



การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งย่อย
และสายจำหน่าย ของ กฟน.

Lightning Performance Assessment of MEA
Subtransmission and Distribution Lines

กมล สุภานัส
Kamol Supanus

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2558



การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งย่อย
และสายจำหน่าย ของ กฟน.

Lightning Performance Assessment of MEA
Subtransmission and Distribution Line

กมล สุภานัส
Kamol Supanus

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อ นามสกุล นายกมล สุภานัส
ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
2. ดร.อรรถ พยอมหอม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาตยา คล้ายเรือง

..... กรรมการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ

..... กรรมการ

ดร.อรรถ พยอมหอม

..... กรรมการและเลขานุการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์
ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ฤทธิทอง

วันที่ เดือน พ.ศ.

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งย่อยและสายจำหน่ายของ กฟน.
ชื่อ สกุล	กมล สุภานัส
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา และคณะ	วิศวกรรมศาสตร์
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

การออกแบบระบบการต่อลงดินเพื่อป้องกันฟ้าผ่าและความผิดปกติเป็นสิ่งที่สำคัญ ทั้งในด้านความปลอดภัยและความเชื่อถือได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สำหรับการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ซึ่งมักจะดำเนินการหรือเกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าบนดินเป็นประจำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบส่ง 69 kV 115 kV และ 24 kV ในกรณีเกิดฟ้าผ่าที่หัวเสาของสายส่งย่อยและสายจำหน่าย เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาความคงทนอยู่ได้ของการเป็นฉนวนของลูกถ้วย และเพื่อปรับปรุงระบบป้องกันฟ้าผ่าในอนาคต โดยวิธีการวิเคราะห์จะดำเนินการโดยใช้โปรแกรม Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program (ATP-EMTP) สำหรับสร้างแบบจำลองระบบส่ง 69 kV เพื่อต้องการทราบผลของแรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย ก่อน และหลังจากติดตั้งสายดินนอกเสา จากการศึกษาทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน คือ ขนาดกระแสฟ้าผ่า ความต้านทานดินอิมพัลส์ ระยะห่างระหว่างเสา รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า โดยมีความสัมพันธ์กับเวลาหน้าคลื่น

โดยการใช้กรณีศึกษาจากระบบของการไฟฟ้านครหลวง เนื่องจากข้อจำกัดของขอบเขตทาง ทำให้ต้องทำการติดตั้งสายส่งย่อยและสายจำหน่ายบนเสาต้นเดียวกันโดยมีสายล่อฟ้าหรือสายดินที่ติดตั้งอยู่ด้านบนสุดของเสาและมีระบบสายดินที่ฝังอยู่ภายในเสาคอนกรีตไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่นำกระแสผิดปกติหรือกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน ปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวง ได้มีการออกแบบการป้องกันฟ้าผ่า โดยอ้างอิงตามมาตรฐานของ IEEE ซึ่งเป็นข้อมูลสากลที่มีการใช้กันอยู่ทั่วไป เพื่อการประสานสัมพันธ์ทางฉนวน ผลที่ได้ คือความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าจะต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่า ที่ทำให้เพิ่มความเชื่อถือของระบบสายส่งย่อย และสายจำหน่าย พร้อมเสนอแนวทางให้ทำการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม โดยแนบด้านนอกของ เสาไฟฟ้าคอนกรีต เพื่อลดแรงดันที่หัวเสาและอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ หรือการติดตั้งสายดินควบเนื่องจากมุมป้องกันล้มเหลวที่จะเกิดขึ้น

(๒)

ซึ่งจากกรณีศึกษาทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับระบบของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งเป็นสิ่งที่คาดหวังว่า วิธีการที่ได้นำเสนอนี้ สามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์และเป็นแนวทางสำหรับใช้ประเมินสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่า ของสายส่งย่อย และสายจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงต่อไป



คำสำคัญ : สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า, สายดินนอกเสา, อัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ

Thesis title	Lightning Performance Assessment of MEA Subtransmission and Distribution Lines
Author	Kamol Supanus
Degree	Master Degree
Major Program	Electric Power Engineering Faculty of Engineering
Academic Year	2015

ABSTRACT

Design of grounding system to protect against lightning and fault is important for both safety and reliability especially for Metropolitan Electricity Authority (MEA) as mostly Metropolitan Electricity Authority operates on overhead networks. This thesis assesses lightning performance for 69 kV 115 kV overhead subtransmission lines, 24 kV distribution line using case study from Metropolitan Electricity Authority. Because of the limitation of the right of way, distribution feeders are regularly installed together with subtransmission lines in a single concrete pole. Overhead Ground Wire (OHGW) installed at top of the pole and grounding system in concrete pole protects fault current or direct lightning surge to ground. Metropolitan Electricity Authority has developed lightning protection based on an IEEE standard which uses international data for insulation coordination. As a result, reliability of the system is lower than the designed value. This thesis suggests a methodology to improve the performance in order to increase the reliability of subtransmission and distribution lines feeding distribution substations. This thesis recommends installation of addition external ground wire on the outer surface of the concrete pole to reduce top pole voltage and back flashover rate or installation of bundle overhead ground wires to protect shielding failure.

As all the case studies presented in the thesis, which constitute this thesis, are applied to existing systems of Metropolitan Electricity Authority, it is expected that the proposed methodologies can be served as useful practical guidelines for lightning performance assessment subtransmission lines and distribution lines of Metropolitan Electricity Authority.



Keywords : Lightning Performance, External Ground Wire, Back flashover

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ และ ดร.อรรถ พยอมหอม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ การไฟฟ้านครหลวง ที่กรุณาให้คำปรึกษาในการเขียนบทความวิชาการ บทความวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ช่วยถ่ายทอดความรู้ที่เอื้ออำนวยในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ตลอดทั้งอบรมสั่งสอนในเรื่องของการดำเนินชีวิต เพื่อให้ประสบความสำเร็จในหน้าที่การงานต่อไปในอนาคต และขอกราบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ให้คำแนะนำ และตรวจสอบจุดบกพร่องของวิทยานิพนธ์ ตลอดจนความช่วยเหลือจากคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อปริญญานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณ นายป้า สุภานัส และนางหลอด สุภานัส ซึ่งเป็นบิดาและมารดาของข้าพเจ้าอย่างสุดซึ้ง ที่ได้อบรมสั่งสอน ข้าพเจ้าตั้งแต่เยาว์วัยให้มีความตั้งใจ พากเพียร ปลูกฝังให้เห็นความสำคัญของการศึกษา และเรื่องการใช้ชีวิต อีกทั้งเป็นแรงบันดาลใจให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสในการศึกษาจนบรรลุผลสำเร็จ สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาการ องค์ความรู้ คุณธรรมจริยธรรมแก่ข้าพเจ้า

กมล สุภานัส

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(ก)
Abstract	(ค)
กิตติกรรมประกาศ	(จ)
สารบัญ	(ฉ)
สารบัญตาราง	(ช)
สารบัญภาพ	(ฎ)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 ทบทวนงานวิจัย	2
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	2
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์	3
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์	3
บทที่ 2 ทฤษฎีสำหรับการประเมินสมรรถนะด้านการป้องกันฟ้าผ่า	4
2.1 บทนำ	4
2.2 การเกิดฟ้าผ่า	5
2.3 ทฤษฎีแรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่า	13
2.4 ดัชนีสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่า	16
2.5 อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คน	24
2.6 เกณฑ์สมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบส่ง	25
บทที่ 3 หลักการของโปรแกรม ATP-EMTP และการจำลองระบบ	26
3.1 บทนำ	26
3.2 หลักการทั่วไปและความสามารถของโปรแกรม ATP-EMTP	27
3.3 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า	31
3.4 แผนผังการทำงานของโปรแกรม	51

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 วิธีการและผลการทดลองระบบสายส่งย่อย,สายจำหน่าย 24 kV	52
4.1 การลดความเสียหายเนื่องจากฟ้าผ่าในระบบ 69 kV ด้วยการติดตั้งสายดินนอกเสา	52
4.2 ผลกระทบของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าต่อแรงดันไฟฟ้าหัวเสาและ สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	61
4.3 การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบสายส่ง 69 kV และ 115 kV ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงแบบ 2 วงจร โดยเปรียบเทียบข้อมูล ในพื้นที่ของ กฟน. กับ ANSI ด้วยโปรแกรม TFlash	65
4.4 กรณีศึกษาผลของการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มรูปแบบต่าง ๆ ต่อการ สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบ 69 kV ในระบบจำหน่ายของไฟฟ้านครหลวง	71
4.5 การประเมินอัตราการวาบไฟตามผิวทั้งหมดเนื่องจากมุมป้องกันล้มเหลว	85
4.6 การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า 24 kV ในระบบจำหน่ายของ กฟน.	93
4.7 การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่า กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดิน นอกเสาเดิม	101
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	106
5.1 บทนำ	106
5.2 สรุปผลการวิจัย	106
5.3 ข้อเสนอแนะ	108
เอกสารอ้างอิง	109
ภาคผนวก ก	113
ภาคผนวก ข	114
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	128

สารบัญญัตราสาร

ตาราง	หน้า
2.1 สถิติจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของประเทศไทยเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2549-2555	17
3.1 ช่วงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า	30
3.2 ข้อมูลตัวแปรสายที่ใช้สร้างแบบจำลอง	37
3.3 ความถี่ของความยาวสายที่พิจารณา	39
3.4 ความเร็วคลื่นภายในคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่	41
3.5 คุณลักษณะวาทไฟตามผิวของฉนวนลูกถ้วยแขวนเพื่อรองรับระบบส่ง	43
3.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง	44
3.7 ความต้านทานจำเพาะของดินแบบต่าง ๆ	45
3.8 พารามิเตอร์สำหรับหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสา	49
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง	55
4.2 แรงดันหัวเสา (KV) ของรูปคลื่น 10/350 μ s	56
4.3 กระแสวิกฤต (KA) ของรูปคลื่น 10/350 μ s	57
4.4 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 10/350 μ s (KV) โดยมี Td เท่ากับ 69 วันต่อปี	57
4.5 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 10/350 μ s (KV) โดยมี Td เท่ากับ 88 วันต่อปี	58
4.6 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 10/350 μ s (KV) โดยมี Td เท่ากับ 99 วันต่อปี	58
4.7 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 10/350 μ s (KV) โดยมี Td เท่ากับ 122 วันต่อปี	58
4.8 รายละเอียดของการลงทุน (บาท/ต้น)	59
4.9 มูลค่าปัจจุบันสุทธิกรณีติดตั้งเพิ่มสายดินนอกเสา (ล้านบาท/100 วงจร-กม.)	60
4.10 แรงดันไฟฟ้าหัวเสา (KV) ของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าต่าง ๆ	63
4.11 กระแสวิกฤต (KA) ของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าต่าง ๆ	63
4.12 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า Td เท่ากับ 122 วันต่อปี	64
4.13 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง	69
4.14 ค่าดัชนีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบ 69 KV (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณี 1	70
4.15 ค่าดัชนีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบ 69 KV (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณี 2	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.16 ค่าดัชนีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบ 115 KV (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)กรณี 1	71
4.17 ค่าดัชนีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบ 115 kV (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณี 2	71
4.18 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง	75
4.19 แรงดันหัวเสา (kV) ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s	79
4.20 แรงดันหัวเสา (kV) ของรูปคลื่น 10/350 μ s	79
4.21 กระแสวิกฤต (kA) ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s	79
4.22 กระแสวิกฤต (kA) ของรูปคลื่น 10/350 μ s	80
4.23 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s ที่ Td เท่ากับ 69 วันต่อปี	80
4.24 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 10/350 μ s ที่ Td เท่ากับ 69 วันต่อปี	80
4.25 รายละเอียดค่าลงทุนแต่ละรูปแบบ (บาท/ต้น)	81
4.26 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (ล้านบาท/100 วงจร-กม.)	82
4.27 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง	88
4.28 กระแสวิกฤต (kA) ของรูปคลื่น 10/350 μ s สำหรับคำนวณ BFOR	89
4.29 กระแสวิกฤต (kA) ของรูปคลื่น 10/350 μ s สำหรับคำนวณ SFFOR	90
4.30 BFOR, SFFOR และ TFOR ของแต่ละกรณี (flashes/100 km/yr)	91
4.31 สถิติจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของประเทศไทยเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2546-2555	95
4.32 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง	96
4.33 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) รูปคลื่น 0.25/100 μ s	97
4.34 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) รูปคลื่น 1/100 μ s	97
4.35 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) รูปคลื่น 2/100 μ s	97
4.36 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) รูปคลื่น 4/100 μ s	98
4.37 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) รูปคลื่น 10/350 μ s	98
4.38 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต (kA) รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μ s	98
4.39 อัตราการเกิดวาบไฟย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μ s ใช้ Td=69 วันต่อปี	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.40 อัตราการเกิดวาทไฟย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μ s ใช้ Td=88 วันต่อปี	99
4.41 อัตราการเกิดวาทไฟย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μ s ใช้ Td=99 วันต่อปี	99
4.42 อัตราการเกิดวาทไฟย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μ s ใช้ Td=122 วันต่อปี	100
4.43 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาเดิม รูปคลื่น 0.25/100 μ s	101
4.44 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาเดิม รูปคลื่น 1/100 μ s	101
4.45 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาเดิม รูปคลื่น 2/100 μ s	102
4.46 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาเดิม รูปคลื่น 4/100 μ s	102
4.47 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาเดิม รูปคลื่น 10/350 μ s	102
4.48 ค่ากระแสวิกฤต (kA) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาเดิม	103
4.49 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤติ (เปอร์เซ็นต์) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาเดิม	103
4.50 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาเดิม ใช้ Td เท่ากับ 69 วันต่อปี	103
4.51 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาเดิม ใช้ Td เท่ากับ 88 วันต่อปี	104
4.52 ค่าอัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาเดิม ใช้ Td เท่ากับ 99 วันต่อปี	104

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.53 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาเดิม ใช้ Td เท่ากับ 122 วันต่อปี	104



สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
2.1 อากาศเริ่มเกิดไอออไนเซชัน	6
2.2 การเกิดฟ้าผ่าที่สมบูรณ์	6
2.3 ฟ้าผ่าขึ้น ฟ้าผ่าลง	7
2.4 การเกิดไอออไนเซชันจากก้อนเมฆ	8
2.5 การเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วระหว่างประจุบวกและประจุลบ	8
2.6 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าบวก	9
2.7 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลบ	9
2.8 ตัวอย่างสถิติของกระแสฟ้าผ่า	10
2.9 การเกิดลำฟ้าผ่าซ้ำ	11
2.10 การเกิดแรงดันเกินเมื่อฟ้าผ่าลงสายดินของระบบสายส่งย่อย	15
2.11 การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเมื่อฟ้าผ่าลงสายดินของระบบสายส่งย่อย	15
2.12 การกระจายความน่าจะเป็นสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย	17
2.13 ระยะเวลาฟ้าผ่าและระยะแนวราบระหว่างการกระจายและจุดศูนย์กลางทรงกลมถึงที่จุด C	21
2.14 ระยะเวลาฟ้าผ่า	23
2.15 ระยะเวลาฟ้าผ่าสั้น	23
2.16 ระยะเวลาฟ้าผ่ายาว	24
3.1 EMTP-ATP Module	31
3.2 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวงที่มีทั้งระบบ 69 kV และ 24 kV	33
3.3 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 20 เมตร 14 ตัน-เมตร	34
3.4 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 22 เมตร 18 ตัน-เมตร	35
3.5 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 22 เมตร 25 ตัน-เมตร	36
3.6 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 23 เมตร 18 ตัน-เมตร	37
3.7 การปักเสาพาดสายของสายส่งย่อยกรณีข้ามถนน	38
3.8 แสดงการป้อนข้อมูลแบบจำลองสายส่งย่อย 69 kV และสายจำหน่าย 24 kV	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
3.9 แสดงรูปแบบการจัดวางสายแบบจำลองสายส่งย่อย 69 kV และสายจำหน่าย 24 kV	40
3.10 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตส่วนบน	42
3.11 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตส่วนล่าง	42
3.12 ลูกถ้วยแขวน 52-3	43
3.13 วงจรสมมูลของรากสายดิน	46
3.14 การสร้างแบบจำลองความต้านทานของรากสายดินแบบแท่ง	47
3.15 การสร้างแบบจำลองตัวเหนี่ยวนำของรากสายดินแบบแท่ง	47
3.16 การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุของรากสายดินแบบแท่ง	48
3.17 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่ใช้ในการวิเคราะห์	50
3.18 การสร้างแบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสฟ้าผ่า	50
3.19 แผนผังการทำงานของโปรแกรม	51
4.1 การติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม	53
4.2 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม	54
4.3 ไดอะแกรมการจำลองของโปรแกรม ATP-EMTP ระบบ 69 kV	54
4.4 ระบบส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง	61
4.5 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวงระบบ 69 kV 2 วงจร	66
4.6 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวงระบบ 115 kV 2 วงจร	66
4.7 รูปแบบการจัดวางโครงสร้างระบบการต่อลงดินของสายส่งย่อยของการไฟฟ้านครหลวงระบบ 69 kV และ 115 kV จำนวน 2 วงจร	67
4.8 การกระจายความน่าจะเป็นสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย	68
4.9 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยของการไฟฟ้านครหลวงที่มีทั้งระบบ 69 kV และ 24 kV	73
4.10 ไดอะแกรมการจำลองของโปรแกรม ATP-EMTP ระบบ 69 kV	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ	หน้า
4.11 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดิน กรณี 1 (ปัจจุบัน)	77
4.12 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดิน กรณี 2	77
4.13 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดิน กรณี 3	78
4.14 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดิน กรณี 4	78
4.15 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดิน กรณี 5	78
4.16 แบบการติดตั้งท่อ PVC ฝังในเสาไฟฟ้าคอนกรีตของเสาสายส่งย่อย	83
4.17 การติดตั้งท่อ PVC สำหรับเสาสายจำหน่ายเพื่อป้องกันสายดิน	84
4.18 รูปแบบการติดตั้งระบบสายส่งย่อย 69 kV และ 24 kV บนต้นเดียวกัน	85
4.19 รูปแบบการติดตั้งระบบสายจำหน่าย 24 kV ด้วย Space Aerial Cable (SAC)	86
4.20 รูปแบบการ การคุ้มครองสายล่อฟ้าด้วยขนาดมุมป้องกัน 30°	87



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

การไฟฟ้านครหลวง เป็นรัฐวิสาหกิจที่มีหน้าที่ ในการจัดหาพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ รวม 3,192 ตารางกิโลเมตร เพื่อสนองความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยข้อมูลสถิติ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2558 การไฟฟ้านครหลวง ให้บริการผู้ใช้ไฟฟ้าประมาณ 3,425,355 ล้านราย โดยมีความต้องการ พลังไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand) ประมาณ 8,755,980 kW เพื่อเป็นการรองรับความต้องการไฟฟ้า ที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต การไฟฟ้านครหลวงจึงได้จัดทำแผนปรับปรุงและขยายระบบจำหน่าย พลังงานไฟฟ้าขึ้น เพื่อรองรับความต้องการในเขตพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง

สำหรับระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในส่วนที่เป็นระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า มีระดับแรงดัน 230 kV, 115 kV และ 69 kV และสายจำหน่ายที่เป็นสายอากาศที่ระดับแรงดัน 12 kV และ 24 kV (Overhead) โดยประมาณ 90 % ของระบบสายส่งและสายจำหน่าย จะเป็นสายอากาศเหนือดิน และเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องของขอบเขต (Right of Way) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการติดตั้งสายจำหน่ายอยู่บนเสาต้นเดียวกับระบบสายส่ง โดยมีสายล่อฟ้าหรือสายดิน (Overhead Ground Wire) ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนสุดของเสาและมีระบบสายดินที่ฝังอยู่ภายในเสาคอนกรีตไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่นำกระแสผิดพ่วงหรือกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน

ที่มาของปัญหานั้น เนื่องจากการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของการไฟฟ้านครหลวงไม่ได้มีการใช้ข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (Thunder Storm Days Per Year) ในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง เพื่อออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า เนื่องจากออกแบบอ้างอิงตาม IEEE ซึ่งทำให้การประสานสัมพันธ์ทางฉนวน (Insulation Coordination) ในระบบไฟฟ้าหรือการออกแบบป้องกันฟ้าผ่า ที่วิเคราะห์จากข้อมูลต่างประเทศ ทำให้ความเชื่อถือได้ของระบบที่เกิดขึ้นจริงต่ำกว่าค่าที่ออกแบบไว้ ทำให้เกิดปัญหาที่ตามมา คือ พบว่าจากข้อมูลสถิติไฟฟ้าดับ พบว่าสาเหตุเนื่องมาจากฟ้าผ่าลงระบบส่งของการไฟฟ้านครหลวง ทำให้เกิดไฟฟ้าดับ ซึ่งพบว่า บางบริเวณที่สายส่งพาดผ่านในที่โล่งแจ้งมาก ๆ มีสถิติไฟฟ้าดับเนื่องจากสายส่งค่อนข้างมาก จากผลกระทบดังกล่าว จึงต้องทำการประเมินสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งย่อยและสายจำหน่ายที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และทำการปรับปรุงสมรรถนะให้ดีขึ้นเพื่อให้มีความน่าเชื่อถือได้ โดยใช้ข้อมูลฟ้าผ่าในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง

1.2 ทบทวนงานวิจัย

งานวิจัยของพรชัย [1] นำเสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า ระบบสายส่ง ของ กฟน. โดยต่อเพิ่มสายดินนอกเสา ทำให้อัตราการเกิดวาปไฟตามผิวย้อนกลับมีค่าลดลงประมาณ 50 % และศึกษาผลของความต้านทานดินอิมพัลส์ เวลาหน้าคลื่นฟ้าผ่า และระยะห่างระหว่างเสาซึ่งพบว่า จะมีประสิทธิภาพสูง เมื่อความต้านทานดินที่ฐานเสาคความถี่ต่ำมีค่าไม่เกิน 10 โอห์ม ซึ่งเท่ากับค่ามาตรฐานความต้านทานดินที่ กฟน. แนะนำสำหรับระบบสายส่ง

บทความของ Alberto [2] บทความนี้ เป็นการประเมินของระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบ จำหน่าย โดยนำเสนอ IEEE Std. 1410-2004 ซึ่งแนะนำการปรับปรุง ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 2 วิธี คือ 1) แบบจำลองซึ่งปรับปรุงเพื่อหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำ และ 2) ใช้วิธีทางสถิติ โดยผลของ 2 วิธี ถูกนำมาวิเคราะห์ และค่าของพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบมากที่สุดได้ถูกกำหนด ซึ่งวิธีที่ นำเสนอทำการเปรียบเทียบกับ IEEE Std. 1410 เพราะให้ผลกับรูปแบบที่ใช้งานจริง และส่งผลกับ Finite Ground Conductivity

บทความของ Mamis [3] นำเสนอการวิเคราะห์ Lightning Surge เสาของระบบส่งต้องมี การจำลอง Nonuniform Line แต่สายอากาศจะสมมติให้เป็น Uniform หากพิจารณาผลของการ Sags การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์สายอากาศ ก็พิจารณาเป็นแบบ Nonuniform Tower Surge Response จะคำนวณโดยใช้ Nonuniform แบบ Single Phase Line Mmodels ทั้งเสาส่ง และสายกราวด์โดยการใส่สถานะของสาย จะได้ผลตอบสนองรวมของระบบ ใน S-Domain ใช้ Fast Inverse Laplace Transform เพื่อแปลงจาก Frequency เป็น Time Domain ผลของ Losses ถูกนำมาเสนอด้วย

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งย่อย 69 kV, 115 kV และ 24 kV
2. เพื่อนำข้อมูลเกี่ยวกับสถิติ จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของประเทศไทยมาใช้ในการ ประเมิน
3. เพื่อศึกษาการสร้างแบบจำลอง (model) และการจำลอง (simulation) ระบบไฟฟ้า โดยใช้ โปรแกรม ATP-EMTP (Alternative Transients Program-Electromagnetic Transients Program)
4. เพื่อทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ ในการลงทุนสำหรับการปรับปรุงสมรรถนะ การป้องกันฟ้าผ่า

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1. การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบสายส่งย่อย 69 kV 115 kV และ 24 kV
2. การประเมินจะดำเนินการโดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ในการจำลอง เพื่อทำการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า
3. การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบสายส่งย่อย จะดำเนินการประเมินในกรณีฟ้าผ่าสายดินที่หัวเสา

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีและมาตรฐานที่ใช้ในระบบสายส่งย่อย 69 kV 115 kV และ 24 kV
2. ศึกษาทฤษฎีแรงดันเกินเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟ้าผ่า
3. รวบรวมข้อมูลกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย และจำนวนวันที่ฝนฟ้าคะนองในพื้นที่ที่จะศึกษา และข้อมูลสถิติไฟฟ้าดับเนื่องจากฟ้าผ่าที่เกิดในพื้นที่
4. ใช้โปรแกรม ATP-EMTP จำลองการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อหาแรงดันหัวเสา แรงดันตกคร่อมพวงลู่ด้วย และกระแสวิกฤต ที่เป็นโครงสร้างปัจจุบัน และโครงสร้างที่ทำการปรับปรุง
5. รวบรวมเรียบเรียง ตรวจสอบข้อมูล และจัดทำรายงานผลการวิจัยและเผยแพร่ที่เกี่ยวกับโครงการ

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์

1. สามารถประเมินสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งย่อยก่อนและหลังทำการปรับปรุงได้
2. สามารถใช้โปรแกรมจำลอง ATP-EMTP ประเมินสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่า ของระบบสายส่งย่อยและสายจำหน่ายได้
3. สามารถวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ จุดคุ้มทุนในการปรับปรุงสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งย่อยและสายจำหน่ายได้
4. สามารถนำผลกระทบฟ้าผ่าไปใช้เป็นแนวทางการออกแบบของระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบส่งย่อยและสายจำหน่ายและใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าได้

บทที่ 2

ทฤษฎีสำหรับการประเมินสมรรถนะด้านการป้องกันฟ้าผ่า

2.1 บทนำ

ปัจจุบันการเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและมีอิทธิพลต่อระบบจำหน่ายนั้น เป็นปัญหาที่สำคัญเป็นอย่างมากเนื่องจากสร้างความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้าซึ่งกลายเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิตในปัจจุบัน ผลกระทบจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย สามารถทำให้เกิดไฟฟ้าดับชั่วคราว หรือไฟฟ้าดับถาวร ทำให้เกิดความผิดปกติพ่วงขึ้นในระบบจำหน่าย ก่อให้เกิดแรงดัน ไฟฟ้าเกินที่เป็นอันตราย ทำให้การส่งพลังงานต้องเสียเสถียรภาพ และสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ป้องกัน โดยปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมดส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือได้ และเสถียรภาพในการจ่ายไฟของระบบไฟฟ้า และส่งผลกระทบต่อการใช้ชีวิตประจำวันของประชาชน

การสนองความต้องการของผู้ใช้ไฟฟ้านั้นวันจะมีต้องการมากขึ้น การให้บริการพลังงานไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง จึงต้องบรรลุวัตถุประสงค์ในด้านของคุณภาพ และความน่าเชื่อถือได้โดยการไฟฟ้านครหลวงมีระบบส่งกำลังไฟฟ้า และระบบจำหน่าย ประกอบไปด้วย ระบบสายส่ง และระบบจำหน่าย ที่เป็นสายอากาศ และสายใต้ดิน โดยมีระดับแรงดันของสายส่ง คือ 230 kV, 115 kV และ 69 kV ในส่วนของระบบจำหน่าย จะมีระดับแรงดันของสายจำหน่าย คือ 12 kV, 24 kV โดยส่วนใหญ่แล้ว ระบบสายส่งและระบบจำหน่าย จะเป็นสายอากาศเหนือดินและเนื่องจากข้อจำกัดเรื่องขอบเขตทางที่จะทำการปักเสาพาดสาย มีเสาและสายไฟฟ้าเดิมอยู่ สาธารณูปโภคต่าง ๆ รวมทั้งกฎระเบียบข้อบังคับของเจ้าของพื้นที่ เช่น กรุงเทพมหานคร (กทม.) กรมทางหลวง (กทล.) กรมทางหลวงชนบท (กทช.) การทางพิเศษ (กทพ.) องค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) เป็นต้น เพราะฉะนั้นแล้ว จึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบจำหน่ายอยู่บนเสาไฟฟ้า ต้นเดียวกันกับระบบส่ง โดยมีสายตัวนำในเสาเป็นส่วนหนึ่งของระบบดินทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างสายดินเหนือ ศิระชะ และแท่งเหล็กดิน เพื่อทำหน้าที่นำกระแสผิดพ่วง หรือกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน

ระบบสายอากาศบนดิน นับว่าโอกาสที่จะเกิดปัญหาไฟฟ้าขัดข้องนั้นมีสูงและเกิดขึ้นได้ง่ายหากเปรียบเทียบกับระบบสายใต้ดิน โดยสาเหตุของการเกิดมีหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น ต้นไม้ สัตว์ อุปกรณ์ชำรุด และฟ้าผ่า ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ ถือเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างยิ่งเพราะฟ้าผ่านอกจากจะทำให้เกิดความขัดข้องขึ้นในระบบไฟฟ้า ยังส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบ อีกด้วย

การเกิดไฟฟ้าช็อตซึ่งเนื่องจากฟ้าผ่านั้น โดยส่วนใหญ่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายดินเหนือศีรษะโดยตรง หากว่ากระแสฟ้าผ่าทำให้แรงดันที่ตกคร่อมลูกถ้วยมากกว่าที่แรงดันที่พวงลูกถ้วยสามารถที่ทนได้ เนื่องมาจากกระแสฟ้าผ่าที่มีค่ามาก หรือความต้านทานของรากสายดินมีค่ามาก ซึ่งเป็นสาเหตุให้แรงดันระหว่างสายเฟสของตัวนำ และสายดินเหนือศีรษะมีค่ามากกว่าแรงดันวาทไฟวิกฤต ก็จะทำให้เกิดการวาทไฟตามผิว ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การเกิดวาทไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ (Back flashover) โดยจะเป็นดัชนีที่สำคัญในการประเมินสมรรถภาพฟ้าผ่า ของระบบส่ง

2.2 การเกิดฟ้าผ่า

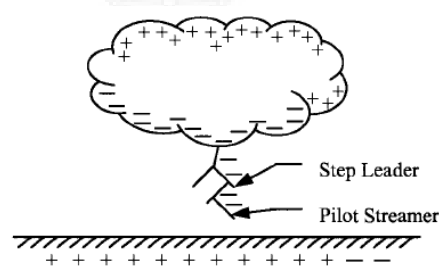
ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศ ซึ่งนับว่าเป็นปัญหาที่สำคัญเป็นอย่างยิ่ง สามารถสร้างความเสียหายให้แก่ระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งได้กลายเป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีวิตในปัจจุบัน โดยผลกระทบจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นกับระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำให้เกิดไฟฟ้าดับชั่วคราว หรือไฟฟ้าดับถาวร ทำให้เกิดความผิดปกติขึ้นในระบบ ก่อให้เกิดแรงดันเกินที่เป็นอันตราย ทำให้การส่งจ่ายพลังงานต้องเสียเสถียรภาพ และสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ป้องกัน

ฟ้าผ่าเกิดขึ้นเนื่องจากการคายประจุหรือดิสชาร์จของประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆ ซึ่งการดิสชาร์จของฟ้าผ่าเกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องพึ่งอิเล็คโตรด การสะสมของประจุที่มีขั้วต่างกันส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าระหว่างกลุ่มประจุเหล่านั้น หากประจุสะสมกันและมีปริมาณมากขึ้น และทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆ และดินมีค่าสูงมากจนอากาศแตกตัวแล้วเกิดไอออนในเซชัน แบบสมบูรณจากก้อนเมฆลงสู่ดิน

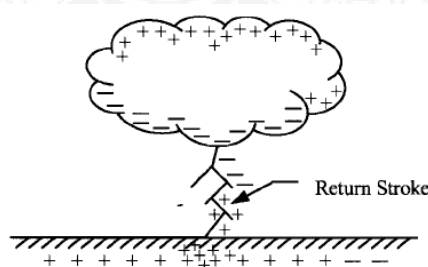
การเกิดประจุก้อนเมฆเกิดขึ้นเนื่องจากมีลมพัดเม็ดฝนจากด้านล่างของก้อนเมฆขึ้นไปด้านบนที่เย็นมากจนจับตัวเป็นเกล็ดน้ำแข็ง และเกิดการเสียดสีของอากาศและหยดน้ำทำให้เกิดไฟฟ้าสถิต โดยส่วนมากด้านล่างของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบ และมีส่วนน้อยเป็นประจুবวก โดยมีค่าประมาณ 10-15 % โดยในส่วนที่เป็นประจুবวกนั้น เกิดขึ้นเนื่องจากหยดน้ำมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่ลมจะพัดพาขึ้นไปได้ และส่วนบนของก้อนเมฆซึ่งห่างขึ้นไปด้านบนอาจเป็น 10 กม.

การเกิดประจุก้อนเมฆทำให้สนามไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆและดิน หากสนามไฟฟ้าสูงมากเกินกว่าค่าที่อากาศทนได้ จะทำให้เกิดการแตกตัวของอากาศและเปลี่ยนสภาพของอากาศจากฉนวนเป็นตัวนำ และถ้าสนามไฟฟ้าสูงมาก การเกิดแตกตัวของอากาศก็จะขยายถึงพื้นดินจนเกิดฟ้าผ่า

เมื่อสนามไฟฟ้าใต้ก้อนเมฆเกินกว่าที่อากาศจะทนได้ (สนามไฟฟ้าวิกฤติใต้ก้อนเมฆประมาณ 10 kV/cm) ก็เกิดไอออไนเซชัน ดังแสดงในภาพ 2.1 แต่เนื่องจากสภาพอากาศในแต่ละบริเวณมีความดันและอุณหภูมิของอากาศไม่เท่ากัน เพราะฉะนั้นการเคลื่อนที่อันวอยต่อการเกิดไอออไนเซชันต่างกัน ทำให้เห็นการเกิดการแตกตัวของอากาศเป็นเหมือนรากต้นไม้ ดังแสดงในภาพ 2.2 ด้านบนของหัวฟ้าผ่า เรียกว่า “ฟ้าผ่านำทาง” (Pilot Streamer) และแต่ละแยกของฟ้าผ่าเรียกว่า Step Leader ช่วงดังกล่าวประจุบก้อนเมฆจะเคลื่อนที่ลงมาไม่รวดเร็วนัก และจะเกิดขนาดกระแสไม่ที่ร้อยแอมแปร์ และในช่วงนี้ยังไม่เห็นแสงหรือได้ยินเสียง โดยเมื่อฟ้าผ่าลงถึงพื้นดินจะเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วระหว่างประจุบวกและลบทำให้เกิดกระแสรุนแรงมีทั้งแสงและเสียง กระแสเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุการเคลื่อนที่ของประจุจากพื้นดินเพื่อขึ้นไปรวมตัวกับประจุบก้อนเมฆ เรียกฟ้า “ลำฟ้าผ่าย้อนกลับ”



ภาพ 2.1 อากาศเริ่มเกิดไอออไนเซชัน



ภาพ 2.2 การเกิดฟ้าผ่าที่สมบูรณ์

การเกิดฟ้าผ่าลงมาและเกิดลำฟ้าผ่าย้อนกลับ เรียกว่า เกิดฟ้าผ่าขึ้นลงหนึ่งรอบ โดยฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นโดยทั่วไป จะมีการเกิดขึ้นฟ้าผ่าขึ้นลงเฉลี่ย 2-3 รอบต่อการเกิดฟ้าผ่าหนึ่งครั้ง ดังนั้นการที่เห็นฟ้าผ่าแต่ละครั้งอาจเกิดฟ้าผ่าขึ้นลง 2-3 รอบ และที่เคยวัดการเกิดฟ้าผ่าขึ้นลงสูงสุด ปรากฏว่ามีการเกิดฟ้าผ่าขึ้นลงทั้งหมด 42 รอบต่อฟ้าผ่าหนึ่งครั้ง

2.2.1 ลักษณะฟ้าผ่าพื้นโลก

ลักษณะของฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกสามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะต่อไปนี้

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

2.2.1.1 ฟ้าผ่าขึ้นหรือลง

ฟ้าผ่าอาจเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 กรณี ทั้งฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลง หากฟ้าผ่าพื้นโลก เริ่มต้นจากก้อนเมฆที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตเกิดไอออไนเซชันของอากาศขยายตัวออกไป เป็นลีดเดอร์วิ่งสู่พื้นโลกทำให้เกิดการดิซชาร์จประจุลงสู่พื้นโลกเป็นลำฟ้าผ่า เรียกว่า ฟ้าผ่าลง แต่ ฟ้าผ่าเริ่มต้นจากพื้นโลกไปสู่ก้อนเมฆ ก็สามารถเกิดขึ้นได้เช่นเดียวกัน โดยมากลีดเดอร์จะเริ่มต้น ก่อตัวจากสิ่งก่อสร้างหรือวัตถุสูง ๆ ในที่พื้นที่ราบจะเริ่มจากยอดที่สูงจากพื้นตั้งแต่ 100 เมตรขึ้นไป เช่น ยอดเสาหรือหอคอยสูง ๆ หรือสิ่งก่อสร้างที่อยู่บนยอดเขาสูง แต่กระแสฟ้าผ่าขึ้นจะมีค่าต่ำ เรียกว่า ฟ้าผ่าขึ้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะพบว่าฟ้าผ่าขึ้นมักจะเกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่าลง ฟ้าผ่าขึ้น และ ฟ้าผ่าลงนั้นจะเกิดขึ้นและมีระยะเวลาที่สั้นและรวดเร็ว โดยไม่สามารถจะสังเกตแยกได้ว่าเป็น ฟ้าผ่าขึ้น หรือฟ้าผ่าลง แต่อาจสังเกตดูจากลำแสงฟ้าผ่าซึ่งมีลักษณะของฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลง โดยลำแสงฟ้าผ่าขึ้นและฟ้าผ่าลงมีลักษณะต่างกัน อธิบายได้คือ หากฟ้าผ่าลงจะมีแขนงแตกจาก ลำฟ้าผ่ากระจายลงสู่พื้นโลก มีลักษณะคล้ายรากต้นไม้ โดยลีดเดอร์นั้นจะกระจายทางขยายตัวลงมา หลาย ๆ ทางแล้วแต่ว่าทางใดจะเกิด ไอออไนเซชันได้ง่าย ในทางกลับกันหากเป็นฟ้าผ่าขึ้นจะ สังเกตเห็นการขยายตัวของแขนงขึ้นไปสู่เบื้องบน



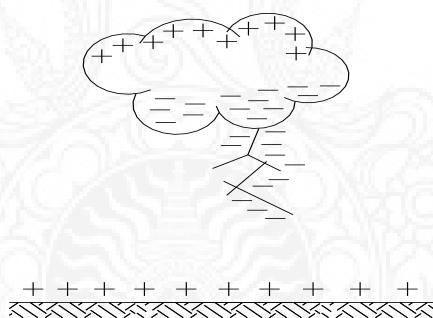
(ก)

(ข)

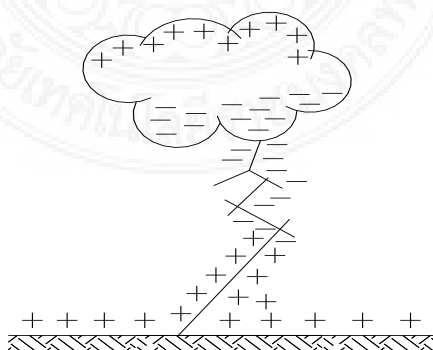
ภาพ 2.3 ฟ้าผ่าลง(ก) ฟ้าผ่าขึ้น(ข)

2.2.1.2 ขั้วของกระแสฟ้าผ่า เป็นบวกหรือลบ

กระแสฟ้าผ่าเป็นกระแสที่ไหลทางเดียว (Unidirection) โดยอาจเป็นบวกหรือเป็นลบก็ได้ ฉะนั้นขั้วบวกหรือลบจึงเป็นลักษณะสมบัติอย่างหนึ่งของฟ้าผ่า กระแสฟ้าผ่าบวกหมายถึงลำฟ้าผ่านำเอาประจุบวกจากก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลก กระแสฟ้าผ่าลบหมายถึงลำฟ้าผ่านำเอาประจุลบจากก้อนเมฆดิสชาร์จลงสู่พื้นโลก ประจุที่อยู่ส่วนล่างของก้อนเมฆมีสองกลุ่ม คือประจุบวกและประจุลบ แต่ส่วนใหญ่ 80-90 % เป็นประจุลบ ดังนั้นฟ้าผ่าที่เกิดส่วนใหญ่ก็เนื่องมาจากประจุลบ เรียกว่าฟ้าผ่าลบ หากการไอออไนเซชันเกิดขึ้นจากกลุ่มประจุบวกได้ก้อนเมฆฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น เรียกว่าฟ้าผ่าบวก การเกิดไอออไนเซชันของอากาศแล้วกระจายทางลงมาเป็นขั้น ๆ (Stepped Leader) ลงมาถึงพื้นโลก ดังแสดงในภาพ 2.4 เกิดการรวมตัวอย่างรวดเร็วของประจุลบจากก้อนเมฆ และประจุบวกที่พื้นโลก เป็นผลให้เกิดแสง สี เสียง ดังแสดงในภาพ 2.5 การเคลื่อนตัวของประจุดังแสดงในภาพ 2.5 อาจเกิดกระแสที่มีขนาด 200-300 แอมแปร์แต่การรวมตัวอย่างรวดเร็วของประจุดังแสดงในภาพ 2.5 ทำให้เกิดกระแสสูงมากอย่างน้อย 1-2 หมื่นแอมแปร์ ฟ้าผ่าที่เริ่มจากประจุลบดังแสดงในภาพ 2.4 และ 2.5 เรียกว่า ฟ้าผ่าลบ



