากสายดิน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่รากสายดินดังสมการที่ (3.11)

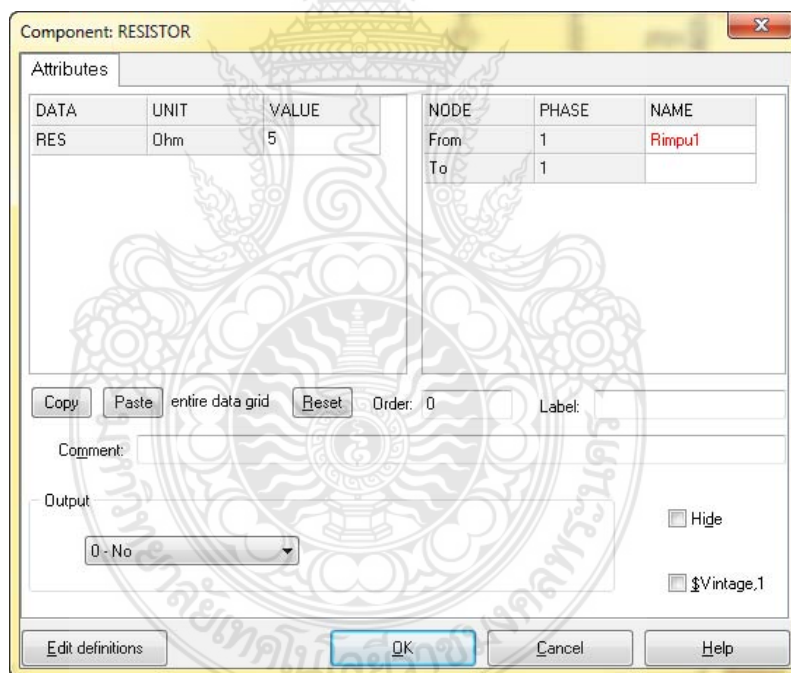
$$L = 2l \cdot \ln \left(\frac{4l}{d} \right) \times 10^{-7} \quad (3.11)$$

- เมื่อ C คือ คาปาซิแตนซ์ของรากสายดิน (ฟารัด)
 L คือ อินดักแตนซ์ของรากสายดิน (เฮนรี่)
 l คือ ความยาวของแท่งหลักดิน (เมตร)
 D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งหลักดิน (เมตร)
 ϵ_r คือ Relative Permittivity ของดิน ($\epsilon_r = 10$)

ดังนั้นวงจรสมมูลของรากสายดิน เมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ระบบรากสายดิน จะประกอบด้วย ความต้านทานอิมพัลส์ คาปาซิแตนซ์ และอินดักแตนซ์ ดังภาพที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรสมมูลของรากสายดิน



รูปที่ 3.14 การสร้างแบบจำลองความต้านทานของรากสายดินแบบแท่ง

Component: IND_RP

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
L	mH	0.00397675	From	1	FTR1
Kp	Damp. 5-10	7.5	To	1	Rimpu1

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No Hide \$Vintage.1

Edit definitions OK Cancel Help

รูปที่ 3.15 การสร้างแบบจำลองตัวเหนี่ยวนำของรากสายดินแบบแท่ง

Component: CAP_RS

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
C	๓F	0.000251462	From	1	Rimpu1
Ks	Damp 0.1-0.2	0.15	To	1	

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No Hide \$Vintage.1

Edit definitions OK Cancel Help

รูปที่ 3.16 การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุของรากสายดินแบบแท่ง

3.3.5 แบบจำลองสายดินนอกเสา

แบบจำลองสายดินภายนอกเสา จะเลือกใช้ลวดเหล็กเคลือบสังกะสีตีเกลียว ขนาด 7.93 มิลลิเมตร ขนาดลงมากับเสาไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อเข้าด้วยกันกับลวดเหล็กที่ฝังภายในเสาที่ยอดเสา สามารถคำนวณค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินภายนอก จากสมการที่ (3-12)

$$Z_{gc} = 60 \ln(h / er) - k \cdot \ln[1 + (rc / D)] \quad (3.12)$$

เมื่อ	Z_{gc}	คือ	เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสาย (โอห์ม)
	E	คือ	ลือกฐานธรรมชาติ มีค่าเท่ากับ 2.71828
	H	คือ	ความยาวสายดินนอกเสา (เมตร)
	R	คือ	รัศมีสายดินนอกเสา (เมตร)
	r_c	คือ	รัศมีเสาไฟฟ้าคอนกรีต (เมตร)
	D	คือ	ระยะห่างระหว่างผิวเสากับแท่งตัวนำลงดิน (เมตร) มีค่า 1 เมตรซึ่งเป็นระยะที่เสิร์จอิมพีแดนซ์เริ่มมีค่าคงที่

โดยคำนวณค่า k จากสมการที่ (3.13)

$$k = 0.096 \cdot r_c + 13.95 \quad (3.13)$$

เมื่อ	k	คือ	ค่าคงที่
	r_c	คือ	รัศมีเสาไฟฟ้าคอนกรีต (เมตร)

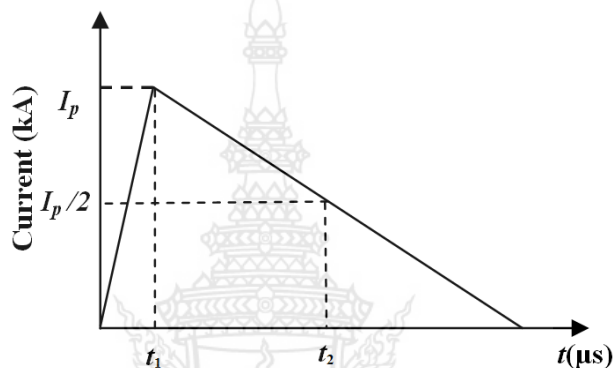
ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์สำหรับหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสา

พารามิเตอร์	ขนาด (เมตร)
ความยาวของสายดินนอกเสา	20
รัศมีเสาไฟฟ้าคอนกรีต	0.2560-0.4360
รัศมีสายตัวนำลงดินนอกเสา	0.00396
ระยะห่างจากผิวเสาสู่สายดินนอกเสา	1

สร้างแบบจำลองสายดินนอกเสา ด้วยฟังก์ชัน Line Distributed/Transp. Lines โดยมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสา ตามการคำนวณจากสมการที่ (3.12)

3.3.6 แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า

แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า จะแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ต่อขนานอยู่กับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของลํ้าฟ้าผ่า และเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ จะกำหนดให้รูปคลื่นอิมพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้น โดยมีเวลาหน้าคลื่นช่วงเวลาเป็น μs ต่อช่วงเวลาหลังคลื่นไมโครวินาที มีค่าเท่ากับ 0.25/100 μs , 1/100 , 2/100 , 3/100 , 4/100 , 10/350 μs ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งในโปรแกรม ATP-EMTP ได้เลือกใช้แบบจำลองแหล่งกำเนิดแบบ SLOP RAMP ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่ใช้ในการวิเคราะห์

Component: SLOPE_RA

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Ampere	50000	SR	1	top21
T0	s	2.5E-7			
A1	Ampere	25000			
T1	s	0.0001			
TStart	s	0			
TStop	s	0.2			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

