



การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งย่อย  
69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล  
Evaluation of Lightning Performance in Subtransmission Line  
69 kV on Electrical Monopole

อานนท์ ส่งแสง  
Arnon Songsang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

พ.ศ. 2559



การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งย่อย  
69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล  
Evaluation of Lightning Performance in Subtransmission Line  
69 kV on Electrical Monopole

อานนท์ ส่งแสง  
Arnon Songsang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร  
พ.ศ. 2559

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

ชื่อวิทยานิพนธ์	การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล
Thesis title	Evaluation of Lightning Performance in Subtransmission Line 69 kV on Electrical Monopole
ชื่อ นามสกุล	อานนท์ ส่งแสง
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	2. ดร.อรรถ พยอมหอม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้ให้ความเห็นชอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ พันธุ์นะ)

..... กรรมการและเลขานุการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ ฤทธิทอง)

วันที่ 29 เดือน เมษายน พ.ศ. 2559

<b>ชื่อวิทยานิพนธ์</b>	การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล
<b>ชื่อ สกุล</b>	อานนท์ ส่งแสง
<b>ชื่อปริญญา</b>	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
<b>สาขาวิชา และคณะ</b>	สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์
<b>ปีการศึกษา</b>	2558

### บทคัดย่อ

ระบบไฟฟ้าในการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) ส่วนมากจะเดินสายเป็นสายอากาศ เมื่อเทียบสัดส่วนในระบบสายส่งย่อยและสายจำหน่ายไปจนถึงระดับแรงต่ำแล้วสายอากาศมีจำนวนร้อยละ 94 เมื่อเทียบสัดส่วนทั้งหมด ในระบบไฟฟ้ากำลังของ กฟน. ซึ่งปกติการปักเสาพาดสายจะใช้เสาไฟฟ้าคอนกรีตทั้งหมด แต่เนื่องจากปัจจุบันมีโครงการต่างๆ เกิดขึ้นมาก เช่นโครงการรถไฟฟ้าและ โครงการด้านสาธารณูปโภคต่างๆ ทำให้การปักเสาพาดสายทำได้ยากเนื่องจากมีข้อจำกัดด้านขอบเขตทางที่ไม่เพียงพอ ดังนั้น กฟน. จึงได้เริ่มทำการติดตั้งเสาไฟฟ้าโมโนโพล เพื่อใช้งานทดแทนเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากการติดตั้งสะดวกและใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่าเสาไฟฟ้าคอนกรีต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ ของไฟฟ้านครหลวง กรณีที่เกิดฟ้าผ่าโดยตรงลงสายล่อฟ้า ที่ตำแหน่งหัวเสบบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ที่มีการติดตั้งพวงลูกถ้วยชนิดแขวนในท่อมของแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสา กระแสวิกฤต และอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ โดยการใช้โปรแกรม ATP-EMTP เพื่อศึกษาการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของเสาไฟฟ้าโมโนโพล จากผลการศึกษาพบว่าเสาไฟฟ้าโมโนโพล สามารถลดค่าอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับลงได้ถึงร้อยละ 79 เมื่อเทียบกับเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันและเมื่อเปรียบเทียบกับเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสาส่ง สามารถลดอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ลงได้ถึงร้อยละ 33.17 ซึ่งผลจากการศึกษาสามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและปรับปรุงสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบไฟฟ้าของ กฟน. ต่อไป

**คำสำคัญ** : สมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า, ไฟฟ้าโมโนโพล, อัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ

<b>Thesis title</b>	Evaluation of Lightning Performance in Subtransmission Line 69 kV on Electrical Monopole
<b>Author</b>	Arnon Songsang
<b>Degree</b>	Master degree
<b>Major program</b>	Electric Power Engineering Faculty of Engineering
<b>Academic Year</b>	2015

## ABSTRACT

Most of Metropolitan Electricity Authority (MEA) electric power system is using overhead line. It is 94% in the system including subtransmission, distribution and low voltage system. All of them were installed on concrete pole. At present, many public facilities have been built such as Sky-Train. It causes more constrains for construction with concrete pole due to lack of right of way. MEA needs to using electrical monopole plays an important role. It's easier than concrete pole for construction and it requires less construction area than concrete pole.

The thesis evaluation of lightning performance in subtransmission line 69 kV study on MEA. Case lightning strike on overhead ground wire (OHGW) at pole top of electrical monopole with suspension insulator, Focusing on three factors is pole top voltage, critical current and back flashover rate (BFOR). ATP-EMTP software is used for simulation. The results show that BFOR is reduced by 79% on electrical monopole structure with suspension insulator compared with existing concrete pole. BFOR is also reduced by 33.17% on concrete pole with external ground wire. The results could be served as a guideline in subtransmission line design and improvement in MEA power system.