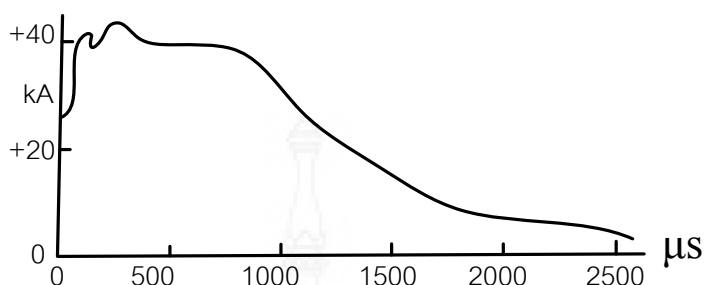
ภาพ 2.4 การเกิดไอออไนเซชันจากก้อนเมฆ



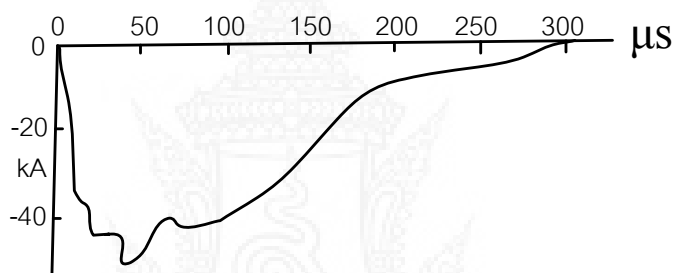
ภาพ 2.5 การเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วระหว่างประจุบวกและประจุลบ

2.2.1.3 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าบวกและลบ มีลักษณะตามภาพ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ



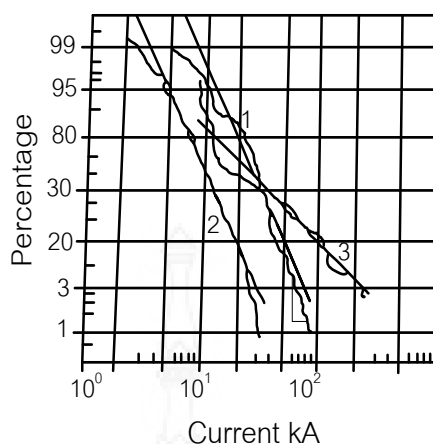
ภาพ 2.6 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าบวก



ภาพ 2.7 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลบ

2.2.1.4 ขนาดกระแสฟ้าผ่า

ขนาดกระแสฟ้าผ่า หมายถึง ค่ายอดของรูปคลื่นฟ้าผ่าโดยจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับว่าเป็นฟ้าผ่าขึ้นหรือฟ้าผ่าลง ปริมาณของประจุที่ดิสชาร์จ ชั่วบวกหรือชั่วลบ จากการบันทึกพบว่ากระแสฟ้าผ่าชั่วลบมีค่าสูงถึง 90 กิโลแอมแปร์ และชั่วบวกมีค่าสูงถึง 270 กิโลแอมแปร์ในภาพ 2.8 แสดงถึงสถิติกระจายของกระแสฟ้าผ่าที่วัดได้จากสถานีวิจัยฟ้าผ่าบนยอดเขา San Salvatore ภาคใต้ของประเทศไทยระหว่างปี 1963 ถึง 1971 จากเส้นกราฟ ดังแสดงในภาพ 2.8 จะเห็นว่ากระแสฟ้าผ่ามีค่าเฉลี่ย (ที่ความน่าจะเป็น 50 %) ชั่วลบประมาณ 30 กิโลแอมแปร์ สำหรับฟ้าผ่าลำแรก และลำฟ้าผ่าตามชั่วลบประมาณ 12 กิโลแอมแปร์ และโดยเฉลี่ยของฟ้าผ่าบวกประมาณ 35 กิโลแอมแปร์



ภาพ 2.8 ตัวอย่างสถิติของกระแสฟ้าผ่า

ลำฟ้าผ่าแรกชั่ววอลบ (ค่าที่ 50 % = 30 kA)

ลำฟ้าผ่าตามชั่ววอลบ (ค่าที่ 50 % = 12 kA)

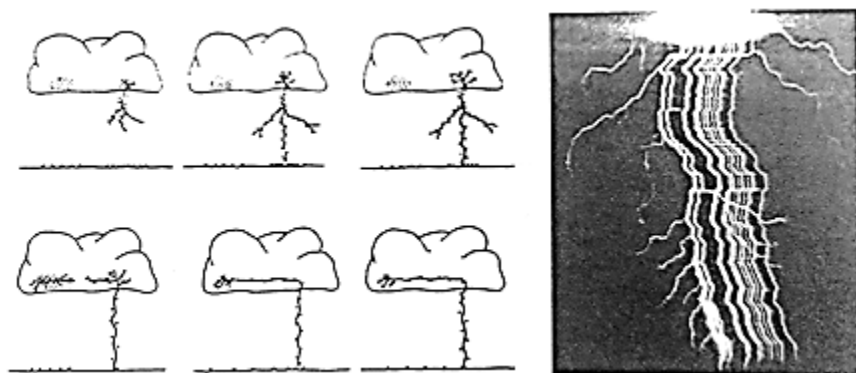
ลำฟ้าผ่าชั่ววอก (ค่าที่ 50 % = 35 kA)

2.2.1.5 จำนวนครั้งฟ้าผ่าต่อเนื่อง

หากสังเกตดูลำฟ้าผ่าขณะที่เกิดฟ้าผ่า มักจะพบว่า มีลำฟ้าผ่าเกิดขึ้นซ้ำตามแนวลำฟ้าผ่าแรก ๆ ซึ่งบางทีมีการผ่าซ้ำหลายครั้ง ปรากฏการณ์เช่นนี้ สามารถอธิบายได้ว่า ในก้อนเมฆนั้นอาจจะมีศูนย์กลางรวมกลุ่มของประจุหลายแห่ง และเมื่อประจุใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตก่อน ก็จะดิสชาร์จลงสู่พื้นโลกเป็นลำฟ้าผ่าแรก หลังจากกลุ่มประจุแรกดิสชาร์จไปหมดแล้ว ก็จะทำให้เกิดสตรีมเมอร์ระหว่างกลุ่มประจุในก้อนเมฆ และเกิดดิสชาร์จลงสู่พื้นตามแนวลำฟ้าผ่าแรก ที่เป็นเช่นนี้ เพราะว่าอากาศในแนวลำฟ้าผ่าที่วิ่งลงมาก่อนนั้นยังคืนตัวกลับเป็นฉนวนได้ไม่ทันที กล่าวคือยังมีสภาพนำไฟฟ้า

ฟ้าผ่าซ้ำนี้จะมีช่วงเว้นระยะเกิดซ้ำระหว่างครั้งประมาณ 5-30 มิลลิวินาที ฟ้าผ่าตามนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีแขนง เพราะไม่มีการขยายตัวเป็นจิ้งหะกั้ว (Stepped leader) เวลาช่วงหน้าคลื่นของฟ้าผ่าซ้ำนี้จะมี ความชันสูงมาก อาจถึง 120 กิโลแอมป์ต่อไมโครวินาที ซึ่งความชันของคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกจะมีค่าเพียง 32 กิโลแอมป์ต่อไมโครวินาที และความชันเฉลี่ยประมาณ 12 กิโลแอมป์ต่อไมโครวินาที จากการบันทึกพบว่า การเกิดฟ้าผ่าซ้ำหลาย ๆ ครั้ง จะมีหรือไม่ขึ้นอยู่กับภูมิประเทศ ในประเทศโซนหนาวจะมีฟ้าผ่าลำเดี่ยวเป็นส่วนใหญ่ แต่ในประเทศโซนร้อนจะมีจำนวนฟ้าผ่าซ้ำมากกว่า 2 ครั้ง อย่างเช่น ในประเทศอังกฤษ จะมีฟ้าผ่าแต่ละครั้ง 1-2

ลำฟ้าผ่า ในแอฟริกาฟ้าผ่าซ้ำเฉลี่ย 4 ลำฟ้าผ่า และในประเทศสหรัฐอเมริกาพบว่ามีฟ้าผ่าซ้ำถึง 26 ลำต่อวาบฟ้าผ่า 1 ครั้ง ดังอย่างภาพถ่ายลำฟ้าผ่าซ้ำ ดังแสดงในภาพ 2.9



ภาพ 2.9 การเกิดลำฟ้าผ่าซ้ำ

2.2.2 ผลจากฟ้าผ่า

ผลจากฟ้าผ่าสามารถก่อให้เกิดความเสียหายหรือเกิดอันตรายสามารถแยกออกได้เป็น 5 ประเภท คือ

- 2.2.2.1 ผลทางความร้อน
- 2.2.2.2 ผลทางแรงกล
- 2.2.2.3 ผลทางไฟฟ้า
- 2.2.2.4 การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า
- 2.2.2.5 แรงดันสปาร์กด้านข้าง

2.2.2.1 ผลทางความร้อน

เมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่า จะสามารถสังเกตลำแสงจ้าของฟ้าผ่า โดยลำแกนมืดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเซนติเมตร และมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 K อุณหภูมิสูงมากขนาดนี้ย่อมก่อให้เกิดเพลิงไหม้แก่วัสดุติดไฟได้ แม้ว่าช่วงระยะเวลาการไหลของกระแสจะสั้นรวดเร็วก็ตาม

หากฟ้าผ่าลงบนโลหะ มักจะมีร่องรอยของการถูกฟ้าผ่าเกิดขึ้นตรงตำแหน่งที่ผ่า ที่เป็นเช่นนี้เพราะ กระแสฟ้าผ่า เมื่อแปลงเป็นพลังงานความร้อน จะมีค่ามากพอที่จะทำให้โลหะหลอมละลายได้ นั่นหมายความว่า โลหะบางทั้งหลาย มีโอกาสถูกฟ้าผ่า หลอมละลายทะลุตรงจุดที่ฟ้าผ่ากระทบได้ถ้าความหนาไม่พอ และหากเป็นถึงโลหะที่เก็บวัสดุไวไฟ เช่น ถังน้ำมันเชื้อเพลิง อาจจะทำให้เกิดการระเบิดขึ้นตามมาได้

เพราะฉะนั้นการออกแบบสายล่อฟ้า โดยต้องใช้เสาล่อฟ้าเป็นตัวล่อ หรือเป็นจุดที่ให้ฟ้าผ่าลง และมีสายตัวนำลงดินเป็นทางนำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดินโดยเร็วที่สุด และ

จะต้องไม่ทำให้สายตัวนำลงดินหลอมละลาย หรืออุณหภูมิสูงขึ้น จนเป็นเหตุให้เกิดเพลิงไหม้ นั่นหมายความว่า สายตัวนำลงดิน จะต้องมีส่วนที่ภาคตัดขวางขนาดโตพอ

2.2.2.2 ผลทางแรงกล

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

กรณีฟ้าผ่าลงบนวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า กระแสฟ้าผ่าจะวิ่งไปตามแนวที่มีความต้านทานน้อยที่สุด ถ้ามีความชื้นในวัสดุนั้น น้ำหรือความชื้นจะเปลี่ยนเป็นไอ เกิดความดัน อาจทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้

2.2.2.3 ผลทางไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่ามีหลายลักษณะ คือ

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

2.2.2.4 การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า

ผลทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่า ประการแรก ก็คือ จะทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำ หากแรงดันเหนี่ยวนำสูงพอก็อาจเกิดสปาร์กได้

2.2.2.5 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 [4]-[8]

2.3 ทฤษฎีแรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟ้าผ่า

แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เกิดขึ้นจากสาเหตุใหญ่ 2 ประการ คือ เนื่องจากฟ้าผ่า และเนื่องจากสวิตช์ ซึ่งแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าจะมีค่าสูงมากกว่าแรงดันเกินเนื่องจากสวิตช์ ดังนั้นการออกแบบฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า จึงพิจารณาจากแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าเป็นหลัก โดยแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าแบ่งได้ 4 กรณี คือ

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

กรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟส จะทำให้เกิดแรงดันเกินมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอื่น ๆ แต่สามารถป้องกันได้ โดยการติดตั้งสายดินเหนือสายเฟส เพื่อให้ฟ้าผ่าลงสายดิน จึงทำให้เกิดฟ้าผ่าลงสายดินแทน ซึ่งถ้าไม่พิจารณากรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟสแล้ว กรณีที่ทำให้เกิดแรงดันเกินในสายเฟสรุนแรงที่สุด คือ กรณีฟ้าผ่าลงสายดิน ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะแรงดันเกินที่จะเกิดขึ้นในสายเฟสเนื่องจากฟ้าผ่าลงสายดิน

2.3.1 แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย [8]-[9]

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยตรง นั้นย่อมทำให้มีแรงดันเกินขึ้นบนสายส่ง เนื่องจากฟ้าผ่าเปรียบเสมือนต้นกำเนิดของตัวจ่ายกระแส เมื่อมีกระแส I วิ่งในสายส่ง ซึ่งมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์ Z_w จะเกิดแรงดันสูงเป็นคลื่นจร วิ่งไปบนสายส่งทั้งสองทางของจุดที่ฟ้าลงมีค่าเท่ากับ $\Delta U = I Z_w / 2$ แรงดันสูงคลื่นจรนี้ เมื่อวิ่งไปถึงจุดที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่ออยู่ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ได้แรงดันเกินในสายเฟส คำนวณได้จาก

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

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 หรือเสาไฟฟ้ามีค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานของรากสายดินมีค่าสูง จะทำให้เกิดแรงดันเกิน ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 1 และอาจมีค่าสูงมากพอที่จะทำให้การเกิดวาบไฟตามผิวของพวกลูกถ้วยฉนวนที่ใช้ยึดหรือรองรับสายไฟได้ เรียกว่า เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Backflash Over) เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขึ้น อาจทำให้เกิดการเจาะทะลุบนลูกถ้วยฉนวน เกิดลัดวงจรลงดินเกิดผิดพ่วงขึ้นในระบบ ล้วนแล้วแต่กระทบต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

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

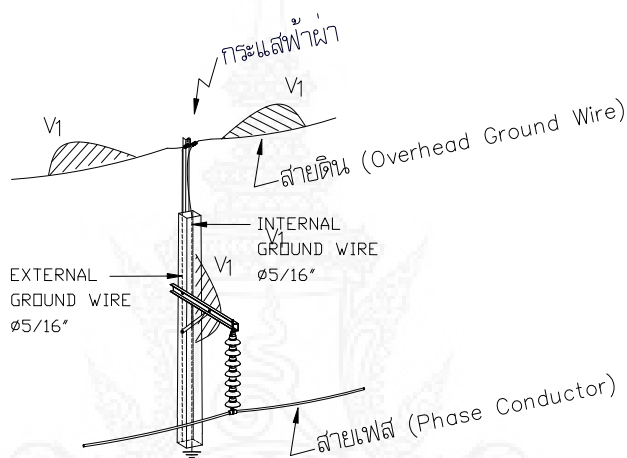
$$V_1 = Z_{total} \times I \quad (2.3)$$

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

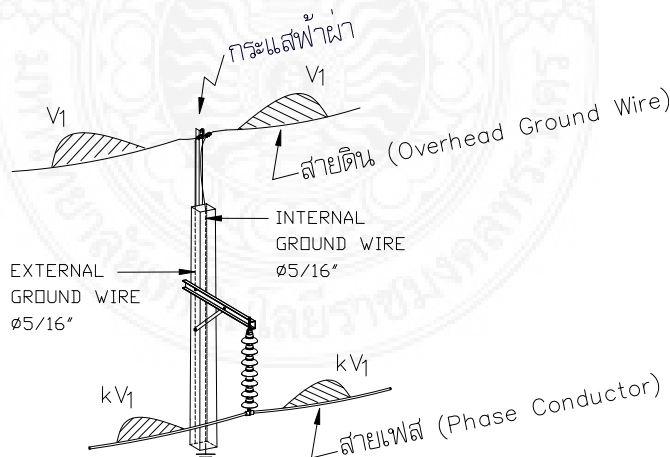
โดยเสิร์จอิมพีแดนซ์รวม คำนวณได้จากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินและเสาขนานกัน

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

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



ภาพ 2.10 การเกิดแรงดันเกินเมื่อฟ้าผ่าลงสายดินของระบบสายส่งย่อย



ภาพ 2.11 การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเมื่อฟ้าผ่าลงสายดินของระบบสายส่งย่อย

แรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วย คำนวณได้จากสมการที่ (2.5) โดยแรงดันคร่อมฉนวน ขึ้นอยู่กับแรงดันเกินในสายดิน ซึ่งมีผลมาจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา และ กระแสฟ้าผ่า

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

เมื่อ V_{ins} คือ แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย

หากพิจารณาเฉพาะแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในสายดิน และแรงดันเกินเหนี่ยวนำในสายเฟส จะทำให้การเกิดวาทไปตามฉนวนของลูกถ้วยนั้นเกิดขึ้นได้ง่าย ซึ่งในทางปฏิบัติผลของการเกิดแรงดันเกินยังมีในส่วนของความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาเป็นปัจจัยหนึ่งในการส่งผลกระทบต่อ การเกิดด้วย เพราะฉะนั้นจึงคำนึงถึงความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาด้วย

2.4 ดัชนีสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Performance Indices)

สถิติจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (T_d) ของประเทศไทยเฉลี่ย ในพื้นที่ของจังหวัด กรุงเทพมหานคร ช่วงปี 2536-2540 ดังตาราง 2.1 ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้ T_d เท่ากับ 68 วัน ซึ่งค่าดังกล่าวจะนำไปใช้คำนวณค่าของความหนาแน่นของจำนวนลำฟ้าผ่าลงสู่ดิน (Ground Flash Density (GFD): N_g) ดังสมการที่ (2.6) [10]-[12]

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

เมื่อ N_g คือ ความหนาแน่นของจำนวนลำฟ้าผ่าลงสู่ดิน (flashes/km²/yr)

T_d คือ จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (วัน/ปี)

ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอดโดยข้อมูลเหล่านี้ค่าที่ได้ เป็นไปตามพื้นที่และวิธีการตรวจวัด แต่สามารถแสดงในรูปสมการอย่างง่ายของขนาดกระแสฟ้าผ่า ได้จากการวัดในภาคสนามเกินกว่ากระแสค่ายอด สำหรับในประเทศไทยจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการ ไฟฟ้าผ่าผลิต ซึ่งการกระจายสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทยเป็นไปตามภาพ 2.12 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 ได้ดังนี้ [10]-[12]

ตาราง 2.1 สถิติจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของประเทศไทยเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2549-2555

ปี	จำนวนวันฝนตกเฉลี่ยต่อปี (T_d)	ความหนาแน่นฟ้าผ่า (ครั้งต่อตารางกิโลเมตรต่อปี)
2549	82	3.2819
2550	98	4.1009
2551	116	5.0632
2552	116	5.0632
2553	122	5.3926
2554	103	4.3641
2555	55	3.8928

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

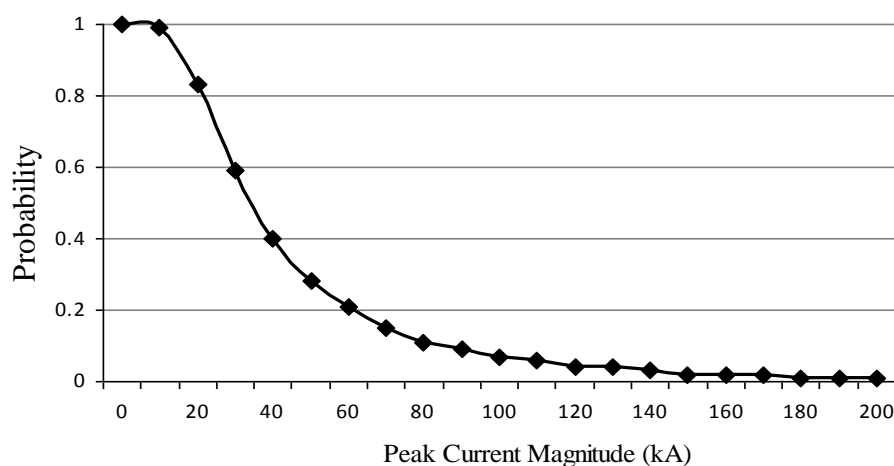
เมื่อ $P(I)$ คือ ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%)

I คือ กระแสฟ้าผ่าค่ายอด (kA)

M คือ กระแสฟ้าผ่าค่ามัธยฐานเท่ากับ 34.4 kA [9]

B คือ ค่าคงที่สำหรับประเทศไทยเท่ากับ 2.5 [9]

จากสมการที่ 2.7 เมื่อนำมาแสดงในรูปกราฟจะได้ดังภาพ 2.12



ภาพ 2.12 การกระจายความน่าจะเป็นสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย [8, 9]

การเกิดฟ้าผ่าที่ตำแหน่งต่าง ๆ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะใช้ในการคำนวณอัตราความล้มเหลวในระบบไฟฟ้ากำลัง สายส่งและสายจำหน่ายสามารถป้องกันการถูกฟ้าผ่าได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการติดตั้งสายล่อฟ้าเหนือสายเฟสเพื่อลดแรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากฟ้าผ่าในทางปฏิบัติมุมป้องกันจะใช้ที่ 30 องศาสำหรับอาคารทาวเวอร์ที่มีความสูง 30 เมตรขึ้นไปมุมนี้เป็นมุมป้องกันถึงแม้การออกแบบการประสานสัมพันธ์ทางฉนวนสำหรับสายส่งและสายจำหน่ายอากาศในพื้นที่ของการไฟฟ้านครหลวงจะทำตามมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงลูกถ้วยต้องสามารถทนแรงดันเนื่องจากฟ้าผ่าได้ กระแสสูงสุดที่ลูกถ้วยจะสามารถทนได้ก่อนที่จะเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับถูกเรียกว่ากระแสวิกฤต สำหรับอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับถูกคำนวณจากสมการที่ (2.11) และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (Shielding Failure Flashover Rate: SFFOR) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.13)

2.4.1 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวทั้งหมด (Total Flashover Rate: TFOR) [13], [14]

2.4.1.1 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่ไม่มีสายดินชิงในอากาศ

อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่ไม่มีสายดินชิงในอากาศ ได้จากผลรวมของสองส่วนคือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟสโดยตรง (Direct Lightning Failure Flashover Rate: DLFFOR) และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเนื่องจากฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่ง (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	การเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเนื่องจากฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่ง (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)

2.4.1.2 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่มีสายดินชิงในอากาศ

อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวของระบบที่มีสายดินชิงในอากาศ ได้จากผลรวมของสามส่วนคือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายดินชิงในอากาศทำให้เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate: BFOR) อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟสซึ่งเกิดจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (Shielding Failure Flashover Rate: SFFOR)

อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเนื่องจากฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่ง (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 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายเฟสซึ่งเกิดจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)

แต่เนื่องจากค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเนื่องจากฟ้าผ่าลงดินใกล้แนวสายส่งในสมการที่ (2.9) นั้นโดยทั่วไปจะมีค่าน้อยมากจึงสามารถตัดทิ้งได้ดังนั้นสมการที่ (2.9) จะลดรูปเป็นดังสมการที่ (2.10)

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

2.4.2 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate: BFOR)

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดินที่หัวเสาไฟฟ้าคอนกรีต กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะกระจายลงสู่ดินและอีกส่วนหนึ่งจะไหลไปตามสายล่อฟ้าไปยังเสาข้างเคียงในลักษณะของคลื่น และเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งทำให้เกิดการหักล้าง หรือเสริมกันกับแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นบนยอดเสา ทำให้เกิดแรงดันในสายดิน (V_1) และเกิดเหนี่ยวนำในสายเฟส (V_p) ซึ่งจะมีค่าประมาณ 20-30 % ของแรงดันเกินในสายดิน ทำให้มีแรงดันคร่อมพวงฉนวนลูกถ้วยเกิดขึ้นตามสมการที่ (2.5) โดยแรงดันคร่อมพวงฉนวนนี้ขึ้นอยู่กับแรงดันเกินในสายดิน ซึ่งมีผลมาจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาและค่ากระแสฟ้าผ่า

ถ้าแรงดันเกินในสายดินและแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในสายเฟสมีค่าแตกต่างกันมากกว่าค่าความคงทนของพวงฉนวนลูกถ้วยจะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover) ของพวงฉนวนลูกถ้วยและอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดไฟฟ้าดับต่อมาซึ่งในทางปฏิบัติแรงดันเกินที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาดูด้วยสำหรับสมการที่ใช้คำนวณหาค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ จะเป็นตามสมการที่ (2.11) ดังนี้

$$\text{BFOR} = P(I \geq I_c) \times N_I \quad (2.11)$$

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

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

2.4.3 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน

(Shielding Failure Flashover Rate: SFFOR)

อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกันสามารถหาได้จากสมการที่ (2-12) โดยประกอบไปด้วย จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกันคูณกับผลคูณของความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่า I น้อยกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤตและความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต

$$\text{SFFOR} = N_I \times P(I \leq I_p) \times P(I \geq I_c) \quad (2.13)$$

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

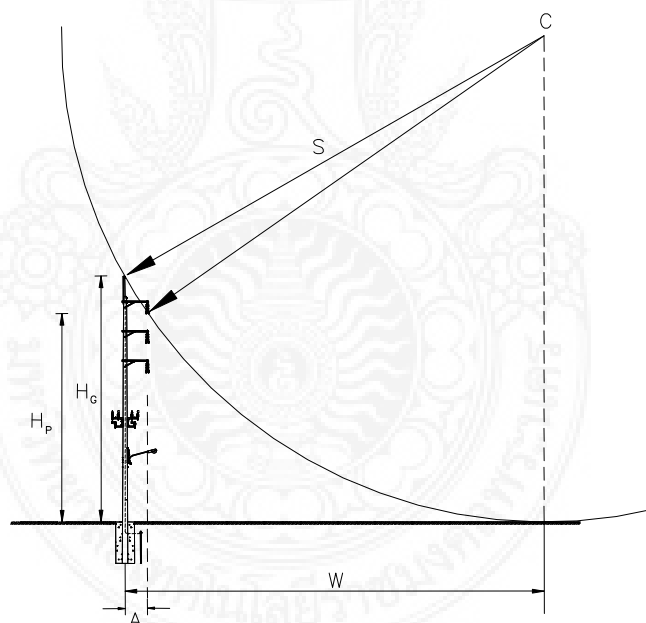
2.4.3.1 การป้องกันสายเฟสอย่างมีประสิทธิภาพ (Effective Shielding) [14]

การพิจารณาว่าสายดินป้องกันสามารถรับฟ้าผ่าได้หรือไม่นั้น อาจพิจารณาจากรูปแบบการติดตั้งสายดินป้องกันและสายเฟส สัมพันธ์กับระยะฟ้าผ่า (Striking Distance) ดังแสดงในภาพ 2.13 รูปวงกลมในรูปจะมีรัศมีเท่ากับระยะฟ้าผ่า ถ้ากระแสฟ้าผ่ามีค่าสูงระยะฟ้าผ่าก็จะมีค่า

มาก ดังนั้นเมื่อเขียนวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับระยะฟ้าผ่าให้วงกลมสัมผัสกับดินและผ่านสายดิน ถ้าสายเฟสอยู่นอกวงกลมแสดงว่าไม่ถูกฟ้าผ่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าสายดินสามารถป้องกันไม่ให้ฟ้าผ่าลงสายเฟสได้ถ้ากระแสฟ้าผ่ามีค่าต่ำ ระยะฟ้าผ่าก็มีค่าน้อย ขนาดรัศมีวงกลมก็มีค่าน้อย ทำให้โอกาสที่สายเฟสอยู่ในวงกลมมีมาก นั่นคือ แม้มีสายดินอยู่ด้านบนแล้วยังมีโอกาสที่จะเกิดฟ้าผ่าด้วยกระแสที่พิจารณาลงสายเฟสได้

กระแสฟ้าผ่าที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าวิกฤต (VCFO) ที่จะทำให้ฉนวนเกิดวาบไฟที่ฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบนั้น เรียกว่า กระแสฟ้าผ่าวิกฤตในการวิเคราะห์หาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตสามารถทำได้โดยใช้สมการที่ (2.14) และ (2.15) [5], [15] คำนวณหารัศมีวงกลมที่สัมผัสดิน และผ่านทั้งสายเฟสและสายดินดังแสดงในภาพ 2.13 และหากระแสฟ้าผ่าที่มีระยะฟ้าผ่าดังกล่าวได้ตามสมการที่ (2.16) [5], [15]

ด้วยรูปแบบของเสาการจัดเรียงสายเฟสและสายดิน ระยะฟ้าผ่า และระยะแนวราบระหว่างระหว่างสายดินและศูนย์กลางของทรงกลมกลิ้ง



ภาพ 2.13 ระยะฟ้าผ่าและระยะแนวราบระหว่างการกระจายและจุดศูนย์กลางทรงกลมกลิ้งที่จุด C [5], [15]

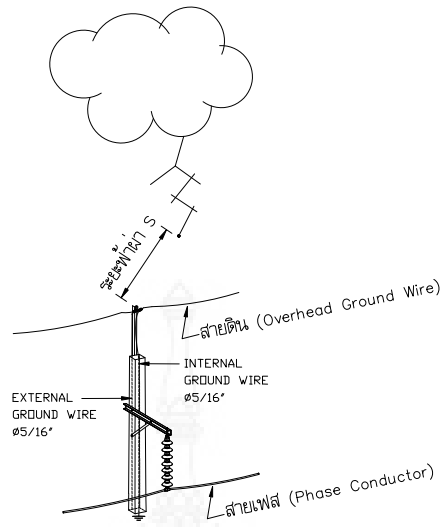
$$S = \frac{1}{2} \left[H_G + H_P + A \left(\frac{2W - A}{H_G - H_P} \right) \right] \quad (2.14)$$

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

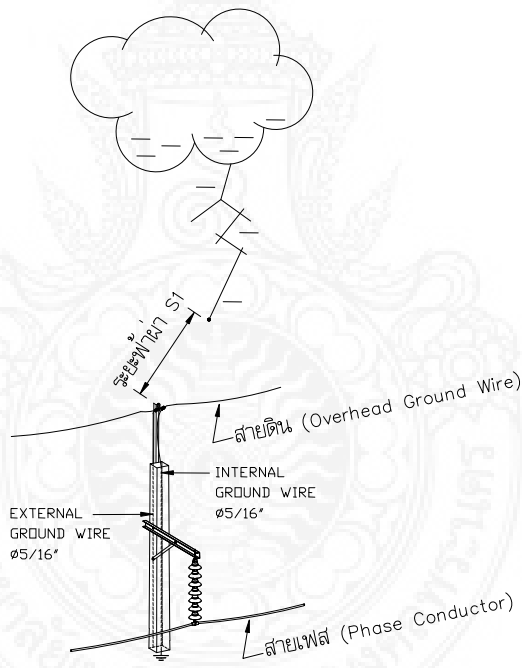
- เมื่อ S คือ ระยะฟ้าผ่าที่น้อยที่สุดที่ฟ้าจะผ่าลงสายดินแทนสายเฟส(เมตร)
 W คือ ระยะห่างระหว่างสายดินและจุดศูนย์กลางทรวงกลมกึ่ง(เมตร)
 H_G คือ ความสูงของสายดิน(เมตร)
 H_P คือ ความสูงของสายเฟส(เมตร)
 A คือ ระยะห่างระหว่างสายดินกับสายเฟสตามแนวระดับ(เมตร)
 S คือ ระยะฟ้าผ่าที่น้อยที่สุดที่ฟ้าจะผ่าลงสายดินแทนสายเฟส(เมตร)

2.4.3.2 ระยะฟ้าผ่า [16]

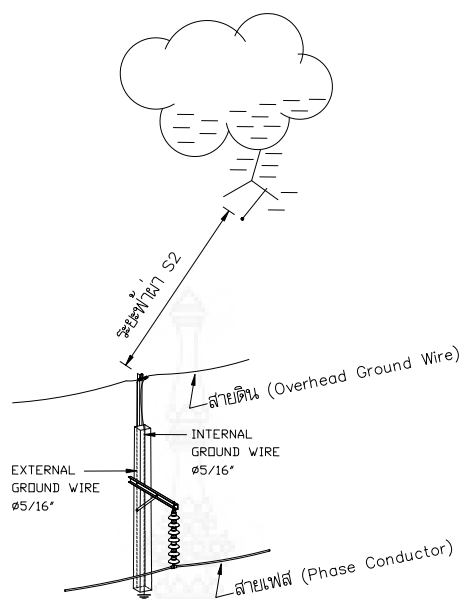
ระยะฟ้าผ่า หมายถึง ระยะทางระหว่างลำฟ้าผ่านำทาง และจุดที่ภาคพื้นดินหรือวัตถุนั้น ๆ เริ่มเกิดดิสชาร์จ แสดงในภาพ 2.13 ถึง 2.15 ระยะดังกล่าวขึ้นอยู่กับประจุบนก้อนเมฆหรือกล่าวในอีกแง่หนึ่งคือขึ้นอยู่กับกระแสฟ้าผ่า ภาพ 2.13 แสดงระยะฟ้าผ่าเป็นระยะระหว่างลำฟ้าผ่านำทางและเสาส่ง ปกติฟ้าผ่าจะลงมาจากก้อนเมฆโดยยังไม่ทราบว่าจะลงตรงจุดใดที่พื้นดิน แต่จะเกิดดิสชาร์จและเคลื่อนที่ลงตามทางมาเรื่อย ๆ เมื่อลำฟ้าผ่าใกล้พื้นดิน และจะเริ่มดิสชาร์จที่ภาคพื้นดินเนื่องจากสนามไฟฟ้าสูงกว่าจุดอื่น จึงจะทราบว่าฟ้าผ่าลงที่จุดใด ภาพ 2.14 แสดงระยะฟ้าผ่าสั้นเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆมีน้อย ลำฟ้าผ่านำทางจึงเคลื่อนที่ลงมาจนเข้าใกล้ภาคพื้นดินจึงเริ่มเกิดดิสชาร์จที่หัวเสา ระยะ S1 ในรูปที่มีค่าน้อยเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆที่มีค่าน้อยหรือกล่าวในอีกแง่หนึ่งได้ว่า กระแสฟ้าผ่ามีค่าต่ำ ภาพ 2.15 ระยะฟ้าผ่ามากเนื่องจากประจุบนก้อนเมฆมีค่ามาก ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่ภาคพื้นดินได้ง่ายกว่า จะเห็นได้จาก S2 ในภาพ 2.15



ภาพ 2.14 ระยะเวลาฟ้าผ่า



ภาพ 2.15 ระยะเวลาฟ้าผ่าสั้น



ภาพ 2.16 ระยะฟ้าผ่ายาว

โดยทั่วไประยะฟ้าผ่าผ่านนั้นอยู่ระหว่าง 20 เมตร ถึง 200 เมตร โดยระยะฟ้าผ่าสามารถนำมาหาค่ากระแสฟ้าผ่าที่ต่ำที่สุดที่สายดินสามารถป้องกันสายเฟสได้โดยแทนค่าลงในสมการที่ (2.16)

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

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

2.5 อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่คน

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

2.6 เกณฑ์สมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบส่ง

เกณฑ์สมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบส่งของแต่ละพื้นที่บริการ หรือของแต่ละการไฟฟ้าแต่ละภูมิภาค หรือแต่ละประเทศ จะมีความแตกต่างกัน ซึ่งบางครั้งก็ระดับแรงดันเดียวกัน แต่ต่างสถานะแวดล้อมกัน ก็ทำให้การประเมินสมรรถนะแตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่น เกณฑ์สมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบ 115 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งในระบบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตนั้นแนวของระบบส่งจะอยู่ในที่โล่งแจ้ง หรือมีโอกาสน้อยที่จะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่ใช่ที่โล่งแจ้ง แต่ในขณะที่ระบบสายส่งของการไฟฟ้านครหลวงนั้น ส่วนมากระบบส่งจะมีลักษณะผสมผสานกันไป คือ ในที่ไม่โล่งแจ้งบ้าง ในที่โล่งแจ้งซึ่งจะอยู่ใกล้กับสิ่งปลูกสร้างที่อยู่ใกล้แนวสายส่ง ซึ่งทำให้การประเมินเกณฑ์สมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบส่งนั้น ถ้าจะใช้เกณฑ์เดียวกันคงไม่เหมาะสม ดังนั้นอาจจะต้องพิจารณาเป็นสภาพพื้นที่แต่ละพื้นที่ไป และต้องพิจารณาสภาพของธรรมชาติ จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี โดยปัจจัยในการเกิด TFOR นั้น จะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ 1). SFFOR ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการจัดวางสายของสายล่อฟ้า และ 2). BFOR ขึ้นกับค่าความต้านทานดินที่ฐานเสา ระยะห่างระหว่างเสาค่าแรงดันวาบไฟวิกฤตของลูกถ้วย



บทที่ 3

หลักการของโปรแกรม ATP-EMTP และการจำลองระบบ

3.1 บทนำ

การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบส่ง จะทำการประเมินสมรรถนะโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประเมิน เนื่องจากไม่สามารถทดสอบระบบส่งด้วยสถานการณ์ฟ้าผ่าจริงได้ เพราะไม่สามารถกำหนดหรือควบคุมสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นจริงที่ซึ่งจะนำมาใช้ในการทดสอบ ดังนั้นจึงต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการที่จะประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบส่ง โดยการเริ่มนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้งานนั้น ในช่วงต้น ค.ศ. 1960 ได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้งานอย่างกว้างขวางทั่วโลก การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจึงเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากระบบอนาล็อกมาใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ Dr.Dommel แห่งมหาวิทยาลัย Munich ประเทศเยอรมันได้เริ่มพัฒนาโปรแกรมสำหรับการคำนวณภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้าแบบดิจิทัลขึ้น โดยอาศัยงานของ Schnyder-Bergeron เป็นวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกทาง Benneville Power Administration (BPA) ซึ่งจัดตั้งโดยกระทรวงพลังงานของสหรัฐมีความสนใจในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เชิญ Dr.Dommel มาเป็นนักวิจัยเพื่อทำการพัฒนาโปรแกรมดังกล่าวจนในปี ค.ศ. 1968 Transient Program Model ซึ่งมีประมาณ 4,000 บรรทัด ก็เสร็จสมบูรณ์ออกมาเผยแพร่

ต่อมาในปี ค.ศ. Dr.Dommel ลาออกจาก BPA โดยมี Dr.W.Scott-Meyer เป็นผู้รับผิดชอบช่วงต่อในการพัฒนาโปรแกรมจนในปี ค.ศ. 1976 ก็มีนักวิจัยอีกหลายคนเข้าร่วมในการพัฒนาโปรแกรมเช่น Dr.Tse-Huei Liu และ Dr.AkihiroAmetani นอกจากนี้ Mr.L.Dube ผู้พัฒนา TACS/MODEL Dr.V. Brandwain ผู้พัฒนาโครงสร้างเครื่องจักรไฟฟ้า Prof. A. Semlyen ผู้พัฒนาโมเดลของสายส่งเข้าร่วมทำให้โปรแกรม EMTP มีความสามารถมากยิ่งขึ้นจนในช่วงทศวรรษ 1980 โปรแกรม EMTP M 31 ซึ่งมีประมาณ 100,000 บรรทัดก็เสร็จสมบูรณ์ และมีการนำไปใช้งานในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลก

การพัฒนาโปรแกรมดำเนินมาเรื่อย ๆ จนถึงปัจจุบันโปรแกรม EMTP แยกออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ ด้วยกันคือ EMTP ของ BPA DCG/EPRI และ ATP-EMTP ของ Dr.Scott-Meyer โดยโปรแกรมที่เราจะนำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบส่งในงานวิจัยนี้คือ ATP-EMTP เป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมในการใช้วิเคราะห์สภาวะชั่วคราว ซึ่งในงานวิจัยหลาย ๆ ด้านก็ได้ใช้โปรแกรมนี้ในการศึกษาถึงผลกระทบต่าง ๆ ในสภาวะชั่วคราวเช่นเดียวกัน

การใช้โปรแกรม EMTP วิเคราะห์สภาวะชั่วคราว (Transient) ในระบบไฟฟ้าให้มีความถูกต้อง และเชื่อถือได้นั้นจำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองคุณสมบัติของอุปกรณ์และปรากฏการณ์ในระบบให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ในบางครั้งจึงมีความยุ่งยากและซับซ้อนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการวิเคราะห์ด้วย

3.2 หลักการทั่วไปและความสามารถของโปรแกรม ATP-EMTP [17]

3.2.1 หลักการทั่วไป

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังหากจัดกลุ่มตามลักษณะของผลลัพธ์ที่ได้ สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม

3.2.1.1 การวิเคราะห์ในกรอบของความถี่(Frequency Domain Analysis)

เป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้ผลตอบสนองของแรงดันหรือกระแสเป็นขนาดและมุมเฟส โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่จะใช้กับการวิเคราะห์ที่ระบบไฟฟ้าที่อยู่ในสภาวะปกติ เช่น การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Analysis) หรือระบบไฟฟ้าที่กลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (Steady State) ภายหลังจากเกิดสภาวะชั่วคราว เช่น การคำนวณกระแสไฟฟ้าผิดปกติ (Fault Current Analysis) เพื่อใช้ในการประสานสัมพันธ์อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า เป็นต้น

3.2.1.2 การวิเคราะห์ในกรอบของเวลา(Time Domain Analysis)

เป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้ผลตอบสนองของแรงดันหรือกระแสเป็นขนาดในแต่ละช่วงเวลา การวิเคราะห์ในลักษณะดังกล่าวเหมาะสมกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดหรืออยู่ในสภาวะชั่วคราวเช่นการสับปลด (Switching Operation) การเกิดความผิดปกติ (Fault) หรือการรบกวนภายนอกอื่น ๆ เช่นฟ้าผ่า ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถใช้แนวคิดของการวิเคราะห์เชิงความถี่ในการวิเคราะห์หรือกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาได้

ในอดีตที่ผ่านมาเทคโนโลยียังไม่ก้าวหน้า รูปแบบของผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในเชิงเวลามักจะเป็นสมการในเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ หากระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่หรือปัญหาที่มีความซับซ้อนก็จะต้องกำหนดสมมติฐานเป็นจำนวนมากจนทำให้ผลตอบสนองที่ได้อาจไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ สภาวะชั่วคราวอีกแบบหนึ่งที่มีนัยก็คือ Transient Network Analyzer (TNA) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่จำลองระบบไฟฟ้าโดยการย่อระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลงแล้วทำการจำลองความต้องการการแต่ TNA นั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก และการปรับเปลี่ยนมีข้อจำกัดการวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวในปัจจุบันจึงได้

ปรับเปลี่ยนไปสู่ดิจิทัลคอมพิวเตอร์มากขึ้น การวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวโดยใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์เริ่มขึ้นตั้งแต่ปี 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 สร้างเป็นอัลกอริทึมที่นำมาแก้ปัญหาภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถใช้กับวงจรข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นวิธีการดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้า (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 เมตริกซ์ของความนำ (Conductance)
 $[V(t)]$ คือ เวกเตอร์ของแรงดัน
 $[I(t)]$ คือ เวกเตอร์ของแหล่งจ่ายกระแส
 $[I]$ คือ เวกเตอร์ของค่าในอดีต