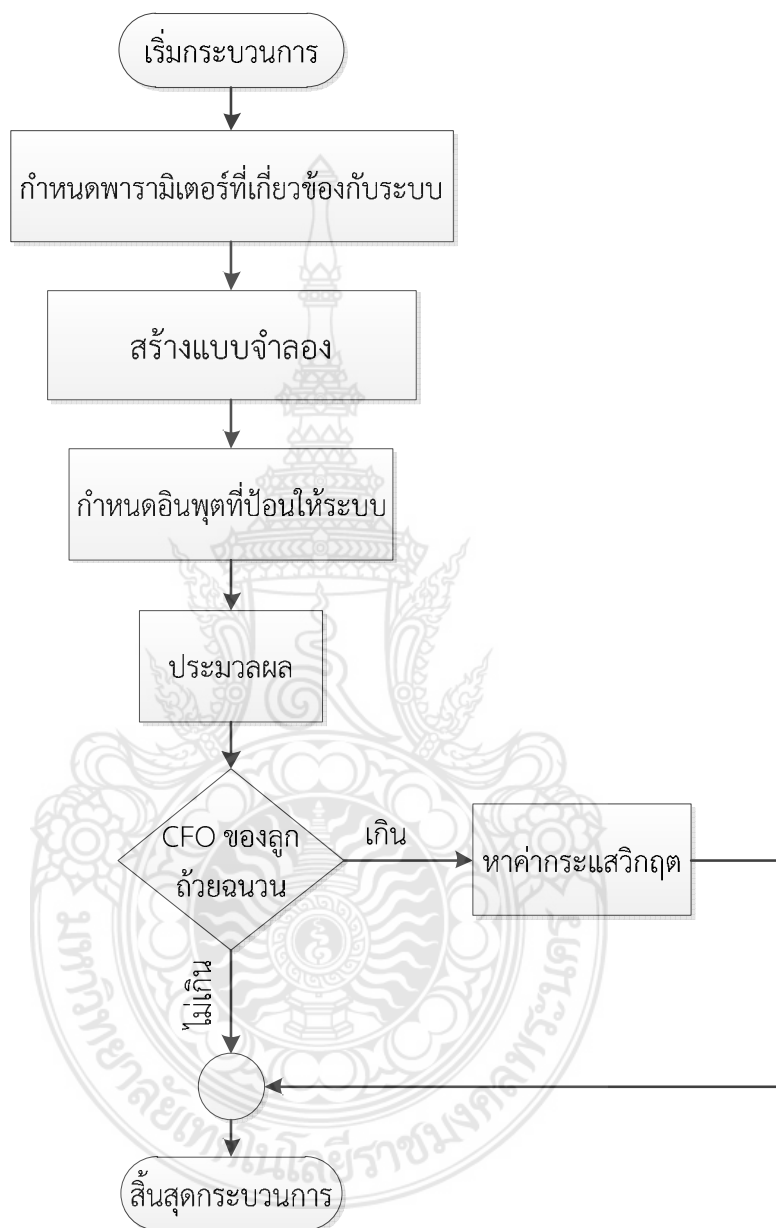
Comment:

Type of source
 Current Voltage Hide

Edit definitions OK Cancel Help

รูปที่ 3.18 การสร้างแบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสฟ้าผ่า

3.4 แผนผังการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 3.19 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 บทนำ

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยการเกิดฟ้าผ่าในแต่ละครั้งก็จะมีความรุนแรงที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของการเกิด ซึ่งฟ้าผ่าสามารถที่จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ตำแหน่งที่โดนฟ้าผ่าโดยตรง หรือแม้แต่บริเวณใกล้เคียงตำแหน่งที่โดนฟ้าผ่า ระบบไฟฟ้าก็เป็นหนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากการเกิดฟ้าผ่าเช่นเดียวกัน โดยสามารถก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินที่เป็นอันตราย ทำให้การส่งจ่ายพลังงานสูญเสียเสถียรภาพ และอาจพัฒนาความรุนแรงไปจนเกิดไฟฟ้าดับชั่วคราว หรือไฟฟ้าดับถาวร ในกรณีของผลกระทบเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ทำให้ขาดความน่าเชื่อถือเกิดขึ้นสำหรับระบบไฟฟ้าด้วยกันทั้งสิ้น

การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบส่งสำหรับงานวิจัยนี้ จะดำเนินการวิเคราะห์ด้วยการใช้โปรแกรม ATP-EMTP เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้นชั่วขณะในช่วงเวลาที่เกิดฟ้าผ่า โดยจะพิจารณาถึงผลของแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสจะสูงกว่าหรือเท่ากับกระแสสายอด กระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ในการทดลองจะพิจารณาผลการทดลองของแต่ละกรณีศึกษา โดยในแต่ละกรณีศึกษาจะให้ผลการทดลองที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับกรณีศึกษาแต่ละกรณี

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

งานวิจัยฉบับนี้ จะแบ่งกระบวนการวิเคราะห์ออกเป็น 7 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1. วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่น

ขั้นตอนที่ 2. วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่น

ขั้นตอนที่ 3. วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่น

ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย แรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่นหลังจากที่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้าคอนกรีต (External Ground)

ขั้นตอนที่ 5 เปรียบเทียบผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ของระบบส่ง 69 kV ของแต่ละระยะห่างระหว่างเสา เพื่อวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการเกิดผลการทดลองดังกล่าว

ขั้นตอนที่ 6 เปรียบเทียบผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ระหว่างกรณีไม่ติดตั้งสายดินนอกเสา และติดตั้งสายดินนอกเสา

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณอัตราความเสียหายจากไฟฟ้ดับ ในระยะ 10 ปี ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร เปรียบเทียบระหว่างกรณีติดตั้งสายดินนอกเสา และไม่ติดตั้งสายดินนอกเสาของรูปคลื่น 0.25/100 และ 10/350 μ s

ในการทดลองขั้นตอนที่ 1-4 ได้จำลองโดยใช้กระแสฟ้าผ่าบวก โดยจากการศึกษา และจากการรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้พบว่าผลกระทบของกระแสฟ้าผ่าบวก ส่งผลกระทบรุนแรงกว่ากระแสฟ้าผ่าลบ

4.2.1 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 1

กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 1 วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อที่จะทราบถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่นดังกล่าว

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916
25	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916
50	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916
75	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916
100	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916
125	1405.5	2783.1	4160.8	5538.4	6916

ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 1/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	492.15	956.44	1420.7	1885	2349.3
25	506.63	985.4	1464.2	1942.9	2421.7
50	523.54	1019.2	1514.9	2010.6	2506.2
75	543.81	1059.8	1575.7	2091.6	2607.6
100	566.85	1105.8	1644.8	2183.8	2722.7
125	594.95	1162	1729.1	2296.2	2863.3

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 2/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	269.16	510.44	751.72	993	1234.3
25	295.87	563.86	831.85	1099.8	1367.8
50	325.4	622.93	920.45	1218	1515.5
75	351.5	675.12	998.74	1322.4	1646
100	374.85	721.8	1068.8	1415.8	1762.7
125	395.98	764.08	1132.2	1500.3	1868.4

ตารางที่ 4.4 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 3/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	198.06	368.22	538.38	708.53	878.69
25	226.4	424.91	623.41	821.91	1020.4
50	255.4	482.9	710.39	937.89	1165.4
75	279.13	530.36	781.59	1032.8	1284.1
100	298.88	569.86	840.84	1111.8	1382.8
125	315.48	603.06	890.64	1178.2	1465.8

ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 4/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	155.52	283.14	410.76	538.38	665.99
25	176.91	325.91	474.9	623.9	772.9
50	207.29	386.67	566.04	745.42	924.79
75	230.29	432.65	635.02	837.39	1039.8
100	247.9	467.88	687.86	907.85	1127.8
125	261.45	494.97	728.5	962.03	1195.6

ตารางที่ 4.6 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	78.949	130	181.04	232.09	283.14
25	102.69	177.38	252.06	326.75	401.43
50	119.97	211.94	303.91	395.88	487.85
75	128.48	228.96	329.44	429.91	530.39
100	132.66	237.32	341.98	446.64	551.29
125	134.72	241.43	348.14	454.86	561.57

ตารางที่ 4.7 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย (kA) ของแต่ละรูปคลื่น ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

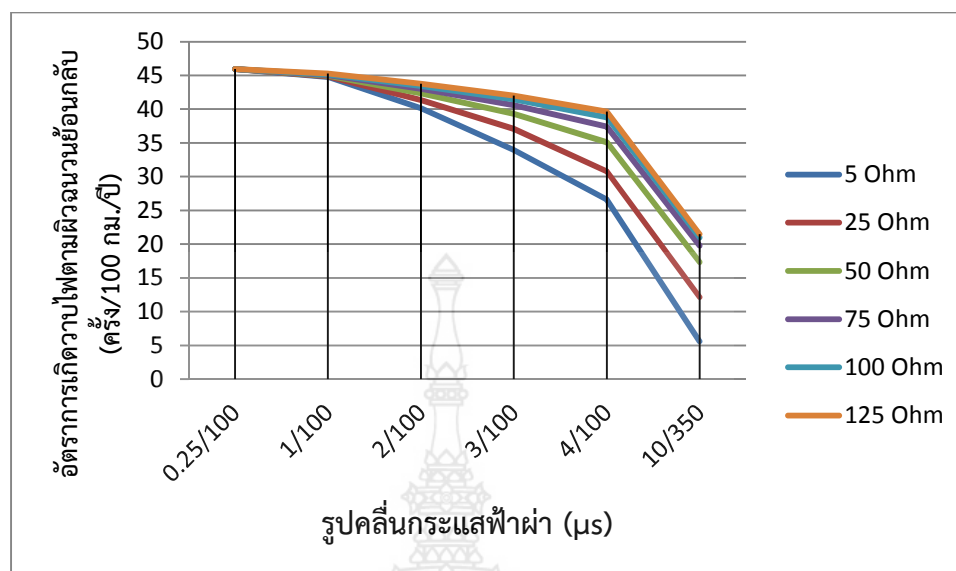
R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μs)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	2.812	8.340	16.05	22.76	30.35	75.85
25	2.812	8.090	14.45	19.505	25.995	51.850
50	2.812	7.815	13.015	17.02	21.58	42.1
75	2.812	7.505	11.965	15.41	19.13	38.54
100	2.812	7.185	11.16	14.2875	17.6	36.98
125	2.812	6.830	10.52	13.465	16.578	36.275

ตารางที่ 4.8 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค้ายอด (%) ของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

R	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μs)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	99.809316	97.187268	87.055437	73.742544	57.765398	12.166541
25	99.809316	97.387956	89.737621	80.509755	66.827221	26.390968
50	99.809316	97.599110	91.907799	85.310550	76.237124	37.637155
75	99.809316	97.825141	93.340297	88.159270	81.260051	42.944883
100	99.809316	98.045223	94.344378	89.995087	84.229368	45.492232
125	99.809316	98.273791	95.082506	91.252856	86.115904	46.687843

ตารางที่ 4.9 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

R	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μs)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	45.96767	44.76007	40.09381	33.96249	26.60414	5.60336
25	45.96767	44.8525	41.3291	37.07916	30.7776	12.15449
50	45.96767	44.94975	42.32858	39.29019	35.11138	17.33398
75	45.96767	45.05385	42.98833	40.60218	37.42471	19.77848
100	45.96767	45.1552	43.45076	41.44768	38.79225	20.95167
125	45.96767	45.26047	43.79071	42.02695	39.6611	21.50231



รูปที่ 4.1 แสดงอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

4.2.1.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองตามขั้นตอนที่ 1 หากพิจารณาค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/ 100 พบว่า ที่ค่าความต้านทานอิมพีดล 5, 25, 50, 75, 100 และ 125 โอห์ม แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน หรือแทบจะไม่มีค่าที่เปลี่ยนแปลงเลย เหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากว่า แรงดันที่หัวเสาไม่สามารถทำให้ลดลงด้วยคลื่นสะท้อนที่มาจากอิมพีแดนซ์ของรากสายดิน เพราะความเร็วของการสะท้อนกลับของคลื่นที่เดินทางผ่านสายดินมีค่า 123 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งใช้ความเร็วในการเดินทางน้อยไปกว่าจะเดินทางถึงยอดเสา ทำให้คลื่นที่สะท้อนกลับจากอิมพีแดนซ์ของรากสายดินไปหักล้างแรงดันที่หัวเสาจึงทำได้ไม่มากนัก จึงเป็นสาเหตุให้แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยมีค่าเพิ่มขึ้น น้อยมาก หรือแทบจะคงที่ แต่เมื่อพิจารณารูปคลื่น 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 μs จะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพีดลมีค่ามากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากว่าเวลาหน้าคลื่นมีระยะเวลาที่มากขึ้นเพียงพอที่จะทำให้การสะท้อนกลับมาหักล้างแรงดันที่หัวเสาของคลื่นจากรากสายดิน และเสาดันข้างเคียงสามารถทำได้ทัน เมื่อพิจารณาที่รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 μs ที่ค่าความต้านทานอิมพีดลคงที่ แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าน้อยลง เมื่อเวลาหน้าคลื่นมากขึ้นตามลำดับ เนื่องจากว่า เวลาหน้าคลื่นยิ่งมากขึ้น ทำให้การสะท้อนกลับมาหักล้างแรงดันที่หัวเสาของคลื่นจากรากสายดิน และเสาดันข้างเคียงทำได้มากขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด พบว่า ที่ความต้านทานอิมพีดล 5, 25, 75, 100, และ 125 โอห์ม ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอดมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพีดลมากขึ้นตามลำดับ และที่ระยะห่างระหว่าง 40, 80 และ 120 เมตร ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด มีค่าน้อยลง

จากผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย และกระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค้ายอด อัตราการวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับจะมีค่าที่สัมพันธ์กับ 2 ค่าข้างต้นดังนี้ เมื่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่ามากขึ้น หรือค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับค้ายอดมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

4.2.2 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 2

กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่น

ตารางที่ 4.10 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
25	1410.2	2796	4181.8	5567.7	6953.5
50	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
75	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
100	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
125	1410.2	2796.1	4181.9	5567.7	6953.5

ตารางที่ 4.11 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 1/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	567.68	1110.7	1654.2	2197.5	2740.8
25	583.88	1143.3	1702.8	2262.3	2821.8
50	603.02	1181.6	1760.3	2338.9	2917.5
75	626.52	1228.6	1830.7	2432.9	3035
100	661.51	1298.6	1935.7	2572.8	3209.9
125	711.25	1398.1	2084.9	2771.8	3458.6

ตารางที่ 4.12 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 2/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	326.13	627.84	929.56	1231.3	1533
25	352.81	681.21	1009.6	1338	1666.4
50	382.71	741	1099.3	1457.6	1815.9
75	409.62	794.82	1180	1565.2	1950.4
100	434.15	843.89	1253.6	1663.4	2073.1
125	457.93	891.43	1324.9	1758.4	2191.9

ตารางที่ 4.13 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 3/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	225.56	426.7	627.84	828.99	1030.1
25	243.35	462.28	681.21	900.14	1119.1
50	277.37	530.3	783.24	1036.2	1289.1
75	308.87	593.3	877.73	1162.2	1446.6
100	335.03	645.63	956.23	1266.8	1577.4
125	356.85	689.26	1021.7	1354.1	1686.5

ตารางที่ 4.14 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 4/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	175.28	326.13	476.99	627.84	778.7
25	197.96	371.48	545.01	718.53	892.05
50	225.32	426.2	627.09	827.97	1028.9
75	250.06	475.66	701.27	926.88	1152.5
100	272.86	521.27	769.68	1018.1	1266.5
125	289.81	555.18	820.54	1083.7	1351.2

ตารางที่ 4.15 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	84.761	145.1	205.45	265.79	326.13
25	108.92	193.31	277.7	362.1	446.49
50	129.79	235.06	340.33	445.6	550.87
75	140.43	256.33	372.23	488.13	604.03
100	145.72	266.9	388.09	509.28	630.47
125	148.45	272.37	396.29	520.21	644.14

ตารางที่ 4.16 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย (kA) ของแต่ละรูปคลื่น ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