แหล่งจ่ายแรงดันของวงจรข่ายส่วนมากจะต่อลงกราวด์ เพราะฉะนั้นจะสามารถแยกสมการออกเป็นสองส่วนคือแรงดันที่ไม่ทราบค่า [ส่วน A] และแรงดันที่ทราบค่า [ส่วน B] ดังสมการที่ (3.2)

$$\begin{bmatrix} v_A(t) \\ v_B(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A(t) \\ I_B(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_{AA} & G_{AB} \\ G_{BA} & G_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_A \\ v_B \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

คำตอบของภาวะชั่วคราวจะหาได้โดยใช้ Triangular Factorization ซึ่งมีข้อดีคือสามารถประยุกต์ใช้กับวงจรที่มีขนาดใหญ่ให้อยู่ในรูปอย่างง่าย อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ในระบบจริงจะแปรตามความถี่ จึงต้องมีการสร้างแบบจำลองที่สามารถรองรับเงื่อนไขดังกล่าว และปัญหาอีกอย่างคือคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการแปรตามเวลาของ

องค์ประกอบ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า หรือกับดักฟ้าผ่า การแก้ปัญหาคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวจะใช้การแทนแบบ Piecewise Linear

ในปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างจาก Trapezoidal Rule คือ นิยมใช้กันแพร่หลายในการจำลองภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเข้าใจอัลกอริทึมได้ง่าย แต่ข้อเสียของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างจากการใช้ขนาดของ Time Step ที่คงที่อาจทำให้เกิดในปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างจาก Trapezoidal Rule นิยมใช้ กันอย่างแพร่หลายในการจำลองภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเข้าใจอัลกอริทึมได้ง่าย แต่ข้อเสียของโปรแกรมการสั่นของสัญญาณ (Numerical Oscillation) ได้ เนื่องจากค่า Time Step กำหนดมาจากความถี่ที่ใช้ในการจำลองความถี่ของปรากฏการณ์ภาวะชั่วคราวที่เกิดขึ้นอาจเกิดทั้งความถี่สูงและความถี่ต่ำในเวลาเดียวกันแต่ต่างโหนดเพราะฉะนั้นการใช้ค่า Time Step เพียงค่าเดียวอาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดการแกว่งของสัญญาณในหลายกรณี เช่น การสวิตชิง หรือการเปลี่ยนช่วงการทำงานในขั้นตอนของ Piecewise Linear อาจทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณได้ เทคนิคต่าง ๆ ถูกนำมาใช้ เช่น ต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์หน่วง (Damping) เพื่อลดการเกิดการแกว่งของสัญญาณ โดยใช้ตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำและอนุกรมกับตัวเก็บประจุ ต่อคร่อมอุปกรณ์สวิตชิงซึ่งเทคนิคที่ใช้กันอยู่มาก เช่น การต่อวงจร snubber (Snubber Circuit) ขนานกับสวิตช์ ซึ่งวงจรดังกล่าวสามารถพบได้ทั่วไปในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่วนวิธีการลดการแกว่งของสัญญาณแบบอื่น ๆ อาจทำได้อีกหลายวิธี เช่นใช้เทคนิค Critical Damping Adjustment (CDA)

ขั้นตอนการแก้ปัญหาภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้าที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นหรือจุดที่เริ่มเกิดภาวะชั่วคราว การแก้ปัญหาจะเริ่มจากหาเงื่อนไขของสภาวะอยู่ตัวซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คำตอบของสภาวะอยู่ตัวของวงจรข่ายแบบเชิงเส้นที่ความถี่หนึ่ง ๆ หาได้จากการใช้สมการโหนดแอดมิตแตนซ์ (Nodal Admittance Equation) ตามสมการที่ (3.3)

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

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

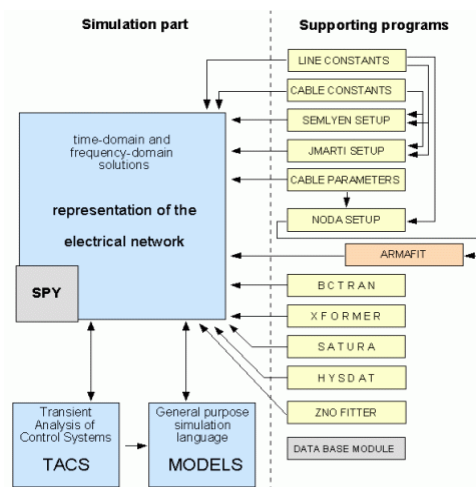
สำหรับการแทนองค์ประกอบของวงจรขายนั้นในการวิเคราะห์ภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า ให้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ จำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลอง เพื่อจำลองคุณลักษณะและคุณสมบัติของอุปกรณ์และปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในระบบไฟฟ้า ให้ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แต่การแทนองค์ประกอบของวงจรขาย ให้มีความถูกต้องครอบคลุมความถี่ทุกช่วงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากคุณลักษณะทางกายภาพของแต่ละองค์ประกอบของวงจรขายจะมีผลโดยตรงกับภาวะชั่วคราวของปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีการจัดกลุ่มภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับการศึกษาดัวยวิธี Time Domain โดยแบ่งตามช่วงความถี่ในแต่ละกลุ่มและความชันหน้าคลื่นที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตาราง 3.1 ตามข้อแนะนำ ของ Cigre

3.2.2 ความสามารถของโปรแกรม ATP-EMTP

โปรแกรม ATP-EMTP พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการจำลองและวิเคราะห์เหตุการณ์ในสถานะชั่วคราว และสถานะอยู่ตัวในระบบไฟฟ้ากำลัง โครงสร้างหลักของโปรแกรมประกอบไปด้วยส่วนที่ใช้ในการจำลอง (Simulation Part) และส่วนช่วยสนับสนุน (Supporting Programs) ในรูปแบบของการวิเคราะห์เชิง Time Domain และ Frequency Domain

ตาราง 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	แรงดันเกินสวิตช์ (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)



ภาพ 3.1 EMTP-ATP Module

โปรแกรม EMTP-ATP ได้จัดเตรียมแบบจำลองอุปกรณ์ไฟฟ้าที่สำคัญหลายชนิดไว้ในโปรแกรมทำให้ผู้ใช้งานสะดวกในการสร้างแบบจำลองมากขึ้น อย่างไรก็ตามตามอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิดที่มีมาให้มีคุณสมบัติและเงื่อนไขการใช้งานที่ต่างกัน ผู้ใช้งานจำเป็นต้องเลือกใช้งานให้ถูกต้อง มิเช่นนั้นจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ผิดจากความเป็นจริง

3.3 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า

การศึกษานี้จะใช้โปรแกรม ATP-EMTP เป็นเครื่องมือจำลององค์ประกอบในระบบสายส่งและสายจำหน่ายอันประกอบไปด้วยแบบจำลองสายส่ง แบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีตแบบจำลองลูกถ้วย แบบจำลองความต้านทานดินอิมพัลส์ที่ฐานเสา แบบจำลองสายตัวนำลงดินนอกเสา แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า ซึ่งแบบจำลองที่ใช้ในการทำวิจัยในปริญญาโทฉบับนี้เป็นแบบจำลองที่มีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั่วโลก

สำหรับการนำแบบจำลองระบบไฟฟ้าไปใช้ในระบบของการไฟฟ้านครหลวงนั้นยังไม่ได้มีข้อมูลการจัดทำที่ได้จากการวัดจริงเนื่องจากต้องใช้เครื่องมือและซอฟต์แวร์ที่ทันสมัยแต่ปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวงยังไม่มีเครื่องมือดังกล่าว แต่ก็แน่ใจได้ว่าแบบจำลองที่ใช้มีความถูกต้องเพราะได้รับการยอมรับกันทั่วโลก

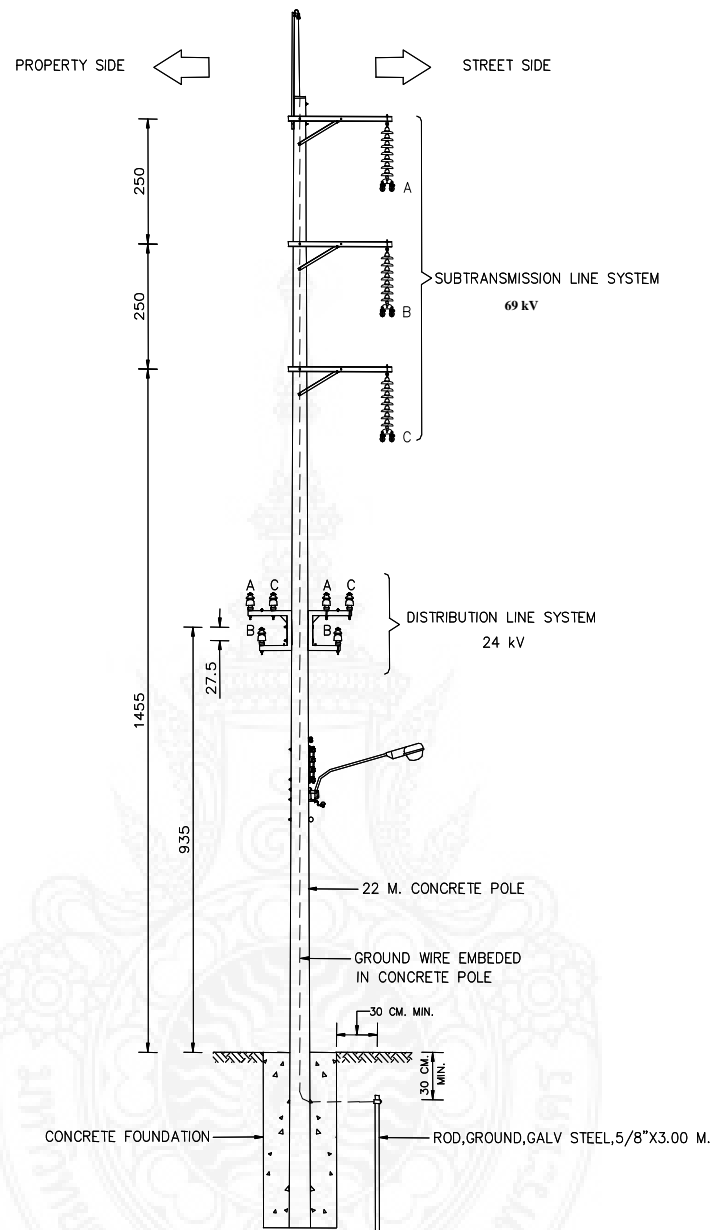
3.3.1 แบบจำลองสายส่งย่อยและสายจำหน่ายเหนือดิน

แบบจำลองสายส่งและสายจำหน่ายเหนือดินแบบหลายตัวนำตามสภาพการใช้งานจริงสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ฟ้าผ่าผ่านนั้นแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเหมาะสมคือแบบจำลองที่แปรผันตามความถี่ (Frequency Dependent Line Model: J. Marti Model) อยู่ใน

โปรแกรม EMTP ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ในการใช้แบบจำลองสายส่งและสายจำหน่ายเหนือดินแบบหลายตัวนำแปรผันตามความถี่ ในการวิเคราะห์คือข้อกำหนดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษาซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ช่วงด้วยกันตามตาราง 3.1 และค่าช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขในโปรแกรมจะต้องน้อยกว่า $1/10.f_{max}$ โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดช่วงที่ทำการศึกษาไว้ที่ 10Hz–3MHz ค่าช่วงเวลาไว้ที่ $1E-9$

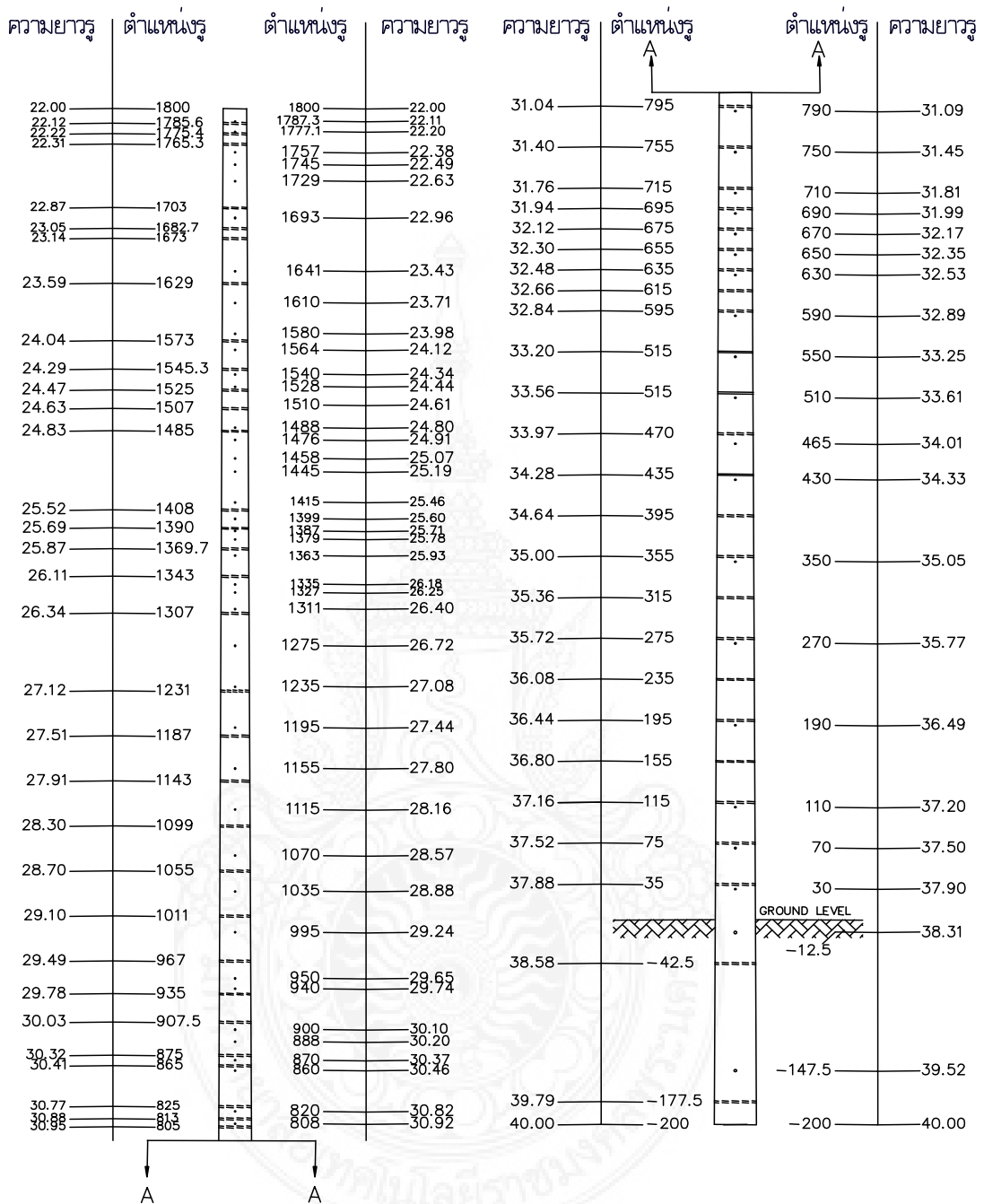
แบบจำลองสายส่งย่อยและสายจำหน่ายเป็นแบบวงจรเดี่ยวตัวนำคู่ที่มีการจัดวางสายเฟสในแนวโค้งประกอบด้วยสายตัวนำคู่ 3 เฟส และสายล่อฟ้า 1 เส้นดังแสดงในภาพ 3.2 ซึ่งเป็นโครงสร้างของระบบส่ง 69 kV และ 24 kV ที่ติดตั้งอยู่บนต้นเดียวกัน

สำหรับเสาคอนกรีตที่ใช้สำหรับสายส่งนั้น จะผลิตรองรับแรงดัน 69 kV จำนวน 1 วงจร สายเดี่ยวโดยมีขนาดความสูงของเสา 20 เมตร มีโมเมนต์ดัด (Bending Moment: BM) 14 ตัน-เมตรตามภาพ 3.3 ต่อมาเมื่อความต้องการการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นในพื้นที่ให้บริการของ การไฟฟ้านครหลวง จึงจำเป็นต้องขยายระบบเพื่อรองรับความต้องการที่มากขึ้นดังกล่าว โดยการเพิ่มโมเมนต์ดัดเป็น 18 ตัน-เมตร เพื่อรองรับตัวนำของสายส่งแบบสายควบเป็น 2 ตัวนำต่อเฟสต่อมาได้พัฒนารูปแบบของเสาไฟฟ้าคอนกรีตใหม่ เป็นขนาดความสูงของเสา 22 เมตรมีโมเมนต์ดัด 18 ตัน-เมตร ตามภาพ 3.4 โดยจะใช้ติดตั้งสายส่งทั้งระดับแรงดัน 115 kV และ 69 kV โดยจะใช้ปักเสาพาดสายในแนวทางตรง และเมื่อปักเสาพาดสายในแนวทางโค้งและหัวมุมซึ่งจะต้องรับแรงดิ่งค่อนข้างมากกว่าปกติ ก็จะใช้ความสูงของเสาคอนกรีต 22 เมตรเท่าเดิม แต่มีโมเมนต์ดัด 25 ตัน-เมตร ดังแสดงในภาพ 3.5 โดยต่อมาได้มีข้อบังคับของกรมทางหลวงที่กำหนดไว้ว่า หากปักเสาพาดสายในบริเวณที่ไม่มีทางเข้า ให้ใช้เสาคอนกรีตที่มีความสูง 23 เมตร และมีโมเมนต์ดัด 18 ตัน-เมตร ดังภาพ 3.6 โดยให้ปักลงดินเพิ่มอีก 1 เมตรเป็น 3 เมตรจากเดิม 2 เมตร แต่หากเป็นพื้นที่ของกรุงเทพมหานครหรือองค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) จะกำหนดให้การไฟฟ้านครหลวงปักเสาที่มีขนาดความสูง 22 เมตร สำหรับในกรณีที่ต้องทำการพาดสายส่งย่อยเพื่อข้ามถนนนั้น จะใช้จำนวนเสาไฟฟ้าฝั่งละ 2 ต้น เพื่อให้โมเมนต์ดัดมีค่า 36 ตัน-เมตร ดังแสดงในภาพ 3.7



NOTE DIMENSIONS ARE IN CM.

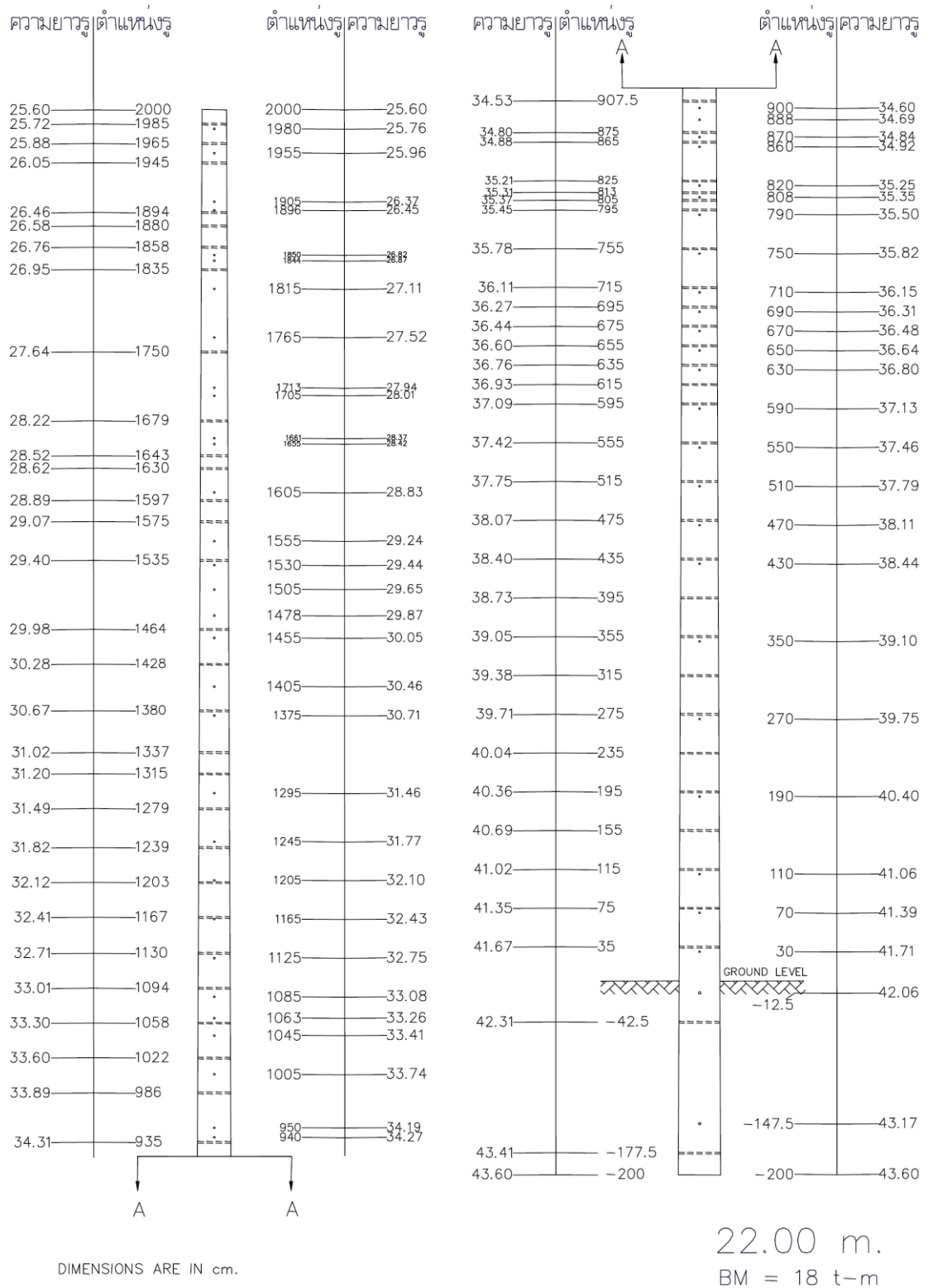
ภาพ 3.2 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวง
ที่มีทั้งระบบ 69 kV และ 24 kV



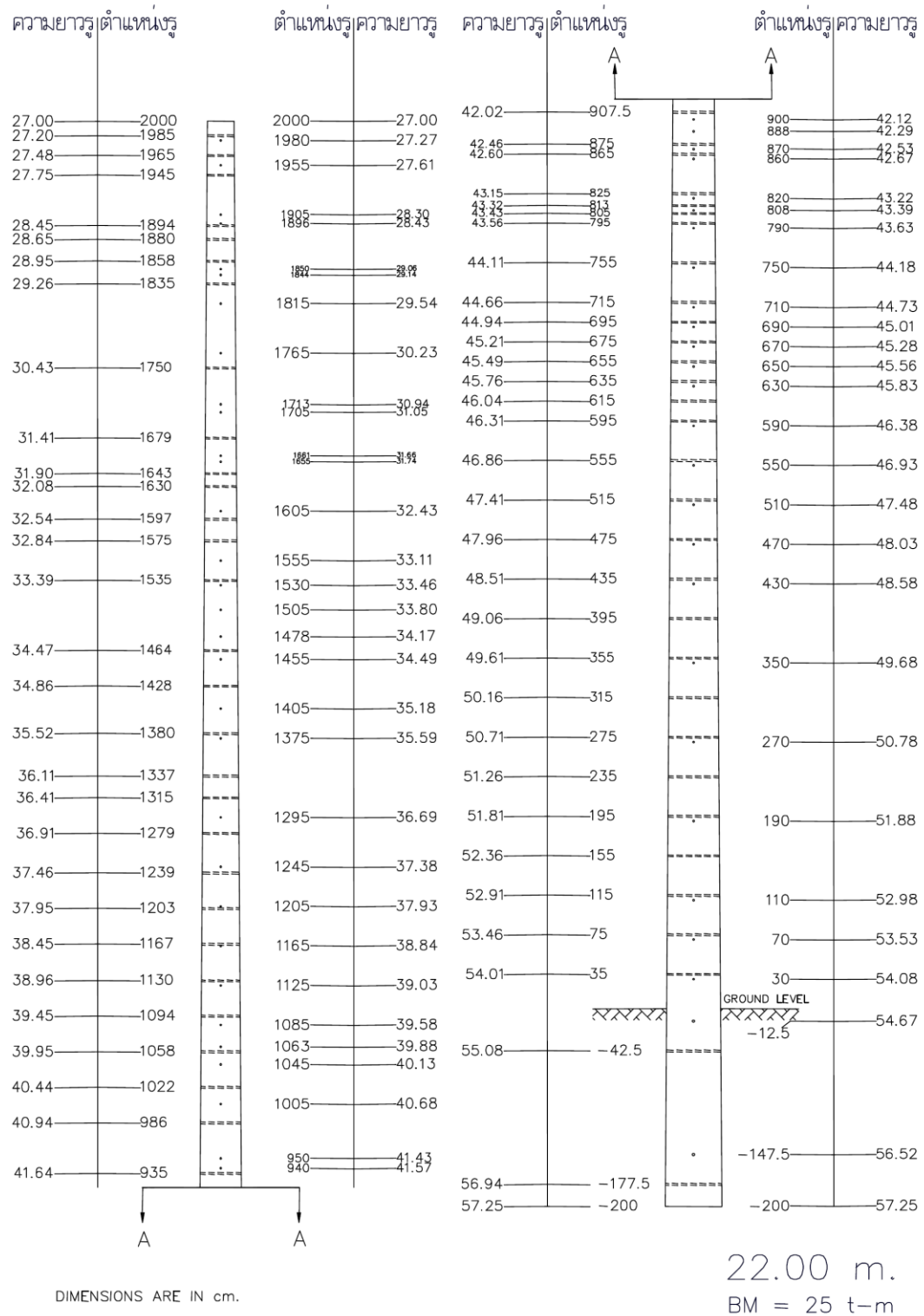
DIMENSIONS ARE IN cm.

20.00 m.
BM = 14 t-m

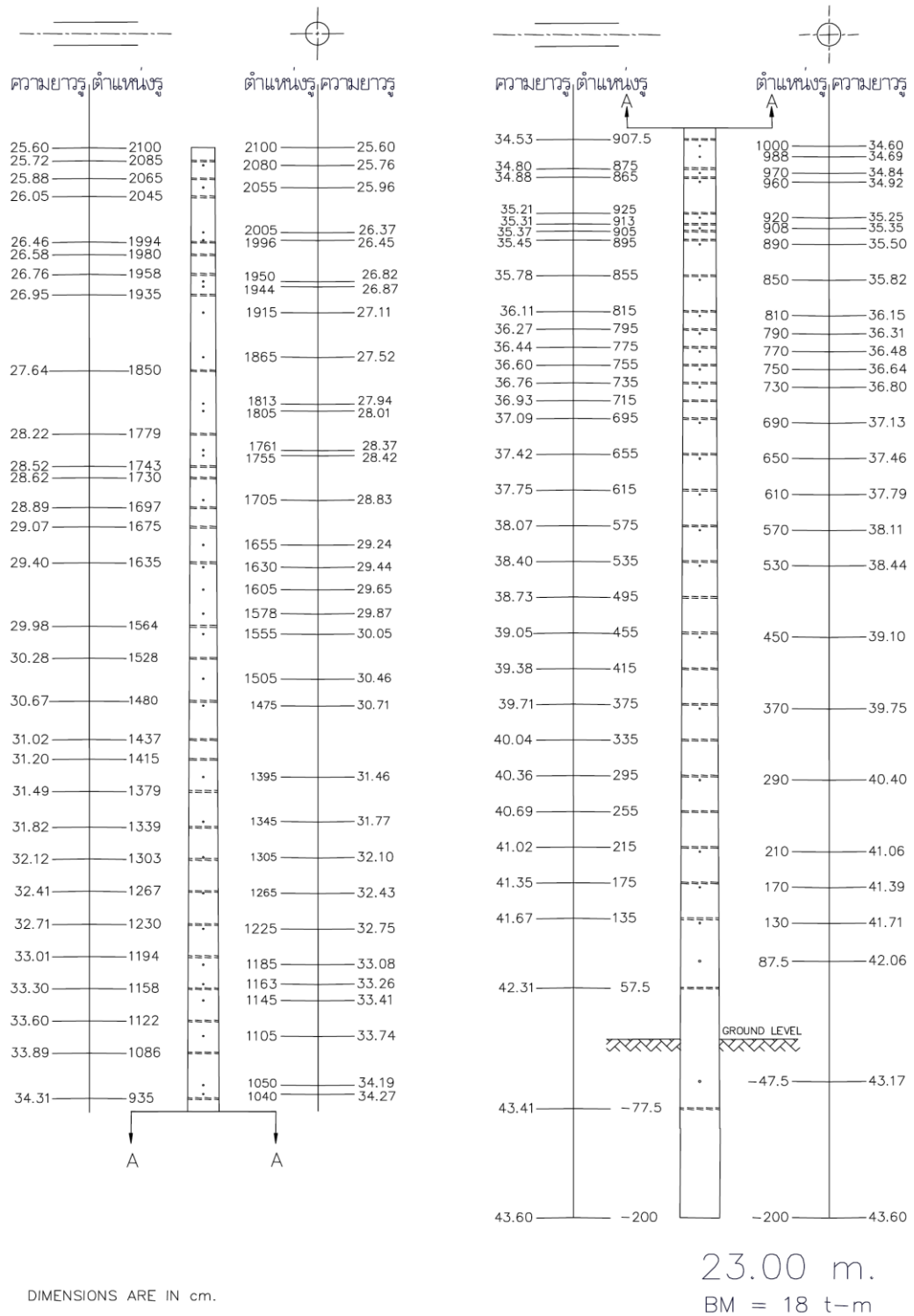
ภาพ 3.3 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 20 เมตร 14 ตัน-เมตร



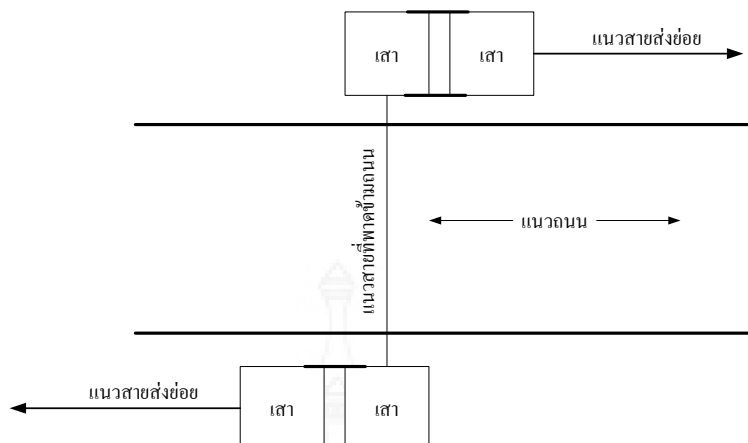
ภาพ 3.4 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 22 เมตร 18 ตัน-เมตร



ภาพ 3.5 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสายส่งความสูง 22 เมตร 25 ตัน-เมตร



ภาพ 3.6 แสดงขนาดเสาไฟฟ้าแต่ละช่วงเสาสูง 23 เมตร 18 ต้น-เมตร



ภาพ 3.7 การปักเสาพาดสายของสายส่งย่อยกรณีข้ามถนน

ตาราง 3.2 ข้อมูลตัวแปรสายที่ใช้สร้างแบบจำลอง

ชนิด	ขนาด (ตร. ม.ม.)	จำนวนเส้นลวด (เส้น)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง 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 [7-8]

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

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

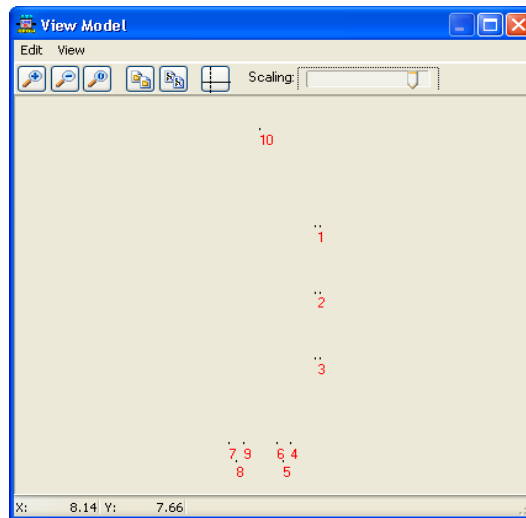
ตาราง 3.3 ความถี่ของความยาวสายที่พิจารณา

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

ในการศึกษาเลือกใช้แบบจำลองแบบ J. Marti ลักษณะเป็นสายความสูญเสียต่ำที่ความถี่สูง โดยใช้โปรแกรม ATP Line Constant (ATPLCC) สร้างแบบจำลอง ดังแสดงในภาพ 3.8 โดยจะประกอบด้วยสายส่งย่อย 69 kV จำนวน 1 วงจร และสายจำหน่าย 24 kV จำนวน 2 วงจร

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0	1.2825	0.08883	2	18.302	17.482	20	180	2
2	2	0	1.2825	0.08883	2	15.902	14.982	20	180	2
3	3	0	1.2825	0.08575	2	13.26	12.482	20	180	2
4	4	0	0.799	0.16456	1.072	10.0073	9.32	0	0	1
5	5	0	0.799	0.16456	0.82	9.3073	8.62	0	0	1
6	6	0	0.799	0.16456	0.572	10.0073	9.32	0	0	1
7	7	0	0.799	0.16456	-1.072	10.0073	9.32	0	0	1
8	8	0	0.799	0.16456	-0.82	9.3073	8.62	0	0	1
9	9	0	0.799	0.16456	-0.572	10.0073	9.32	0	0	1
10	10	0	0.39688	4.57333	0	21.68	21.35	0	0	1

ภาพ 3.8 แสดงการป้อนข้อมูลแบบจำลองสายส่งย่อย 69 kV และสายจำหน่าย 24 kV



ภาพ 3.9 แสดงรูปแบบการจัดวางสายแบบจำลองสายส่งย่อย 69 kV และสายจำหน่าย 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 [18]

มาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง กำหนดให้ใช้เสาคอนกรีตสูง 22 เมตรสายล่อฟ้า จะทำการต่อลงดิน โดยผ่านสายตัวนำเป็นลวดเหล็กเคลือบสังกะสี ที่ฝังอยู่ในเสาคอนกรีตทุกต้น ลงดินไปยังระบบรากสายดิน ซึ่งจะมีตัวนำเป็นแท่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.875 มิลลิเมตรความยาว 3 เมตรโดยอยู่ต่ำจากผิวดิน 0.3 เมตรรายละเอียดตามภาพที่ 3-2 และ 3-3

การหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีตนั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (3.6) [7-8]

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

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

เมื่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีการสูญเสีย จะทำให้เกิดการหน่วงซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากต้องมียางส่วนหนึ่งที่จะต้องกระทำ เพื่อเอาชนะแรงหน่วงนี้ ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น ขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ และ ความนำไฟฟ้าของคอนกรีต และความถี่เป็นไปตามสมการที่ (3.7) [19]

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

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

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

งานวิจัยของ สำเร็จ [16] ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความเร็วของคลื่นภายในคอนกรีต ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ในช่วง 25 kHz ถึง 1 MHz โดยพบว่ามีค่าตามในตาราง 3.4

ตาราง 3.4 ความเร็วคลื่นภายในคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ [16]

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

การทำแบบจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ ความเร็วคลื่นภายในเสาคอนกรีตนี้ จะใช้ $123 \text{ m}/\mu\text{s}$

Component: LINEZT_1

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R/l	Ohm/m	0
Z		451.5
v		123000000

NODE	PHASE	NAME
From	1	top1
To	1	IF1

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Lines

Length: [m]

Output:

ILINE

L, C

Z, v

Z, tau

Conductance

G=0

G=R*C/L

Hide

\$Vintage.1

Edit definitions OK Cancel Help

ภาพ 3.10 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตส่วนบน

Component: LINEZT_1

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
R/l	Ohm/m	0
Z		451.5
v		123000000

NODE	PHASE	NAME
From	1	IF1
To	1	FTR1

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Lines

Length: [m]

Output:

ILINE

L, C

Z, v

Z, tau

Conductance

G=0

G=R*C/L

Hide

\$Vintage.1

Edit definitions OK Cancel Help

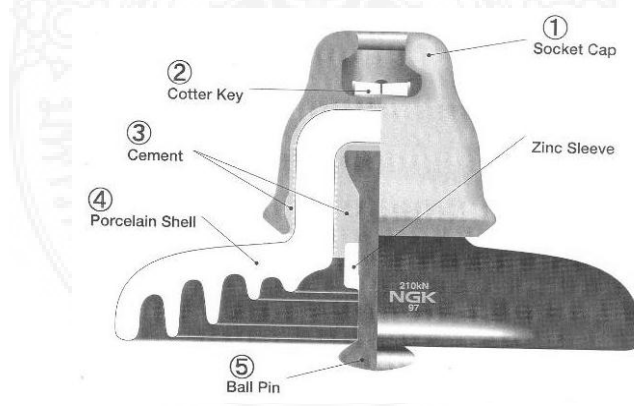
ภาพ 3.11 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตส่วนล่าง

3.3.3 แบบจำลองฟองลูกถ้วย

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

ตาราง 3.5 คุณลักษณะวางไฟตามผิวของฉนวนลูกถ้วยแขวนเพื่อรองรับระบบส่ง [20]

จำนวน (ลูก)	ค่าเฉลี่ยวางไฟตามผิวความถี่ต่ำ		ค่าเฉลี่ยวางไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต	
	ผิวแห้ง	ผิวเปียก	ทางบวก	ทางลบ
1	80	50	125	130
2	155	90	255	255
3	215	130	355	345
4	270	170	440	415
5	325	215	525	495
6	380	255	610	585
7	435	295	695	670



ภาพ 3.12 ลูกถ้วยแขวน 52-3

มาตรฐานการก่อสร้างระบบสายส่ง 69 kV ของการไฟฟ้านครหลวง กำหนดให้ใช้ลูกถ้วย หมายเลข 52-3 ตามมาตรฐาน มอก.354 จำนวน 4 ลูก แต่ในปัจจุบัน กฟน. ทำการติดตั้งจำนวน 7 ลูก เนื่องจาก การเปลี่ยนระดับแรงดันเป็นระบบ 115 kV จะได้ไม่ต้องทำการดับไฟและติดตั้งลูกถ้วยเพิ่ม โดยมีคุณลักษณะของการวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วย (Critical Impulse Flashover Voltage: CFO) ดังแสดงตาราง 3.6 โดยใช้ค่าของสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient Variance) เท่ากับ 3 %

ตาราง 3.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

ชนิดของฉนวน	ผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วย (kV) สัมประสิทธิ์ของความผันแปร (kV)			
	ลำดับบวก	ลำดับลบ	ลำดับบวก	ลำดับลบ
52-3 (7 unit)	695	670	674.15	649.90
56/57-2 (1unit)	180	205	174.60	198.85

3.3.4 แบบจำลองความต้านทานอิมพัลส์ [14], [21]

สำหรับการศึกษานี้ได้พิจารณาลักษณะของความต้านทานดิน เมื่อมีกระแสแพร่กระจายในดิน หากกระแสฟ้าผ่ามีขนาดสูงพอที่จะสนามไฟฟ้าสูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของดิน ณ จุดที่ติดตั้งตัวนำลงดินจะทำให้ดินรอบ ๆ 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 กับความต้านทานดินอิมพัลส์สามารถหาได้จากสมการที่ (3.9)

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

เมื่อ	R_i	คือ	ความต้านทานดินอิมพัลส์ (โอห์ม)
	R_0	คือ	ความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง (โอห์ม)
	ρ	คือ	ความต้านทานดินจำเพาะ (โอห์ม.เมตร)
	α	คือ	สัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของความต้านทานดิน

เนื่องจากค่าความต้านทานดิน ขึ้นกับชนิดและลักษณะของดินเป็นหลักและในการปฏิบัติงานภาคสนามมีความไม่แน่นอนของลักษณะของดิน ขึ้นอยู่กับพื้นที่ปฏิบัติงาน ดังนั้น ในการศึกษาโดยโปรแกรม ATP-EMTP จึงทำโดยการแปรผันค่าความต้านทานดินอิมพัลส์เป็นหลายค่า เพื่อพิจารณาผลของความต้านทานดินอิมพัลส์ที่มีผลต่อแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่า ในที่นี้แปรผันค่าดังนี้ 5, 25, 50, 75 และ 100 โอห์ม แต่สำหรับค่าความต้านทานดินจำเพาะในพื้นที่ของการไฟฟ้านครหลวงนั้นจากการสำรวจพื้นที่โดยทั่ว ๆ พบว่า มีคุณลักษณะเป็นดินสองชั้นโดยดินชั้นบนมีค่าความต้านทานดินจำเพาะไม่เกิน 5 โอห์ม.เมตรและมีความหนาไม่เกิน 2 เมตรส่วนดินชั้นล่างมีค่าความต้านทานดินจำเพาะไม่เกิน 100 โอห์ม.เมตร แต่ในการทำกรณีศึกษานี้จะไม่ได้พิจารณาค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ที่ต่ำกว่า 5 โอห์ม เนื่องจากพิจารณาเป็นกรณีเลวร้ายสุดว่า กรณีที่ค่าของความต้านทานดิน ที่ความถี่กำลังเป็น 5 โอห์มนั้นค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ไม่มีทางเกิน 5 โอห์ม

ความต้านทานจำเพาะของดินขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่นความชื้นของดินส่วนประกอบทางเคมี ความเข้มข้นของเกลือที่อยู่ในดิน ขนาดของเม็ดดิน ชนิดของเนื้อดินหินทราย กรวด ฯลฯ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ชนิดของดินแบบต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตาราง 3.7

ตาราง 3.7 ความต้านทานจำเพาะของดินแบบต่าง ๆ

ชนิดของดิน	ความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega \times m$)
ดินเปียก	10
ดินชื้น	100
ดินแห้ง	1,000
หินใต้ดิน	10,000

เมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ระบบบรากสายดิน จะแพร่กระจายไหลในดิน แรงดันที่บรากสายดินจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้มีการนำกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นความจุของดินจะหาได้จากสมการที่ (3.10)

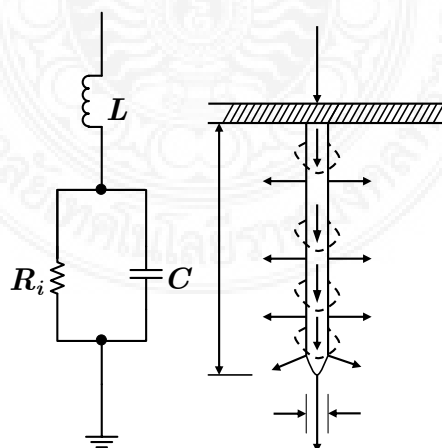
$$C = \frac{\epsilon_r \ell}{18 \ln \left(\frac{4\ell}{d} \right)} \times 10^{-9} \quad (3.10)$$