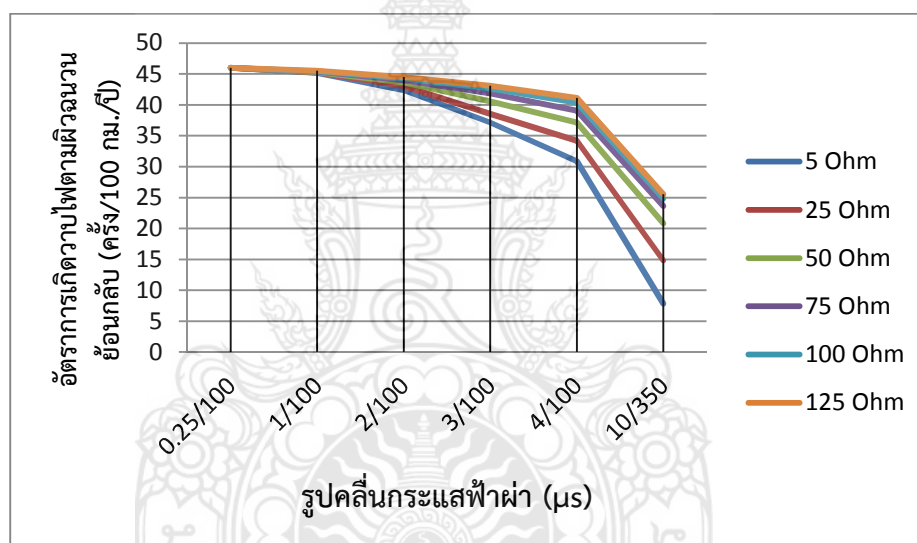
R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μ s)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	2.82	7.19	12.95	19.44	25.9	64.75
25	2.82	6.99	11.9	17.87	22.52	46.33
50	2.82	6.76	10.91	15.45	19.45	37.12
75	2.82	6.49	10.15	13.74	17.32	33.7
100	2.82	6.14	9.55	12.58	15.74	32.25
125	2.82	5.7	9.03	11.75	14.74	31.52

ตารางที่ 4.17 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μ s)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	99.807960	98.041887	92.000404	80.640370	67.029818	17.062661
25	99.807960	98.172792	93.424453	83.717172	74.252462	32.205740
50	99.807960	98.316942	94.639116	88.091451	80.620290	45.258085
75	99.807960	98.477516	95.484539	90.840912	84.754657	51.284638
100	99.807960	98.671938	96.097660	92.517776	87.595043	54.024930
125	99.807960	98.894741	96.589992	93.616609	89.271027	55.442989

ตารางที่ 4.18 ค่าอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับของฉนวนลูกถ้วย ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μs)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	45.96704	45.15367	42.37123	37.13932	30.87091	7.858292
25	45.96704	45.21396	43.02709	38.55635	34.19733	14.83251
50	45.96704	45.28035	43.58651	40.57095	37.13007	20.84383
75	45.96704	45.3543	43.97587	41.83722	39.03417	23.61939
100	45.96704	45.44384	44.25825	42.60951	40.34232	24.88144
125	45.96704	45.54645	44.48499	43.11559	41.11421	25.53454



รูปที่ 4.2 แสดงอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

4.2.2.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองตามขั้นตอนที่ 2 หากพิจารณาค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/100 พบว่า ที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์ 5, 25, 50, 75, 100 และ 125 โอห์ม แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน หรือแทบจะไม่มีค่าที่เปลี่ยนแปลงเลย แต่เมื่อพิจารณารูปคลื่น 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพัลส์มีค่ามากขึ้นตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 ที่ความต้านทานอิมพัลส์คงที่ แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าน้อยลง เมื่อเวลาหน้าคลื่นมากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เหตุที่เป็นเช่นนี้ เหตุผลก็เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์การทดลองในกรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

เมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสน้ำยอด พบว่า ที่ความต้านทานอิมพัลส์ 5, 25, 75, 100, และ 125 โอห์ม ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสน้ำยอดมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพัลส์มากขึ้นตามลำดับ และที่ระยะห่างระหว่าง 40, 80 และ 120 เมตร ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสน้ำยอดมีค่าน้อยลง

จากผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย และกระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสน้ำยอด อัตราการวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับจะมีค่าที่สัมพันธ์กับ 2 ค่าข้างต้นดังนี้ เมื่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่ามากขึ้น หรือค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับค่าน้ำยอดมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองขั้นตอนที่ 2 เปรียบเทียบกับผลการทดลองในขั้นตอนที่ 1 พบว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ค่ากระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสน้ำยอด อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตรจะมีค่าที่มากกว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร

4.2.3 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 3

กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 3. วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพัลส์ 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและ หางคลื่น คือ 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่น

ตารางที่ 4.19 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	1407.2	2792.7	4178.2	5563.7	6949.2
25	1407.3	2792.8	4178.3	5563.9	6949.4
50	1407.3	2792.8	4178.4	5563.9	6949.4
75	1407.3	2792.8	4178.4	5563.9	6949.4
100	1407.3	2792.8	4178.4	5563.9	6949.5
125	1407.3	2792.8	4178.4	5563.9	6949.5

ตารางที่ 4.20 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 1/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	583.52	1145.3	1707.1	2268.9	2830.6
25	610.99	1200.2	1789.5	2378.7	2968
50	649.3	1276.9	1904.4	2532	3159.5
75	689.04	1356.3	2023.6	2690.9	3358.2
100	736.2	1450.6	2165.1	2879.5	3594
125	786.29	1550.8	2315.4	3079.9	3844.4

ตารางที่ 4.21 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 2/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	309.06	596.35	883.65	1170.9	1458.2
25	350.69	679.62	1008.6	1337.5	1666.4
50	395.66	769.55	1143.4	1517.3	1891.2
75	434.64	847.53	1260.4	1673.3	2086.2
100	469.02	916.28	1363.5	1810.8	2258.1
125	499.73	977.7	1455.7	1933.6	2411.6

ตารางที่ 4.22 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 3/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	216.98	412.21	607.43	802.66	997.88
25	246.82	471.88	696.94	922	1147.1
50	279.88	537.99	796.11	1054.2	1312.3
75	308.46	595.16	881.85	1168.6	1455.2
100	343.71	665.65	987.59	1309.5	1631.5
125	372.77	742.21	1074.8	1425.8	1776.8

ตารางที่ 4.23 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 4/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	180.8	339.82	498.85	657.87	816.89
25	214.03	406.29	598.54	790.79	983.05
50	246.7	471.62	696.54	921.46	1146.4
75	272.36	522.94	773.51	1024.1	1274.7
100	292.92	564.07	835.21	1106.4	1377.5
125	310.98	600.16	889.35	1178.5	1467.7

ตารางที่ 4.24 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	85.386	149	212.6	276.21	339.82
25	112.58	203.31	294.04	384.77	475.5
50	138.21	254.56	370.91	487.25	603.6
75	150.63	279.4	408.17	536.94	665.72
100	156.75	291.64	426.54	561.43	696.32
125	159.79	297.73	435.66	573.6	711.54

ตารางที่ 4.25 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย (kA) ของแต่ละรูปคลื่น ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

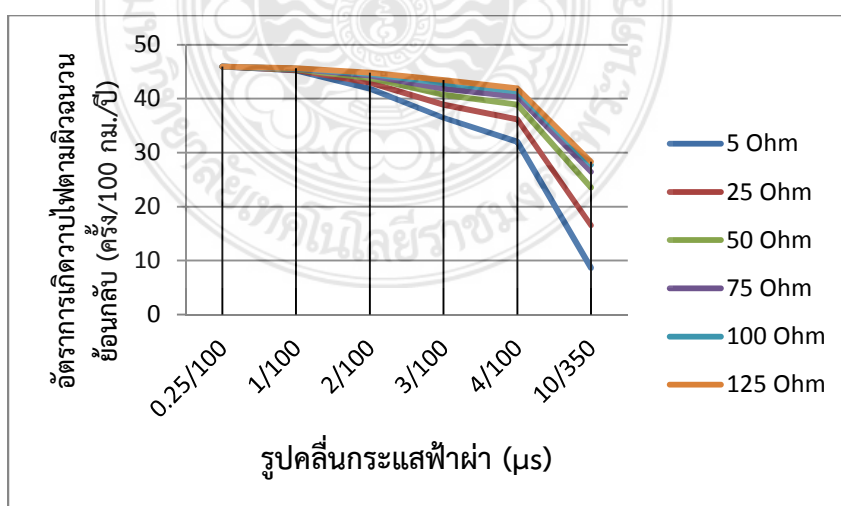
R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	2.85	7.0001	13.695	20.150	24.730	61.83
25	2.84	6.68	11.960	17.48	20.460	43.35
50	2.84	6.27	10.52	15.24	17.485	33.8
75	2.84	5.895	9.530	13.72	15.694	30.55
100	2.84	5.505	8.795	12.22	14.505	29.15
125	2.84	5.145	8.235	11.21	13.6	28.51