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านรากสายดิน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่รากสายดินดังสมการที่ (3.11)

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

- 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 เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ระบบรากสายดินจะประกอบด้วย ความต้านทานดินอิมพัลส์ คาปาซิแตนซ์ และอินดักแตนซ์ ดังภาพที่ 3.13



ภาพ 3.13 วงจรสมมูลของรากสายดิน

Component: RESISTOR

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
RES	Ohm	25

NODE	PHASE	NAME
From	1	Rimpu1
To	1	

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No Hide \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

ภาพ 3.14 การสร้างแบบจำลองความต้านทานของรากสายดินแบบแท่ง

Component: IND_RP

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
L	mH	0.00397675
Kp	Damp. 5-10	7.5

NODE	PHASE	NAME
From	1	FTR1
To	1	Rimpu1

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output

0 - No Hide \$Vintage,1

Edit definitions OK Cancel Help

ภาพ 3.15 การสร้างแบบจำลองตัวเหนี่ยวนำของรากสายดินแบบแท่ง

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
C	๓F	0.000251462	From	1	Pimpu1
Ks	Damp 0.1-0.2	0.15	To	1	

ภาพ 3.16 การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุของรากสายดินแบบแบ่ง

3.3.5 แบบจำลองสายดินนอกเสา

แบบจำลองสายดินภายนอกเสา จะเลือกใช้ลวดเหล็กเคลือบสังกะสีตีเกลียวขนาด 7.93 มิลลิเมตร ขนานลงมากับเสาไฟฟ้า โดยเชื่อมต่อเข้าด้วยกันกับลวดเหล็กที่ฝังภายในเสาที่ยอดเสา สามารถคำนวณค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินภายนอก จากสมการที่ (3-12)

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

- เมื่อ Z_{gc} คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสาย (โอห์ม)
 e คือ ล็อกฐานธรรมชาติ 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) [22]

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

เมื่อ k คือ ค่าคงที่
 r_c คือ รัศมีเสาไฟฟ้าคอนกรีต (เมตร)

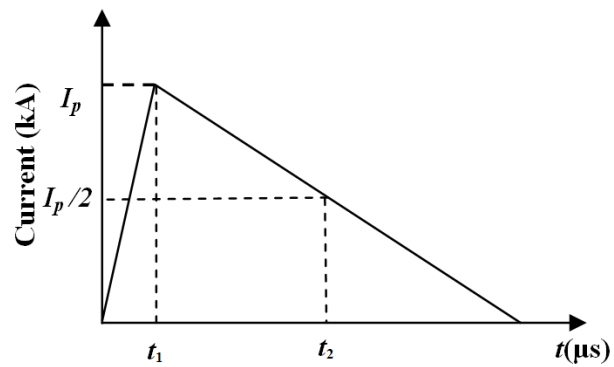
ตาราง 3.8 พารามิเตอร์สำหรับหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสา

พารามิเตอร์	ขนาด (เมตร)
ความยาวของสายดินนอกเสา	20
รัศมีเสาไฟฟ้าคอนกรีต	0.2560-0.4360
รัศมีสายตัวนำลงดินนอกเสา	0.00396
ระยะห่างจากผิวเสาถึงสายดินนอกเสา	0.01

สร้างแบบจำลองสายดินนอกเสาด้วยฟังก์ชัน Line Distributed / Transp.Lines โดยมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสาตามการคำนวณจากสมการที่ (3.12)

3.3.6 แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า

แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า จะแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ต่อขนานอยู่กับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของลัมฟ้าผ่า และเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ จะกำหนดให้รูปคลื่นอิมพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้น โดยมีเวลาหน้าคลื่นช่วงเวลาเป็น μs ต่อช่วงเวลาหลังคลื่นไมโครวินาที มีค่าเท่ากับ 0.25/100 μs , 1/100, 2/100, 3/100, 4/100 และ 10/350 μs ตามลำดับ ดังแสดงในภาพ 3.17 ซึ่งในโปรแกรม ATP-EMTP ได้เลือกใช้แบบจำลองแหล่งกำเนิดแบบ Slop Ramp ดังภาพ 3.18 [6], [14]



ภาพ 3.17 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์

Component: SLOPE_RA

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Ampere	75000	SR	1	sour
T0	s	0.25E-6			
A1	Ampere	37500			
T1	s	0.0001			
TStart	s	0			
TStop	s	0.2			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

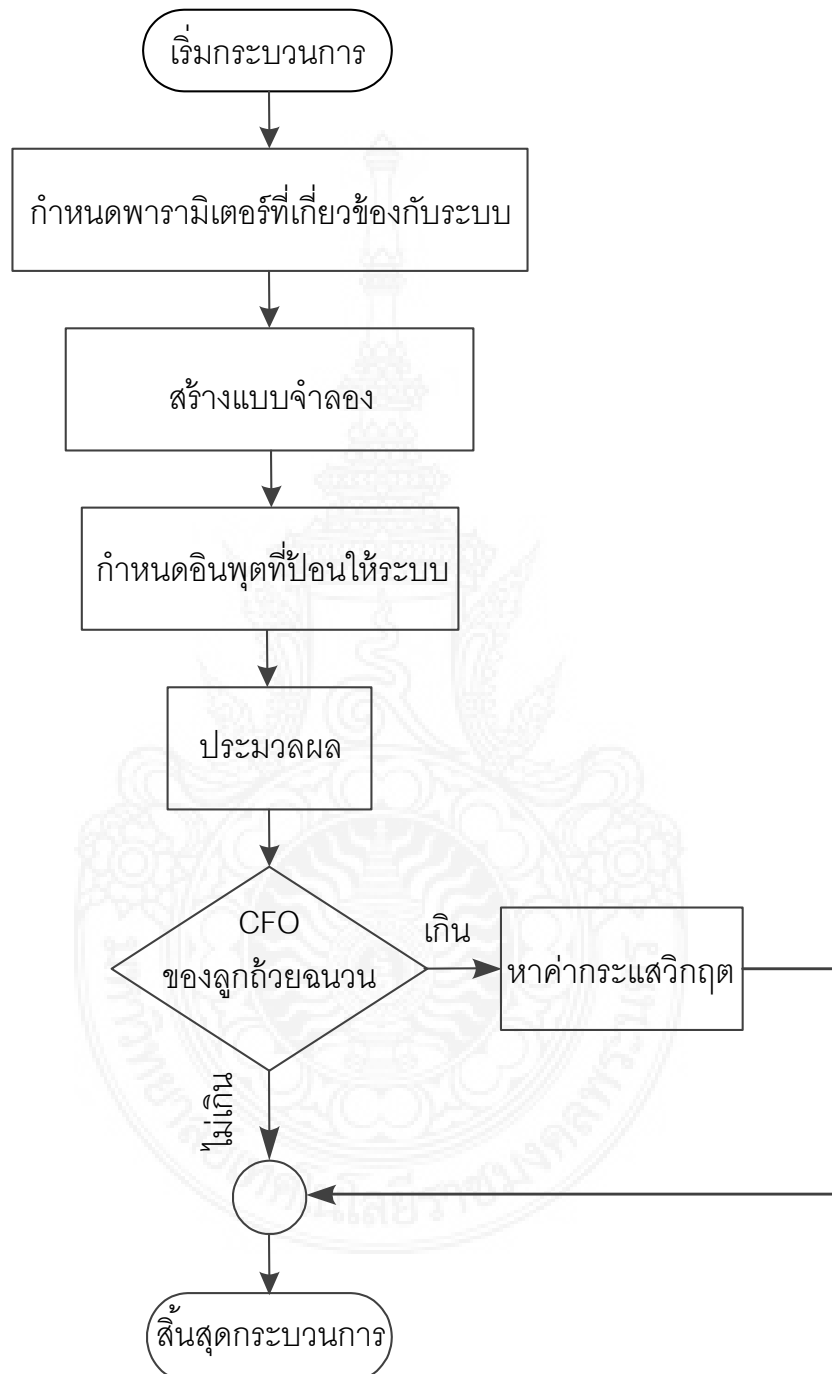
Type of source Hide

Current Voltage

Edit definitions OK Cancel Help

ภาพ 3.18 การสร้างแบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า

3.4 แผนผังการทำงานของโปรแกรม



ภาพ 3.19 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

บทที่ 4

วิธีการและผลการทดลองระบบสายส่งย่อย,สายจำหน่าย 24 kV

4.1 การลดความเสียหายเนื่องจากฟ้าผ่าในระบบ 69 kV ด้วยการติดตั้งสายดินนอกเสา

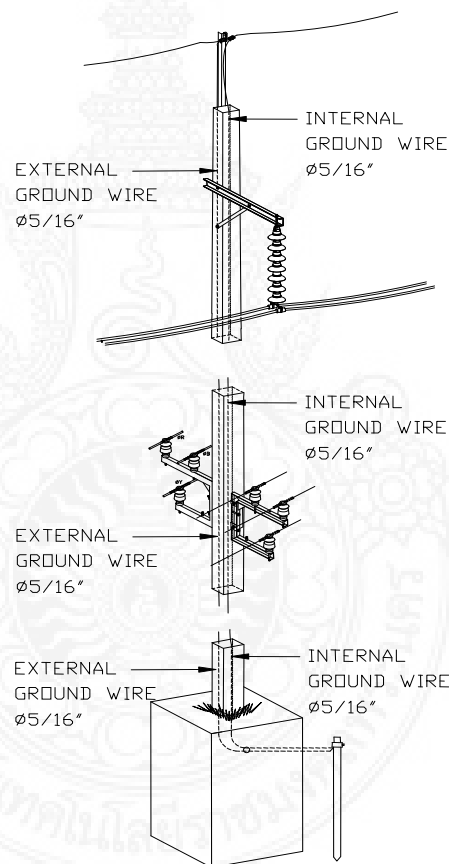
การติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มนั้น จะทำการติดตั้งโดยแนบไปกับเสาไฟฟ้าคอนกรีตและทำการประสานระหว่างสายล่อฟ้าและแท่งหลักดิน ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นการขนานระหว่างเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีตและสายดินนอกเสา ทำให้ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์รวมลดลงและทำให้ค่าแรงดันที่หัวเสาไฟฟ้าคอนกรีตมีค่าลดลง และส่งผลให้ค่าแรงดันตกคร่อม ของพวงลู่ด้วยนั้น ลดลงเช่นกันตลอดจนทำให้อัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate: BFOR) มีค่าลดลง ประโยชน์ที่ได้รับจากการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มนั้น ขึ้นกับระยะห่างระหว่างเสา รูปแบบการจัดวางสายเฟส และสายล่อฟ้า เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีต และอิมพีแดนซ์ของรากสายดิน โดยการสร้างแบบจำลองนั้น จะใช้โปรแกรม ATP-EMTP และใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อทำการปรับปรุงสมรรถนะระบบสายส่งย่อย 115 kV สำหรับการพิจารณาสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่านั้น จะพิจารณาในเทอมของแรงดันหัวเสากระแสวิกฤต (Critical Current) และอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ โดยจะทำการศึกษาสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบปัจจุบันและเมื่อทำการปรับปรุง และจะทำการศึกษาผลดังกล่าว ด้วยรูปคลื่นและอิมพีแดนซ์ของรากสายดินที่แตกต่างกัน [8, 20]

4.1.1 การติดตั้งเพิ่มสายดินนอก

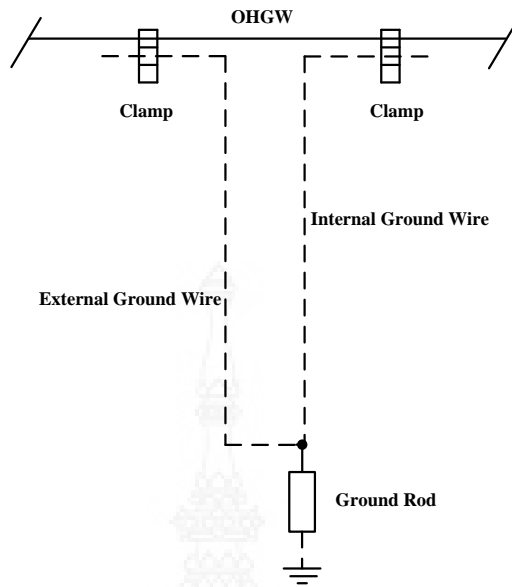
ข้อมูลไฟฟ้าชดช้องในปี พ.ศ. 2557 ในระบบสายส่ง 69 kV ที่เก็บรวบรวมโดยฝ่ายควบคุมระบบไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงนั้น พบว่า เกิดจากฟ้าผ่าทำให้ไฟฟ้าดับถาวร (ช่วงเวลาไฟฟ้าดับถาวร คือ การเกิดไฟฟ้าดับมากกว่าหรือเท่ากับ 1 นาที) จำนวน 17 ครั้งและเกิดไฟฟ้าดับชั่วคราวจำนวน 44 ครั้ง (ช่วงเวลาไฟฟ้าดับชั่วคราว คือ การเกิดไฟฟ้าดับน้อยกว่า 1 นาที) สำหรับความยาวของสายส่ง 69 kV นั้นคือ 612.91 วงจร-กิโลเมตร จากข้อมูลดังกล่าว สามารถนำไปคำนวณค่าของอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ได้ค่า 9.95 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา การติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม ซึ่งทำให้สามารถลดอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ โดยใช้ลวดเหล็กเคลือบสังกะสีทีเกลียวขนาดพื้นที่หน้าตัด 38.32 ตารางมิลลิเมตรแบบข้างเสาโดยร้อยสายไปในท่อพีวีซี เพื่อป้องกันแรงดันสัมผัสกับเสาเมื่อเกิดความผิดพลาด โดยแสดงการติดตั้งในภาพ 4.1 และรูปแบบจำลองในภาพ 4.2

4.1.2 การจำลอง

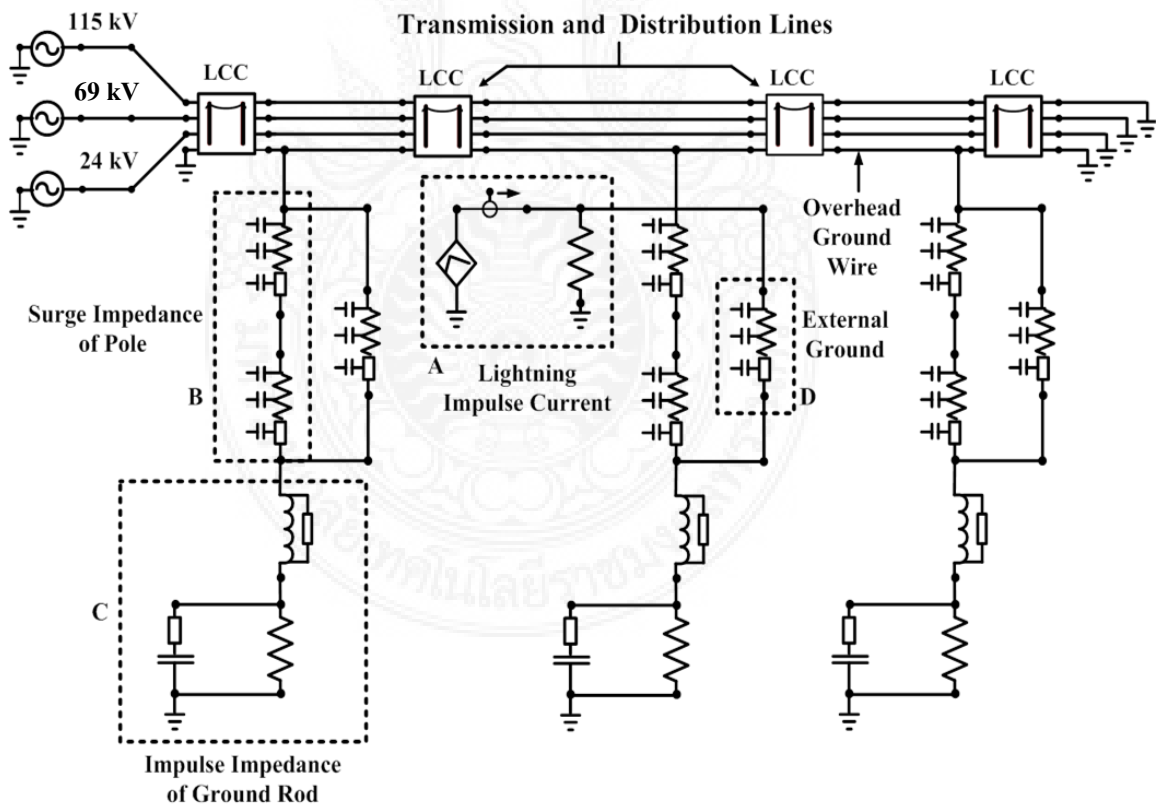
การใช้โปรแกรม ATP-EMTP มาสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับแหล่งกำเนิดแรงดันจะใช้ 3 เฟส สายล่อฟ้า สายส่งและสายจำหน่ายจะใช้โมเดล Line Constants/Cable Constants ของ J. Marti's โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ แสดงดังภาพ 4.3 ซึ่งมีรายละเอียดประกอบไปด้วย การจำลองโมเดลความถี่ โมเดลกระแสฟ้าผ่า (บล็อก A) โมเดลเส้นรัจ อิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีต (บล็อก B) โมเดลอิมพีแดนซ์ของแท่งรากสายดิน (Ground Rod) (บล็อก C) โมเดลอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสา (บล็อก D)



ภาพ 4.1 การติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม



ภาพ 4.2 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม



ภาพ 4.3 ไลออะแกรมการจำลองของโปรแกรม ATP-EMTP ระบบ 69 kV

ตาราง 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

รายละเอียด	ค่า	แบบจำลอง
1. Lightning Current		
- Amplitude (kA)	34.4	Ramp
- Front Time/Tail Time (μs) [24], [25]	10/350	
2. OHGW		
- Diameter (mm)	7.94	
- DC Resistance (Ω)	3.60	
3. Phase Conductor of 115 kV		
- Diameter (mm)	25.65	J. Marti
- DC Resistance (Ω)	0.0778	
4. Phase Conductor of 24 kV		
- Diameter (mm)	15.35	
- DC Resistance (Ω)	0.164	
5. Pole		
- Height (m)	20	
- Span (m)	80	
- Surge Impedance (Ω)	451.4	
- Wave Velocity ($\text{m}/\mu\text{s}$) [18], [26]	123	
6. External Ground		
- Diameter (mm)	7.94	Distributed
- Length (m)	20	Parameter
- Surge Impedance (Ω)	411.27	
- Wave Velocity ($\text{m}/\mu\text{s}$) [18], [26]	300	
7. Ground Rod		
- Diameter (mm)	16	
- Length (m)	3	
- Impulse Resistance (Ω)	5-100	

4.1.3 ผลการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ จะใช้รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า $10/350\ \mu\text{s}$ สำหรับศึกษาระบบปัจจุบันและเมื่อทำการปรับปรุง โดยการติดตั้งสายดินนอกเสา แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของแท่งรากสายดิน โดยใช้ค่ากระแสฟ้าผ่าที่ค่ามัธยฐาน $34.4\ \text{kA}$ ซึ่งเป็นข้อมูลที่เกิดขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2536-2540 ในประเทศไทย

เมื่อพิจารณาผลของรูปคลื่น ในตาราง 4.2 กรณีที่เป็นระบบปัจจุบันและกรณีที่ทำการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มแล้วที่มีการเปลี่ยนค่าของความต้านทานอิมพัลส์ จาก $5\ \Omega$ ถึง $100\ \Omega$ พบว่าที่ระบบสายส่งย่อย $69\ \text{kV}$ เมื่อยังไม่ได้ทำการปรับปรุงนั้น แรงดันที่หัวเสามีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่เพิ่มขึ้น เหตุผลนั้นเนื่องมาจากแรงดันที่หัวเสาไม่สามารถทำให้ลดลงด้วยคลื่นสะท้อนที่มาจากอิมพีแดนซ์ของรากสายดิน เนื่องจากความเร็วของการเดินทางย้อนกลับผ่านสายดินที่อยู่ในเสาไฟฟ้าคอนกรีตมีความเร็ว 123 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งช้ากว่าความเร็วของตัวนำสายดินที่เดินนอกเสาคอนกรีต ดังนั้นแรงดันที่หัวเสาจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของรากสายดิน แต่เมื่อทำการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มนั้น จะช่วยลดแรงดันที่หัวเสา สามารถช่วยลดแรงดันที่หัวเสาได้ เนื่องจากความเร็วของคลื่นที่สะท้อนจากระบบรากสายดิน ผ่านมาทางลวดตัวนำของสายดินนอกเสาที่ติดตั้งเพิ่มนั้น มีความเร็ว 300 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งเร็วกว่าการเดินทางย้อนกลับผ่านสายดินที่อยู่ในเสาไฟฟ้าคอนกรีต ซึ่งมีความเร็ว 123 เมตรต่อไมโครวินาที โดยค่าของแรงดันหัวเสาที่ระบบ $115\ \text{kV}$ แสดงดังตาราง 4.2 และ 4.3 อย่างไรก็ดี สำหรับรูปคลื่น $10/350\ \mu\text{s}$ ที่ระบบสายส่ง $115\ \text{kV}$ นั้นค่าของแรงดันหัวเสาเมื่อทำการติดตั้งสายดินนอกเสาแล้วจะเริ่มมีค่ามากกว่าระบบเดิมเมื่อค่าความต้านทาน อิมพัลส์มีค่ามากกว่า $50\ \Omega$ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับเริ่มเป็นค่าบวก

ตาราง 4.2 แรงดันหัวเสา (kV) ของรูปคลื่น $10/350\ \mu\text{s}$

$R_i\ (\Omega)$	External ground wire	
	Without	With
5	250.68	161.26
10	270.03	228.54
25	363.75	359.94
50	457.38	465.03
75	504.70	512.81
100	528.07	534.19

ตาราง 4.3 ค่ากระแสวิกฤตภายใต้รูปคลื่น 10/350 μs ในช่วงความต้านทานอิมพัลส์ จาก 5 Ω ถึง 100 Ω พบว่าเมื่อทำการปรับปรุงระบบแล้วสามารถรองรับกระแสฟ้าผ่าได้มากขึ้นแต่เมื่อค่าความต้านทานอิมพัลส์มีค่ามากกว่า 100 Ω การติดตั้งสายดินนอกเสาจะไม่เกิดประโยชน์

ตาราง 4.3 กระแสวิกฤต (kA) ของรูปคลื่น 10/350 μs

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	102.70	166.50
10	99.00	117.50
25	73.40	74.50
50	58.80	57.50
75	53.40	52.40
100	51.10	50.40

และจากการศึกษาพบว่าค่า T_d แปรผันตรงต่อค่า BFOR โดยพบว่าถ้าพื้นที่ใดมีค่าของ T_d มากก็จะเป็นโอกาสเกิดไฟฟ้าดับมากกว่า ซึ่งค่าสถิติของ T_d ก็จะเป็นตัวที่ทำให้การออกแบบระบบเพื่อรองรับการเกิดฟ้าผ่าในบริเวณนั้น ต้องมีการพิจารณาเป็นกรณีพิเศษ ซึ่งก็แล้วแต่ว่าจะใช้วิธีการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าแบบใด ซึ่งจากกรณีศึกษาที่ได้ใช้จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีคือ 69, 88, 99 และ 122 วัน ดังตาราง 4.4 ถึง 4.7 ซึ่งจะใช้ ตาราง 3.6 ที่มีค่าของสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient Variance) เท่ากับ 3 % เป็นตัวเทียบค่าการวางไฟ

ตาราง 4.4 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 10/350 μs (kV) โดยมี T_d เท่ากับ 69 วันต่อปี

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	2.89	0.90
10	3.14	2.10
25	6.19	5.99
50	9.82	10.26
75	11.82	12.25
100	12.83	13.15

ตาราง 4.5 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 10/350 μ s (kV) โดยมี Td เท่ากับ 88 วันต่อปี

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	3.91	1.22
10	4.26	2.84
25	8.38	8.12
50	13.31	13.90
75	16.02	16.60
100	17.38	17.82

ตาราง 4.6 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 10/350 μ s (kV) โดยมี Td เท่ากับ 99 วันต่อปี

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	4.53	1.41
10	4.94	3.29
25	9.71	9.40
50	15.42	16.11
75	18.57	19.23
100	20.14	20.65

ตาราง 4.7 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 10/350 μ s (kV) โดยมี Td เท่ากับ 122 วันต่อปี

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	5.88	1.84
10	6.41	4.28
25	12.61	12.21
50	20.02	20.92
75	24.10	24.97
100	26.15	26.81

ตาราง 4.8 รายละเอียดของการลงทุน (บาท/ตัน)

รายการ	ค่าลงทุน (บาท/ตัน)
Material	603.72
Labor	76.95
Work Control	23.09
Transportation	30.18
Operation	36.69
Miscellaneous	36.69
Total	807.33

และจากตาราง 4.3 ค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่ 5 Ω เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม ดังนั้นการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม นั้น จะกำหนดให้ใช้ที่ค่านี้ และจากนั้นเมื่อนำค่ากระแสวิกฤตที่ได้ ไปทำการคำนวณหาค่าอัตราการวบไฟตามผิวย้อนกลับ ดังแสดงผลการคำนวณในตาราง 4.4 ถึง 4.7 โดยค่าลงทุนในการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มนั้น จะมีค่าใช้จ่ายต้นละ 807.33 บาทต่อตัน แสดงรายละเอียดค่าใช้จ่าย ตามตาราง 4.8 จากนั้นนำไปคำนวณและวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์การลงทุนเพื่อคำนวณหามูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV) ตลอดทั้งโครงการต่อไป

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV หรือ Net Present Worth: NPW) คือ ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันของกระแสเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการ (Present Value: PV) กับเงินลงทุนเริ่มแรก ณ อัตราผลตอบแทนที่ต้องการของเงินลงทุนของโครงการ

เงินลงทุนสำหรับการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม แสดงรายละเอียดดังตาราง 4.8 ซึ่งในตารางแสดง จะเป็นค่าใช้จ่ายต่อตัน แต่เวลาคิดค่าใช้จ่ายทั้งโครงการจะพิจารณาที่ระยะทาง 100 วงจร-กิโลเมตร ซึ่งเมื่อคิดค่าลงทุนจะได้ 502,038.81 บาท ได้มีการศึกษาเรื่องอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ โดยสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่าอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (Interruption Cost) ต่อครั้ง ในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง 147,500 บาทต่อครั้ง ในปี พ.ศ.2544 และเมื่อคิดเทียบเป็นปี 2557 เงินลงทุนทั้งหมดสำหรับการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม ระยะทาง 100 วงจร-กิโลเมตร คือ 712,037.08 บาท และอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับต่อครั้งคือ 258,016 บาทต่อครั้ง โดยใช้อัตราลดค่า (Discount Rate) 7.24% อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตรา

ความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับต่อครั้งกับอัตราการรบกวนไฟตามผิวย้อนกลับ และทำการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิตลอดโครงการ 25 ปี [27]

สำหรับการคิดมูลค่าปัจจุบันสุทธิตลอดอายุโครงการ ในกรณีของระบบที่ใช้อยู่ในปัจจุบันกับกรณีปรับปรุง โดยการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม แสดงผลตามตาราง 4.9 ข้อสังเกตถ้ามูลค่าปัจจุบันสุทธิตลอดทั้งโครงการเป็นบวก แสดงว่าสามารถยอมรับโครงการที่ลงทุนนั้นได้ สำหรับมูลค่าปัจจุบันสุทธิตลอดทั้งโครงการของแต่ละรูปคลื่อนั้น คือผลรวมของระบบ 69 kV โดยให้อโอกาสความน่าจะเป็นที่จะเกิด Td มีโอกาสเท่ากันจึงคิดเป็นค่าเฉลี่ย โดยเมื่อวิเคราะห์แล้ว พบว่าการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม จะทำให้เกิดความคุ้มค่าในการลงทุน ซึ่งมีประโยชน์และจะได้มีการนำไปใช้งานจริง ซึ่งจะต้องทำการพิจารณาความเป็นไปได้ทางด้านเทคนิคกันต่อไป

ตาราง 4.9 มูลค่าปัจจุบันสุทธิกรณีติดตั้งเพิ่มสายดินนอกเสา (ล้านบาท/100 วงจร-กม.)

Description	NPV			
	Thunderstorm day (days/yr)			
	69	88	99	122
NPV without External ground	13.40	17.68	20.27	25.91
NPV with External ground	5.11	6.45	7.26	9.02
Average expected NPV without external ground : A	19.31			
Average expected NPV with external ground : B	6.96			
Difference between A and B	12.35			

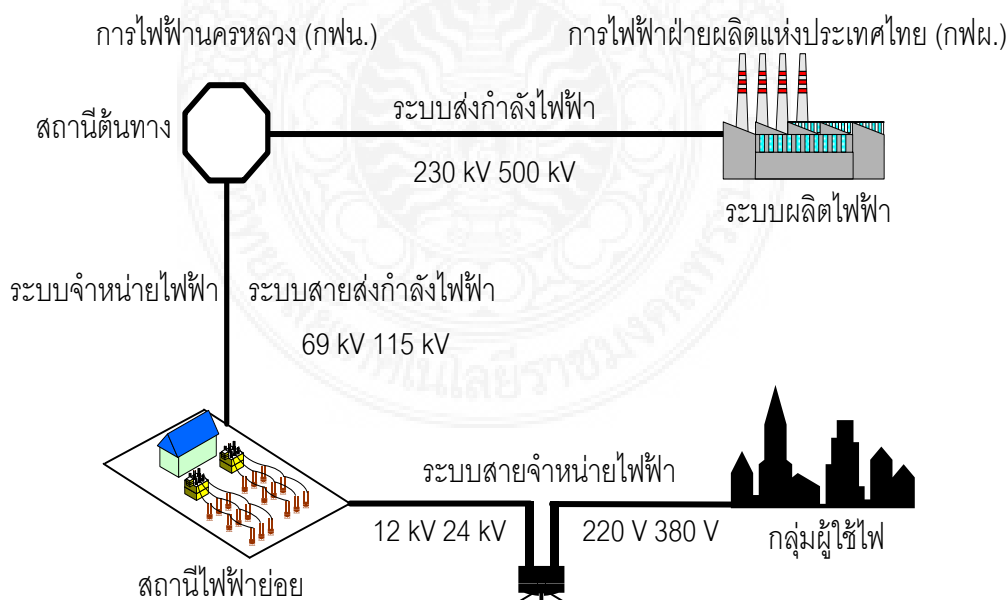
จากการศึกษา พบว่า การติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มนั้น ทำให้ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าดีขึ้นมาก และเมื่อพิจารณาในเรื่องเศรษฐศาสตร์การลงทุนแล้วคุ้มค่า ซึ่งการนำเสนองานวิจัยนี้สามารถนำมาพิจารณาเป็นแนวทาง เพื่อพัฒนาสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าและสามารถที่จะลดอัตราการเกิดไฟฟ้าดับทั้งหมด อันเนื่องมาจากการเกิดการรบกวนไฟตามผิวย้อนกลับ

4.1.4 สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบ 69 kV และ 24 kV ที่ติดตั้งบนเสาต้นเดียวกัน โดยติดตั้งเพิ่มสายดินนอกเสา ภายใต้เงื่อนไขรูปคลื่น 10/350 μ s และความต้านทานอิมพัลส์ที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP เป็นตัวศึกษาวิเคราะห์ค่าแรงดันหัวเสา กระแสวิกฤต และอัตราการวาบไฟ ประโยชน์ของการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มนั้นขึ้นกับความต้านทานอิมพัลส์ ซึ่งพบว่า ความต้านทานอิมพัลส์ที่มีค่าต่ำสุดจะเหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุง

4.2 ผลกระทบของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าต่อแรงดันไฟฟ้าหัวเสาและสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

ระบบส่งจ่ายพลังไฟฟ้าในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) มีพื้นที่รับผิดชอบ 3 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ การจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดด้วยระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า มีระดับแรงดัน 230 KV, 115 kV, และ 69 kV และสายจำหน่ายที่เป็นสายอากาศที่ระดับแรงดัน 24 kV และ 12 kV โดยที่การไฟฟ้านครหลวงรับกำลังไฟฟ้ามาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง ดังแสดงในภาพ 4.4



ภาพ 4.4 ระบบส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ประมาณร้อยละ 90 เป็นสายอากาศเหนือดิน และติดตั้งสายจำหน่ายไฟฟ้าให้อยู่บนเสาต้นเดียวกับระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยมีสายล่อฟ้าหรือสายดิน (Overhead Ground Wire) ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนสุดของเสาไฟฟ้าและมีระบบสายดินฝังอยู่ภายในเสาไฟฟ้าแบบคอนกรีต เพื่อทำหน้าที่นำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน

เนื่องจากข้อจำกัดในการปักเสาพาดสายของ กฟน. ทำให้ระบบจำหน่าย 24 kV ติดตั้งอยู่บนเสาต้นเดียวกับ ระบบส่งย่อย 69 kV ทำให้ใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่าร่วมกัน โดยมีสายดินภายในเสาเป็นส่วนหนึ่งของระบบสายดินเชื่อมระหว่างสายดินเหนือศีรษะและแท่งหลักดิน

เมื่อเกิดฟ้าผ่าไปที่สายส่งย่อยหรือสายจำหน่าย ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำเกิดขึ้นทั้งสองระบบ โดยอาจสร้างความเสียหายได้ จากการเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ (Black Flash Over : BFO) ดังนั้นบทความนี้ทำการวิเคราะห์ช่วงเวลาของหน้าคลื่นที่ช่วงเวลาน้อย มีความชันมาก มีผลทำให้แรงดันที่หัวเสามีค่ามากและช่วงเวลาหลังคลื่นไม่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาและอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ โดยทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ในระบบจำหน่าย 24 kV ติดตั้งอยู่บนเสาต้นเดียวกับ ระบบส่งย่อย 69 kV โดยใช้ค่าของจำนวนวันที่พายุฟ้าคะนองต่อปีเท่ากับ 122 วันต่อปี

4.2.1 กรณีศึกษา

ได้ทำการทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ระดับแรงดัน 69 kV ดังแสดงใน ภาพ 4.3 โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ด้วยรูปคลื่น 0.25/100, 10/100, 10/350 μ s ฟ้าผ่าที่ตำแหน่งหัวเสา จากนั้นเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้าหัวเสา และค่าอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (BFOR) โดยทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นว่ามีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาและค่าของ BFOR สำหรับกรณีที่เป็นรูปคลื่น 0.25/200 และ 10/100 μ s เป็นการกำหนดให้ความยาวหางคลื่นคงที่คือ 100 μ s แล้วทำการเปลี่ยนแปลงความยาวหน้าคลื่นที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์เท่ากับ 1, 5, 10, 25, 75 และ 100 Ω ด้วยค่ากระแสฟ้าผ่า 34.4 kA ซึ่งเป็นค่ากระแสมาตรฐานในช่วงปี พ.ศ. 2536-2540 ของประเทศไทย ผลการทดสอบดังแสดงใน ตาราง 4.10-4.12

จากตาราง 4.10 พบว่าเมื่อทดสอบด้วยค่ากระแสฟ้าผ่า 34.4 kA ด้วยรูปคลื่น 0.25/100 μ s จะให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาสูงกว่าเมื่อทดสอบด้วยรูปคลื่น 10/100 μ s เนื่องจาก รูปคลื่น 0.25/100 μ s มีความชันหน้าคลื่นมากกว่าและมีช่วงเวลาน้ำคลื่นสั้นกว่าถึง 40 เท่าจึงทำให้คลื่นที่สะท้อนมาจากฐานเสาไม่สามารถมาหักล้างยอดคลื่นได้ทันแต่สำหรับรูปคลื่น 10/100 μ s มีค่าแรงดันไฟฟ้าหัวเสาดูต่ำกว่ามากเพราะว่าคลื่นจากฐานเสาสามารถไปหักล้างยอดคลื่นได้ทัน และพบว่าทั้งสองรูปคลื่นมีค่าของแรงดันไฟฟ้าหัวเสาเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของความต้านทานอิมพัลส์เพิ่มมากขึ้นด้วย

ตาราง 4.10 แรงดันไฟฟ้าหัวเสา (kV) ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

$R_f (\Omega)$	0.25/100 μs	10/100 μs	10/350 μs
1	5,612.5	242.87	242.87
5	5,671.9	250.68	250.68
10	5,672.9	270.03	270.03
25	5,673.0	363.75	363.75
50	5,673.0	457.38	457.38
75	5,673.0	504.70	504.70
100	5,673.0	528.07	528.07

ในทางกลับกันเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบที่รูปคลื่น 10/100 μs และ 10/350 μs คือกำหนดให้ช่วงเวลาน้ำคลื่นคงที่แต่เปลี่ยนค่าของช่วงเวลาหลังคลื่นก็จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าหัวเสา มีค่าเท่ากันที่ทุกค่าของความต้านทานอิมพีแดนซ์นั้นหมายความว่าช่วงเวลาน้ำคลื่นมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าหัวเสามากกว่าแม้ว่าค่าของช่วงเวลาหลังคลื่นต่างกันและเมื่อทำการพิจารณาค่าของกระแสวิกฤตของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าแบบต่างๆพบว่าค่าของกระแสวิกฤตของรูปคลื่น 0.25/100 μs มีค่าคงที่ที่ทุกค่าของความต้านทานอิมพีแดนซ์เนื่องจากคลื่นจากฐานรากไม่สามารถมาหักล้างยอดคลื่นได้ทันเพราะหน้าคลื่นมีความชันมาก ส่วนรูปคลื่น 10/100 μs และ 10/350 μs มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากันเพราะว่าช่วงเวลาน้ำคลื่นเท่ากันหรือมีความชันเท่ากันนั่นเองและที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์น้อย ๆ ก็ทำให้ระบบสามารถรองรับค่ากระแสวิกฤตได้สูงขึ้นโดยมีผลการศึกษาดังแสดงในตาราง 4.11

ตาราง 4.11 กระแสวิกฤต (kA) ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

$R_f (\Omega)$	0.25/100 μs	10/100 μs	10/350 μs
1	4.48	104.60	104.60
5	4.48	102.70	102.70
10	4.48	99.00	99.00
25	4.48	73.40	73.40
50	4.48	58.80	58.80
75	4.48	53.40	53.40
100	4.48	51.10	51.10

จากนั้นการคำนวณค่าของ BFOR สามารถประมวลผลค่า BFOR ดังแสดงในตาราง 4.12 โดยเมื่อทำการศึกษาผลของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่าที่มีผลต่อค่าของ BFOR ก็พบว่าค่า BFOR มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความชันของช่วงเวลาหน้าคลื่น

ตาราง 4.12 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่า ที่ Td เท่ากับ 122 วันต่อปี

R_f (Ω)	0.25/100 μ s	10/100 μ s	10/350 μ s
1	95.89	5.63	5.63
5	95.89	5.88	5.88
10	95.89	6.41	6.41
25	95.89	12.61	12.61
50	95.89	20.02	20.02
75	95.89	24.10	24.10
100	95.89	26.15	26.15

โดยค่าจากตาราง 25 (Ω) พบว่าค่าของ BFOR ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s มีค่าคงที่ทุกค่าความต้านทานอิมพัลส์ ส่วนค่า BFOR ของรูปคลื่น 10/100 μ s และ 10/350 μ s มีค่าเท่ากันคือมีค่าน้อยที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์น้อย ๆ และ BFOR มีค่ามากเมื่อค่าความต้านทานอิมพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้น

4.2.2 สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่าที่มีผลต่อค่าของแรงดันไฟฟ้าหัวเสาและค่าของ BFOR โดยจากการศึกษาพบว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นมีผลต่อค่าของแรงดันไฟฟ้าหัวเสาและค่าของ BFOR มากกว่าช่วงเวลาหลังคลื่นคือถ้าช่วงเวลาหน้าคลื่นมีค่าน้อยมากหรือมีความชันมาก ก็ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากฐานเสาไม่สามารถหักล้างยอดคลื่นที่หัวเสาได้ทันหรือเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมีค่าเป็นลบน้อยลง ส่งผลให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าหัวเสาและค่าของ BFOR มีค่ามากกว่ารูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่าที่มีช่วงเวลาหน้าคลื่นมากหรือมีความชันน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าดัชนีของสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานอิมพัลส์ด้วย โดยเฉพาะกับรูปคลื่นที่มีช่วงเวลาหน้าคลื่นมากก็ทำให้ค่าอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับมีค่ามากขึ้นด้วย แต่ถ้าช่วงเวลาหน้าคลื่นน้อยก็ไม่มีผลต่อค่าของ BFOR

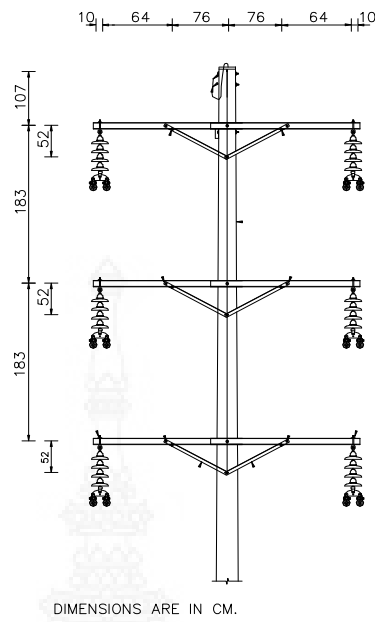
4.3 การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบสายส่ง 69 kV และ 115 kV ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงแบบ 2 วงจร โดยเปรียบเทียบข้อมูลในพื้นที่ของ กฟน. กับ ANSI ด้วยโปรแกรม TFlash

การวิเคราะห์สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบพวงลูกถ้วยในเทอมของอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวทั้งหมด (TFOR) (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) สำหรับระบบ 69 kV และ 115 kV ในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวงปัจจุบันการออกแบบพวงลูกถ้วย ระบบ 69 kV และ 115 kV จะอ้างอิงตาม American National Standards Institute (ANSI) หรือ IEEE Std. ซึ่งอาจจะไม่เหมาะสมกับการประสานสัมพันธ์ทางฉนวน (insulation coordination) ในระบบจำหน่ายใน กฟน. เพราะความแตกต่างของจำนวนวันฝนฟ้าคะนองและการกระจายความน่าจะเป็นสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าผลคือเกิดความผิดพร่องขึ้นกับพวงลูกถ้วยในระบบสายส่งย่อยของ กฟน. บ่อยครั้งดังแสดงได้จากค่า TFOR ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญ

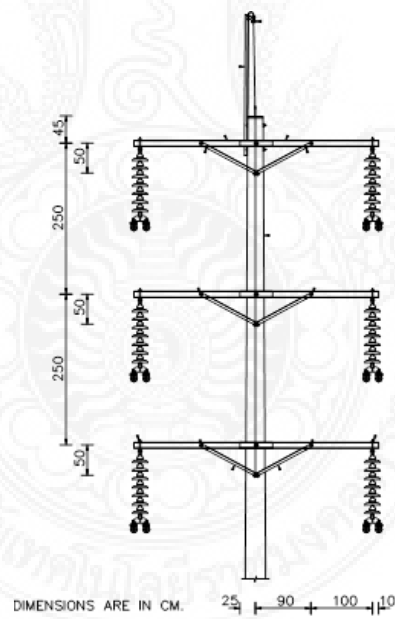
แรงดันเกินไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถเป็นสาเหตุโดยตรงของการเกิดฟ้าผ่าที่สาย OHWG หรือ ฟ้าผ่าใกล้เคียงกับระบบจำหน่ายในทางปฏิบัติระบบสายส่งย่อย 69 kV และ 115 kV ของ กฟน. ในประเทศไทย การเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับจะเป็นสาเหตุที่ทำให้พวงลูกถ้วยวาบไฟตามผิวและนำไปสู่การเกิดไฟฟ้าดับงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งย่อยในระบบจำหน่ายของ กฟน. เป็นกรณีศึกษาที่ทำการเปลี่ยนจำนวนลูกถ้วยในพวงของระบบสายส่ง 69 kV และ 115 kV จะทำการศึกษาและวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม TFlash ซึ่งจะใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ระบบ

4.3.1 การจำลอง

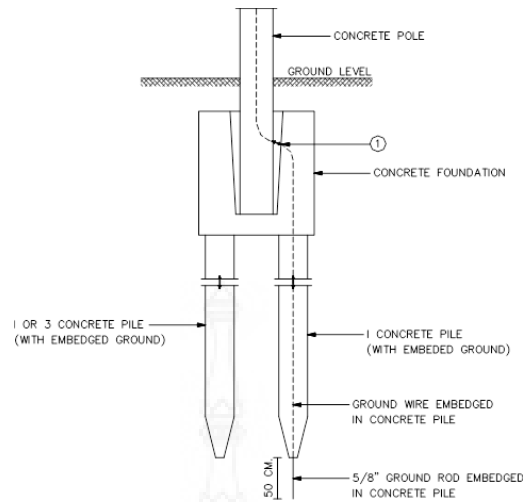
การใช้โปรแกรม TFlash มาสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าก็จะใช้หลักการเดียวกันกับการใช้โปรแกรม ATP-EMTP เช่นกันแต่จะเป็นการใช้ระบบสายส่งย่อยที่ระดับแรงดัน 69 kV และ 115 kV จำนวน 2 วงจรอยู่บนเสาต้นเดียวกัน



ภาพ 4.5 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวงระบบ 69 kV 2 วงจร



ภาพ 4.6 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวงระบบ 115 kV 2 วงจร



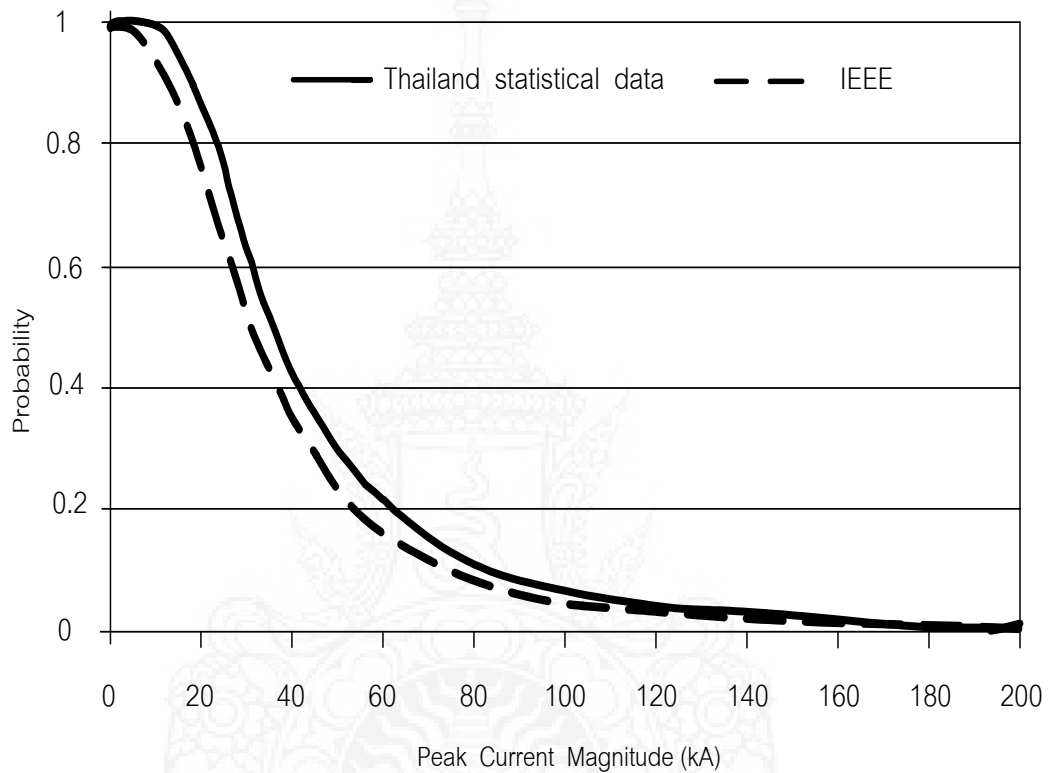
ภาพ 4.7 รูปแบบการจัดวางโครงสร้างระบบการต่อลงดินของสายส่งย่อยของการไฟฟ้านครหลวง ระบบ 69 kV และ 115 kV จำนวน 2 วงจร

สมการความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอดโดยข้อมูลเหล่านี้ ได้แสดงค่าไว้ในบทที่ 2 ค่าเป็นสมการที่ได้เป็นไปตามพื้นที่และวิธีการตรวจวัด แต่สามารถแสดงในรูปสมการอย่างง่ายของขนาดกระแสฟ้าผ่าได้จากการวัดในภาคสนามเกินกว่ากระแสค่ายอดสำหรับในประเทศไทยจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ซึ่งการกระจายสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย และอ้างอิงตาม ANSI เป็นไปตามภาพ 4.8 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 ได้ดังนี้

$$P(I) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{I}{M}\right)^B\right)} \quad (4.1)$$

เมื่อ	P (I)	คือ	ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (%)
	I	คือ	กระแสฟ้าผ่าค่ายอด (kA)
	M	คือ	กระแสฟ้าผ่าค่ามัธยฐานเท่ากับ 34.4 kA สำหรับประเทศไทย และเท่ากับ 31 kA สำหรับ IEEE Std.
	B	คือ	ค่าคงที่สำหรับประเทศไทยเท่ากับ 2.5 สำหรับประเทศไทย และ เท่ากับ 2.6 สำหรับ IEEE Std.

ซึ่งสามารถนำมานำเสนอในรูปแบบกราฟดังภาพ 4.8 โดยจะเป็นกราฟที่แสดงเมื่ออ้างอิงจากสมการที่ใช้ในประเทศไทยและจาก IEEE Std. อยู่บนรูปเดียวกันและนอกจากนี้การใช้ค่าของ จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (thunderstorm days) ที่ต่างกันโดยไทยใช้ 69 วันต่อปี แต่ของ IEEE [28]-[29] Std. ใช้ 30 วันต่อปี ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงได้ดังตาราง 4.13



ภาพ 4.8 การกระจายความน่าจะเป็นสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย

ตาราง 4.13 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

รายละเอียด	ค่า	แบบจำลอง
1. Lightning Current		
- Amplitude (kA)	34.4	Ramp
- Front Time/Tail Time (μs) [6]	1.2/50	
2. OHGW		
- Diameter (mm)	7.94	
- DC Resistance (Ω)	3.60	
3. Phase Conductor of 69 kV and 115 kV		
- Diameter (mm)	25.65	J. Marti
- DC Resistance (Ω)	0.0778	
4. Phase Conductor of 24 kV		
- Diameter (mm)	15.35	
- DC Resistance (Ω)	0.164	
5. Pole		
- Height (m)	20	
- Span (m)	80	
- Surge Impedance (Ω)	451.4	
- Wave Velocity (m/ μs)	123	Distributed Parameter
7. Ground Rod		
- Diameter (mm)	16	
- Length (m)	0.50	
- Soil Resistivity ($\Omega \cdot \text{m}$)	5	

4.3.2 กรณีศึกษา

ผลของการวิเคราะห์สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งย่อย แสดงในตาราง 4.14 ถึง 4.17 ค่าของ อัตราการเกิดวابلไฟตามผิวย้อนกลับ (BFOR) อัตราการเกิดวابلไฟตามผิวเนื่องจากความล้มเหลวของสายดินป้องกัน (SFFOR) และอัตราการเกิดวابلไฟตามผิวทั้งหมด(TFOR) ของทั้งกรณีที่ใช้ข้อมูลอ้างอิงตาม IEEE Std เป็นกรณีที่ 1 และ อ้างอิงข้อมูลตามประเทศไทย เป็นกรณีที่ 2 ดังแสดงในภาพ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับซึ่งทั้ง 2 กรณีค่าของอัตราการเกิดวابلไฟตามผิวทั้งหมดมีความแตกต่างกันมาก ตัวอย่างเช่น ค่าอัตราการเกิดวابلไฟตามผิวทั้งหมดของระบบ 69 kV ที่พวงลูกถ้วยใช้ 4 ลูกและระบบ 115 kV ที่พวงลูกถ้วยใช้ 7 ลูก พบว่า ค่าของอัตราการเกิดวابلไฟตามผิวทั้งหมดของทั้ง 2 ระบบมีความแตกต่างกันประมาณ 70% จากผลดังกล่าวพบว่าค่าที่เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าที่ต่ำลงเมื่อใช้ข้อมูลที่อ้างอิงจากพื้นที่บริการของ กฟน. การเพิ่มขึ้นของจำนวนลูกถ้วย ที่จะทำให้สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าดีขึ้นแต่ก็จะนำมาซึ่งการเพิ่มขึ้นของเงินลงทุนเมื่อลูกถ้วยเพิ่มขึ้นจาก 5 ลูกเป็น 6 ลูก ในระบบ 69 kV และการเพิ่มขึ้นของลูกถ้วยที่เพิ่มขึ้นจาก 8 ลูกเป็น 9 ลูก ในระบบ 115 kV สำหรับเหตุผลการวิเคราะห์ค่าลงทุนสำหรับการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าควรต้องกำหนดจุดที่เหมาะสมให้สมดุลระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟ

ตาราง 4.14 ค่าดัชนีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบ 69 kV (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณี 1

Items (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)	จำนวนลูกถ้วย (ลูก)			
	3	4	5	6
BFOR	10.29	8.15	7.30	6.80
SFFOR	0.72	0.51	0.44	0.15
TFOR	11.05	8.66	7.74	6.95

ตาราง 4.15 ค่าดัชนีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบ 69 kV (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณี 2

Items (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)	จำนวนลูกถ้วย (ลูก)			
	3	4	5	6
BFOR	32.71	28.69	24.27	22.89
SFFOR	1.55	1.03	0.84	0.52
TFOR	34.42	29.72	25.11	23.41

ตาราง 4.16 ค่าดัชนีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบ 115 kV (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณี 1

Items (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)	จำนวนลูกถ้วย (ลูก)			
	6	7	8	9
BFOR	9.57	7.65	6.31	5.40
SFFOR	0.52	0.44	0.43	0.35
TFOR	10.09	8.09	6.74	5.75

ตาราง 4.17 ค่าดัชนีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบ 115 kV (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณี 2

Items (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)	จำนวนลูกถ้วย (ลูก)			
	6	7	8	9
BFOR	31.43	25.85	22.00	19.34
SFFOR	1.10	0.93	0.89	0.83
TFOR	32.53	26.79	22.89	20.17

4.3.3 สรุป

การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยใช้ค่าของอัตราการเกิดวาวไฟตามผิวทั้งหมดผลการศึกษาของระบบสายส่งย่อย 69 kV และ 115 kV ในพื้นที่บริการของ กฟน.มีความสำคัญอยู่ที่ TFOR ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีและค่าความน่าจะเป็นของค่ายอดกระแสฟ้าผ่า สิ่งสำคัญนอกจากการทำเพื่อเป็นการปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าให้ดีขึ้น การศึกษาควรต้องพิจารณาด้านการลงทุนด้วยเพื่อช่วยในการตัดสินใจปรับปรุงสมรรถนะการป้องกัน

4.4 กรณีศึกษาผลของการการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มรูปแบบต่างๆ ต่อสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบ 69 kV ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง

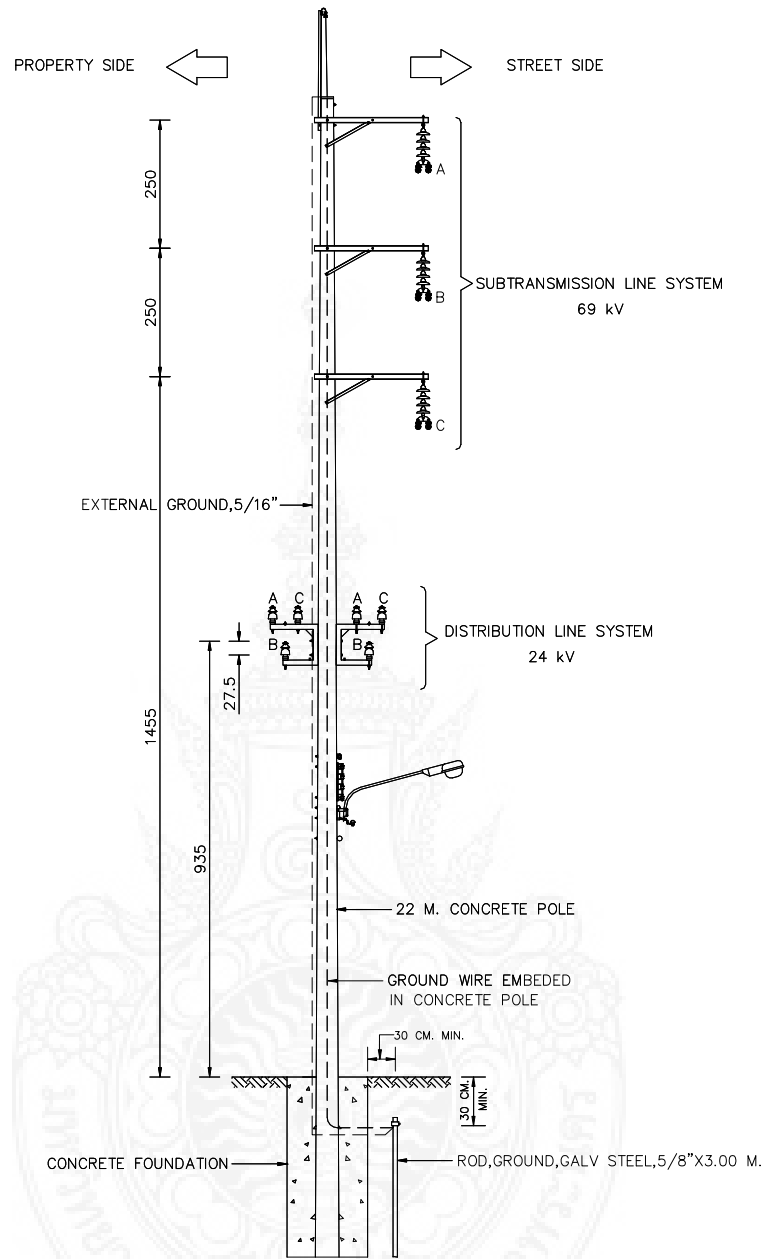
การเกิดการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ เกิดจากฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้าหรือหัวเสาไฟฟ้าคอนกรีตซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการเกิดไฟฟ้าดับถาวรในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง แนวทางหนึ่งที่จะสามารถลดแรงดันเกินฟ้าผ่าจากการเกิดการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ คือ การติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม โดยเชื่อมประสานระหว่างสายล่อฟ้ากับแท่งจากสายดิน งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบ 69 kV และระบบ 24 kV ซึ่งอยู่บนเสาดันเดียวกัน ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP การประเมินสมรรถนะระบบการป้องกันฟ้าผ่า จะคำนวณในเทอมของแรงดันหัวเสา กระแสวิกฤตและอัตราการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า การติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม

สามารถปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าให้ดีขึ้นได้และเป็นข้อเสนอในการตัดสินใจเพื่อแก้ปัญหา และปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีสายส่งย่อยและสายจำหน่ายติดตั้งอยู่บนเสาต้นเดียวกัน

4.4.1 การจำลอง

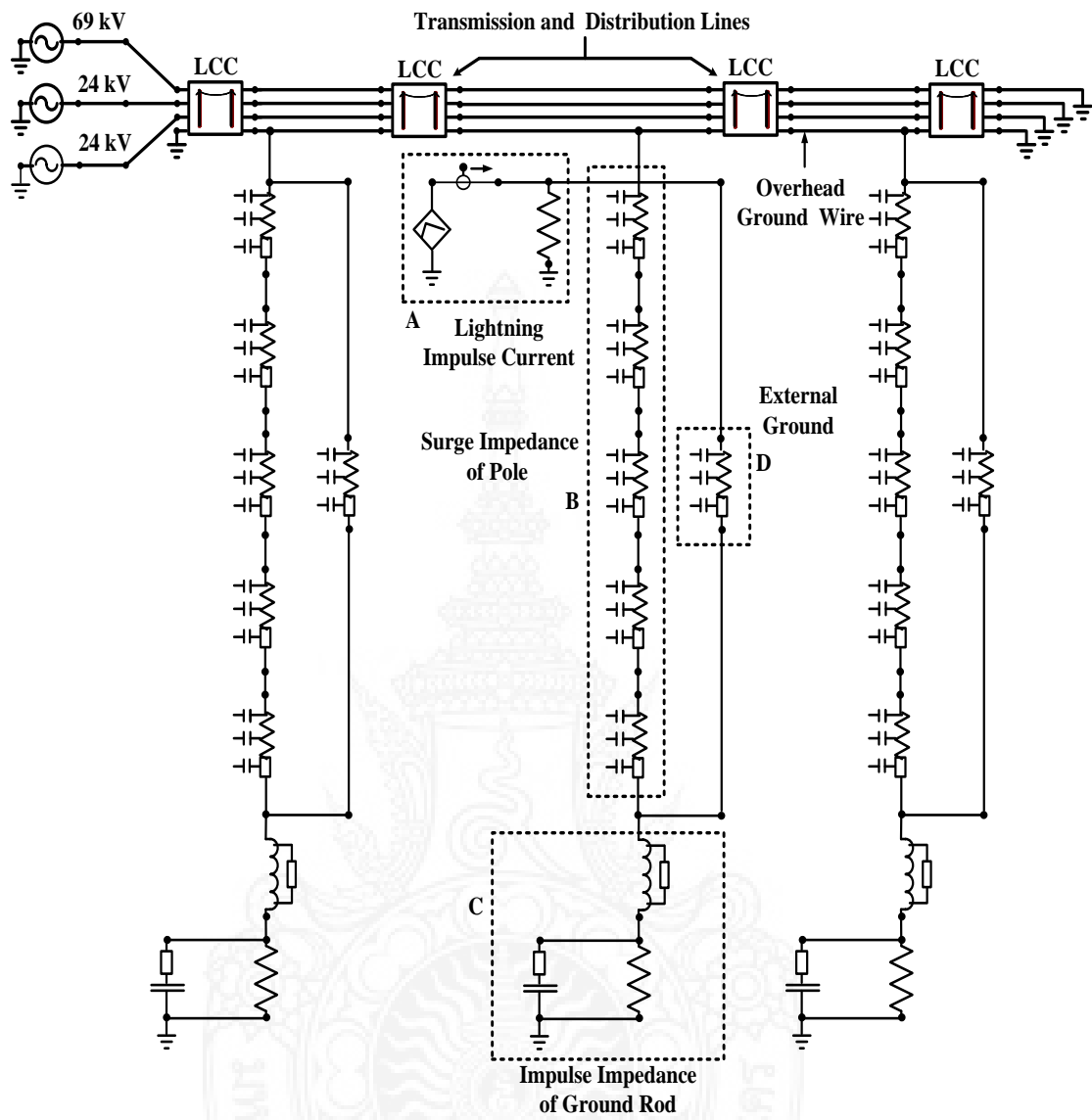
สำหรับการพิจารณาที่ระดับ 69 kV นี้จะใช้ลูกถ้วยจำนวน 4 ลูกซึ่งจะน้อยกว่า 115 kV ซึ่งจะใช้จำนวน 7 ลูกและจะพิจารณา (Coefficient of Variation : CV) ที่ค่า 3% และสำหรับการจำลองเสิร์จอิมพีแดนซ์ของระบบ 69 kV นี้ จะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เริ่มจากหัวเสาถึงจุดประสานของครอสอาร์มสายส่งเฟส A ส่วนที่ 2 อยู่ระหว่างครอสอาร์มสายส่งเฟส B และเฟส C และส่วนที่ 3 อยู่ระหว่างครอสอาร์มสายส่งเฟส C และจุดประสานครอสอาร์มระบบ 24 kV ส่วนที่ 4 อยู่ระหว่างครอสอาร์มสายจำหน่ายจนถึงฐานเสา โดยดูรายละเอียดได้จากภาพ 4.9 และ 4.10

การใช้โปรแกรม ATP-EMTP มาสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า โดยแหล่งกำเนิดแรงดันจะใช้ 3 เฟส สายล่อฟ้า สายส่งและสายจำหน่ายจะใช้โมเดล Line Constants/Cable Constants ของ J. Marti's โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ แสดงดังภาพ 4.22 ซึ่งมีรายละเอียดประกอบไปด้วยการจำลองโมเดลความถี่ โมเดลกระแสฟ้าผ่า (บล็อก A) โมเดลเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีต (บล็อก B) โมเดลอิมพีแดนซ์ของแท่งรากสายดิน (Ground Rod) (บล็อก C) โมเดลอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสา (บล็อก D)



NOTE DIMENSIONS ARE IN CM.

ภาพ 4.9 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยของการไฟฟ้านครหลวงที่มีทั้งระบบ 69 kV และ 24 kV



ภาพ 4.10 ไดอะแกรมการจำลองของโปรแกรม ATP-EMTP ระบบ 69 kV

ตาราง 4.18 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

รายละเอียด	ค่า	แบบจำลอง
1. Lightning Current		
- Medium Amplitude (kA)	34.40	Ramp
- Front Time/Tail Time μs [24], [25]	0.25/100,10/350	
2. OHGW		
- Diameter (mm)	7.94	
- DC Resistance (Ω)	3.60	
3. Phase Conductor of 69 kV		
- Diameter (mm)	25.65	J. Marti
- DC Resistance (Ω)	0.0778	
4. Phase Conductor of 24 kV		
- Diameter (mm)	15.35	
- DC Resistance (Ω)	0.164	
5. Pole		
- Height (m)	20	
- Span (m)	80	
- Surge Impedance (Ω)	451.4	
- Wave Velocity ($\text{m} / \mu\text{s}$) [18], [26]	123	
6. External Ground		
- Diameter (mm)	7.94	Distributed Parameter
- Length (m)	20	
- Surge Impedance (Ω)	411.27	
- Wave Velocity ($\text{m} / \mu\text{s}$) [18], [26]	300	
7. Ground Rod		
- Diameter (mm)	16	
- Length (m)	3	
- Impulse Resistance (Ω)	5	

4.4.2 ผลการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มในรูปแบบต่าง ๆ กัน จำนวน 5 รูปแบบโดยใช้รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าช่วงเวลาหน้าคลื่นต่อช่วงเวลาหลังคลื่น 0.25/100 μ s และ 10/350 μ s ขนาดกระแสฟ้าผ่า 34.4 kA ซึ่งเป็นค่ามัธยฐานในปี พ.ศ.2540 และใช้จำนวนวันที่ฝนฟ้าคะนอง 69 วันต่อปีและสำหรับรูปแบบที่ทำการศึกษามีดังนี้

กรณีที่ 1 เป็นรูปแบบระบบสายส่งที่ใช้งานจริง ๆ แสดงดังภาพ 4.11 ซึ่งเป็นแบบจำลองของสายดินจำนวน 1 เส้นที่ฝังอยู่ในเสาคอนกรีตและประสานเข้ากับสายล่อฟ้าและแท่งรากสายดินจำนวน 1 แท่ง

กรณีที่ 2 มีลักษณะรูปแบบเหมือนกรณีที่ 1 แต่มีการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มโดยติดตั้งแนบเข้ากับเสาและประสานเข้ากับสายล่อฟ้าและแท่งหลักดิน (แท่งรากสายดิน) จำนวน 1 แท่ง แสดงดังภาพ 4.12

กรณีที่ 3 มีลักษณะรูปแบบเหมือนกรณีที่ 2 แต่มีการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มเข้าไปรวมเป็น 2 เส้นแสดงดังภาพ 4.13

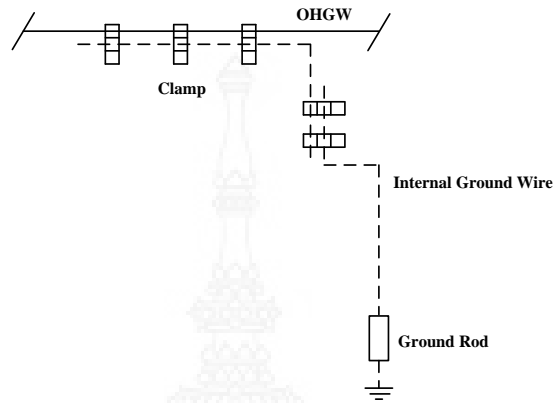
กรณีที่ 4 มีลักษณะรูปแบบเหมือนกรณีที่ 1 แต่มีการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม 1 เส้น และมีการติดตั้งเพิ่มรากสายดินอีกจำนวน 1 แท่ง แสดงดังภาพ 4.14

กรณีที่ 5 มีลักษณะรูปแบบเหมือนกรณีที่ 3 แต่มีการติดตั้งเพิ่มรากสายดินอีกจำนวน 1 แท่ง เพื่อให้ใช้ประสานสายดินนอกกับสายล่อฟ้า แสดงดังภาพ 4.15

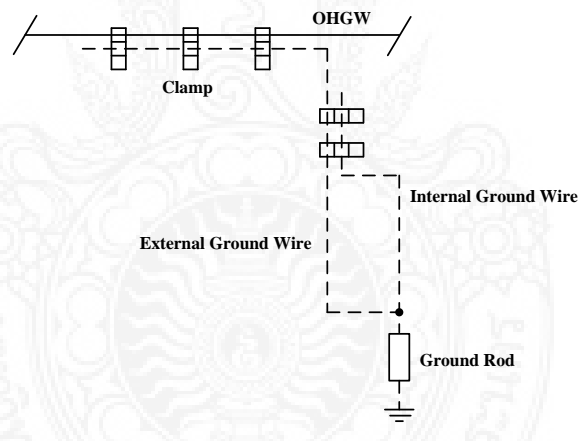
ดัชนีสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าแสดงในตาราง 4.19 ถึง 4.24 สำหรับตาราง 4.19 และ 4.20 ที่แสดงค่าแรงดันหัวเสา ที่ระดับแรงดัน 69 kV และ 24 kV ซึ่งจะมีค่าลดลง เนื่องจาก คลื่นสะท้อน ที่มาหักล้างจากแท่งรากสายดินที่เดินทางผ่านทางสายดินนอกเสา โดยที่ระดับแรงดัน 69 kV แรงดัน ที่หัวเสา จะมีค่าลดลง 36% ถึง 60% เมื่อติดตั้งเพิ่มสายดินนอกเสา และที่ระดับแรงดัน 24 kV แรงดัน ที่เป็นจุดประสานระหว่างครอสอาร์มและสายดินในเสา จะมีค่าลดลง 3% ถึง 64% โดยเมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่า แรงดันที่หัวเสาของระบบ 69 kV จะสูงกว่า 24 kV ดังนั้นก็จะมีแรงดันตกคร่อม แยกออกเป็นคนละวงจร

สำหรับกระแสวิกฤตนั้น คือ กระแสที่มีค่าต่ำสุดที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิว ซึ่งจะแปรผกผันกับแรงดันหัวเสา โดยแรงดันที่หัวเสามีค่าสูงจะให้ค่ากระแสวิกฤตต่ำ และถ้าแรงดันที่หัวเสามีค่าต่ำจะให้ค่ากระแสวิกฤตสูง ในตาราง 4.21 และ 4.22 จะเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ตามที่กล่าว รูปคลื่น 0.25/100 จะแสดงให้เห็นว่า การติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม จะทำให้กระแสวิกฤต มีค่าเพิ่มขึ้น แต่สำหรับรูปคลื่น 10/350 ในตาราง 4.22 แสดงให้เห็นว่า การติดตั้งสายดิน

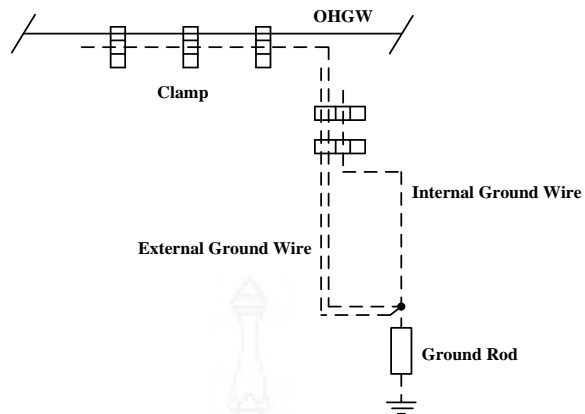
นอกเสาเพิ่มจำนวน 2 เส้นนั้น (กรณี 3) จะไม่เกิดประโยชน์สำหรับระบบ 24 kV เพราะมีแท่งรากสายดินแท่งเดียว (กรณี 2) ก็เป็นการเพียงพอแล้วสำหรับการหักล้างแรงดันที่หัวเสา อย่างไรก็ตาม การติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มนั้น ควรจะติดตั้งพิจารณาค่าของกระแสวิกฤตด้วย



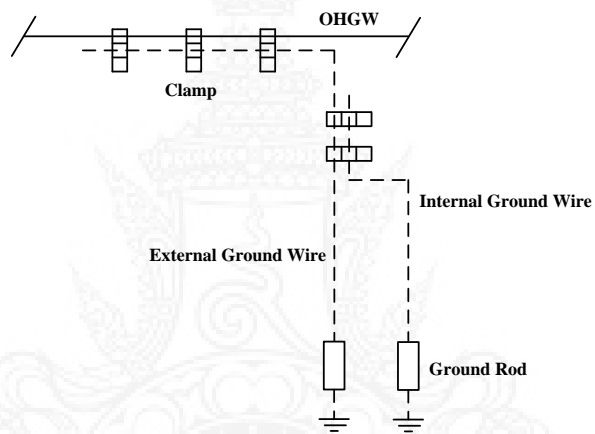
ภาพ 4.11 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดิน กรณี 1 (ปัจจุบัน)



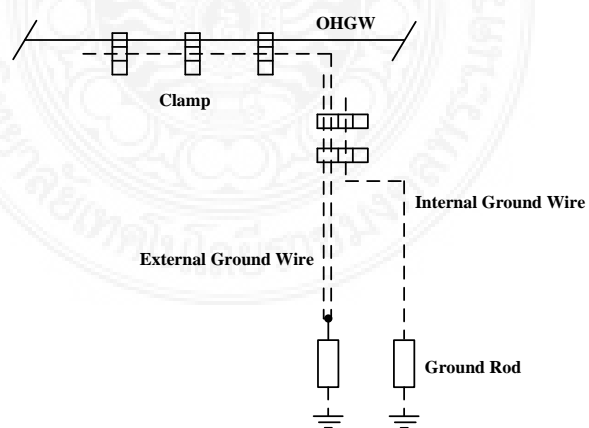
ภาพ 4.12 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดิน กรณี 2



ภาพ 4.13 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดิน กรณีที่ 3



ภาพ 4.14 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดิน กรณีที่ 4



ภาพ 4.15 รูปแบบจำลองการติดตั้งสายดิน กรณีที่ 5

เมื่อพิจารณาค่าในตาราง 4.24 ซึ่งเป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าคือ 0.25/100 μs ค่าของการรวบรวมไฟตามผิวย้อนกลับ จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เหตุผลที่สำคัญ คือ รูปคลื่นมีความชันมาก จึงไม่สามารถลดค่าแรงดันที่หัวเสาได้มากนัก แต่สำหรับรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า 10/350 μs ที่แสดงค่าในตาราง 4.24 กรณี 2 ถึง 5 การติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มสามารถลดอัตราการรวบรวมไฟตามผิวย้อนกลับได้ แต่ในกรณี 5 จะสามารถลดอัตราการรวบรวมไฟตามผิวย้อนกลับได้มากที่สุด ซึ่งในการพิจารณาว่าจะใช้รูปแบบการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มรูปแบบใดนั้นต้องพิจารณาเศรษฐศาสตร์การลงทุนด้วย เพื่อให้เกิดความเหมาะสมมากที่สุด

ตาราง 4.19 แรงดันหัวเสา (kV) ของรูปคลื่น 0.25/100 μs

กรณี	แรงดันหัวเสา (kV)
1	5,671.90
2	3,367.40
3	2,496.00
4	3,154.60
5	2,308.60

ตาราง 4.20 แรงดันหัวเสา (kV) ของรูปคลื่น 10/350 μs

กรณี	แรงดันหัวเสา (kV)
1	250.25
2	161.05
3	151.21
4	155.70
5	136.85

ตาราง 4.21 กระแสวิกฤต (kA) ของรูปคลื่น 0.25/100 μs

กรณี	กระแสวิกฤต (kA)
1	2.73
2	4.60
3	6.20
4	4.90
5	6.70

ตาราง 4.22 กระแสวิกฤต (kA) ของรูปคลื่น 10/350 μ s

กรณี	กระแสวิกฤต (kA)
1	62.80
2	101.50
3	108.00
4	103.60
5	119.00

ตาราง 4.23 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s ที่ Td เท่ากับ 69 วันต่อปี

กรณี	BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
1	43.82
2	43.65
3	43.38
4	43.60
5	43.26

ตาราง 4.24 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ของรูปคลื่น 10/350 μ s ที่ Td เท่ากับ 69 วันต่อปี

กรณี	BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
1	7.59
2	2.48
3	2.13
4	2.36
5	1.67

สำหรับเงินลงทุนต่อต้นในแต่ละกรณี แสดงรายละเอียดดังตาราง 4.25 ซึ่งในตาราง จะแสดงให้เห็นว่า กรณี 2 มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนน้อยสุด ในขณะที่กรณี 5 จะมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนมากที่สุด ดังนั้นการวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุน จึงใช้เป็นเกณฑ์การพิจารณาว่าจะเลือกรูปแบบใด โดยคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิตลอดอายุโครงการ 25 ปี เวลาคิดค่าใช้จ่ายทั้งโครงการ จะพิจารณาที่ระยะทางของสายส่ง 100 กิโลเมตร

ตาราง 4.25 รายละเอียดค่าลงทุนแต่ละรูปแบบ (บาท/ต้น)

รายการ	กรณี 2	กรณี 3	กรณี 4	กรณี 5
วัสดุ	603.72	1,207.43	929.94	1,533.65
ค่าแรงงาน	76.95	153.89	559.77	636.71
ค่าควบคุมงาน	23.09	46.17	167.93	191.01
ค่าขนส่ง	30.18	60.37	46.49	76.68
ค่าดำเนินการ	36.69	73.40	85.20	121.91
เบ็ดเตล็ด	36.69	73.40	85.20	121.91
รวม(บาท/ต้น)	807.33	1,614.65	1,874.54	2,681.86
บาท/100 วงจร.กม.	1,009,964.78	2,019,929.55	2,345,045.23	3,355,010.01

ได้มีการศึกษาเรื่องอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ โดยสถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พบว่า อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับ (Interruption Cost) ต่อครั้ง ในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง คือ 147,500 บาทต่อครั้ง ในปี พ.ศ. 2544 และเมื่อเทียบอัตราความเสียหาย เนื่องจากไฟฟ้าดับต่อครั้งเป็นปี พ.ศ.2557 คือ 365,957.36 บาทต่อครั้งโดยใช้อัตราลดค่า (Discount Rate) 7.24 % อัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับทั้งหมดสามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตราความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับต่อครั้งกับอัตรการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ และทำการคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิตลอดโครงการ 25 ปี และจากการคำนวณจะให้ความน่าจะเป็นที่จะเกิดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าทั้งสองรูปคลื่นเป็น 50 % ทั้งคู่ จึงได้ผลดังตาราง 4.26 ซึ่งพบว่า กรณี 3 จะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิตลอดโครงการ 25 ปีต่ำสุดนั่นหมายความว่า จะมีมูลค่าความเสียหายเนื่องจากไฟฟ้าดับรวมกับเงินที่ลงทุนเพื่อปรับปรุงตลอดโครงการต่ำสุด ซึ่งก็จะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ เครื่องมือตรวจวัดรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า ควรทำการติดตั้งที่สถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย เพื่อให้ได้รูปคลื่นที่ใกล้เคียงความจริง และสามารถนำไปใช้ในการคำนวณได้ถูกต้อง ซึ่งจะนำไปสู่การตัดสินใจที่ดีที่สุดรายละเอียดแสดงดังตาราง 4.26 ซึ่งปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวงยังไม่มีเครื่องมือตรวจวัดคุณลักษณะรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าในพื้นที่ได้ ดังนั้นจึงต้องอาศัยข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตและกรมอุตุนิยมวิทยา [27]

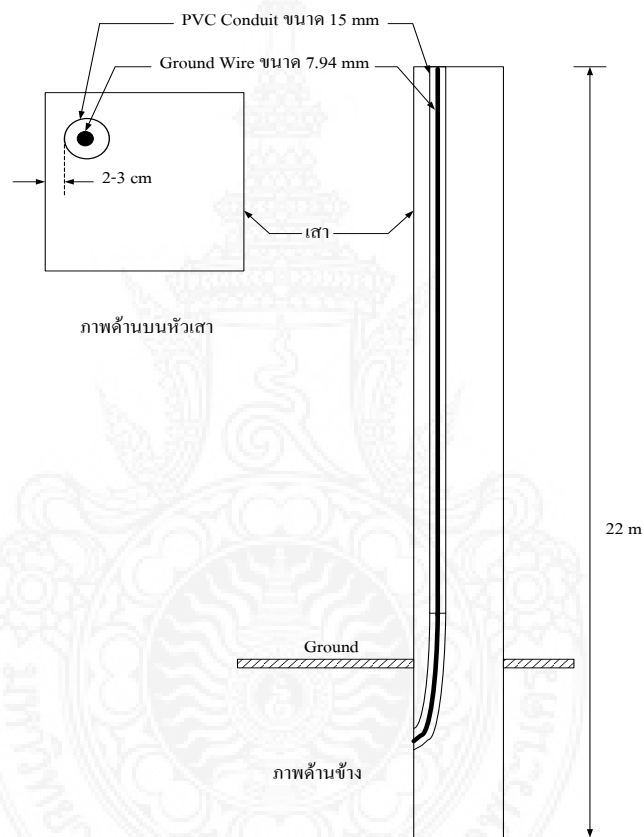
ตาราง 4.26 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (ล้านบาท/100 วงจร-กม.)

กรณี	รูปคลื่น (μ s)		NPV ทั้งหมดที่คาดหวังไว้
	0.25/100	10/350	
1	197.16	35.89	116.53
2	197.58	13.74	105.66
3	197.53	13.41	<u>105.47</u>
4	199.15	14.95	107.05
5	198.76	13	105.88

4.4.3 การประยุกต์ใช้

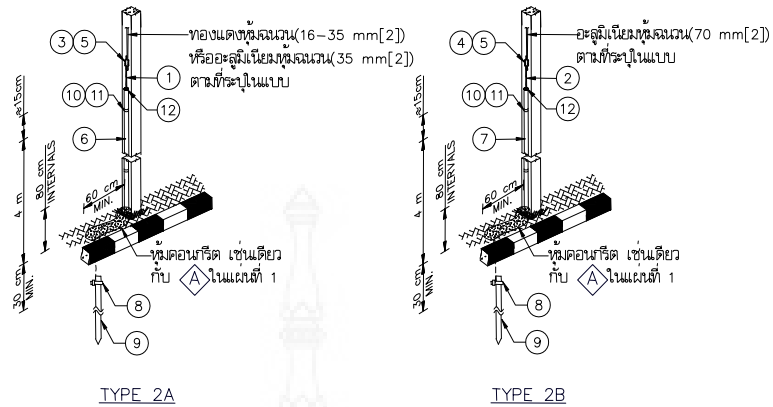
สำหรับการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มอีกหนึ่งเส้นนั้น เป็นการติดตั้งสายแนบเสาซึ่ง การติดตั้งดังกล่าว อาจจะไม่เกิดความไม่ปลอดภัยต่อสายดินดังกล่าวได้ เนื่องจากปัจจุบันนี้สายไฟ ของการไฟฟ้านครหลวงมักถูกขโมย ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวขึ้นอีก จึง มีแนวทางการป้องกันโดยการฝังท่อ PVC ตลอดแนวเสา ตั้งแต่หัวเสาไปจนถึงโคนเสา แล้วให้ ท่อ PVC โค้งออกด้านข้างเสา แล้วทำการร้อยสายดินดังกล่าวตามแนวท่อ โดยขนาด เส้นผ่าน ศูนย์กลาง 7.93 มิลลิเมตร ส่วนท่อ PVC ที่มีใช้ในการไฟฟ้านครหลวง จะมีหลายขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางคือ 3/8 นิ้ว (15 มิลลิเมตร) 1/2 นิ้ว (18 มิลลิเมตร) 3/4 นิ้ว (20 มิลลิเมตร) 1 นิ้ว (15 มิลลิเมตร) ซึ่งเมื่อพิจารณาขนาดท่อที่มีขนาดเล็กที่สุดคือ 15 มิลลิเมตร พบว่า พื้นที่หน้าตัด ของสายมีสัดส่วน ประมาณ 30% ของพื้นที่หน้าตัดของท่อ PVC และหลังจากนั้นก็เดินสายดินที่เพิ่มดังกล่าวใน ท่อ PVC โดยที่สายดินเดิมที่ฝังอยู่ในเสายังคงฝังอยู่ในเนื้อคอนกรีต ซึ่งก็ทำให้สายมีการป้องกันที่ แข็งแรง แต่เมื่อทำการเดินสายดินเพิ่มในท่อที่ฝังในเสาแล้ว สายดินเดิมอาจไม่จำเป็นต้องใช้แล้ว ซึ่งก็เป็นการลดต้นทุน แทนที่จะต้องเดินสายดินเป็น 2 เส้น ส่วนการที่จะเดินสายดินไว้ในท่อตั้งแต่ เริ่มผลิตเสาเลยหรือไม่นั้น ต้องพิจารณาความเหมาะสมอีกครั้ง แต่ การเดินท่อ PVC ฝังในเสานั้น ต้องพิจารณาเรื่องความแข็งแรงของเสาด้วย เพื่อให้ไม่ทำให้กำลังของเสาเสียไป แต่จากการพิจารณา ของฝ่ายธุรกิจขนส่งและผลิตภัณฑ์ พบว่า สามารถทำได้โดยไม่ส่งผล ต่อกำลังของเสา แต่ตำแหน่ง การเดินท่อ PVC อยู่ในตำแหน่งบริเวณของ เสาจะต้องไม่ให้ขวางตำแหน่งรูของเสา เพื่อใช้สำหรับให้ ผู้ปฏิบัติงานทำงานบนเสาไฟฟ้าส่วนค่าใช้จ่ายในการลงทุนต้องพิจารณาของเดิมที่ไม่มีท่อ PVC ฝัง กับของใหม่ที่มีท่อ PVC ฝัง ว่าเพิ่มขึ้นต่อต้นเท่าไรเพื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมสำหรับรูปแบบ การติดตั้งท่อ PVC โดยการฝังในเสาคอนกรีตในเบื้องต้นนั้น แสดงดังภาพ 4.16 ส่วนเสาสาย จำหน่ายนั้น ในปัจจุบันนั้นสายดินไม่ได้ฝังอยู่ในเสา แต่อยู่นอกเสาและเป็นสายทองแดง และ

ขณะนี้ได้มีการแก้ปัญหาสายถูกขโมย โดยการใส่สายลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี ดีเกลือขนาด 7.93 มิลลิเมตร ยาวประมาณ 4 เมตร เดินในท่อ PVC นอกเสา โดยมีความสูงของท่อจากพื้นดิน ประมาณ 4 เมตรขึ้นไป ต่อเชื่อมกับสายทองแดงเดิมก็ทำให้สามารถป้องกันสายถูกขโมยได้ ซึ่งปัจจุบันนี้งานมาตรฐานไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงก็ได้จัดทำมาตรฐานของสายจำหน่าย เพื่อป้องกันสายดินถูกขโมยไว้หลายรูปแบบ แล้วแต่ความเหมาะสมในการใช้งาน ในที่นี้จะแสดง Type 2 ซึ่งเป็นกรณีที่ใช้สายกราวด์แบบผสม โดยมีทั้งส่วนที่หุ้มฉนวนและสายเปลือย ดังแสดงภาพ 4.17



ภาพ 4.16 แบบการติดตั้งท่อ PVC ฝังในเสาไฟฟ้าคอนกรีตของเสาสายส่งย่อย

TYPE 2 กรณีใช้สายกราวด์แบบผสม (หุ้มฉนวน + เปลือย)



BILL OF MATERIAL				
ITEM NO.	CODE NO.	REQ'D		DESCRIPTION
		TYPE 2A	TYPE 2B	
1	4010-303-30000	≈ 5.1 m		GUY WIRE, GALV. STEEL $\phi 3/8"$
2	4010-303-40000			GUY WIRE, GALV. STEEL $\phi 1/2"$
3	6145-074-14300	1	1	CONNECTOR, COMPRESSION TYPE (H-FRAME) 35-70 mm[2] RUN 16-35 mm[2] TAP
4	6145-074-15400	1	1	CONNECTOR, COMPRESSION TYPE (H-FRAME) 120 mm[2] RUN 70 mm[2] TAP
5	6145-101-44100	2	2	AIRSEAL COMPOUND 4" x 4" x 1/8"
6	4710-500-04000	1	-	CONDUIT, PVC 15 mm(3/8") x 4 m
7	4710-500-05000	-	1	CONDUIT, PVC 18 mm(1/2") x 4 m
8	6145-095-50000	1	1	U-CLAMP FOR 5/8" GROUND ROD
9	5615-033-50200	1	1	GROUND ROD, GALV. STEEL $\phi 16$ mm x 2.4 m
10	6145-216-00200	SEE TABLE 1 ON SH.NO.2		TIE WIRE, SOLID AL. NO.6 AWG (SEE DETAIL "C" ON SH.NO.1)
11	5625-664-26500	4	4	WOODEN PLUG 2 x 3/4" - 13/16"
12	5970-312-23000	≈ 15 cm	≈ 15 cm	CORK TAPE, 2" x 30 ft.

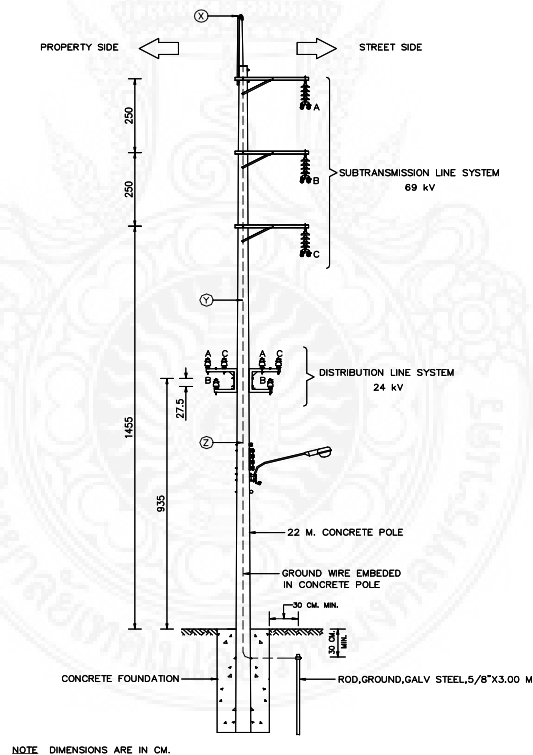
ภาพ 4.17 การติดตั้งท่อ PVC สำหรับเสาสายจำหน่ายเพื่อป้องกันสายดิน

4.4.4 สรุป

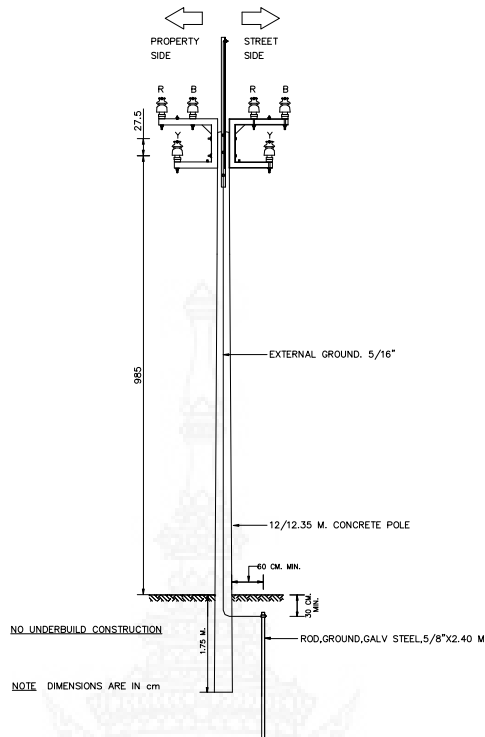
ผลของการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มในระบบสายส่งย่อย 69 kV และ ระบบสายจำหน่าย 24 kV ซึ่งติดตั้งอยู่บนเสาดันเดียวกัน การสร้างแบบจำลองและจำลองของระบบที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันและระบบที่ทำการปรับปรุง โดยการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่ม โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ผลการจำลอง พบว่า สามารถใช้ปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าได้ ทำให้แรงดันหัวเสาลดลง กระแสวิกฤตมีค่าสูงขึ้น และทำให้อัตรากារวาบไฟตามผิวย้อนกลับมีค่าลดลง โดยเฉพาะถ้ารูปคลื่นกระแสฟ้าผ่ามีช่วงเวลาของหน้าคลื่นนาน การวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุน ทำให้ทราบว่ารูปแบบการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มรูปแบบใดเหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงมาตรฐานด้านระบบการต่อลงดินในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวงต่อไป

4.5 การประเมินอัตราการวางไฟตามผิวทั้งหมดเนื่องจากมุมป้องกันล้มเหลว

การวางไฟตามผิวเนื่องจากมุมป้องกันล้มเหลว มีสาเหตุมาจากฟ้าผ่าลงระบบสายเฟสของสายส่งย่อย ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดไฟฟ้าดับในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง โดยรูปแบบของการจัดเรียงตัวของสายล่อฟ้า รวมทั้งค่าต่าง ๆ ที่จะนำไปคำนวณสมรรถนะของระบบส่ง จะใช้โปรแกรม ATP-EMTP สำหรับดัชนีชี้วัดสมรรถนะของระบบป้องกันฟ้าผ่า จะอธิบายอยู่ในเทอมของอัตรามุมป้องกันล้มเหลว อัตราการวางไฟตามผิวย้อนกลับ และอัตราการวางไฟตามผิวทั้งหมด การศึกษาจะทำการศึกษาระบบสายส่ง 69 kV ที่มีต่อจำนวนวงจรของ 24 kV ที่ติดตั้งอยู่ได้ 69 kV โดยผลของการศึกษาพบว่า อัตราการวางไฟตามผิวทั้งหมด ถูกทำให้ลดลงได้โดยการติดตั้งสายล่อฟ้า เพื่อป้องกันมุมล้มเหลว ดังนั้นรูปแบบการจัดเรียงตัวของสายล่อฟ้าของสายส่งและสายจำหน่าย จะสามารถช่วยลดอัตราการล้มเหลวของสายส่ง สำหรับการติดตั้งสายส่งย่อยและสายจำหน่ายในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง



ภาพ 4.18 รูปแบบการติดตั้งระบบสายส่งย่อย 69 kV และ 24 kV บนต้นเดียวกัน



ภาพ 4.19 รูปแบบการติดตั้งระบบสายจำหน่าย 24 kV ด้วย Space Aerial Cable (SAC)

Space Aerial Cable (ASC หรือ SAC) เป็นตัวนำอลูมิเนียมเคลือบด้วย XLPE หุ้ม และมีเปลือก (Sheath) ที่ทำจาก XLPE หุ้มชั้นนอกอีกชั้นหนึ่ง แต่ไม่สามารถสัมผัสโดยตรง การเดินสายต้องใช้ Spacer เพื่อจำกัดระยะห่างสาย ต้องใช้ Messenger Wire ช่วยดึงสายและเป็น Over Head Ground Wire

สำหรับรูปแบบที่ใช้ในการศึกษาจะใช้รูปคลื่น 10/350 μ s โดยมีขนาดกระแสฟ้าผ่า ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน 34.4 kA สำหรับค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่ใช้คือ 5 โอห์ม ซึ่งมีกรณีที่น่าสนใจทั้งหมด 7 กรณีดังนี้

กรณี 1 เป็นรูปแบบการติดตั้งที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยมีระบบสายส่ง 69 kV มีอยู่เพียง 1 วงจร แสดงดังภาพ 4.9 โดยไม่คิดคำนวณการติดตั้งระบบ 24 kV อยู่ข้างใต้

กรณี 2 เป็นรูปแบบการติดตั้งที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยมีคิดคำนวณระบบสายจำหน่าย 24 kV อยู่เพียง 1 วงจร แสดงดังภาพ 4.19

กรณี 3 เป็นรูปแบบการติดตั้งที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน โดยมีระบบสายส่ง 69 kV จำนวน 1 วงจรและระบบสายจำหน่าย 24 kV จำนวน 2 วงจร แสดงดังภาพ 4.9

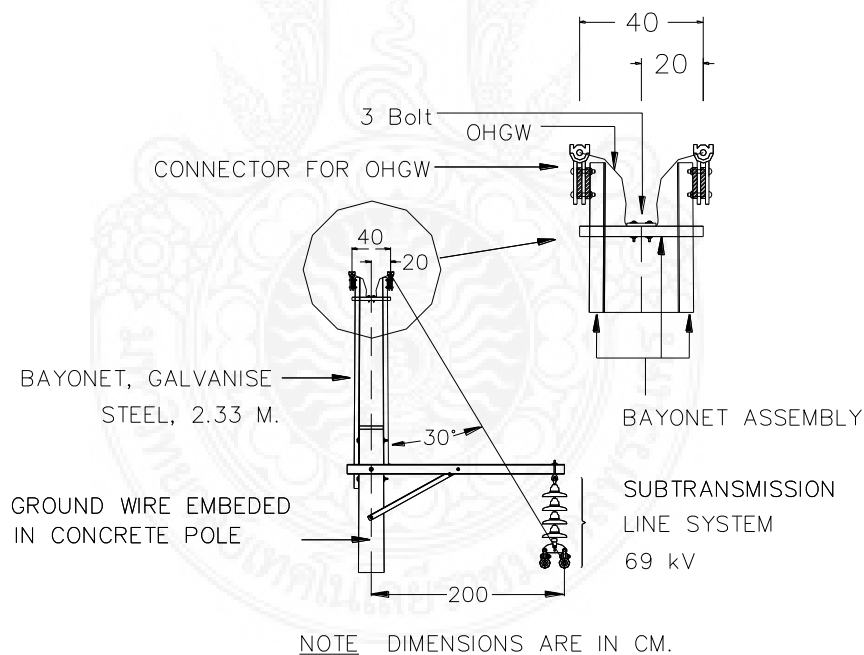
กรณี 4 เป็นรูปแบบการติดตั้งในกรณี 3 ซึ่งใช้งานอยู่ในปัจจุบันแต่มีการติดตั้งสายล่อฟ้าเพิ่มอีก 1 เส้นที่ตำแหน่งในภาพ 4.9

กรณี 5 เป็นรูปแบบการติดตั้งในกรณี 3 แต่มีการติดตั้งสายล่อฟ้าเพิ่มอีก 1 เส้นที่ตำแหน่ง Y จุดนี้เป็นการติดตั้งสายล่อฟ้าเพิ่มที่อยู่ระหว่างครอสอาร์ม เฟส C ของระบบสายส่ง 69 kV และส่วนบนของครอสอาร์มระบบสายจำหน่าย 24 kV ในภาพ 4.18

กรณี 6 เป็นรูปแบบการติดตั้งในกรณี 3 ซึ่งใช้งานอยู่ในปัจจุบันแต่มีการติดตั้งสายล่อฟ้าเพิ่มอีก 1 เส้นที่ตำแหน่ง Z จุดนี้เป็นการติดตั้งสายล่อฟ้าเพิ่มอีก 1 เส้นซึ่งอยู่ระหว่างส่วนล่างระบบสายจำหน่าย 24 kV และดิน ในภาพ 4.18

กรณี 7 เป็นรูปแบบการติดตั้งในกรณี 3 แต่มีการติดตั้งสายล่อฟ้าเพิ่มอีก 1 เส้นซึ่งการติดตั้งควบสายตัวนำ เป็น 2 เส้นนี้จะอยู่ห่างกัน 40 เซนติเมตรและมีมุมป้องกันของสายเฟส 30 องศา แสดงดังภาพ 4.20

จากนั้นทำการหาค่ากระแสสวิกฤตของพวงลู่ถ้วย เมื่อเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ แสดงดังตาราง 4.29 เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ซึ่งเป็นค่าที่เป็นส่วนหนึ่งของอัตราการวาบไฟทั้งหมด



ภาพ 4.20 รูปแบบการ การคู่ควบสายล่อฟ้าด้วยขนาดมุมป้องกัน 30°

ตาราง 4.27 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

รายละเอียด	ค่า	แบบจำลอง
1. Lightning Current		
- Amplitude (kA)	34.4	Ramp
- Front Time/Tail Time (μs) [24], [25]	10/350	
2. OHGW		
- Diameter (mm)	7.94	
- DC Resistance (Ω)	3.60	
3. Phase Conductor of 69 kV		
- Diameter (mm)	25.65	
- DC Resistance (Ω)	0.0778	
4. Phase Conductor of 24 kV		J. Marti
- Diameter (mm)	15.35	
- DC Resistance (Ω)	0.164	
5. Frequency for Line Modeling		
- Transmission Line	937,500	
- Distribution Line	187,5000	
6. Pole of 69 kV		
- Height (m)	20	
- Span (m)	80	
- Surge Impedance (Ω)	451.4	
- Wave Velocity ($\text{m}/\mu\text{s}$) [18], [26]	123	
7. Pole of 24 kV		Distributed Parameter
- Diameter (mm)	10.25	
- Length (m)	40	
- Surge Impedance (Ω)	378.25	
- Wave Velocity ($\text{m}/\mu\text{s}$) [18], [26]	300	

8. Ground Rod of 69 kV

- Diameter (mm)	16
- Length (m)	3
- Impulse Resistance (Ω)	5

9. Ground Rod of 24 kV

- Diameter (mm)	16
- Length (m)	2.4
- Impulse Resistance (Ω)	5

ตาราง 4.28 กระแสวิกฤต (kA) ของรูปคลื่น 10/350 μ s สำหรับคำนวณ BFOR

กรณี	กระแสวิกฤต (kA)	
	69 kV	24 kV
1	60.20	-
2	-	78.50
3	62.60	45.90
4	65.60	46.60
5	70.00	29.10
6	66.60	31.60
9	77.40	55.50

สำหรับการหาอัตราการล้มเหลวของมุมป้องกัน ก็จะต้องใช้ข้อมูลกระแสฟ้าผ่าวิกฤต ที่ทำให้เกิดมุมป้องกันล้มเหลว และข้อมูลขนาดกระแสฟ้าผ่าที่ผ่าลงสายเฟส ซึ่งจะได้ผลดังตาราง 4.28 ซึ่งเป็นค่าที่เป็นส่วนหนึ่งของอัตราการวาบไฟทั้งหมด

ตาราง 4.29 กระแสฟิวท์ (kA) ของรูปคลื่น 10/350 μ s สำหรับคำนวณ SFOR

Case	I_p (kA)		Critical current (kA)	
	69 kV	24 kV	69 kV	24 kV
1	14.82	-	20.70	-
2	-	47.97	-	9.25
3	14.82	14.82	20.70	87.50
4	14.82	14.82	24.40	55.90
5	14.82	14.82	28.20	77.40
6	14.82	14.82	21.80	73.70
9	12.94	12.94	24.90	32.00

กระแสฟิวท์ที่ปรากฏในแต่ละกรณีที่ได้จากตาราง 4.28 จะนำไปใช้ในการคำนวณอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ซึ่งจากผลการศึกษาค้นคว้า ค่ากระแสฟิวท์ในกรณีที่ 3 ถึง 7 มีค่ามากกว่ากรณีที่ 1 ซึ่งเป็นวงจรที่มีใช้งานอยู่จริง แต่ไม่มีระบบสายจำหน่าย 24 kV ติดตั้งอยู่ข้างใต้ โดยในกรณีที่ 4, 5, 6 และ 7 นั้น เนื่องมาจากมีการขนานสายล่อฟ้าเข้าไปกับสายล่อฟ้าเดิมส่วนกรณีที่ 3 เนื่องมาจากแรงดันคู่ควบ (Voltage Coupling) ระหว่างระบบสายจำหน่าย 24 kV กับตัวนำระบบสายส่ง 69 kV ซึ่งจากเหตุผลนี้ จึงทำให้แรงดันที่หัวเสาและแรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วยมีค่าลดลง สำหรับในกรณีที่ 2 เป็นกรณีเดียว ที่มีระบบสายจำหน่าย 24 kV ติดตั้งอยู่เพียง 1 วงจรเท่านั้น โดยติดตั้งอยู่บนเสา 12 เมตร และมีการติดตั้งสายต่อลงดินนอกเสาไว้ ไม่ได้ฝังอยู่ในเสาเหมือนระบบสายส่ง 69 kV จึงทำให้คลื่นสะท้อนจากระบบสายดิน ผ่านตัวนำสายดินนอกเสา คือ ทั้งเดินทางจากสายล่อฟ้าลงสายดินและจากรากสายดินมายังสายล่อฟ้าทำเพื่อลดทอนขนาดแรงดันที่หัวเสาให้มีค่าลดลง

สำหรับค่ากระแสฟิวท์ในแต่ละกรณีที่แสดงในตาราง 4.29 นั้น จะใช้สำหรับคำนวณอัตราการวาบไฟ เนื่องจากมุมป้องกันล้มเหลว เมื่อฟ้าผ่าลงตัวนำของสายเฟสจะทำให้เกิดแรงดันคู่ควบระหว่างตัวนำสายเฟสและสายล่อฟ้า ซึ่งแรงดันคู่ควบนี้จะช่วยลดแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยและเป็นผลทำให้ค่ากระแสฟิวท์ที่ระบบสายส่งย่อย 69 kV มีค่าเพิ่มขึ้นในกรณีที่ 3 ถึง 7 ก็เนื่องมาจากเหตุผลดังที่กล่าวมาข้างต้น และสำหรับระบบสายจำหน่าย 24 kV นั้น ค่ากระแสฟิวท์ที่ปรากฏมีค่าเพิ่มขึ้น ในกรณีที่ 3 ถึง 7 ก็เนื่องมาจากสาเหตุโดยการติดตั้งสายล่อฟ้าเพิ่มและการติดตั้งสายจำหน่ายเพิ่มจำนวนวงจร

การคำนวณค่าของ BFOR, SFFOR และ TFOR สำหรับแต่ละกรณี แสดงดังตาราง 4.30 สำหรับค่า TFOR ในกรณีที่ 3 ถึง 7 จะมีค่าน้อยกว่ากรณีที่ 1 และ 2 รวมกัน ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการติดตั้งสายล่อฟ้าและการเพิ่มจำนวนวงจรของสายจำหน่าย 24 kV ในกรณีที่ 7 มีค่า TFOR ต่ำสุด เมื่อรวม 2 ระดับแรงดันเข้าด้วยกันและเมื่อทำการเปรียบเทียบกรณีที่ 3 และ 7 พบว่ากรณีที่ 7 นั้นทำให้มีความน่าเชื่อถือระบบไฟฟ้าดีขึ้น แต่ถึงแม้ว่ากรณีที่ 7 นั้น ความน่าเชื่อถือ ของระบบไฟฟ้าจะดีขึ้นและน่าจะนำมาใช้ในพื้นที่ที่มีการใช้พลังงานไฟฟ้าค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามระยะเวลาความปลอดภัยสำหรับการบำรุงรักษาและการปฏิบัติงานเป็นเรื่องที่ต้องพิจารณาซึ่งเกี่ยวข้องกับจำนวนวงจรของสายจำหน่าย 24 kV ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ต้องพิจารณา จากค่า TFOR BFOR และ SFFOR พบว่า BFOR เป็นค่าที่สำคัญที่มีผลต่อไฟฟ้าดับมากกว่า SFFOR

ตาราง 4.30 BFOR, SFFOR และ TFOR ของแต่ละกรณี (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)

กรณี	แรงดัน (kV)	BFOR	SFFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)	TFOR	TFOR
1	69	9.12	3.90	13.02	49.14
2	24	5.19	30.92	36.12	
3	69	8.42	3.90	12.33	27.84
	24	15.07	0.44	15.51	
4	69	7.65	3.51	11.16	26.99
	24	14.69	1.15	15.83	
5	69	6.67	3.11	9.78	38.13
	24	27.77	0.58	28.36	
6	69	7.41	3.79	11.20	37.31
	24	25.46	0.65	26.11	
7	69	5.36	2.54	7.90	20.62
	24	10.70	2.02	12.71	

4.5.1 ประโยชน์ที่จะนำมาใช้

มีหลายแนวทางที่นำเสนอวิธีการแล้วสามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติ ในกรณีระบบของการไฟฟ้านครหลวงได้ คือ 1) ตัวอย่างเช่นระบบสายส่ง 69 kV และระบบสายจำหน่าย 24 kV ที่ติดตั้งอยู่บนเสาต้นเดียวกัน ถึงแม้ว่าจะประหยัดในการลงทุนบักเสาพาดสายก็จริงแต่ค่าของ TFOR ก็มีค่าสูงซึ่งแน่นอนเลยว่าจะส่งผลให้ผู้ที่ใช้ไฟมีอัตราความสูญเสียเนื่องจากไฟฟ้าดับมากซึ่งจะต้องพิจารณาให้ดี ในกรณีที่พื้นที่นั้นมีอัตราความสูญเสียเนื่องจากไฟฟ้าดับมาก 2) ในพื้นที่ที่มีจำนวนฟ้าผ่าลงระบบส่งบ่อยครั้ง ก็ควรจะต้องทำการติดตั้งเพิ่มสายล่อฟ้าอีก 1 เส้นโดยให้มีมุมป้องกันฟ้าผ่า 30° เพื่อจะได้ลดค่า TFOR ของระบบสายส่ง 69 kV และระบบสายจำหน่าย 24 kV สำหรับการศึกษานี้ในกรณีที่ 7 ค่าเฉลี่ยของ TFOR จะมีค่าลดลงเนื่องมาจาก SFFOR มีค่าลดลงไป 34.82 % (ลดจาก 3.90 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี เป็น 2.54 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ทำยสุดค่าความต้านทานของรากสายดินที่ฐานเสาที่จะไปหักล้างแรงดันที่หัวเสาที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยวนำฟ้าผ่าการสำรวจและการรวบรวมข้อมูลที่ดีของความต้านทานจำเพาะดินในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวงนั้น เป็นหน้าที่ที่สำคัญสำหรับการปรับปรุงระบบไฟฟ้า เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือในระบบสายส่งและสายจำหน่าย

การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า ขึ้นอยู่กับจำนวนปัจจัย เช่น ความต้านทานดิน เสรีจิมพีแดนซ์ของเสาและสาย การจัดเรียงตัวนำของสายส่งและสายจำหน่าย รวมทั้งสายล่อฟ้า รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า สภาวะแวดล้อม ของระบบสายส่งและสายจำหน่าย จำนวนวันฝนฟ้าคะนองในพื้นที่ และถ้าปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ถูกพิจารณาในวิธีที่นำเสนออีกจะทำให้การประมาณค่า TFOR มีค่าใกล้เคียงความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

4.5.2 สรุป

การเกิดฟ้าผ่าโดยตรงหรือข้างเคียงบนสายล่อฟ้าหรือการเกิดฟ้าผ่า อาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดไฟฟ้าดับเป็นบริเวณกว้าง และทำความเสียหายให้อุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบส่งจ่ายไฟฟ้า เช่น ผลของการเกิดการวาบไฟตามผิว ซึ่งเป็นสาเหตุของพลังงานที่มีค่าสูงของลำฟ้าผ่า ในงานวิจัยนี้ จะทำการวิเคราะห์ดัชนีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบที่ใช้จริง 69 kV และ 24 kV ที่ติดตั้งอยู่บนเสาต้นเดียวกัน การคำนวณดัชนีประกอบไปด้วย BFOR, SFFOR และ TFOR โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP การวิเคราะห์จะมีทั้งการขยายจากระบบเดิม ผลของการเพิ่มจำนวนวงจรระบบสายจำหน่าย 24 kV และการติดตั้งเพิ่มของสายล่อฟ้าที่ตำแหน่งต่างๆ อาจจะเป็นหรือล่างระบบสายจำหน่าย 24 kV บนระบบสายส่ง 69 kV ซึ่งจะสังเกตได้จากกรณีการเพิ่มวงจรสายจำหน่าย 24 kV หรือสายล่อฟ้าในตำแหน่งที่ใกล้กับสายล่อฟ้าเส้นเดิม ภายใต้เงื่อนไขมุมป้องกัน 30 องศา จึงจะพอใจในการปรับปรุงความน่าเชื่อถือได้ของระบบป้องกันฟ้าผ่า การจัดรูปแบบการเรียงตัวของตัวนำ

สายล่อฟ้าและสายเฟส ต้องมีความเหมาะสมในด้านการลงทุน สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ต้องตัดสินใจในการลงทุน และความต้องการในด้านความเชื่อถือได้ในระบบไฟฟ้ากำลัง

4.6 การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย 24 kV ของ กฟน.

บทความวิจัยนี้นำเสนอผลการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย 24 kV โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP สร้างแบบจำลองของระบบการไฟฟ้านครหลวงเพื่อทดสอบ ในการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า เป็นกรณีฟ้าผ่าลงที่หัวเสาซึ่งจากการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า พบว่าค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ค่ายอดของกระแสฟ้าผ่าจะมีผลต่อค่าค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับโดยเมื่อค่าความต้านทานอิมพัลส์ ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า และรูปคลื่นมีความชันมากก็จะส่งผลให้ระบบรองรับค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตมีค่าน้อยแต่ค่าของ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับมีค่ามาก

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ เกิดจากการถ่ายเทประจุไฟฟ้าจำนวนมากระหว่างวัตถุที่มีประจุฟ้าผ่าฟ้าผ่าอาจจะเกิดขึ้นระหว่างก้อนเมฆกับอากาศ หรือระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก ซึ่งการเกิดฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกนั้น ถือได้ว่าสร้างความเสียหายทั้งต่อมนุษย์ ระบบไฟฟ้า สิ่งมีชีวิต และอื่น ๆ การเกิดฟ้าผ่าในแต่ละครั้งความแรงของกระแสฟ้าผ่าก็มีผลกับระบบไฟฟ้า ถ้ามากเกินไปค่าความคงทนของฉนวนลูกถ้วยนั้น ก็อาจเกิดการวาบไฟย้อนกลับเข้าสู่ระบบทำให้เกิดความเสียหายขึ้น ในการประเมินสมรรถนะฟ้าผ่านั้นมีประโยชน์อย่างมาก ยิ่งถ้ามีข้อมูลฟ้าผ่าที่สะสมไว้เป็นเวลานาน สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาค่าทางสถิติ ที่มีประโยชน์ในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าของพื้นที่ที่เฉพาะเจาะจงได้

4.6.1 รูปแบบการเกิดฟ้าผ่า

ลักษณะการเกิดฟ้าผ่าสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 กรณี โดยจะขึ้นอยู่กับแต่ละตำแหน่งที่เกิดฟ้าผ่า [5], [7], [23]

1. ฟ้าผ่าโดยตรงไปที่สายจำหน่าย หากแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ฉนวนมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤตที่จะเกิดการวาบไฟตามผิวฉนวน (Critical Flashover Voltage หรือ CFO) จะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวเกิดขึ้นที่ฉนวน (Flashover) โดยในกรณีนี้เกิดจากการป้องกันที่ล้มเหลว หรือเรียกได้ว่า การวาบไฟตามผิวฉนวนเนื่องจากการป้องกันที่ล้มเหลว

2. ฟ้าผ่าโดยตรงไปที่สายดินเหนือศีรษะ และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายเฟส (Overhead Ground Wire หรือ OHGW) เป็นการผ่าลงสายดิน จะทำให้มีคลื่นวิ่งจากหัวเสาด้านเส้นทางตัวนำในเสาสูงสู่พื้นดิน โดยคลื่นกระแสฟ้าผ่าจะมองโครงสร้างเสาเป็นเสิร์จจิมพีแดนซ์ค่าหนึ่ง และถ้ารากสายดินมีค่าความต้านทานรากสายดินสูงกว่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ของเสาจะทำให้เกิด

คลื่นสะท้อนกลับเป็นบวก เพราะความต้านทานรากสายดินสูง และเกิดคลื่นสะท้อนกลับเป็นลบได้ หากมีค่าต่ำกว่าเสิร์จจิมพีแดนซ์ของเสา จะมีการรวมกันของคลื่นสะท้อนมารวมกัน ทำให้โครงสร้างเสามีแรงดันสูงขึ้นมากจนเลยค่า CFO เกิดความไวไฟตามผิวเรียกว่าไฟตามผิวย้อนกลับ (Backflash Over)

3. ฟาผ่าไปยังจุดใกล้เคียงระบบจำหน่าย หรือบนพื้นดินในกรณีนี้จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่สายเฟส โดยที่หากค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้มีค่าเกินกว่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤตที่จะเกิดวาวไฟตามผิวของฉนวน การวาวไฟตามผิวก็จะเกิดขึ้นที่ฉนวนแรงดันไฟฟ้าเกินจากกรณีนี้สามารถพบได้บ่อยกว่า 2 กรณีที่กล่าวไว้ข้างต้น

4.6.2 แรงดันไฟฟ้าเกินเนื่องจากฟาผ่า [5], [7]

แรงดันไฟฟ้าเกินในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า เกิดขึ้นจากสาเหตุใหญ่ 2 ประการ คือ เนื่องจากฟาผ่า และเนื่องจากสวิตชิง

กรณีฟาผ่าโดยตรงลงสายเฟส จะทำให้เกิดแรงดันเกินมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การเกิดฟาผ่ากรณีอื่นๆ แต่สามารถป้องกันได้ โดยการติดตั้งสายดินเหนือสายเฟส เพื่อให้ฟาผ่าลงสายดิน จึงทำให้เกิดฟาผ่าลงสายดินแทน ซึ่งถ้าไม่พิจารณากรณีโดยตรงลงสายเฟสแล้ว กรณีที่ทำให้เกิดแรงดันเกินในสายเฟสรุนแรงที่สุด คือ กรณีฟาผ่าลงสายดิน และทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายเฟส ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะแรงดันเกินที่จะเกิดขึ้นในสายเฟสเนื่องจากฟาผ่าลงสาย [5], [7]

สำหรับระบบ 24 kV ที่จะใช้ในการศึกษาจะมีรูปแบบการติดตั้งระบบสายจำหน่าย 24 kV ด้วย Space Aerial Cable (SAC หรือ ASC) (การไฟฟ้านครหลวงนิยมเรียก ASC ซึ่งเป็นสายชนิดเดียวกัน กับ SAC) ดังแสดงในภาพ 4.19

เมื่อเกิดฟาผ่าลงสายดิน จะทำให้เกิดแรงดันในสายดิน และเกิดเหนี่ยวนำในสายเฟส ซึ่งจะมีค่าประมาณ 20-30% ของแรงดันเกินในสายดิน แรงดันในสายดินสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2) ถึง (2.5)

4.6.3 ดัชนีสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่า

สถิติจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของประเทศไทยเฉลี่ยในพื้นที่ของจังหวัดกรุงเทพมหานคร ช่วงปี 2546-2555 แสดงดังตาราง 4.1 ซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ เท่ากับ 122 วันซึ่งเป็นค่าสูงที่สุดโดยค่าดังกล่าวจะนำไปใช้คำนวณค่าของความหนาแน่นของจำนวนลัมฟ้าผ่าลงสู่ดิน Ng (Ground Flash Density GFD)

ตาราง 4.31 สถิติจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของประเทศไทยเฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2546-2555

ตำแหน่ง	จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี	ความหนาแน่นของจำนวนลัมฟ้าผ่าลงสู่ดิน (ครั้งต่อตารางกิโลเมตรต่อปี)
ท่าเรือคลองเตย (2550)	69	2.64
ศูนย์ประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ (2549)	88	3.58
สนามบินดอนเมือง (2553)	99	4.15
บางนา (2551-2552)	122	5.39

4.6.4 ดัชนีสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่า

ทำการศึกษาผลของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าที่ค่าต่าง ๆ ต่อแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย ดังแสดงตาราง 4.33 – 4.37 $R_f (\Omega)$ คือความต้านทานดินอิมพัลส์

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดินที่หัวเสาไฟฟ้าคอนกรีต กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะกระจายลงสู่ดิน และอีกส่วนหนึ่งจะไหลไปตามสายล่อฟ้าไปยังเสาข้างเคียงในลักษณะของคลื่น และเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งทำให้เกิดการหักล้าง หรือเสริมกันกับแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นบนยอดเสา ทำให้เกิดแรงดันในสายดิน และเกิดเหนี่ยวนำในสายเฟสซึ่งจะมีค่าประมาณ 20-30 % ของแรงดันเกินในสายดิน ทำให้มีแรงดันคร่อมพวงฉนวนลูกถ้วยเกิดขึ้นโดยแรงดันคร่อมฉนวนนี้ขึ้นอยู่กับแรงดันเกินในสายดิน ซึ่งมีผลมาจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา และค่ากระแสฟ้าผ่า

ถ้าแรงดันเกินในสายดินและแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในสายเฟสมีค่าแตกต่างกันมากกว่าค่าความคงทนของฉนวนลูกถ้วยจะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover) ของฉนวนลูกถ้วยและอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดไฟฟ้าดับต่อมาซึ่งในทางปฏิบัติแรงดันเกินที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความต้านทานดิน สำหรับสมการที่ใช้คำนวณหาค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ จะเป็นตามสมการที่ (2.11) และ (2.12)

ตาราง 4.32 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

รายละเอียด	ค่า	แบบจำลอง
1. Lightning Current		
- Amplitude (kA)	10, 20, 30, 34.4, 40, 50	Ramp
- Front Time/Tail Time (μs) [24],[25]	0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100, 10/350	
2. OHGW		
- Diameter (mm)	7.94	J. Marti
- DC Resistance (Ω)	4.5733	
3. Phase Conductor of 24 kV		
- Diameter (mm)	16.35	
- DC Resistance (Ω)	0.164	
4. Pole		
- Height (m)	10.25	
- Span (m)	40	
- Surge Impedance (Ω)	378.25	
- Wave Velocity (m/ μs) [18],[26]	300	
5. External Ground		
- Diameter (mm)	7.94	Distributed Parameter
- Length (m)	10.25	
- Surge Impedance (Ω)	378.25	
- Wave Velocity (m/ μs) [18],[26]	300	
6. Ground Rod		
- Diameter (mm)	16	
- Length (m)	2.4	
- Impulse Resistance (Ω)	5, 25, 50, 75, 100	

ตาราง 4.33 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ที่รูปคลื่น 0.25/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)					
	10	20	30	34.4	40	50
5	451	894	1,337	1,532	1,780	2,223
25	508	1,009	1,509	1,728	2,008	2,510
50	569	1,125	1,691	1,937	2,251	2,812
75	619	1,230	1,841	2,110	2,451	3,063
100	685	1,314	1,967	2,254	2,620	3,273

ตาราง 4.34 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ที่รูปคลื่น 1/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)					
	10	20	30	34.4	40	50
5	119	229	340	389	451	562
25	157	305	454	519	602	751
50	220	432	644	737	855	1,068
75	271	534	795	911	1,059	1,322
100	313	618	923	1058	1,229	1,534

ตาราง 4.35 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ที่รูปคลื่น 2/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)					
	10	20	30	34.4	40	50
5	66	124	183	208	241	299
25	114	220	326	373	432	538
50	160	311	461	529	614	764
75	195	382	568	651	754	942
100	225	442	657	753	875	1091

ตาราง 4.36 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ที่รูปคลื่น 4/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)					
	10	20	30	34.4	40	50
5	43	79	114	130	150	185
25	84	161	237	271	314	390
50	117	225	334	381	442	549
75	140	272	404	463	536	669
100	159	310	461	526	611	763

ตาราง 4.37 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) ที่รูปคลื่น 10/350 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)					
	10	20	30	34.4	40	50
5	29	51	72	81	93	114
25	56	105	153	175	202	251
50	75	142	208	238	274	342
57	86	164	242	276	319	397
100	93	178	262	300	347	431

ตาราง 4.38 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต (kA) รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μ s

R_i (Ω)	รูปคลื่น (μ s)				
	0.25/100	1/100	2/100	4/100	10/350
5	3.9	15.5	30	49.5	81
25	3.43	11.5	16.2	22.8	35.5
50	3.1	8.04	11.5	16	26
75	2.82	6.5	9.35	13	22.1
100	2.65	5.61	8	11.5	20.5

จากตาราง 4.37 - 4.38 พบว่าเมื่อค่ายอดของกระแสฟ้าผ่าหรือความต้านทานดินอิมพัลส์เพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ค่าของแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยและได้ทำการศึกษาค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต ที่ค่าความคงทนของฉนวนลูกถ้วยและอัตราการเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับ ดังแสดงตาราง 4.39 ถึง 4.42

ตาราง 4.39 อัตราการเกิดวาทไฟย้อนกลับ (ครั้ง/100วงจร-กม./ปี) ที่รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μs ใช้ Td เท่ากับ 69 วันต่อปี

$R_f (\Omega)$	รูปคลื่น (μs)				
	0.25/100	1/100	2/100	4/100	10/350
5	82.96	73.32	48.72	23.91	8.76
25	83.05	78.26	72.31	61.37	40.02
50	83.11	81.17	78.26	72.60	55.67
75	83.16	82.04	80.23	76.59	62.60
100	83.18	82.43	81.20	78.26	65.39

ตาราง 4.40 อัตราการเกิดวาทไฟย้อนกลับ (ครั้ง/100วงจร-กม./ปี) ที่รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μs ใช้ Td เท่ากับ 88 วันต่อปี

$R_f (\Omega)$	รูปคลื่น (μs)				
	0.25/100	1/100	2/100	4/100	10/350
5	112.43	99.38	66.02	32.41	11.88
25	112.57	106.06	98.00	83.17	54.24
50	112.64	110.01	106.06	98.40	75.45
75	112.70	111.19	108.73	103.81	84.85
100	112.73	111.72	110.05	106.06	88.62

ตาราง 4.41 อัตราการเกิดวาทไฟย้อนกลับ (ครั้ง/100วงจร-กม./ปี) ที่รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μs ใช้ Td เท่ากับ 99 วันต่อปี

$R_f (\Omega)$	รูปคลื่น (μs)				
	0.25/100	1/100	2/100	4/100	10/350
5	130.27	115.14	76.50	37.55	13.76
25	130.42	122.89	113.55	96.37	62.84
50	130.51	127.46	122.89	114.01	87.42
75	130.58	128.83	125.98	120.27	98.31
100	130.61	129.44	127.50	122.89	102.68

ตาราง 4.42 อัตราการเกิดวาบไฟย้อนกลับ (ครั้ง/100วงจร-กม./ปี) ที่รูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μ s ใช้ Td เท่ากับ 122 วันต่อปี

R _i (Ω)	รูปคลื่น (μ s)				
	0.25/100	1/100	2/100	4/100	10/350
5	169.14	149.49	99.32	48.76	17.87
25	169.34	159.56	147.43	125.12	81.59
50	169.46	165.50	159.56	148.03	113.50
75	169.54	167.27	163.57	156.16	127.64
100	169.59	168.06	165.55	159.56	133.32

ณวนลูกถ้วยสามารถจะทนได้ ของแต่ละค่าที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และรูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μ s โดยพบว่าเมื่อค่าช่วงเวลาน้ำคลื่นมีค่าน้อย ๆ หรือมีความชันมากก็จะทำให้สามารถรองรับค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตได้น้อยลง