ตารางที่ 4.26 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%) ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μ s)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	99.802822	98.166306	90.908920	79.201769	69.531758	18.757722
25	99.804544	98.365489	93.346790	84.455239	78.566024	35.936407
50	99.804544	98.601520	95.082506	88.445714	84.445850	51.099558
75	99.804544	98.798937	96.117267	90.871167	87.674332	57.364287
100	99.804544	98.985924	96.800579	93.004993	89.649825	60.204760
125	99.804544	99.142318	97.272572	94.284450	91.051725	61.526639

ตารางที่ 4.27 ค่าอัตราการเกิดวาปไฟตามพิวฉนวนย้อนกลับ ของระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μ s)					
	0.25/100	1/100	2/100	3/100	4/100	10/350
5	45.96468	45.21097	41.86855	36.47676	32.02319	8.63896
25	45.96547	45.30271	42.99132	38.89627	36.18397	16.55069
50	45.96547	45.41141	43.79071	40.7341	38.89195	23.53415
75	45.96547	45.50233	44.26728	41.85116	40.37884	26.4194
100	45.96547	45.58845	44.58198	42.8339	41.28866	27.7276
125	45.96547	45.66048	44.79936	43.42316	41.93432	28.33639



รูปที่ 4.3 แสดงอัตราการเกิดวาปไฟตามพิวฉนวนย้อนกลับ ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตร

4.2.3.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองตามขั้นตอนที่ 3 หากพิจารณาค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/ 100 พบว่า ที่ค่าความต้านทานอิมพีดลั 5, 25, 50, 75, 100 และ 125 โอห์ม แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน หรือแทบจะไม่มีค่าที่เปลี่ยนแปลงเลย แต่เมื่อพิจารณารูปคลื่น 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพีดลัมีค่ามากขึ้นตามลำดับ และเมื่อพิจารณาที่รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 ที่ค่าความต้านทานอิมพีดลัคงที่ แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าน้อยลง เมื่อเวลาหน้าคลื่นมากขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้เหตุที่เป็นเช่นนี้ เหตุผลก็เช่นเดียวกับกับการวิเคราะห์การทดลองในกรณีระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร ในกรณีนี้ สาเหตุที่แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยเป็นเช่นนี้ ก็เป็นเช่นเดียวกับกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และ 80 เมตร

เมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด พบว่า ที่ความต้านทานอิมพีดลั 5, 25, 75, 100, และ 125 โอห์ม ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอดมีค่ามากขึ้น เมื่อความต้านทานอิมพีดลัมากขึ้นตามลำดับ และที่ระยะห่างระหว่าง 40, 80 และ 120 เมตร ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอดมีค่าน้อยลง

จากผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย และกระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด อัตราการวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับจะมีค่าที่สัมพันธ์กับ 2 ค่าข้างต้นดังนี้ เมื่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่ามากขึ้น หรือค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับค่ายอดมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

วิเคราะห์ผลการทดลองขั้นตอนที่ 3 เปรียบเทียบกับผลการทดลองในขั้นตอนที่ 2 พบว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ที่ระยะห่างระหว่างเสา 120 เมตรจะมีค่าที่มากกว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

4.2.4 กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 4

กระบวนการวิเคราะห์ ขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์ผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย กระแสฟ้าผ่าวิกฤต ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับของระบบส่ง 69 kV ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ฉนวนลูกถ้วย 4 ลูกถ้วย ความต้านทานอิมพีดลั 5-125 โอห์ม โดยมีรูปคลื่นอิมพีดลัฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นและหางคลื่น คือ 0.25/100, 10/350 μ s เพื่อวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละรูปคลื่นหลังจากที่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้าคอนกรีต (External Ground)

ตารางที่ 4.28 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย (kV) รูปคลื่น 0.25/100 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า				
	10	20	30	40	50
5	847.76	1671.1	2494.5	3317.9	4141.2
25	862.94	1701.5	2540	3378.6	4217.1
50	877.21	1730	2582.8	3435.6	4288.4
75	888	1751.6	2615.2	3478.8	4342.4
100	896.39	1768.4	2640.4	3512.3	4384.3
125	903.17	1781.9	2660.7	3539.5	4418.2

ตารางที่ 4.29 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย รูปคลื่น 10/350 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า				
	10	20	30	40	50
5	61.788	99.048	136.31	173.57	210.83
25	107.71	190.9	274.08	357.27	438.12
50	132.24	239.95	347.65	455.36	563.07
75	142.76	260.99	379.22	497.45	615.68
100	147.39	270.26	392.64	515.98	638.85
125	149.47	274.41	399.35	524.28	649.21

ตารางที่ 4.30 กระแสฟ้าผ่าวิกฤต (kA) กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

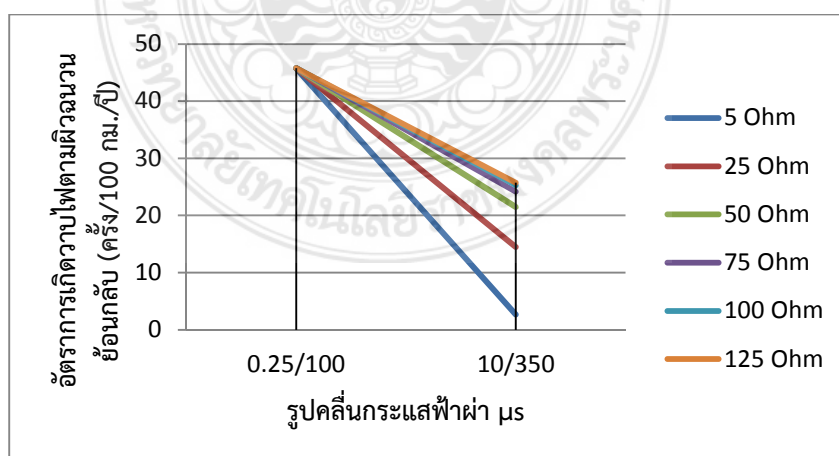
R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า	
	0.25/100	10/350
5	4.745	104.8
25	4.66	46.95
50	4.583	36.3
75	4.525	33.05
100	4.48	31.8
125	4.445	31.3

ตารางที่ 4.31 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร กรณีติดตั้งสายดินนอกเสา

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μs)	
	0.25/100	10/350
5	99.298324	5.814053
25	99.329119	31.484458
50	99.356314	46.644975
75	99.376361	52.500101
100	99.391657	54.896152
125	99.403398	55.875139

ตารางที่ 4.32 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า (μs)	
	0.25/100	10/350
5	45.73233	2.677691
25	45.74651	14.50032
50	45.75903	21.48257
75	45.76827	24.17918
100	45.77531	25.28269
125	45.78072	25.73357



รูปที่ 4.4 แสดงอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ กรณีติดตั้งสายดินนอกเสา ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

4.2.4.1 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองตามขั้นตอนที่ 4 หากพิจารณาแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/100 μs และ 100/350 μs พบว่าเมื่อความต้านทานอิมพีแดนซ์มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่ามากขึ้นตามลำดับ เมื่อนำผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมาเปรียบเทียบกับทั้งสองรูปคลื่น พบว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/100 μs มีค่ามากกว่ารูปคลื่น 100/350 μs

เมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด พบว่าเมื่อความต้านทานอิมพีแดนซ์มากขึ้น ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอดมีค่ามากขึ้นตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับรูปคลื่น 0.25/100 และ 100/350 μs พบว่า รูปคลื่น 100/350 μs มีค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอดมากกว่ารูปคลื่น 0.25/100 μs

จากผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย และกระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด อัตราการวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับจะมีค่าที่สัมพันธ์กับ 2 ค่าข้างต้นดังนี้ เมื่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่ามากขึ้น หรือค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับค่ายอดมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