จากตาราง 4.39 - 4.42 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ กรณีค่าเฉลี่ยวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตเกินค่า 180 kV ที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์และรูปคลื่นคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μ s โดยพบว่าเมื่อเวลาน้ำคลื่นมีค่าน้อยหรือมีความชันมากก็จะทำให้อัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับมีค่ามากเนื่องจากคลื่นสะท้อนจากโคนเสาไม่สามารถหักล้างแรงดันหัวเสาได้ทันจึงเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับเกิดขึ้น

4.6.5 สรุป

จากผลการศึกษาที่ระดับแรงดัน 24 kV พบว่ากระแสฟ้าผ่าที่เวลาน้ำคลื่นที่ชันมากหรือเท่ากับ 0.25/100 μ s นั้นจะสามารถรองรับค่าความคงทนค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตได้น้อยคืออยู่ที่ 2.65 ถึง 3.9 กิโลแอมแปร์เท่านั้น แต่ถ้ากระแสฟ้าผ่ามีช่วงเวลาน้ำคลื่นที่ชันน้อย ก็จะสามารถทนทานกระแสฟ้าผ่าได้สูงขึ้นก่อนจะเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ สำหรับรูปคลื่น 10/350 μ s ความต้านทานอิมพัลส์ 5 Ω จะสามารถทนทานกระแสฟ้าผ่าได้สูงสุดถึง 81 กิโลแอมแปร์ จึงจะเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ

และจากการทราบค่ากระแสวิกฤตของแต่ละกรณีนั้น เมื่อนำมาหาค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับเช่นที่ Td เท่ากับ 69 วัน พบว่าที่ความต้านทาน อิมพัลส์ 5 Ω จะมีอัตราการเกิดวาบไฟย้อนกลับน้อยสุดเมื่อเทียบกับ ค่าอิมพัลส์ 25, 50, 75 และ 100 Ω โดยที่รูปคลื่น 10/350 μ s ที่ความต้านทานอิมพัลส์ 5 Ω มีอัตราการเกิดวาบไฟย้อนกลับ 8.76 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี และที่

ความต้านทาน 100 Ω มีอัตราการเกิดวบไฟย้อนกลับ 82.96 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี จะเห็นได้ว่าที่ความต้านทานอิมพัลส์ 5 Ω จะน้อยกว่า 100 Ω อยู่ 9.47 เท่าและพบว่าที่ความต้านทาน 5 Ω เหมือนกัน แต่เวลาหน้าคลื่นเปลี่ยนไปก็ทำให้อัตราการเกิดวบไฟย้อนกลับเปลี่ยนไปโดยที่รูปคลื่น 0.25/100 μs มีอัตราการเกิดที่สูงสุดในทุกความต้านทานอิมพัลส์ เมื่อเปรียบเทียบกับทุกรูปคลื่น กระแสฟ้าผ่า

4.7 การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่า กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาขนานกับสายดินนอกเสาเดิม

4.7.1 ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย 24 kV โดยการติดตั้งเพิ่มสายดินนอกเสาขนานกับสายดินนอกเสาเดิมได้ผลดังตาราง 4.43 ถึง 4.53 โดยพิจารณาที่ระยะห่างเสา 40 เมตร

ตาราง 4.43 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาขนานกับสายดินนอกเสาเดิมที่รูปคลื่น 0.25/100 μs

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)					
	10	20	30	34.4	40	50
5	291	574	858	982	1141	1424
25	366	724	1082	1240	1440	1796
50	446	884	1322	1515	1760	2198
75	510	1011	1513	1733	2015	2516
100	562	1115	1669	1913	2222	2776

ตาราง 4.44 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาขนานกับสายดินนอกเสาเดิมที่รูปคลื่น 1/100 μs

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)					
	10	20	30	34.4	40	50
5	88	167	246	281	326	405
25	153	298	443	507	588	733
50	216	425	633	725	842	1050
75	267	526	785	898	1043	1302
100	309	609	910	1042	1211	1511

ตาราง 4.45 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาดิมที่รูปคลื่น 2/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)					
	10	20	30	34.4	40	50
5	53	99	144	165	190	235
25	111	213	316	361	419	522
50	158	308	459	525	609	759
75	193	379	565	646	750	935
100	222	437	651	745	865	1077

ตาราง 4.46 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาดิมที่รูปคลื่น 4/100 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)					
	10	20	30	34.4	40	50
5	40	72	103	117	135	167
25	83	158	234	267	309	384
50	116	224	331	379	439	547
75	140	271	403	461	536	667
100	159	250	461	527	611	762

ตาราง 4.47 ค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย (kV) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาชานานกับสายดินนอกเสาดิมที่รูปคลื่น 10/350 μ s

R_i (Ω)	กระแสฟ้าผ่า (kA)					
	10	20	30	34.4	40	50
5	28	49	69	78	90	110
25	56	105	153	174	201	250
50	75	142	208	238	275	342
75	86	164	242	277	320	398
100	93	178	263	300	348	433

ตาราง 4.48 ค่ากระแสวิกฤต (kA) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสขนานกับสายดินนอกเสาเดิม

$R_i (\Omega)$	รูปคลื่น (μs)				
	0.25/100	1/100	2/100	4/100	10/350
5	6.1	22	38	54	85
25	5	11.9	17	23	36
50	4	8.4	11.5	16	26
75	3.5	6.8	9.5	13	22
100	3.1	5.8	8.2	11.5	20.3

ตาราง 4.49 ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤติ(เปอร์เซ็นต์) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสขนานกับสายดินนอกเสาเดิม

$R_i (\Omega)$	รูปคลื่น (μs)				
	0.25/100	1/100	2/100	4/100	10/350
5	0.9869	0.7535	0.4381	0.2446	0.0943
25	0.992	0.9342	0.8534	0.7323	0.4716
50	0.9954	0.9713	0.9393	0.8714	0.6681
75	0.9967	0.9829	0.9614	0.9192	0.7535
100	0.9975	0.9884	0.9730	0.9393	0.7889

ตาราง 4.50 ค่าอัตราการเกิดวายุไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสขนานกับสายดินนอกเสาเดิม ใช้ Td เท่ากับ 69 วันต่อปี

$R_i (\Omega)$	รูปคลื่น (μs)				
	0.25/100	1/100	2/100	4/100	10/350
5	30.66	23.41	13.61	7.60	2.93
25	30.82	29.02	26.51	22.75	14.65
50	30.92	30.18	29.18	27.07	20.75
75	30.96	30.53	29.81	28.56	23.41
100	30.99	30.71	30.23	29.18	24.51

ตาราง 4.51 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาขนานกับสายดินนอกเสาเดิม ใช้ Td เท่ากับ 88 วันต่อปี

$R_i (\Omega)$	รูปคลื่น (μs)				
	0.25/100	1/100	2/100	4/100	10/350
5	111.44	85.09	49.47	27.63	10.66
25	112.02	105.49	96.37	82.69	53.25
50	112.40	109.69	106.06	98.40	75.45
75	112.55	110.99	108.57	103.81	85.09
100	112.64	111.62	109.87	106.06	89.09

ตาราง 4.52 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาขนานกับสายดินนอกเสาเดิม ใช้ Td เท่ากับ 99 วันต่อปี

$R_i (\Omega)$	รูปคลื่น (μs)				
	0.25/100	1/100	2/100	4/100	10/350
5	129.12	98.58	57.32	32.01	12.35
25	129.78	122.23	111.66	95.81	61.70
50	130.23	127.09	122.89	114.01	87.42
75	130.40	128.60	125.79	120.27	98.58
100	130.51	129.32	127.30	122.89	103.22

ตาราง 4.53 ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) กรณีเพิ่มสายดินนอกเสาขนานกับสายดินนอกเสาเดิม ใช้ Td เท่ากับ 122 วันต่อปี

$R_i (\Omega)$	รูปคลื่น (μs)				
	0.25/100	1/100	2/100	4/100	10/350
5	167.65	128.00	74.42	41.56	16.03
25	168.51	158.70	144.98	124.40	80.11
50	169.09	165.01	159.56	148.03	113.50
75	169.31	166.97	163.32	156.16	128.00
100	169.46	167.91	165.28	159.56	134.02

จากตาราง 4.43 ถึง 4.47 แสดงค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วย โดยสังเกตได้ว่าที่ความต้านทานดินอิมพัลส์ต่ำจะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมลูกถ้วยมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับความต้านทานดินอิมพัลส์สูง กระแสฟ้าผ่าที่มีค่าสูง จะทำให้แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยมีค่าสูงตาม เช่น ตาราง 4.43 กระแสฟ้าผ่าที่ 10 กิโลแอมแปร์ ความต้านทานดินอิมพัลส์ 5 โอห์ม มีค่าแรงดัน 291 kV น้อยกว่าความต้านทานดินอิมพัลส์ 100 โอห์ม จะมีค่าแรงดัน 562 kV ซึ่งมากกว่าถึง 1.931 เท่า และที่ความต้านทานดินอิมพัลส์ 5 โอห์ม ที่กระแสฟ้าผ่า 50 กิโลแอมแปร์ มีค่าแรงดัน 1424 kV ซึ่งมากกว่าถึง 4.893 เท่า และที่รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าชันมากขึ้น จะทำให้แรงดันที่ตกคร่อมลูกถ้วยสูงดังแสดงในตาราง 4.43 ถึง 4.47

จากตาราง 4.48 ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่จะทำให้แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยเท่ากับหรือมากกว่าค่า CFO ของลูกถ้วยที่ 180 kV ของแต่ละค่าที่ขึ้นกับค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ระยะห่างระหว่างเสา 40 เมตร และรูปคลื่น 0.25/100, 1/100, 2/100, 4/100 และ 10/350 μ s ที่ความต้านทานดินอิมพัลส์ต่ำและเวลาหน้าคลื่นที่ชันน้อยที่สุด จะทำให้ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตมีค่าสูงสุดในตาราง 4.48 ทำให้รองรับกระแสฟ้าผ่าได้สูงถึงจะทำให้ค่าแรงดันเกิน 180 kV

จากตาราง 4.49 แสดงค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต โดยนำค่าจากตาราง 4.48 แทนค่าเพื่อนำไปหาค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับในตาราง 4.51

จากตาราง 4.50 ถึง 4.53 แสดงค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับโดย สังเกตได้ว่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับที่น้อยที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ที่ต่ำและรูปคลื่น 10/350 μ s ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นเมื่อมีค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ที่สูง และเวลาหน้าคลื่นที่ชันหรือ 0.25/100 μ s

4.7.2 สรุป

ค่ากระแสวิกฤตของแต่ละกรณีนั้นเมื่อนำมาหาค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ เช่นที่ Td เท่ากับ 69 วันต่อปี พบว่าที่ความต้านทาน อิมพัลส์ 5 Ω จะมีอัตราการเกิดวาบไฟย้อนกลับน้อยสุดเมื่อเทียบกับ ค่าอิมพัลส์ 25, 50, 75 และ 100 Ω โดยที่รูปคลื่น 10/350 μ s ที่ความต้านทานอิมพัลส์ 5 Ω มีอัตราการเกิดวาบไฟย้อนกลับ 8.76 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี และที่ความต้านทาน 100 Ω มีอัตราการเกิดวาบไฟย้อนกลับ 65.39 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี จะเห็นได้ว่าที่ความต้านทานอิมพัลส์ 5 Ω จะน้อยกว่า 100 Ω อยู่ 7.47 เท่า และพบว่าที่ความต้านทาน 5 Ω เหมือนกัน แต่เวลาหน้าคลื่นเปลี่ยนไปก็ทำให้อัตราการเกิดวาบไฟย้อนกลับเปลี่ยนไปโดยที่รูปคลื่น 0.25/100 μ s มีอัตราการเกิดที่สูงที่สุดในทุกความต้านทานอิมพัลส์ เมื่อเปรียบเทียบกับทุกรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการประเมินสมรรถนะฟ้าผ่า กฟน. กรณีฟ้าผ่าลงหัวเสาโดยตรง ของระบบส่ง 69 kV, 115 kV และ 24 kV และทำการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มและวิธีการใช้มุมป้องกันในการปรับปรุงระบบ 69 kV, 115 kV และ 24 kV ใช้โปรแกรม ATP-EMTP ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมในการใช้วิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังในสถานะชั่วคราว โดยมีเป้าหมายเพื่อที่จะทราบถึงผลกระทบของฟ้าผ่าต่อระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ให้กับระบบส่งจ่ายกระแสไฟฟ้า และเป็นแนวทางในการพิจารณาปรับปรุงมาตรฐานการก่อสร้างระบบสายส่งย่อยและสายจำหน่าย และเป็นการรองรับผลกระทบที่จะเกิดขึ้นในอนาคต โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.2 สรุปผลการวิจัย

5.2.1 การปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า

การประเมินและการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบ 69 kV, 115 kV และ 24 kV ที่ติดตั้งบนเสาต้นเดียวกัน โดยติดตั้งเพิ่มสายดินนอกเสา ภายใต้เงื่อนไขรูปคลื่น 0.25/100 μ s และ 100/350 μ s และความต้านทานอิมพัลส์ที่แตกต่างกัน โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP สำหรับสร้างแบบจำลอง และการทำการศึกษาวิเคราะห์ค่าแรงดันหัวเสา กระแสวิกฤต และอัตราการวาบไฟทั้งหมด และศึกษาประโยชน์ของการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มนั้น ขึ้นกับรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าและค่าความต้านทานอิมพัลส์ ซึ่งพบว่า ความต้านทานอิมพัลส์ที่มีค่าต่ำที่สุดจะเหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงสมรรถนะระบบส่งและการประเมินหรือการคำนวณค่าต่าง ๆ นั้น ได้มีการนำข้อมูลที่เป็นสถิติจำนวนวันที่ฝนฟ้าคะนองของประเทศไทยและในพื้นที่บริการมาใช้ใน การคำนวณ ทำให้ทราบค่าอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับที่ได้ มีค่าใกล้เคียงความเป็นจริง และจากการศึกษาพบว่ารูปคลื่นที่มีช่วงเวลาหน้าคลื่นเท่ากันแม้ช่วงเวลาหลังคลื่นจะต่างกันแต่ก็จะให้ผลที่เกิดขึ้นของแรงดันหัวเสารวมทั้งอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับมีค่าเท่ากันด้วย

5.2.2 การปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มเติมด้วยรูปแบบต่าง ๆ

การปรับปรุงและการประเมินโดยการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มเติมด้วยรูปแบบต่าง ๆ ในระบบสายส่งย่อย 69 kV และ ระบบสายจำหน่าย 24 kV ที่ติดตั้งอยู่บนเสาดันเดียวกัน การสร้างแบบจำลองและการจำลองของระบบที่มีใช้งานอยู่ในปัจจุบันและระบบที่ทำการปรับปรุง โดยการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มโดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ผลการศึกษา พบว่าสามารถใช้ปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าได้ โดยทำให้แรงดันหัวเสาตกลงกระแสวิกฤต เพื่อรองรับระดับความผิดพลาดมีค่าสูงขึ้น จึงทำให้อัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับมีค่าลดลง โดยเฉพาะถ้ารูปคลื่นกระแสฟ้าผ่ามีช่วงเวลาของหน้าคลื่นนาน รวมทั้งการวิเคราะห์ ด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุนที่เหมาะสม จึงทำให้ทราบว่า รูปแบบการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มรูปแบบใดเหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงมาตรฐานด้านระบบการต่อลงดิน ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง

5.2.3 การประเมินอัตราการวาบไฟตามผิวทั้งหมดเนื่องจากมุมป้องกันลัมเหลว

ผลของการเกิดการวาบไฟตามผิว เนื่องจากมุมป้องกันลัมเหลว มีสาเหตุมาจากฟ้าผ่าลงระบบสายเฟสของสายส่ง ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดไฟฟ้าดับในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง โดยรูปแบบของเสาและการจัดเรียงตัวนำของสายเฟสและสายล่อฟ้า รวมทั้งค่าต่าง ๆ ที่จะนำไปคำนวณหาค่าของสมรรถนะของระบบสายส่งและสายจำหน่าย ใช้โปรแกรม ATP-EMTP สำหรับดัชนีชี้วัดสมรรถนะของระบบการป้องกันฟ้าผ่า จะอยู่ในเทอมของอัตรามุมป้องกันลัมเหลว อัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ซึ่งผลรวมของค่าทั้งสองดังกล่าวข้างต้นนั้น คือ อัตราการวาบไฟตามผิวทั้งหมด และในการการศึกษาระบบสายส่ง 69 kV ที่มีผลต่อจำนวนวงจรของ 24 kV ที่ติดตั้งอยู่ใต้ 69 kV โดยผลของการศึกษาพบว่า อัตราการวาบไฟตามผิวทั้งหมดถูกทำให้ลดลงได้ จะสังเกตว่าสายล่อฟ้าในตำแหน่งที่ใกล้กับสายล่อฟ้าเส้นเดิม ภายใต้เงื่อนไข มุมป้องกัน 30 องศาสามารถนำมาปรับปรุงความน่าเชื่อถือได้ให้ดีขึ้นด้วย โดยต้องมีความเหมาะสมในด้านการลงทุนกับความต้องการไฟฟ้าด้วย เพื่อให้สามารถตัดสินใจการลงทุนได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การประเมินสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังไม่ได้เอาทฤษฎีความน่าจะเป็นในการเกิดฟ้าผ่าที่ตำแหน่งฟ้าผ่ามาใช้ ดังนั้นสำหรับงานวิจัยที่จะดำเนินการในอนาคตนั้น จะนำทฤษฎีความน่าจะเป็น ซึ่งจะมีเรื่องของความแปรปรวนและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (The Variance and Standard Deviations) มาใช้ในการป้อนข้อมูลอินพุต เพื่อให้โอกาสที่ฟ้าจะผ่าในตำแหน่งเสาต้นใด ๆ มีโอกาสเกิดขึ้นเท่าเทียมกัน รวมทั้งพิจารณาเรื่องโอกาสของรูปคลื่นฟ้าผ่าแบบต่าง ๆ ค่าความต้านทานจำเพาะที่ฐานเสาค่าต่าง ๆ โดยกำหนดค่าความต้านทานจำเพาะที่ความถี่ 50 เฮิรตซ์ แล้วเมื่อเกิดฟ้าผ่าก็จะคำนวณค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์โดยเมื่อได้ผลของค่าดัชนีความเชื่อถือได้ในเรื่องการป้องกันฟ้าผ่า ก็จะนำผลมาคิดค่าความแปรปรวนของข้อมูล โดยความน่าจะเป็นนี้จะใช้ทฤษฎีมอนติคาร์โลมาคำนวณ เพื่อให้ได้ ค่าอัตราการวาบไฟทั้งหมดของระบบสายส่งย่อยและสายจำหน่าย

5.3.2 การศึกษาสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังไม่ได้ทำการศึกษาเกณฑ์ความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและช่วงก้าวสูงสุด ในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าลงระบบส่ง เนื่องจากการสร้างแบบจำลองของกรณีดังกล่าวต้องพัฒนาด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ซึ่งจะต้องมีการพัฒนาด้วยความรอบคอบเพื่อให้ผลที่ได้ออกมาที่มีความถูกต้อง ซึ่งเมื่อได้แบบจำลองดังกล่าวแล้วก็ต้องทำการเปรียบเทียบกับโปรแกรมที่มีความน่าเชื่อถือ เช่น โปรแกรม CDEGS เป็นต้น

5.3.3 ควรจะต้องทำการสำรวจค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง โดยอาจทำเป็นคอนทัวร์ เพื่อทราบถึงโครงสร้างและคุณลักษณะของดินเพื่อประโยชน์ในการจัดทำมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง

5.3.4 งานวิจัยที่น่าศึกษาอีกในอนาคตคือการศึกษาเกณฑ์ความปลอดภัยของระบบสายส่งย่อยและสายจำหน่าย โดยเป็นกรณีที่เกิดความผิดพลาด เนื่องจากการลัดวงจรที่เสาเพียงต้นเดียว ซึ่งเป็นกรณีเลวร้ายสุด แต่ในความเป็นจริงนั้น เสาแต่ละต้นจะเชื่อมด้วยสายเหนือดิน ในอนาคตผู้วิจัยจะทำการศึกษาในกรณีที่ทำการเชื่อมระบบการต่อลงดินที่ฐานเสาของแต่ละต้น แต่เนื่องจากการสร้างแบบจำลองดังกล่าว อาจจะต้องพิจารณาในเรื่องการเชื่อมกันด้วยสายเหนือดินด้วย จึงเป็นงานวิจัยที่จะศึกษาเพิ่มเติมต่อไป

5.3.5 ในการออกแบบระบบการต่อลงดินของเสานั้น ต้องพิจารณาถึงสิ่งที่เป็นโลหะที่อยู่ใกล้แนวเสา ดังนั้นในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน จึงต้องพิจารณาแนวทางเช่นเดียวกับการออกแบบกราวด์กริดของสถานีจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ที่อาจจะต้องพิจารณากรณีที่มีระบบท่อหรือโครงสร้างที่เป็นโลหะอยู่ใกล้กับเสาไฟฟ้าเพราะอาจจะเกิดเกิดสภาวะ Auxiliary Grounding System

เอกสารอ้างอิง

- [1] พรชัย เศรษฐสมบัติ. “การปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวงโดยต่อเพิ่มสายนอกเสา.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [2] Alberto, R., et al. “Non Uniform Line Tower model for Lightning Transient Studies.” Proceedings of Power System Transients. Brazil, 2001 : 1-7.
- [3] Mamis, M.S. and Koksai, M. “Lightning Surge Analysis Using Nonuniform, Single-Phase Line Model.” Proceeding of Generation, Transmission and Distribution. [n.p.], 2001 : 85-90.
- [4] ก้องกิจ เวทยานนท์ และกิตติคุณ บุญสก. “การวิเคราะห์ฟ้าผ่าในระบบส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมอีเอ็มทีพี.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2541.
- [5] ชำนาญ ห่อเกียรติ “ความเชื่อถือได้และการบำรุงรักษาระบบจำหน่ายไฟฟ้า.” กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.
- [6] ส้ารวย สังข์สะอาด. “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.” พิมพ์ครั้งที่ 3 กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.
- [7] Diesendorf, W. “Insulation Co-ordination in High-voltage Electric Power Systems.” England : Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1974
- [8] ชำนาญ ห่อเกียรติ. “ถาม-ตอบ ไฟฟ้ากำลัง.” พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์, 2552
- [9] เทพกัญญา ชติแสง. “การต่อลงดินและการติดตั้งอะเรสเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบ 22-24 กิโลโวลต์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.

- [10] Diesendorf, W. "Insulation Co-ordination in High-voltage Electric Power Systems." England : Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1974.
- [11] 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.
- [12] ชูวงศ์ วัฒนศักดิ์ภูบาล. "การลดปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้องเนื่องจากฟ้าผ่าสายส่ง 115 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546.
- [13] 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.
- [14] Hileman, A. R. "Insulation Coordination for Power Systems" New York : Marcel Dekker & Co (Publishers) Ltd., 1999.
- [15] Klairuang, 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.
- [16] ชำนาญ ห่อเกียรติ และเทพกัญญา ขัติแสง. "การต่อลงดิน." กรุงเทพมหานคร : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.
- [17] การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. "คู่มือการใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP." กรุงเทพมหานคร : การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2551.
- [18] Zhijing, Z., et al. "The Simulation Model for Calculating the Surge Impedance of a Tower." Proceeding of IEEE International Symposium on Electrical Insulation." USA, 2004 : 331-334.

- [19] สำเรึง อินท่าไม้. “เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีต อันเนื่องมาจากผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีต.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- [20] TIS.354-1985. “Suspension Insulator Type 52-3.” Bangkok : Thai Industrial Standards Institute, 1985.
- [21] El-Morshedy, A., et al. “High-Voltage Engineering.” New York : Marcel Dekker & Co. (Publishers) Ltd., 2000.
- [22] Mozumi, T., et al. “An Empirical Formula for the Surge Impedance of a Grounding Conductor along a Reinforced Concrete Pole in a Distribution Line.” Proceeding of Power System Transients (IPST). Brazil, 2001 : 1-6.
- [23] Jaruwattanadilok, S. and Fuangfoo, P. “Improving Lightning Performance in PEA Distribution System in Case of Low Grounding Resistance.” Proceedings of IEEE Region 10 Conference (TENCON). Chiang Mai, 2004 : 373-376.
- [24] IEC 61024-1. “Protection of structures against lightning Part 1: General principles.”
- [25] IEC 61312-1. “Protection against lightning electromagnetic Part 1: General principles.” New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1995.
- [26] Hintamai, S., et al. “Analysis of Electrical Reinforced Concrete Pole Grounding Effects to Overvoltage in High Voltage.” Proceeding of the 29th Electrical Engineering Conference (EECON-29). Thailand, 2006 : 229-232.
- [27] Energy Research Institute Chulalongkorn University. “Electricity Outage Cost Study.” Bangkok : Chulalongkorn University, 2001.
- [28] IEEE Std. 1243-1997. “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines.” New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1997.

- [29] IEEE Standard 1410-2004. "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines." New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2004.



ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

1. K. Supanus, N. Rugthaicharoencheep and A. Phayomhom, "Lightning Performance Improvement of 69 kV Subtransmission Line by External Ground in Distribution System," The 6th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET2014), Krabi Province, Thailand, March 26 - 28, 2014.
2. K. Supanus, N. Rugthaicharoencheep and A. Phayomhom, "External Grounding Design to Reduce Effects of Lightning Damage in Distribution System," The 7th IET International conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), Manchester, UK, April 8 - 10, 2014.
3. K. Supanus, T. Lantharthong, N. Rugthaicharoencheep and A. Phayomhom, "Effect of Lightning Current Waveform to Pole Top Voltage and Lightning Performance in Distribution System," The 37th Electrical Engineering Conference (EECON 37), Khon Kaen Province, Thailand, November 19 - 21, 2014.

เนื้อหาบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

การปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์
โดยการติดตั้งสายดินนอกเสาในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

Lightning Performance Improvement of 69 kV Subtransmission Line

by External Ground in Distribution System

กมล สุกานต์¹ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ² และ อรรถ พยอมหอม²

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 ถ.ประชาธิปไตย แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร โทรศัพท์ :02-9132424 ต่อ 150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

²งานโครงข่ายอัจฉริยะ กองวิศวกรรมไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง

เขตคลองเตย กรุงเทพมหานคร 10110 โทรศัพท์: 02-348-5561 E-mail: attp@mea.or.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง โดยติดตั้งสายดินนอกเสา เพื่อลดความเสียหายอันเกิดจากฟ้าผ่า โดยหากค่าของแรงดันเกินเหนี่ยวนำฟ้าผ่ามีค่ามากกว่าค่าแรงดันความไวตามควิอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วย (Critical Impulse Flashover voltage : CFO) ที่สามารถทนได้ก็จะทำให้เกิดการวางไฟตามควิอิมพัลส์ จุดประสงค์ของการติดตั้งสายดินนอกเสาเพื่อลดอัตราความไวตามควิอิมพัลส์ โดยจะทำการเชื่อมสายตัวนำระหว่างสายดินที่ทำหน้าที่ป้องกันฟ้าผ่าและแท่งเหล็กดิน ซึ่งบทความนี้จะทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลของสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าก่อนและหลังปรับปรุงระบบด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เพื่อให้ได้ค่าแรงดันหัวเสา ค่ากระแสวิกฤตและอัตราความไวตามควิอิมพัลส์ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าการปรับปรุงระบบสามารถลดค่าของอัตราความไวตามควิอิมพัลส์ลงได้ และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงมาตรฐานการต่อลงดินในระบบจำหน่ายของ กฟน. ต่อไป

คำสำคัญ: กระแสวิกฤต, อัตราความไวตามควิอิมพัลส์, สายดินนอกเสา

Abstract

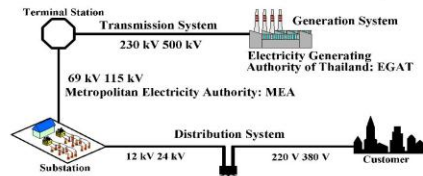
This paper presents an external ground design in distribution system for improved lightning performance. Lightning protection is a set of features typically designed into grounding systems at locations subject to lightning damage. Basically, back flashover occurs when the amplitude of the lightning overvoltage experienced by insulator strings in response to direct strikes to a tower or to the shield wires at tower vicinities exceeds the insulation withstand of the line. The objective function is to reduce the effects of lightning overvoltage from back flashover is an attachment of external ground wire connected between the overhead ground wires and a ground rod. This paper analyzes the effects of lightning performance of 69 kV circuit in Metropolitan

Electricity Authority (MEA)'s distribution system of Thailand. The proposed ATP-EMTP model for simulation and analysis of lightning in terms of pole top voltage, critical current and back flashover rate. The study results show that external grounding system design can reduce the effects of lightning and improve distribution system reliability.

Keywords: critical current, back flashover rate, external ground wire

1. บทนำ

ระบบส่งจ่ายพลังไฟฟ้าเป็นพื้นฐานของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ประกอบด้วยตัวระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า มีระดับแรงดัน 230 kV 115 kV และ 69 kV และสายพylonที่เป็นสายอากาศที่ระดับแรงดัน 12 kV และ 24 kV (Overhead) โดยมีระบบจำหน่ายของ กฟน. ดังแสดงรูปที่ 1

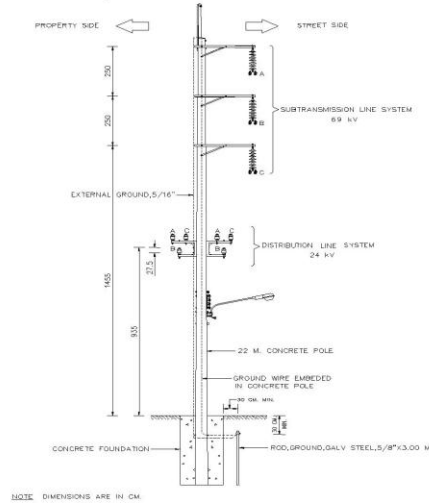


รูปที่ 1 ระบบจำหน่ายของ กฟน.

ประมาณ 90% ของระบบสายส่งและสายพylon จะเป็นสายอากาศเหนือดิน และเนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องขอบเขต (Right of Way) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทำการติดตั้งสายพylonบนเสาเดี่ยวกับระบบสายส่ง โดยมีสายล่อฟ้าหรือสายดิน (Overhead Ground Wire) ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนสุดของเสาไฟฟ้าและมีระบบสายดินที่ฝังอยู่ภายในเสาคอนกรีตไฟฟ้า เพื่อทำหน้าที่นำกระแสผิดพ้องหรือกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน [1]

เนื่องจากข้อจำกัดในการปักเสาพylonของ กฟน. ทำให้ระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ ติดตั้งอยู่บนเสาเดี่ยวกับ ระบบส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ ทำให้ใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่าร่วมกัน โดยมีสายดินภายในเสาเป็นส่วนหนึ่งของระบบสายดินเชื่อมระหว่างสายดินเหนือศีรษะและแท่งเหล็ก

ดิน ดังแสดงในรูปที่ 2

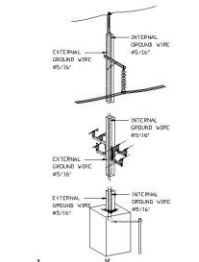


รูปที่ 2 การติดตั้งระบบสายจำหน่ายไฟฟ้า 69 kV และ 24 [2]

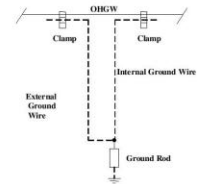
เมื่อเกิดฟ้าผ่าไปที่สายส่งย่อยหรือสายจำหน่าย จะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำเกิดขึ้นทั้งสองระบบ โดยอาจสร้างความเสียหายได้จากการเกิดการรวมไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ (Blackflash Over: BFO) บทความนี้จะทำการวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา กระแสวิกฤติ และอัตราการรวมไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับ (Black Flashover Rate : BFOR) เมื่อฟ้าผ่าไปที่หัวเสา ของระบบสายส่งย่อย 69 kV โดยจะทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP โดยจะใช้ค่าของจำนวนวันที่ฟ้าผ่าคาบองต่อปีเท่ากับ 122 วัน

2. การติดตั้งสายดินนอกเสา (External Ground Wire)

การติดตั้งสายดินนอกเสาเพื่อลดค่าของอัตราการรวมไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับจะทำการติดตั้งโดยใช้ขนาดลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสีที่เทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.93 มิลลิเมตร ทำการเชื่อมระหว่างสายล่อฟ้าและแท่งหลักดินที่โคนเสาโดยมีรูปแบบการติดตั้งดังรูปที่ 3 และมีสคีมแมตติงดังรูปที่ 4



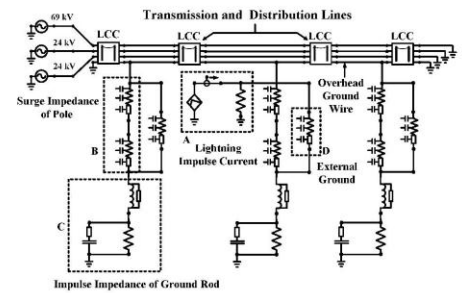
รูปที่ 3 การติดตั้งสายดินนอกเสา



รูปที่ 4 : Schematic diagram การติดตั้งสายดินนอกเสา

3. โปรแกรม ATP-EMTP

การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบส่งที่จะนำเสนอในบทความนี้ จะใช้โปรแกรม ATP-EMTP เป็นรูปแบบของระบบจำหน่ายในการประเมิน โดยจะประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสสลับ 3 เฟส สายดินเหนือศีรษะ สายส่งย่อย และสายจำหน่าย โดยจะใช้ค่าคงที่ของสายรูปแบบ J. Marti's โดยโปรแกรม ATP-EMTP ดังแสดงในรูปที่ 5 ประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์คือ ความถี่สำหรับรูปแบบสายจำหน่าย, กระแสฟ้าผ่า, เสรีจิมพีแดนซ์สำหรับเสาคอนกรีต, อิมพีแดนซ์ที่แกนสำหรับแท่งกราวด์



รูปที่ 5 แบบจำลองระบบจำหน่ายโดยโปรแกรม ATP-EMTP

3.1 เสรีจิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีต

เสาของกริดของระบบส่งจะมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา โดยเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาของกริด คืออิมพีแดนซ์ของระบบดินของเสา ซึ่งเสาในระบบส่งจะมีขนาดและความสูงต่างกันตามลักษณะของการใช้งาน และแรงดันของระบบ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของเสาจะขึ้นอยู่กับความสูงของเสาและขนาดของสายดิน ดังแสดงในสมการที่ (1) [3]

$$Z_T = 60 \ln \left(\frac{H}{r} \right) + 90 \left(\frac{r}{H} \right) - 60 \quad (1)$$

เมื่อ Z_T คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา (Ω)
 H คือ ความสูงของเสาของกริด (m)
 r คือ รัศมีของสายดิน (m)

3.2 ลูกถ้วย

มาตรฐานการก่อสร้างระบบสายส่ง 69 kV ของการไฟฟ้าในทรวง กำหนดให้ใช้ลูกถ้วยหมายเลข 52-3 ตามมาตรฐาน มอก.354 จำนวน 4 เคาใน ปัจจุบัน กฟน. จะทำการติดตั้งจำนวน 7 ลูกเนื่องจากเวลาที่จะทำการเปลี่ยน แรงดันเป็นระบบ 115 kV จะได้อายุการใช้งานที่พอเหมาะ โดยมีความถี่ของลักษณะของกราวบไฟตามผิว ดังแสดงตารางที่ 1 โดยจะใช้ค่าของสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient Variance) 3 %

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง [3]

Insulator Type	CFO (kV)		Coefficient of Variation	
	Positive	Negative	Positive	Negative
52-3 (7 unit)	695	670	674.15	649.9
56/57-2 (1unit)	180	205	174.60	198.85

3.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและจำลองในกรณีศึกษาจะมีข้อมูลดังตารางที่ 2

4. ดัชนีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า

ดัชนีในการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าจะประกอบไปด้วย 1) แรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา 2) กระแสวิกฤต 3) อัตราการรวมไฟตามผิวย้อนกลับ โดยแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา คือ แรงดันเทียบกับดิน ส่วนกระแสวิกฤตคือ ค่ากระแสที่ทำให้เริ่มเกิดการรวมไฟตามผิวย้อนกลับที่พวงลูกถ้วย หลังจากนั้นจะนำไปคำนวณค่าอัตราการรวมไฟตามผิวย้อนกลับต่อไป โดยใช้สมการที่ 2-5 [1, 4]

$$BFOR = P(I \geq I_C) \cdot N_I \quad (2)$$

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{M} \right)^B} \quad (3)$$

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

Detail	Values	Model
1. Lightning current		

- Amplitude (kA)	34.40	Ramp
- Front time/tail time (μ S) [5]	10/350	
2. OHGW		
- Diameter (mm)	7.94	
- DC resistance (Ω /km)	3.60	
3. Phase conductor of 69 kV		
- Diameter (mm)	25.65	J.Marti
- DC resistance (Ω /km)	0.0778	
4. Phase conductor of 24 kV		
- Diameter (mm)	15.35	
- DC resistance (Ω /km)	0.164	
5. Pole		
- Height (m)	20	
- Span (m)	80	
- Surge impedance (Ω)	451.4	
- Wave velocity (m/ μ S)	123	
6. External ground		
- Diameter (mm)	7.94	Distributed Parameter
- Length (m)	20	
- Surge impedance (Ω)	411.27	
- Wave velocity (m/ μ S)	300	
7. Ground rod		
- Diameter (mm)	16	
- Length (m)	3	
- Impulse resistance (Ω)	5-100	

$$N_1 = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (4)$$

$$N_g = 0.0133 J_d^{1.25} \quad (5)$$

เมื่อ BFOR คือ อัตราการเกิดรวมไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100วงจร-กม.ปี)
P(I) คือ ความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่า I สูงกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต(%)
I คือ กระแสฟ้าผ่าค่ายอด
M คือ กระแสฟ้าผ่าค่ามีขยฐานเท่ากับ 34.4 kA
B คือ ค่าคงที่สำหรับประเทศไทยเท่ากับ 2.5
h คือ ความสูงเฉลี่ยของสายดิน (เมตร)
N_1 คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดิน (ครั้ง/100 วงจร-กม.ปี)
b คือ ระยะห่างระหว่างสายดิน(เมตร)

5. กรณีศึกษา

จากรูปที่ 2 เมื่อทำการสร้างแบบจำลองและจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ด้วยรูปคลื่น 10/350 μ s โดยที่ฟ้าผ่าที่ตำแหน่งหัวเสาแล้วทำการ

เปรียบเทียบก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงโดยการติดตั้งสายดินนอกเสาที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ต่างๆ ด้วยค่ากระแสฟ้าผ่า 34.4 kA ซึ่งเป็นค่ากระแสมาตรฐานในช่วงปี พ.ศ. 2536-2540 ของประเทศไทย [1]

การประมวลผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3-6 ซึ่งการทดสอบในตารางที่ 3 พบว่าถ้ากำหนดให้ค่ากระแสฟ้าผ่ามีค่าเท่ากับ 34.4 kA ที่ค่าของความต้านทานอิมพีแดนซ์มีค่า 5 10 และ 25 Ω เมื่อทำการติดตั้งสายดินนอกเสาจะสามารถลดค่าของ BFOR ลงได้ แต่เมื่อค่าของความต้านทานอิมพีแดนซ์มีค่า 50-100 Ω การติดตั้งสายดินนอกเสาจะไม่มีประโยชน์ เพราะจะทำให้ค่าของ BFOR มีค่าเพิ่มขึ้น และตารางที่ 4 พบว่าเมื่อทำการติดตั้งสายดินนอกเสา จะทำให้ค่าของกระแสฉีกจุดมีค่ามากขึ้นเมื่อค่าของความต้านทานอิมพีแดนซ์ มีค่า 5 10 และ 25 Ω

จากนั้นทำการคำนวณค่าของ BFOR โดยใช้สมการที่ 2-5 ดังแสดงผลของค่า BFOR ในตารางที่ 5 และ 6 โดยเมื่อทำการศึกษาผลของ T_d ที่มีต่อค่าของ BFOR ก็พบว่าเมื่อค่าของ T_d มีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าของ BFOR มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งค่าของ T_d มากก็จะทำให้มีโอกาสเกิดไฟฟ้าดับได้มากกว่าแต่ก็ต้องขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฟ้าผ่า

ตารางที่ 3 แรงดันไฟฟ้าหัวเสาสำหรับรูปคลื่น 10/350 μs (kV)

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	Without
5	250.68	161.26
10	270.03	228.54
25	363.75	359.94
50	457.38	465.03
75	504.70	512.81
100	528.07	534.19

ตารางที่ 4 กระแสฉีกจุดสำหรับรูปคลื่น 10/350 μs (kA)

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	Without
5	102.70	166.50
10	99.00	117.50
25	73.40	74.50
50	58.80	57.50
75	53.40	52.40
100	51.10	50.40

ตารางที่ 5 BFOR สำหรับรูปคลื่น 10/350 μs, $T_d=99$

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	4.53	1.41
10	4.94	3.29
25	9.71	9.40
50	15.42	16.11
75	18.57	19.23
100	20.14	20.65

ตารางที่ 6: BFOR สำหรับรูปคลื่น 10/350 μs, $T_d=122$

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	5.88	1.84
10	6.41	4.28

25	12.61	12.21
50	20.02	20.92
75	24.10	24.97
100	26.15	26.81

6. สรุป

บทความนี้เป็นกรณีการนำเสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าโดยการติดตั้งสายดินนอกเสาในระบบจำหน่ายของ กฟน. ด้วยแบบจำลองรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า 10/350 μs ที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ต่างๆ ซึ่งใช้โปรแกรม ATP-EMTP ในการสร้างแบบจำลองและจำลองเพื่อให้ได้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา ค่ากระแสฉีกจุด และค่าอัตราการวางไฟตามผิวย้อนกลับ โดยพบว่าดัชนีของสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าจะขึ้นอยู่กับความต้านทานอิมพีแดนซ์และจำนวนวันที่พบฟ้าที่จะนองต่อปี ซึ่งถ้ามีค่ามากก็จะทำให้ค่าอัตราการวางไฟตามผิวย้อนกลับมีค่ามากขึ้นด้วย และจากการศึกษาดังกล่าวนี้จะสามารถนำไปใช้เป็นตัวบ่งชี้ในการปรับปรุงมาตรฐานการต่อลงดินในระบบจำหน่ายของ กฟน. ต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าหนกรหลวงที่สนับสนุนข้อมูลทางด้านเทคนิคที่เป็นประโยชน์และเอื้ออำนวยต่อการศึกษาวិเคราะห์ของบทความนี้ ซึ่งทำให้เกิดความสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Phayomhom, and S. Sirisumrannukul, "Computation of Total Flashover Rate in MEA's Overhead Transmission Circuit due to Shielding Failure." GMSARN International Journal 4, pp. 121-130, 2010.
- [2] Power System Planning Department Metropolitan Electricity Authority.MEA Overhead Subtransmission Construction Standard. DWG. No. 10A4-0524. Bangkok : Metropolitan Electricity Authority, 2000.
- [3] TIS.354-1985. Suspension Insulator Type 52-3. Bangkok : Thai Industrial Standards Institute, 1985.
- [4] A. R. Hileman, Insulation Coordination for Power Systems, New York : Marcel Dekker & Co (Publishers) Ltd., 1999.
- [5] IEC 61024-1. "Protection of structures against lightning Part 1: General principles." New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1990.