วิเคราะห์ผลการทดลองขั้นตอนที่ 4 เปรียบเทียบกับผลการทดลองในขั้นตอนที่ 2 พบว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ที่ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตรจะมีค่าที่มากกว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยกรณีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตรกรณีติดตั้งสายดินนอกเสา จากผลการทดลองสามารถแสดงให้เห็นว่า เมื่อติดตั้งสายดินนอกเสาทำให้สามารถลดแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยลงได้ค่อนข้างมาก สามารถทำให้กระแสฟ้าผ่าวิกฤตมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้โอกาสเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวนน้อยลงตามไปด้วย

4.2.5 กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 5

กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 5 จะเป็นการนำผลการทดลองในกระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 2 และกระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 4 มาเปรียบเทียบวิเคราะห์ผลของการเกิดทั้ง 2 กรณี เพื่อที่จะทราบว่า ทั้ง 2 กรณี ให้ผลการทดลองที่แตกต่างกันอย่างไร โดยจะพิจารณาเปรียบเทียบรูปคลื่นฟ้าผ่า 0.25/100 μs และ 100/350 μs ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์ในขั้นตอนที่ 4 เป็นผลการทดลอง ในกรณีที่ได้ปรับปรุงระบบ โดยการเพิ่มสายดินนอกเสาคอนกรีต (External Ground) เข้าไปเพื่อที่จะช่วยลดทอนแรงดันที่ตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย

ตารางที่ 4.33 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
25	1410.2	2796	4181.8	5567.7	6953.5
50	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
75	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
100	1410.2	2796	4181.9	5567.7	6953.5
125	1410.2	2796.1	4181.9	5567.7	6953.5

ตารางที่ 4.34 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย (kV) รูปคลื่น 0.25/100 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	847.76	1671.1	2494.5	3317.9	4141.2
25	862.94	1701.5	2540	3378.6	4217.1
50	877.21	1730	2582.8	3435.6	4288.4
75	888	1751.6	2615.2	3478.8	4342.4
100	896.39	1768.4	2640.4	3512.3	4384.3
125	903.17	1781.9	2660.7	3539.5	4418.2

จากตารางที่ 4.33 และตารางที่ 4.34 เป็นแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 0.25/100 μ s กรณีที่ยังไม่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า และติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้าตามลำดับ ของระบบ 69 kV โดยมีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร โดยหากพิจารณาแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ทั้ง 2 ตาราง พบว่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยในกรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า มีค่าแรงดันไฟฟ้า ที่น้อยกว่ากรณีที่ไม่ติดตั้ง

ตารางที่ 4.35 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร ของรูปคลื่น 10/350 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)				
	10	20	30	40	50
5	84.761	145.1	205.45	265.79	326.13
25	108.92	193.31	277.7	362.1	446.49
50	129.79	235.06	340.33	445.6	550.87
75	140.43	256.33	372.23	488.13	604.03
100	145.72	266.9	388.09	509.28	630.47
125	148.45	272.37	396.29	520.21	644.14

ตารางที่ 4.36 แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย รูปคลื่น 10/350 μ s กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร

R_i (Ω)	รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า				
	10	20	30	40	50
5	61.788	99.048	136.31	173.57	210.83
25	107.71	190.9	274.08	357.27	438.12
50	132.24	239.95	347.65	455.36	563.07
75	142.76	260.99	379.22	497.45	615.68
100	147.39	270.26	392.64	515.98	638.85
125	149.47	274.41	399.35	524.28	649.21

จากตารางที่ 4.33 และตารางที่ 4.34 เป็นแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น 10/350 μ s กรณีที่ยังไม่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า และติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้าตามลำดับ ของระบบ 69 kV โดยมีระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร จะพบว่า ค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยก็เป็นไปในทิศทางเดียวกับกับกรณีของรูปคลื่น 0.25/100 โดยมีแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยที่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ที่น้อยกว่าค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยที่ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสา

4.2.6 กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 6

กระบวนการวิเคราะห์ขั้นตอนที่ 6 จะเป็นการคำนวณอัตราความเสียหายจากไฟฟ้าดับ ในระยะ 10 ปี ของระบบส่ง 69 kV ของระยะห่างระหว่างเสา 80 เมตร เปรียบเทียบระหว่างกรณีติดตั้งสายดินนอกเสา และไม่ติดตั้งสายดินนอกเสาของรูปคลื่น 0.25/100 และ 10/350 μ s

มูลค่าเงินลงทุนในการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม แสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.37 โดยข้อมูลที่แสดงในตารางจะเป็นค่าใช้จ่ายต่อเสาไฟฟ้า 1 ต้น แต่ในการคิดค่าใช้จ่ายทั้งโครงการจะพิจารณาที่ระยะ 100 วงจร-กิโลเมตร ได้มีการศึกษาการเรื่องอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ โดยสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่า อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (Interruption Cost) ต่อครั้ง ในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง 147,500 บาทต่อครั้ง ในปี พ.ศ.2544 โดยเมื่อคิดเทียบออกมาเป็นปี 2556 อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับต่อครั้งคือ 341251 บาท เงินลงทุนสำหรับทั้งหมดของโครงการในการติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้ามีมูลค่า 712069.20 บาท

ตารางที่ 4.37 รายละเอียดของการลงทุนติดตั้งสายดินนอกเสา (บาท/ต้น)

รายการ	ค่าลงทุน (บาท/ต้น)
วัสดุ	425.65
ค่าแรงงาน	54.25
ค่าควบคุมงาน	16.28
ค่าขนส่ง	21.28
ค่าดำเนินการ	25.87
เบ็ดเตล็ด	25.87
รวม(บาท/ต้น)	569.20

4.2.6.1 อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ

การคำนวณอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ จะเป็นการคำนวณอัตราค่าเสียหายในกรณีของระบบส่ง 69 kV ที่ไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า และที่มีการติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า เปรียบเทียบกัน เพื่อหาจุดคุ้มทุนของการลงทุนติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ว่ามีความคุ้มค่าในการลงทุนที่จะคืนสุดในระยะเวลาเท่าใด ซึ่งในกรณีนี้เราจะพิจารณากรณีที่ระบบมีความต้านทานอิมพีแดนซ์ 5 โอห์ม ซึ่งถือเป็นความต้านทานอิมพีแดนซ์มาตรฐานที่น้อยที่สุดที่ควรพิจารณา

ตารางที่ 4.38 อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ กรณีไม่ติดตั้งสายดินนอกเสา รูปคลื่น 0.25/100 μ s

ปีที่	อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (บาท)	
	กรณีไม่ได้ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า	กรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า
1	15,686,298.37	16,318,272.54
2	31,372,596.73	31,924,475.89
3	47,058,895.1	47,530,679.23
4	62,745,193.47	63,136,882.58
5	78,431,491.84	78,743,085.92
6	94,117,790.2	94,349,289.27
7	109,804,088.6	109,955,492.6
8	125,490,386.9	125,561,696
9	141,176,685.3	141,167,899.3
10	156,862,983.7	156,774,102.6

4.2.6.2 วิเคราะห์อัตราค่าเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ

จากการคำนวณอัตราค่าเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ ระยะเวลา 10 ปี ของกรณีไม่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า และติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า พบว่ากรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า ระยะเวลาผ่านไป 10 ปี ค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ไม่ได้ติดตั้งเสาไฟฟ้า ซึ่งเมื่อย้อนกลับไปพิจารณาดู ปีต่อปีจะเห็นว่า ในปีที่ 9 ค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับของกรณีติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า มีความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าสะสมรวม 9 ปีที่น้อยกว่าในกรณีไม่ติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่า ในระยะ 9 ปี หลังจากติดตั้งสายดินนอกเสาไฟฟ้า จะทำให้ความเสียหายที่เกิดขึ้นเนื่องจากไฟฟ้ามูลค่าลดลงตามลำดับต่อเนื่องไปจากปีที่ 9 ของการติดตั้ง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

งานวิจัยฉบับนี้ได้นำเสนอการประเมินสมรรถนะฟ้าผ่า ของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) กรณีฟ้าผ่าลงหัวเสาโดยตรง ของระบบส่ง 69 กิโลโวลต์ ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสภาวะชั่วคราว โดยมีเป้าหมายเพื่อที่จะทราบถึงผลกระทบของฟ้าผ่าที่มีผลต่อระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เพื่อที่จะเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ให้กับระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าระดับแรงดัน 69 กิโลโวลต์ และเป็นแนวทางในการพิจารณาปรับปรุงมาตรฐานการก่อสร้างระบบส่งจ่ายใหม่ เพื่อที่จะรองรับถึงผลกระทบของฟ้าผ่าที่จะเกิดขึ้นในอนาคตต่อไป

5.2 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยได้ทำการประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบส่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำการศึกษาผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ค่ากระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสคายอด อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ของระบบส่ง 69 กิโลโวลต์ ที่มีระยะห่างระหว่างเสา 40, 80, และ 120 เมตรตามลำดับ ในกรณีที่ไม่ติดตั้งและติดตั้งสายดินนอกเสา และทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เพื่อที่จะหาอัตราความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับ และจุดคุ้มทุนของการติดตั้งสายดินนอกเสา จากการศึกษาทำให้สามารถที่จะสรุปผลการวิจัยได้ ดังต่อไปนี้

1. สำหรับการศึกษาศักยภาพการวิจัยในครั้งนี้ เพื่อที่จะทราบค่าผลกระทบของฟ้าผ่าที่มีผลต่อระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระดับแรงดัน 69 กิโลโวลต์ โดยจะทำการวิเคราะห์ค่าของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสคายอด อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ ของระบบส่งที่มีความต้านทานอิมพีแดนซ์ที่ฐานเสา 5, 25, 75, 100 และ 125 โอห์ม รูปคลื่นฟ้าผ่า 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 μ s ที่ระยะห่างระหว่างเสาตั้งแต่ 40, 80 และ 120 เมตร จากการศึกษาพบว่ารูปคลื่น 0.25/100 μ s ที่ความต้านทานอิมพีแดนซ์ที่เปลี่ยนไปแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน หรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อพิจารณารูปคลื่น 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 μ s จะพบว่า เมื่อความต้านทานอิมพีแดนซ์เพิ่มมากขึ้น แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยก็จะเพิ่มมากขึ้นไปด้วยตามลำดับ แต่หากพิจารณารูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 3/100, 4/100, และ 10/350 μ s ที่ความต้านทานอิมพีแดนซ์ที่พบว่า ช่วงเวลาหน้าคลื่นมีค่ามากแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าน้อยลงตามลำดับ

2. ความต้านทานดินที่ฐานเสาแก้วมีความสำคัญต่อค่าแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย และค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต เนื่องจากว่ายิ่งความต้านทานดินมีค่าต่ำขนาดของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยก็จะมีค่าต่ำลง และกระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่จะทำให้เกิดไฟฟ้าขัดข้องของระบบไฟฟ้าก็จะมีค่ามากขึ้น ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าจะมากกว่ากระแสวิกฤตของระบบไฟฟ้าจะมีค่าน้อยลง จากผลการวิเคราะห์สามารถสรุปได้ว่า ยิ่งความต้านทานดินมีค่าต่ำจะยิ่งส่งผลให้อัตราการเกิดวาบไฟตามฉนวนมีค่าน้อยลง ความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นของระบบไฟฟ้าก็จะมีค่าน้อยลง ส่งผลให้โอกาสการเกิดไฟฟ้าขัดข้องของระบบไฟฟ้าน้อยตามไปด้วย ดังนั้นก่อนที่จะดำเนินการก่อสร้างระบบดินของเสา ควรจะพิจารณาลดความต้านทานดินให้มีค่าต่ำที่สุดก่อนเป็นอันดับแรก

3. ระยะห่างระหว่างเสามีผลต่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย เนื่องจากผลของการสะท้อนกลับของคลื่นเสิร์จฟ้าผ่าจากเสาต้นที่อยู่ข้างเคียง เดินทางกลับมาหักล้างแรงดันเกินที่หัวเสา เมื่อพิจารณาผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยของรูปคลื่น $2/100 \mu s$ ระยะห่างระหว่างเสา 40, 80 และ 120 เมตร ที่ความต้านทานอิมพีแดนซ์ที่ ดังแสดงในตารางที่ 4.3, ตารางที่ 4.12, และตารางที่ 4.21 พบว่า แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่ามากขึ้นที่ระยะห่างระหว่างเสามีค่ามากขึ้นตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์ แสดงให้เห็นว่า ยิ่งระยะห่างระหว่างเสามีค่ามากขึ้น อัตราการเกิดวาบไฟตามฉนวนย้อนกลับก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย อย่างไรก็ตามการสะท้อนของคลื่นที่เดินทางกลับมาหักล้างแรงดันเกินหัวเสาส่วนใหญ่จะเกิดจากการสะท้อนของคลื่นที่ฐานเสา เนื่องจากมีระยะทางที่ใกล้กว่าคลื่นสะท้อนที่เดินทางมาจากเสาข้างเคียง

4. ช่วงเวลาหน้าคลื่นมีผลต่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย และกระแสฟ้าผ่าวิกฤต เนื่องจากช่วงเวลาหน้าคลื่นมีผลต่อการสะท้อนกลับของคลื่น ทั้งการสะท้อนกลับของคลื่นที่ฐานเสา และการสะท้อนกลับของคลื่นที่เสาต้นข้างเคียง จากผลการวิเคราะห์พบว่า เวลาหน้าคลื่นยังมีค่ามาก จะทำให้แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่าน้อยลง เนื่องจากมีค่าน้อยของรูปคลื่นมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ การสะท้อนกลับของคลื่นจากฐานเสา และจากเสาต้นข้างเคียงสามารถเดินทางมาหักล้างได้ทัน

5. เมื่อทำการติดตั้งสายดินนอกเสา พบว่าสามารถทำให้แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยมีค่าที่ลดลงกว่ากรณีไม่ติดตั้ง เมื่อพิจารณารูปคลื่น $0.25/100 \mu s$ ก่อนติดตั้งสายดินนอกเสา พบว่าที่ระยะเวลาหน้าคลื่นนี้แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงน้อยมาก หรือแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลย แต่เมื่อติดตั้งสายดินนอกเสา ปรากฏว่าทำให้แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยนั้นมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปในทางที่ลดลงในความต้านทานอิมพีแดนซ์และระยะห่างระหว่างเสาที่เท่ากัน

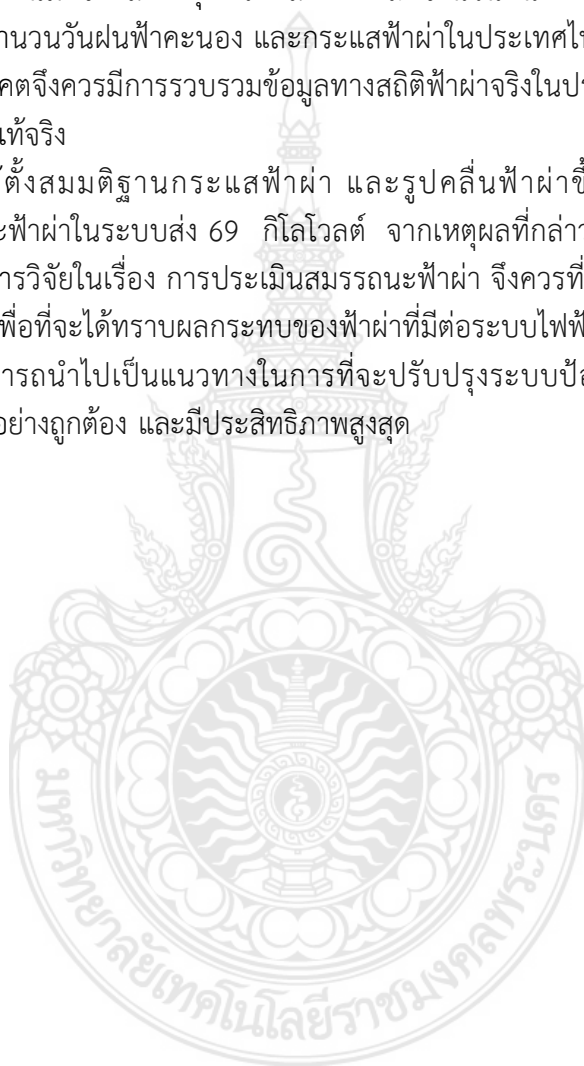
6. อัตราความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าดับ หลังจากที่ได้ทำการปรับปรุงระบบโดยการติดตั้งสายดินนอกเสา สามารถช่วยลดอัตราความเสียหายให้มีมูลค่าที่ลดลง และสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลาอันสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับอายุการใช้งานหลังการติดตั้ง

7. แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วยที่ได้ประมณผลออกมาโดยโปรแกรม ATP-EMTP ในงานวิจัยนี้เมื่อนำผลการวิจัยไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ได้ทำการวิจัยผลของแรงดันที่หัวเสาเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงหัวเสาของระบบส่ง 69 kV ปรากฏว่ามีผลของแรงดันที่หัวเสาที่สอดคล้องกันตามหลักทฤษฎีที่ได้สรุปไปแล้วในข้างต้น ซึ่งถือเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องส่งผลต่อแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย

5.3 ข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันได้มีการนำข้อมูลฟ้าผ่าของต่างประเทศมาใช้ในการวิเคราะห์ และออกแบบระบบไฟฟ้ากันเป็นอย่างมาก หมายรวมถึงรูปแบบการจัดวางสายส่ง หรือสายจำหน่ายระบบไฟฟ้า ที่มีต้นแบบมาจากต่างประเทศ โดยเมื่อนำมาใช้ในประเทศไทย ส่งผลให้อัตรากาการเกิดไฟฟ้าดับในประเทศไทยมีค่ามากกว่าที่เกิดในต่างประเทศ ทั้งนี้มาจากสาเหตุที่กระแสฟ้าผ่าและจำนวนฝนฟ้าคะนองที่แตกต่างกัน เพราะในความเป็นจริงแล้ว จำนวนวันฝนฟ้าคะนอง และกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทยมีค่ามากกว่าในต่างประเทศ เพราะฉะนั้น ในอนาคตจึงควรมีการรวบรวมข้อมูลทางสถิติฟ้าผ่าจริงในประเทศไทย เพื่อนำมาวิเคราะห์ และรู้ผลกระทบทที่แท้จริง

งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐานกระแสฟ้าผ่า และรูปคลื่นฟ้าผ่าขึ้นมาในการวิเคราะห์ เพื่อที่จะประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบส่ง 69 กิโลโวลต์ จากเหตุผลที่กล่าวมาในข้างต้น สำหรับผู้สนใจที่จะศึกษาค้นคว้าทำการวิจัยในเรื่อง การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่า จึงควรที่จะใช้ข้อมูลสถิติฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทย เพื่อที่จะได้ทราบผลกระทบของฟ้าผ่าที่มีต่อระบบไฟฟ้าของประเทศไทยอย่างแท้จริง ผลการศึกษาจึงสามารถนำไปเป็นแนวทางในการที่ปรับปรุงระบบป้องกันฟ้าผ่า หรือการประสานสัมพันธ์ทางฉนวนได้อย่างถูกต้อง และมีประสิทธิภาพสูงสุด



บรรณานุกรม

- ชำนาญ ท่อเกียรติ. ถาม-ตอบ ไฟฟ้ากำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จรัสสินทวงศ์การพิมพ์, 2552
- ก้องกิจ เวทยานนท์ และกิตติคุณ บุญกสก. “การวิเคราะห์ฟ้าผ่าในระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม อีเอ็มทีพี” ปริญญาานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2541.
- ณัฐพงศ์ สุวรรณโชติ และคณะ. 2555. “การศึกษาแรงดันเกินที่หัวเสาเนื่องจากฟ้าผ่ากลางสายและที่หัวเสาในระบบส่ง 69 kV ของการไฟฟ้านครหลวง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON-35). : 259-262
- สำรวย สังข์สะอาด. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- เทพกัญญา ชติแสง. “การต่อลงดินและการติดตั้งอะเรสเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบ 22-24 กิโลโวลต์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- ชำนาญ ท่อเกียรติ และเทพกัญญา ชติแสง. การต่อลงดิน. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์, 2549.
- การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. คู่มือการใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP. กรุงเทพมหานคร : การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2551.
- สำเร็จ อินท่าไม้. เสรีจิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีต อันเนื่องจากผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีต. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- ชำนาญ ท่อเกียรติ และเทพกัญญา ชติแสง. การต่อลงดิน. กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์, 2549.
- ชำนาญ ท่อเกียรติ. การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : [ม.ป.พ.], [ม.ป.ป.].
- ชวงค์ วัฒนศักดิ์ภูบาล. การลดปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้องเนื่องจากฟ้าผ่าสายส่ง 115 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.
- Diesendorf, W. “Insulation Co-ordination in High-voltage Electric Power Systems.” England : Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1974.
- Phayomhom, A., Thasananutariya, T. and Sirisumrannukul, S. “Analysis of Insulator Strings for 69 kV and 115 kV Subtransmission Lines in MEA’s Power Distribution System.” Proceeding of the 17th Conference on Electric Power Supply Industry (CEPSI). Macau, 2008 : 1-4.

- Phayomhom, A. and Sirisumrannukul, S. "Lightning Performance Improvement of 115 and 24 kV Circuits by External Ground in MEA's Distribution System." GMSARN International Journal. [n.p.], 3 (March 2009) : 31-38.
- Martinez, J.A., Gonzalez-Molina, F. and Chowdhuri, P. "Calculation of Lightning Flashover Rates of Overhead Distribution lines. A Comparative Study." Proceeding of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. [n.p.], 2000. 2577-2582.
- Kailuang, N., Saibath, G. and Samuthchaihit, V. "Effect of 115 kV Lines to Lightning Performance of 230 kV Transmission Lines." Proceedings of 31th Electrical Engineering Conference (EECON-31). [n.p.], 2008 : 219-222.
- Hileman, A. R. "Insulation Coordination for Power Systems." New York : Marcel Dekker & Co (Publishers) Ltd., 1999.
- Hintamai, S., Liangkhrua, K and Hokierti, J. "Effect of Grounding Resistance and Span Length for Overvoltage due to Direct Lightning Strokes to 115 kV Pole." Proceeding of 25th Electrical Engineering Conference (EECON-25). [n.p.], 2001 : 66-70.
- IEEE Std. 1243-1997. "Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines." New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1997.
- Phayomhom, A. and Sirisumrannukul, S. "Lightning Performance Improvement of 115 and 24 kV Circuits by External Ground in MEA's Distribution System." GMSARN International Journal. [n.p.], 3 (March 2009) : 31-38.



ภาคผนวก



คณะผู้วิจัย



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

การศึกษา

ปร.ด. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
คอ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตเทเวศร์

งานวิจัยที่สนใจ

การวางแผนและปฏิบัติการในระบบไฟฟ้ากำลัง ผลกระทบของการเชื่อมต่อแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายในระบบจำหน่ายไฟฟ้า และเทคนิคการหาค่าเหมาะสมที่สุด

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง
ใบอนุญาตผู้ตรวจสอบอาคาร

สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- สมาคมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (แห่งประเทศไทย)
- สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) สามัญสมาชิก ตลอดชีพ
- Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Association of Thailand (ECTI Thailand)
- Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)
- The Institution of Engineering and Technology (IET)
- International Association of Computer Science and Information Technology (IACSIT)

คณะผู้วิจัย



นายสุรสิทธิ์ ประกอบกิจ
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
E-mail: surasit.pr@rmutp.ac.th

การศึกษา

วศ.ม. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

งานวิจัยที่สนใจ

ระบบไฟฟ้ากำลัง และการต่อลงดินของระบบไฟฟ้า

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพ

ใบอนุญาตประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้า งานไฟฟ้ากำลัง

สมาชิกสมาคมวิชาชีพ

- สมาคมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (แห่งประเทศไทย)