External Grounding Design to Reduce Effects of Lightning Damage in Distribution System

K. Supanus*, W. Thansiphaserth*, N. Rugthaicharoencheep*, Member, IEEE, A. Phayomhom[†]

*Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok, Thailand, e-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

[†] Metropolitan Electricity Authority, Bangkok, Thailand, e-mail: attp@mea.or.th

Keywords: Back flashover rate, External ground, Lightning performance, Overhead ground wire

Abstract

This paper presents an external ground design in distribution system for improved lightning performance. Lightning protection is a set of features typically designed into grounding systems at locations subject to lightning damage. Basically, back flashover occurs when the amplitude of the lightning overvoltage experienced by insulator strings in response to direct strikes to a tower or to the shield wires at tower vicinities exceeds the insulation withstand of the line. The objective function is to reduce the effects of lightning overvoltage from back flashover is an attachment of external ground wire connected between the overhead ground wires and a ground rod. This paper analyzes the effects of lightning performance of 69 kV circuit in Metropolitan Electricity Authority (MEA)'s distribution system of Thailand. The proposed ATP-EMTP model for simulation and analysis of lightning in terms of pole top voltage, critical current and back flashover rate. The study results show that external grounding system design can reduce the effects of lightning and improve distribution system reliability.

1 Introduction

The number of thunderstorm days in Bangkok, Thailand averaged over the period from 2003 to 2012, are 69, 88, 99 and 122 days [1]. Direct or indirect lightning strokes on overhead ground wire (OHGW) could lead to power interruption as a result of insulation flashover caused by the high energy of the strokes. When a lightning stroke hits at the OHGW of a 69 kV subtransmission system, an overvoltage is induced on both the phase conductors of the 69 kV and 24 kV system. Metropolitan Electricity Authority (MEA) is responsible for power distribution covering an area of 3,192 square kilometers in Bangkok, Nonthaburi, and Samutprakarn provinces of Thailand. MEA serves approximately 32 % of the whole country power demand in 2012. MEA's networks consist of transmissions, subtransmissions, and distribution systems. The voltage level in transmission systems is 230 kV, in subtransmission systems 69 kV and 115 kV, and in distribution systems 12 kV and 24 kV is shown in Figure 1. This overvoltage can damage insulators by back flashover if the voltage across the insulators exceeds the critical flashover

voltage of the insulators. This problem can be solved by the method of external ground.

An external ground is attached along the concrete pole connected between the overhead ground wire and a ground rod. It can help reduce the resistance of the ground rod and the surge impedance of the pole. This method gives a reduction in voltage across the insulator units as well as back flashover rate. The benefit of an external ground depends on pole span, line configuration, surge impedance of the pole, and resistance of the ground rod. Due to the right of way and obstruction in some service areas, a 24 kV circuit have to be installed under a 69 kV circuit on the same concrete pole. In this configuration, the 24 kV and 69 kV circuits share the same lightning protection that uses a ground wire embedded in the pole to provide a grounding path between an overhead ground wire on the top of the pole and a ground rod located in earth under the pole.

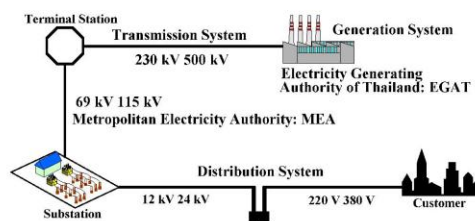


Figure 1: MEA power's distribution system.

The objective is considered in the view point of this paper to model and analyze a lightning performance improvement of 69 kV circuits by external grounds for each scheme of improvement the Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program (ATP-EMTP) is applied to solve the problem. The lightning performance problem is subject to system constraints. The performances are considered in terms of pole top voltage, critical current and back flashover rate. The developed methodology is tested with a distribution system of Metropolitan Electricity Authority (MEA). Simulation results with and without external grounds for different values of number of thunderstorm days per year in each service area and impulse resistance of ground rod are presented. The study results shown that the economic assessment for each scheme is then performed by reliability

cost and worth analysis. Grounding system design and improvement of subtransmission pole with under built.

2 Data of system studies

2.1 Detail of 69 kV and 24 kV circuits

The configuration and grounding system of a 69 kV subtransmission line with two underbuilt 24 kV feeders in MEA' System is shown in Figure 2. The reinforced concrete pole is 20 m high. The 69 kV circuit consists of 2x400 mm² all-aluminium conductor (AAC) per phase, while the double circuits of the 24 kV feeder consists of 1x185 mm² spaced aerial cable (ASC) per phase. A 1x38.32 mm² OHGW is directly connected to a ground wire embedded in the concrete pole. The ground wire is connected to a 3-m-long ground rod with a diameter of 15.875 mm² [2].

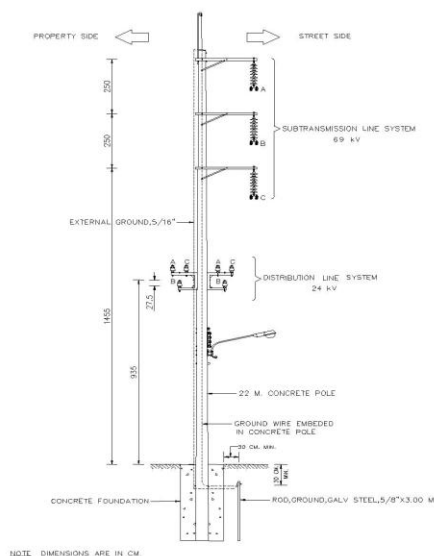


Figure 2: Installation of 69 and 24 kV circuits in MEA's distribution system.

2.2 Insulator

A suspension porcelain insulator type 52-3 and a pin post porcelain insulator type 56/57-2 are commonly used in MEA's system. The suspension insulator is complied with Thai Industrial Standard: TIS.354-1985 [3] and the pin post insulator with TIS.1251-1994 [4] standard. In a 69 kV subtransmission system, a string of 7 suspension insulator units are installed to support a phase conductor, while in the 24 kV feeder, the pin post insulators support the phase conductor. The critical flashover voltage of these two

insulators is listed in Table 1. An approximate for the coefficient of variation (CV) of self restoring insulation is 3%.

Insulator type	CFO (kV)		Coefficient of Variation	
	Positive	Negative	Positive	Negative
52-3 (7 unit)	695	670	674.15	649.9
56/57-2 (1unit)	180	205	174.60	198.85

Table 1: Critical flashover voltage of insulators.

3 Installation of external ground wire

In this paper, the method of external ground is applied to the MEA network in order to reduce the back flashover rate (BFOR) value. The method of external ground is implemented by attaching a 1x38.32 mm² of zinc-coated steel wire along the concrete pole connected between an overhead ground wire and an existing ground rod. The typical detail of external ground installation and its schematic diagram are provided in Figure 3 and Figure 4.

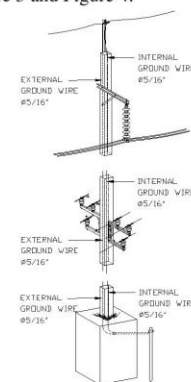


Figure 3: External ground wire installation.

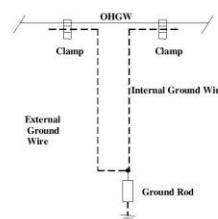


Figure 4: Schematic diagram of external ground installation.

4 ATP-EMTP model

The proposed ATP-EMTP model used to analyze lightning performance is shown in Figure 5. The 69 kV and 24 kV circuits are represented by AC three-phase voltage sources.

The OHGW, subtransmission, and distribution lines are modelled by line constants or cable parameters/cable constants of J. Marti's line model. The ATP-EMTP model is proposed in Figure 5 and needs following parameters:

- Frequency for line modelling
- Lightning current model (Block A)
- Surge impedance of concrete pole (Block B)
- Impulse impedance of the ground rod (Block C)
- Surge impedance of external ground (Block D)

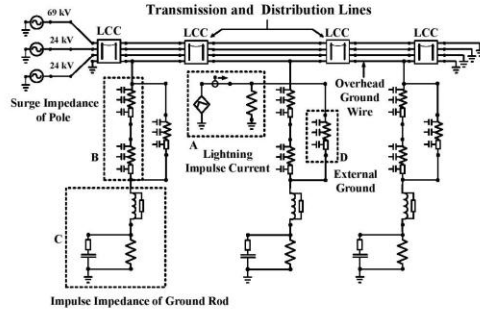


Figure 5: Typical diagram of ATP-EMTP.

4.1 Frequency for line modelling

Line parameters (resistance, inductance, and capacitance) are represented by a frequency dependent model of the transient phenomenon of lightning [5]. This frequency varies with the length of line segment. The frequency is calculated by

$$f = \frac{3 \times 10^8}{4l_{line}} \tag{1}$$

4.2 Lightning current source model

Lightning is represented by the slope ramp model shown in Figure 6. Three important parameters that identify the characteristic of lightning current waveforms are peak current I_p , front time t_1 , and tail time t_2 . The peak current is the maximum value of current found in the waveform. The front time is a time interval when the current increases from zero to its peak. The tail time is the sum of the front time and the time that the current falls to 50% of its peak value.

4.3 Surge impedance of pole

Surge impedance of pole (Z_T) is the impedance of the grounding path. Its value depends on the height of the pole and the size of the ground wire. Z_T can be expressed as [6]:

$$Z_T = 60 \ln \left(\frac{H}{r} \right) + 90 \left(\frac{r}{H} \right) - 60 \tag{2}$$

where Z_T is surge impedance pole (Ω)

H is pole height (m)

r is radius of ground wire (m)

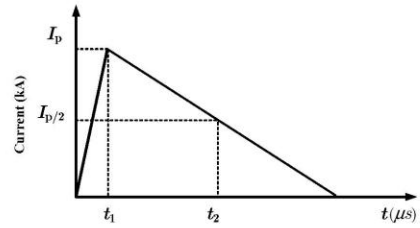


Figure 6: Lightning current waveform.

4.4 Impulse impedance of the ground rod

An equivalent circuit of the ground rod is shown in Figure 7. The resistance, inductance, and capacitance of the under transient phenomenon are calculated by [7-8]:

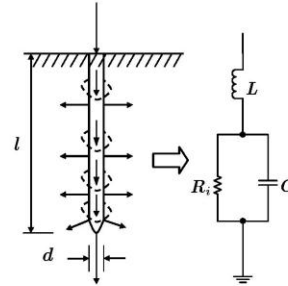


Figure 7: Equivalent circuit for ground rod under impulse condition.

$$R_i = \alpha R_0 \tag{3}$$

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \tag{4}$$

$$L = 2l \left(\ln \frac{4l}{d} \times 10^{-7} \right) \tag{5}$$

$$C = \frac{\epsilon_r l}{18 \ln \left(\frac{4l}{d} \right)} \times 10^{-9} \tag{6}$$

where R_i is impulse resistance of ground rod (Ω)
 α is impulse coefficient
 R_0 is resistance of ground rod at power frequency (Ω)
 ρ is solid resistivity (Ω -m)
 l is total length of ground rod (m)
 d is diameter of ground rod (m)
 L is inductance of ground rod (H)
 C is capacitance of ground rod (F)
 ϵ_r is relative permittivity of solid

4.5 Surge impedance of external ground

A good approximation for the surge impedance of an external ground is given in (7) [9], whose parameters are based on those of the MEA standard as presented in Table 2.

Detail	Values	Model
1. Lightning current		
- Amplitude (kA)	34.40	Ramp
- Front time/tail time (μ S) [10],[11]	10/350	
2. OHGW		
- Diameter (mm)	7.94	
- DC resistance (Ω /km)	3.60	
3. Phase conductor of 69 kV		
- Diameter (mm)	25.65	J.Marti
- DC resistance (Ω /km)	0.0778	
4. Phase conductor of 24 kV		
- Diameter (mm)	15.35	
- DC resistance (Ω /km)	0.164	
5. Pole		
- Height (m)	20	
- Span (m)	80	
- Surge impedance (Ω)	451.4	
- Wave velocity (m/ μ S) [12]	123	
6. External ground		
- Diameter (mm)	7.94	Distributed Parameter
- Length (m)	20	
- Surge impedance (Ω)	411.27	
- Wave velocity (m/ μ S) [12]	300	
7. Ground rod		
- Diameter (mm)	16	
- Length (m)	3	
- Impulse resistance (Ω)	5-100	

Table 2: Type of voltage on difference dimensions.

$$Z_{gc} = 60 \ln \left(\frac{h}{er} \right) - k \ln \left(1 + \left(\frac{r_c}{D} \right) \right) \quad (7)$$

$$k = 0.096 \times r_c + 13.95 \quad (8)$$

where Z_{gc} is surge impedance external ground (Ω)

h is conductor height (mm)
 r is conductor radius (mm)

e is base of natural logarithm
 k is constant
 r_c is radius of pole (mm)
 D is separate distance between skill of reinforced concrete pole and grounding conductor(mm)

5 Lightning performance indices

Three lightning performance indices are considered: 1) pole top voltage, 2) critical current and 3) BFOR. The pole top voltage in a 69 kV subtransmission line is a voltage-to-ground of the OHGW. The critical current is defined as lightning stroke current when injected into the conductor causing flashover. When the critical current is known, BFOR expressed in flashovers per length of line per year can be calculated by [13-14] :

$$BFOR = N_l \times P(I) \quad (9)$$

$$P(I) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{I}{A} \right)^B \right)} \quad (10)$$

$$N_l = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (11)$$

$$N_g = 0.0133T_d^{1.25} \quad (12)$$

where $BFOR$ is back flashover rate (flashes/100 km/yr)
 $P(I)$ is probability distribution of stroke current peak magnitude
 I is first stroke peak current magnitude (kA)
 A is median of stroke peak current magnitude (kA)
 B is constant (2.5 for Thailand power system)
 N_l is number of lightning strikes (flashes/100 km/yr)
 N_g is ground flash density (flashes/km²/yr)
 h is average conductor height (m)
 b is separation distance of overhead ground wire (m)
 T_d is number of thunderstorms (days/yr)

6 Case study

The system in Figure 3 is simulated by the ATP-EMTP program. The lightning performance of this system is analyzed by lightning current waveforms 10/350 μ s, lightning strikes to top of the pole without and with an external ground for different impulse resistances of the ground rod. The numerical results under the 10/350 μ s waveform reveal that without an external ground in the 69 kV circuit, the pole top voltage remains unchanged for different impulse resistances by lightning strikes to top of the pole and mid span as shown in Table 3 and critical current for 10/350 μ s waveform as shown in Table 4.

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	250.68	161.26
10	270.03	228.54
25	363.75	359.94
50	457.38	465.03
75	504.70	512.81
100	528.07	534.19

Table 3: Pole top voltage for 10/ 350 μ s waveform (kV).

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	102.70	166.50
10	99.00	117.50
25	73.40	74.50
50	58.80	57.50
75	53.40	52.40
100	51.10	50.40

Table 4: Critical current for 10/ 350 μ s waveform (kA).

In Table 3, the set value of lightning current is 34.4 kA, which is the median of stroke peak current magnitude. If impulse resistance are 5, 10 and 25 Ω , the external ground wire can reduce the BFOR. However, if impulse resistance value is between 50-100 Ω , external ground wire is not necessary because the value of BFOR increases. Table 4 shows that critical current increases if external ground wire of 5, 10 and 25 Ω are installed. However, critical current decreases if external ground wire of 50-100 Ω are installed. The test results are derived from a lightning current magnitude of 34.4 kA, which is the median of stroke peak current magnitude over the period from 1993 to 1997 in Thailand. The number of thunderstorm days (T_d) in Bangkok, Thailand over the period from 2006 to 2012, the maximum is 122 days. Simulation results are shown in Tables 5-8.

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	2.89	0.90
10	3.14	2.10
25	6.19	5.99
50	9.82	10.26
75	11.82	12.25
100	12.83	13.15

Table 5: BFOR for 10/ 350 μ s waveform, $T_d=69$.

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	3.91	1.22
10	4.26	2.84
25	8.38	8.12
50	13.31	13.90
75	16.02	16.60
100	17.38	17.82

Table 6: BFOR for 10/ 350 μ s waveform, $T_d=88$.

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	4.53	1.41
10	4.94	3.29
25	9.71	9.40
50	15.42	16.11
75	18.57	19.23
100	20.14	20.65

Table 7: BFOR for 10/ 350 μ s waveform, $T_d=99$.

R_i (Ω)	External ground wire	
	Without	With
5	5.88	1.84
10	6.41	4.28
25	12.61	12.21
50	20.02	20.92
75	24.10	24.97
100	26.15	26.81

Table 8: BFOR for 10/ 350 μ s waveform, $T_d=122$.

The mathematical relation between critical current and BFOR, as expressed in (10) and (11), indicates that increasing the critical current decreases $P(I)$ and hence BFOR. The comparison BFOR between Table 5 to 8 under the 10/350 μ s waveform, the maximum reductions of BFOR in both circuits are only achieved by the 5 Ω impulse resistance. The study effects of T_d shows that if T_d increases BFOR also increases as well as the power system outage based on critical current limit. In Tables 5 to 8, the 5 Ω of impulse resistance (R_i) is optimal for the installation of external ground. Thereby, the economic analysis of external ground is performed only in this value of R_i . The net present value (NPV), which is defined as the total present value (PV) of a time series of cash flows [15], is applied to demonstrate the economic merit. The breakdown of investment cost for the installation of external ground depicted in Figure 4 is listed in Table 9.

Item	Investment Cost (Baht/pole)
Material	603.72
Labor	76.95
Work Control	23.09
Transportation	30.18
Operation	36.69
Miscellaneous	36.69
Total	807.33

Table 9: Breakdown of investment cost (Baht/pole).

The total investment cost for 100 km subtransmission lines can be calculated as 502,038.81 Baht. It was reported in [12] that the interruption cost per event in MEA's service area was 147,500 Baht/event in the year 2000. The total investment cost and the interruption cost are respectively equivalent to 1,009,946.78 Baht/100 km and 365,957.36 Baht/event with a discount rate of 7.24%. The total outage cost can be estimated by the product of 365,957.36 Baht/event and BFOR.

The total investment cost and total outage cost are then used in the calculation of NPV with the same discount rate (7.24 %) over a period of 25 years. The net present value in case of without and with external ground are shown in Table 10.

Description	NPV			
	Thunderstorm day (days/vr)			
	69	88	99	122
NPV without External ground	13.40	17.68	20.27	25.91
NPV with External ground	5.11	6.45	7.26	9.02
Average expected NPV without external ground : A	19.31			
Average expected NPV with external ground : B	6.96			
Difference between A and B	12.35			

Table 10: Net present value without and with external ground (Million Baht/100 km).

Note that the cash flows for the investment cost are considered as positive. The total NPV for each lightning waveform is the summation of NVP from 69 kV whereas the total expected. The lower expected value in case of the system with external ground indicates the economic merit to implement this proposed technique to MEA' distribution system.

7 Conclusion

This paper has presented the lightning performance improvement of 69 kV circuits installed on the pole by an external ground in MEA's distribution network. The lightning performance is evaluated by 10/350 μ s lightning current waveforms and different impulse resistances. The test results obtained from the ATP-EMTP indicate that pole top voltage, critical current, and BFOR can be improved when an external ground is installed. The advantages of external ground depend on lightning current waveform, wave velocity and impulse resistance of ground rod. In addition, the test results also reveal that low impulse impedance is suitable for external ground. The results in this paper could be served a guideline in grounding system design of subtransmission line and modification of grounding standards in MEA's distribution system.

Acknowledgements

The authors would like to express his deepest gratitude to Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Thailand for support, and would like to express his sincere thanks to Power System Planning Department, Metropolitan Electricity Authority (MEA) for technical data.

References

- [1] Data Base of Thai Meteorological Department (TMD), year 2003-2012.
- [2] MEA Overhead Subtransmission construction standard, power system planning department, Metropolitan Electricity Authority, DWG. No. 10A4-0524. 2000.
- [3] TIS.354-1985. 1985. Suspension insulator type 52-3. Bangkok: Thai IndustrialStandardsInstitute.
- [4] TIS.1251-1994. 1994. Pin post insulator type 56/57-2. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute.
- [5] R. Alberto and et al. "Non uniform line tower model for lightning transient studies," In Proceedings of Power System Transients, Rio de Janeiro, Brazil, June 2001.
- [6] Z. Zhijing, and et al. "The Simulation model for calculating the surge impedance of a tower," In Proceedings of IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA, September 2004.
- [7] H. Jinliang, and et al. "Impulse characteristics of grounding systems of transmission-line towers in the regions with high soil resistivity," In Proceedings of Power System Technology, Beijing, China, 18-21 August 1998.
- [8] A. El-Morshedy, and et al. "High-voltage engineering," New York: Marcel Dekker & Co (Publishers) Ltd. 2000.
- [9] T. Mozumi, and et al. "An empirical formula for the surge impedance of a grounding conductor along a reinforced concrete pole in a distribution line," In Proceedings of Power System Transients Rio de Janeiro, Brazil, June 24-28, 2001.
- [10] IEC 61024-1. 1990. Protection of structures against lightning part 1: gGeneral principles.
- [11] IEC 61312-1. 1995. Protection against lightning electromagnetic part 1: general principles.
- [12] A. Phayomhom, T. Thasananutariya, and S. Sirisumrannukul, "Effect of external ground on lightning performance of 69 kV and 24 kV circuits in MEA's distribution system," Proceeding of the International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, China, 2009.
- [13] IEEE Std. 1243-1997. Guide for improving the lightning performance of transmission lines.
- [14] J. T. Whitehead, and et al. "Estimation lightning performance of transmission lines II – updates to analytical models," IEEE Working Group Report, IEEE Transactions on Power Delivery, 8(3): July, 1254-1267.
- [15] E. L. Grant, W. G. Ireson, and R. S. Leavenworth. "Principles of engineering economy," John Wiley & Sons, 1990.

**ผลกระทบของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าต่อแรงดันไฟฟ้าหัวเสา
และสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า**
**Effect of Lightning Current Waveform to Pole Top Voltage and
Lightning Performance in Distribution System**

กมล สุภานต์¹ ทง ลานธารถอง¹ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ¹ และอรุณ พยอมหอม²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร e-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

²กองวิศวกรรมไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง e-mail: atp@mea.or.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่มีต่อแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาและสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดผลกระทบการเกิดฟ้าผ่าของแรงดันเกินจากอัตราการวางไฟตามผิวย้อนกลับ การศึกษาและสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ประมาณค่าแรงดันหัวเสา ค่ากระแสวิกฤต และอัตราการวางไฟตามผิวย้อนกลับ โดยได้นำเทคนิคที่เสนอทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระดับแรงดัน 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง จากผลการศึกษาพบว่าช่วงเวลาของหน้าคลื่นมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาและอัตราการวางไฟ และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงการป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่ายไฟฟ้า

คำสำคัญ: รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า อัตราการเกิดควาไฟตามผิวย้อนกลับ ความต้านทานอิมพัลส์ แรงดันไฟฟ้าที่คอคบร่วมพวงลูกถ้วย

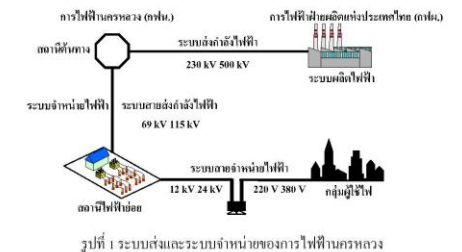
Abstract

This paper presents an effect of lightning current waveform to pole top voltage and lightning performance in distribution system. The objective is to reduce the effects of lightning overvoltage from back flashover. The proposed ATP-EMTP model for simulation and analysis of lightning in terms of pole top voltage, critical current and back flashover rate. This paper analyzes the effects of lightning performance of 69 kV circuit in Metropolitan Electricity Authority (MEA)'s distribution system. The results of the study show that the time of wave front effect to pole top voltage and back flashover rate and can be used as a guide to improve the lightning performance in distribution system.

Keywords: Current waveforms of lightning, back flashover rate, impulse resistance, voltage across the insulators string

1. บทนำ

ระบบส่งจ่ายพลังไฟฟ้าในพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) มีพื้นที่รับผิดชอบ 3 จังหวัด ได้แก่ กรุงเทพมหานคร นนทบุรี และสมุทรปราการ การจ่ายกำลังไฟฟ้าไปยังโหลดด้วยระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า มีระดับแรงดัน 230 กิโลโวลต์ 115 กิโลโวลต์ และ 69 กิโลโวลต์ และสายป้อนที่เป็นสายอากาศที่ระดับแรงดัน 24 กิโลโวลต์ และ 12 กิโลโวลต์ โดยที่การไฟฟ้านครหลวงรับกำลังไฟฟ้ามาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง ดังแสดงในรูปที่ 1

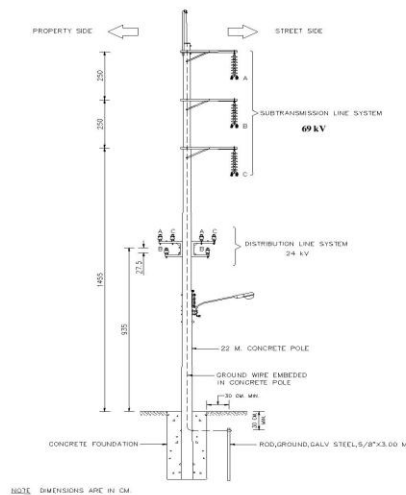


ระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง ประมาณร้อยละ 90 เป็นสายอากาศเหนือดิน และติดตั้งสายจำหน่ายไฟฟ้าให้อยู่บนเสาต้นเดียวกับระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า โดยมีสายล่อฟ้าหรือสายดิน (Overhead Ground Wire) ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนสุดของเสาไฟฟ้า และมีระบบสายดินฝังอยู่ภายในเสาไฟฟ้าแบบคอนกรีต เพื่อทำหน้าที่นำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน [1]

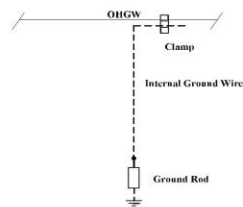
เนื่องจากข้อจำกัดในการปักเสาพาดสายของ กฟน. ทำให้ระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ติดตั้งอยู่บนเสาต้นเดียวกับระบบส่ง 69 กิโลโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2 [2] ทำให้ใช้ระบบป้องกันฟ้าผ่าร่วมกัน โดยมีสายดินภายในเสาเป็นส่วนหนึ่งของระบบสายดินเชื่อมระหว่างสายดินเหนือศีรษะและแท่งหลักดิน

เมื่อเกิดฟ้าผ่าไปที่สายส่งย่อยหรือสายจำหน่าย ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำเกิดขึ้นทั้งสองระบบ โดยอาจสร้างความเสียหายได้ จากการเกิดการวางไฟตามผิวย้อนกลับ (Black Flash Over: BFO) ดังนั้น

บทความนี้ทำการศึกษาวิเคราะห์ช่วงเวลาของน้ำหนักที่ช่วงเวลาสั้นๆ มีความชันมาก มีผลทำให้แรงดันที่หัวเสาและช่วงกลางหลังคานี้ไม่มีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาและอัตราความไวตามผิวย้อนกลับ โดยทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ในระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ ติดตั้งอยู่บนเสาต้นเดียวกัน ระบบส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ โดยใช้ค่าของจำนวนวันที่พายุที่เคาะลงต่อปีเท่ากับ 122 วัน



รูปที่ 2 เสาไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง

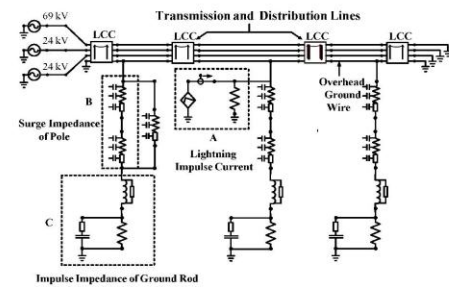


รูปที่ 3 แบบจำลองการติดตั้งเสาตอ

2. โปรแกรม ATP-EMTP

การประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าในระบบส่งที่นำเสนอในบทความนี้ได้ใช้โปรแกรม ATP-EMTP มาประมวลผลของระบบส่ง โดยแบบจำลองในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสเสถียร 3 เฟส สายดินเหนือศีรษะสายส่งย่อย และสายจำหน่าย โดยใช้ค่าคงที่ของสายรูปแบบ J.Marti's ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ดังแสดงในรูปที่ 4 แบบจำลองที่ใช้ทดสอบ

มีค่าพารามิเตอร์ คือ ความถี่สำหรับรูปแบบสายจำหน่าย กระแสฟ้าผ่าเสิร์จอิมพีแดนซ์สำหรับเสาคอนกรีต และอิมพีแดนซ์ที่เคาะลงสำหรับเสากรวด



รูปที่ 4 แบบจำลองระบบจำหน่ายโดยโปรแกรม ATP-EMTP

2.1 เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีต

เสาคอนกรีตของระบบส่งมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา โดยเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีต คืออิมพีแดนซ์ของระบบดินของเสา ซึ่งเสาในระบบส่งมีขนาดและความสูงต่างกันตามลักษณะของการใช้งาน และแรงดันของระบบ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของเสาขึ้นอยู่กับความสูงของเสาและขนาดของสายดิน ดังแสดงในสมการที่ (1) [3]

$$Z_T = 60 \ln \left(\frac{H}{r} \right) + 90 \left(\frac{r}{H} \right) - 60 \tag{1}$$

- เมื่อ Z_T คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา (Ω)
- H คือ ความสูงของเสาคอนกรีต (m)
- r คือ รัศมีของสายดิน (m)

2.2 ลูกถ้วย

มาตรฐานการก่อสร้างระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง กำหนดให้ใช้ลูกถ้วยหมายเลข 52-3 ตามมาตรฐาน มอก.354 จำนวน 4 ลูก แต่ในปัจจุบัน กฟน. ทำการติดตั้งจำนวน 7 ลูก เนื่องจากการเปลี่ยนระดับแรงดันเป็นระบบ 115 กิโลโวลต์ จะได้น้ำหนักการรับไฟและติดตั้งลูกถ้วยเพิ่ม โดยมีคุณลักษณะของกราวนไฟตามผิวอิมพีแดนซ์วิกฤตของทางลูกถ้วย (Critical Impulse Flashover Voltage: CFO) ดังแสดงตารางที่ 1 โดยใช้ค่าของสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient Variance) เท่ากับ 3 %

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง [3]

ชนิดของงาน	ผิวอิมพีแดนซ์วิกฤตของทางลูกถ้วย (กิโลโวลต์)		สัมประสิทธิ์ของความผันแปร (กิโลโวลต์)	
	ค่าขั้นต่ำ	ค่ามัธย	ค่าขั้นต่ำ	ค่ามัธย
52-3 (7 unit)	695	670	674.15	649.99
56/57-2 (1unit)	180	205	174.60	198.85

2.2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองและจำลองในกรณีศึกษานี้มีข้อมูลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

Detail	Values	Model
1. Lightning current		
- Amplitude (kA)	34.40	Ramp
- Front time/tail time (μs) [4]	10/350	
2. OHGW		
- Diameter (mm)	7.94	
- DC resistance (Ω/km)	3.60	
3. Phase conductor of 69 kV		
- Diameter (mm)	25.65	J.Marti
- DC resistance (Ω/km)	0.0778	
4. Phase conductor of 24 kV		
- Diameter (mm)	15.35	
- DC resistance (Ω/km)	0.164	
5. Pole		
- Height (m)	20	
- Span (m)	80	
- Surge impedance (Ω)	451.4	
- Wave velocity (m/μs)	123	Distributed Parameter
6. Ground rod		
- Diameter (mm)	16	
- Length (m)	3	
- Impulse resistance (Ω) [5]	5-100	

3. ดัชนีสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า

ดัชนีในการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า ประกอบด้วย แรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา กระแสวิกฤต และอัตราความไวไฟตามผิวย้อนกลับ โดยแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา คือ แรงดันที่ OHGW เทียบกับดิน ส่วนกระแสวิกฤตคือค่ากระแสที่ทำให้เริ่มเกิดการรวมไฟตามผิวย้อนกลับที่พวงลูกถ้วย หลังจากนั้นก็นำไปคำนวณค่าอัตราความไวไฟตามผิวย้อนกลับต่อไปโดยใช้สมการที่ 2-5 [1], [6-7]

$$BFOR = P(I \geq I_C) \cdot N_1 \quad (2)$$

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{M}\right)^B} \quad (3)$$

$$N_1 = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (4)$$

$$N_g = 0.0133 I_d^{1.25} \quad (5)$$

เมื่อ	BFOR	คือ	อัตราเกิดรวมไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
	P(I)	คือ	ความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่า I สูงกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต (%)

I	คือ	กระแสฟ้าผ่าค่ายอด
M	คือ	กระแสฟ้าผ่าค่ามีฐานเท่ากับ 34.4 kA
B	คือ	ค่าคงที่สำหรับประเทศไทยเท่ากับ 2.5
h	คือ	ความสูงเฉลี่ยของสายดิน (เมตร)
N ₁	คือ	จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสายดิน (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
b	คือ	ระยะห่างระหว่างสายดิน (เมตร)
N _g	คือ	ความหนาแน่นของจำนวนฟ้าผ่าลงสู่ดิน (ครั้ง/ตร.กม./ปี)
T _d	คือ	จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (วัน/ปี)

4. กรณีศึกษา

กรณีศึกษาได้ทำการทดสอบกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของกรฟไฟฟ้า นครหลวง ระดับแรงดัน 69 กิโลโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยทำการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ด้วยรูปคลื่น 0.25/100 10/100 10/350 μs ฟ้าผ่าที่ตำแหน่งหัวเสา จากนั้นเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา และค่าอัตราความไวไฟตามผิวย้อนกลับ (BFOR) โดยทำการเปรียบเทียบรูปคลื่นว่ามีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา และค่าของ BFOR สำหรับกรณีที่เป็นรูปคลื่น 0.25/100 10/100 μs เป็นการกำหนดให้ความยาวหางคลื่นคือ 100 μs แล้วทำการเปลี่ยนแปลงความยาวหน้าคลื่นที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์เท่ากับ 5 10 25 75 และ 100 Ω ด้วยค่ากระแสฟ้าผ่า 34.4 kA ซึ่งเป็นค่ากระแสมีฐานในชั่วโมง พ.ศ. 2536-2540 ของประเทศไทย ผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3-5

การทดสอบในตารางที่ 3 พบว่าเมื่อทดสอบด้วยค่ากระแสฟ้าผ่า 34.4 kA ด้วยรูปคลื่น 0.25/100 μs ให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาสูงกว่าเมื่อทดสอบด้วยรูปคลื่น 10/100 μs เนื่องจาก รูปคลื่น 0.25/100 μs มีความชันหน้าคลื่นมากกว่าและมีช่วงเวลาน้ำคลื่นสั้นกว่าถึง 40 เท่าจึงทำให้คลื่นที่สะท้อนมาจากฐานเสาไม่สามารถมาหักล้างยอดคลื่นได้ทันแต่สำหรับรูปคลื่น 10/100 μs มีค่าแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาต่ำกว่ามากเพราะว่าคลื่นจากฐานเสาสามารถไปหักล้างยอดคลื่นได้ทัน และพบว่าทั้งสองรูปคลื่นมีค่าของแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของความต้านทานอิมพัลส์เพิ่มมากขึ้นด้วยเนื่องจากต้นประสิทธิการสะท้อนกลับมีค่าเป็นลบน้อยลง

ตารางที่ 3 แรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา (kV) ของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

R _i (Ω)	0.25/100 μs	10/100 μs	10/350 μs
5	5,671.9	250.68	250.68
10	5,672.9	270.03	270.03
25	5,673.0	363.75	363.75
50	5,673.0	457.38	457.38
75	5,673.0	504.70	504.70
100	5,673.0	528.07	528.07

ในทางกลับกันเมื่อทำการพิจารณาเปรียบเทียบที่รูปคลื่น 10/100 μ s และ 10/350 μ s คือค่าหนึ่งให้ช่วงเวลาน้ำล้นลงที่แต่เปลี่ยนค่าของช่วงเวลาลงก็จะมีแนวโน้มว่าแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาที่เท่ากันที่ทุกค่าของความต้านทานอิมพัลส์นั้นหมายความว่าช่วงเวลาน้ำล้นมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาแก้วแก้วที่ของช่วงเวลาลงที่ต่างกันและเมื่อทำการพิจารณาค่าของกระแสวิกฤตของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าแบบต่างๆพบว่าค่าของกระแสวิกฤตของรูปคลื่น 0.25/100 μ s มีค่าคงที่ที่ทุกค่าของความต้านทานอิมพัลส์เนื่องจากคลื่นจากฐานรากไม่สามารถมาหักล้างยอดคลื่นได้ทันเพราะหน้าคลื่นมีความชันมาก ส่วนรูปคลื่น 10/100 μ s และ 10/350 μ s มีค่ากระแสวิกฤตเท่ากันเพราะว่าช่วงเวลาน้ำล้นเท่ากันหรือมีความชันเท่ากันนั่นเองและที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์น้อยๆก็ทำให้ระบบสามารถรองรับกระแสวิกฤตได้สูงขึ้น โดยมีผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 กระแสวิกฤต (kA) ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า

R_f (Ω)	0.25/100 μ s	10/100 μ s	10/350 μ s
5	4.48	102.70	102.70
10	4.48	99.00	99.00
25	4.48	73.40	73.40
50	4.48	58.80	58.80
75	4.48	53.40	53.40
100	4.48	51.10	51.10

จากนั้นการคำนวณค่าของ BFOR โดยใช้สมการที่ 2 - สมการที่ 5 สามารถประมวลผลค่า BFOR ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยเมื่อทำการศึกษาผลของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าของ BFOR ก็พบว่าค่า BFOR มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความชันของช่วงเวลาน้ำล้น

ตารางที่ 5 BFOR (ครั้ง/100 กม.-กม./ปี) ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ $T_d = 122$

R_f (Ω)	0.25/100 μ s	10/100 μ s	10/350 μ s
5	95.89	5.88	5.88
10	95.89	6.41	6.41
25	95.89	12.61	12.61
50	95.89	20.02	20.02
75	95.89	24.10	24.10
100	95.89	26.15	26.15

โดยค่าจากตารางที่ 5 พบว่าค่าของ BFOR ของรูปคลื่น 0.25/100 μ s มีค่าคงที่ทุกค่าความต้านทานอิมพัลส์ ส่วนค่า BFOR ของรูปคลื่น 10/100 μ s และ 10/350 μ s มีค่าเท่ากันคือมีค่าน้อยที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์น้อยๆ และ BFOR มีค่ามากขึ้นที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่มีค่าเพิ่มขึ้น

5. สรุป

บทความนี้เป็นการศึกษาผลของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อค่าของแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาและค่าของ BFOR โดยจากการศึกษาพบว่าช่วงเวลาน้ำล้นมีผลต่อค่าของแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาและค่าของ BFOR มากกว่าช่วงเวลาลงที่ล้นคือถ้าช่วงเวลาน้ำล้นมีค่าน้อยมากหรือมีความชันมากก็ทำให้คลื่นสะท้อนกลับจากฐานเสาไม่สามารถหักล้างยอดคลื่นที่หัวเสาได้ทันหรือเนื่องค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับมีค่าเป็นลบน้อยลง ส่งผลให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาและค่าของ BFOR มีค่ามากกว่ารูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่มีช่วงเวลาน้ำล้นมากหรือมีความชันน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าดัชนีของสมรรถนะการป้องกันที่ค่าขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานอิมพัลส์ด้วยโดยเฉพาะกับรูปคลื่นที่มีช่วงเวลาน้ำล้นมากก็ทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดของย้อนกลับมีค่ามากขึ้นด้วย แต่ถ้าช่วงเวลาน้ำล้นน้อยก็ไม่มีผลต่อค่าของ BFOR

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ให้การสนับสนุน และขอขอบคุณการไฟฟ้าในนครหลวงที่สนับสนุนข้อมูลด้านเทคนิคที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาของบทความนี้จนสำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Phayomhom, and S. Sirisumrannukul, "Computation of total flashover rate in MEA's overhead transmission circuit due to shielding failure," GMSARN International Journal, vol. 4, no. 3, pp.121-130, September 2010.
- [2] Power System Planning Department Metropolitan Electricity Authority, "MEA Overhead Sub-transmission Construction Standard". DWG. No. 10A4-0524. Bangkok: Metropolitan Electricity Authority, 2000.
- [3] TIS.354-1985. Suspension Insulator Type 52-3. Bangkok : Thai Industrial Standards Institute, 1985.
- [4] IEC 61024-1. "Protection of structures against lightning Part 1: General principles." New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1990.
- [5] H. Jinliang, and et. al., "Impulse characteristics of grounding systems of transmission-line towers in the regions with high soil resistivity," in Proc. Power System Technology, Beijing, China, August 1998.
- [6] A. R. Hileman, Insulation coordination for power systems, New York : Marcel Dekker & Co (Publishers) Ltd., 1999.
- [7] J. T. Whitehead and et. al., "Estimation lightning performance of transmission lines II – updates to analytical models," IEEE Working Group Report, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 8, no. 3, pp.1254-1267, July 1993.

ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล	นายกมล สุภานัส	
วัน เดือน ปีเกิด	6 สิงหาคม 2513	
ภูมิลำเนา	97/6 วังเสมา ตำบลกุดน้ำใส อำเภอจัตุรัส จังหวัดชัยภูมิ	
ประวัติการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วุฒิมัธยมศึกษา		
ปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร	2554
ปวส.	วิทยาลัยช่างกลปทุมวัน	2539
ปวช.	โรงเรียนกองทัพบกอุปถัมภ์ ช่างกลขนส่งทหารบก	2534

ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

วิศวกรไฟฟ้า 5 แผนกก่อสร้างระบบจำหน่าย กองบริการการจำหน่าย
การไฟฟ้านครหลวงเขตยานนาวา