**Keywords :** Lightning Performance, Electrical Monopole, Back flash over rate

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงตามจุดประสงค์ได้ เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ความช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาในการเขียนบทความวิชาการ บทความวิจัย และให้ความอนุเคราะห์ช่วยถ่ายทอดความรู้ที่เอื้ออำนวยในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ตลอดจนทั้งอบรมสั่งสอนในเรื่องของการดำเนินชีวิต เพื่อให้ประสบความสำเร็จในหน้าที่การงานต่อไปในอนาคต

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อรรถ พยอมหอม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งเป็นวิศวกรไฟฟ้า 9 กองวิศวกรรมไฟฟ้า ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง ที่ได้ถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับการใช้โปรแกรม ATP-EMTP ซึ่งถือเป็นสิ่งสำคัญในขั้นตอนของการศึกษา ในการทำวิจัยของวิทยานิพนธ์นี้ อีกทั้งยังได้ให้ความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและขอกราบพระคุณท่าน คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้คำแนะนำ และตรวจสอบจุดบกพร่องของวิทยานิพนธ์ ตลอดจนความช่วยเหลือจากคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความรู้ที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเดชา ส่งแสง และคุณแม่เรวดี ส่งแสง คอยเป็นกำลังใจที่อยู่เบื้องหลังความสำเร็จ ที่ได้ให้ความช่วยเหลืออบรมสั่งสอน ให้ข้าพเจ้ามีความตั้งใจ พากเพียร ปลูกฝังให้เห็นความสำคัญของการศึกษาเล่าเรียนมาตั้งแต่เยาว์วัย จวบจนปัจจุบัน อีกทั้งสนับสนุนค่าเล่าเรียน คอยให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาทั้งในเรื่องเรียน และเรื่องการใช้ชีวิต ทั้งส่งเสริมให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสในการศึกษาจนบรรลุผลสำเร็จ สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาการ องค์ความรู้ คุณธรรม จริยธรรมแก่ข้าพเจ้า และเพื่อนทุกคน ที่ให้ความร่วมมือและความช่วยเหลือ ซึ่งส่งผลทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดำเนินตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้อย่างสมบูรณ์

อานนท์ ส่งแสง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
Abstract	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญ/๕»	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 กรอบแนวคิด	4
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.3 ความรู้เบื้องต้นของการเกิดฟ้าผ่า	9
2.4 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า	11
2.5 คุณลักษณะฟ้าผ่าพื้นโลก	14
2.6 ผลจากฟ้าผ่า	19
2.7 ความเสียหายจากฟ้าผ่าต่อสิ่งปลูกสร้าง	27
2.8 ลักษณะของฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย	29
2.9 ค่าความชันหน้าคลื่น	31
2.10 ข้อมูลสำหรับการประเมินสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่า	32
2.11 อัตราการเกิดควาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate: BFOR)	35
2.12 แนวทางการปรับปรุงหลักดินเพื่อลดค่าความต้านทานดิน	36

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 หลักการของโปรแกรม ATP-EMTP และการจำลองระบบ	38
3.1 บทนำ	38
3.2 หลักการทั่วไปและความสามารถของโปรแกรม ATP-EMTP	39
3.3 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า	44
3.4 กระบวนการประมวลผลของแบบจำลอง	62
3.5 แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP	63
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	66
4.1 บทนำ	66
4.2 การศึกษาของแบบจำลองในกรณีต่างๆ	66
4.3 สรุปวิธีการทดลองและผลการทดลอง	82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	85
5.1 บทนำ	85
5.2 สรุปผลการวิจัย	86
5.3 ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารอ้างอิง	89
ภาคผนวก ก	93
ภาคผนวก ข	94
ประวัติผู้วิจัย	114



## สารบัญญัตราสาร

ตาราง	หน้า
2.1 จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของรับผิดชอบของ กฟน. เฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2543-2558	33
3.1 ช่วงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า	43
3.2 ข้อมูลตัวแปรสายที่ใช้สร้างแบบจำลอง	47
3.3 ความถี่ของความยาวสายที่พิจารณา	48
3.4 ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ที่นำมาใช้ในแบบจำลอง	51
3.5 ความเร็วคลื่นภายในคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่	51
3.6 คุณลักษณะของการวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของลูกถ้วยในการจำลอง	53
3.7 ความต้านทานจำเพาะของดินแบบต่างๆ	55
3.8 พารามิเตอร์สำหรับหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสา	61
3.9 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง	65
4.1 แรงดันหัวเสา (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต	67
4.2 แรงดันหัวเสา (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต ติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา	67
4.3 แรงดันหัวเสา (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล	68
4.4 แรงดันหัวเสา (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที บนเสาไฟฟ้าประเภทต่างๆ	69
4.5 แรงดันหัวเสา (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที ที่ผลต่อเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา	71
4.6 กระแสวิกฤต (กิโลแอมป์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที ที่มีผลต่อลูกถ้วยจำนวน 4 ลูก	72
4.7 กระแสวิกฤต (กิโลแอมป์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที ที่มีผลต่อลูกถ้วยจำนวน 7 ลูก	72
4.8 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ที่ Td เท่ากับ 116 วันต่อปี กรณีใช้ลูกถ้วยจำนวน 4 ลูก	73
4.9 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ที่ Td เท่ากับ 116 วันต่อปี กรณีใช้ลูกถ้วยจำนวน 7 ลูก	73

## สารบัญญัตินี้ (ต่อ)

ตาราง	หน้า
4.10 แรงดันตกคร่อมพวงลู่กล้วย (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล	74
4.11 แรงดันไฟฟ้าหัวเสา (กิโลโวลต์) ที่มีผลต่อรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล	76
4.12 แรงดันตกคร่อมพวงลู่กล้วย (กิโลโวลต์) ที่มีผลต่อรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล	77
4.13 กระแสวิกฤต (กิโลแอมป์) ที่มีผลต่อรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล	78
4.14 ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤต(%) บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล	79
4.15 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี), Td เท่ากับ 122 วันต่อปี กรณีบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล	80
4.16 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที, ที่สถิติข้อมูลจำนวน วันพายุฟ้าคะนองต่อปีต่างกัน บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล	81
4.17 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี), คลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที, ที่สถิติข้อมูล จำนวน วันพายุฟ้าคะนองต่อปีต่างกัน บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล	82
4.18 ผลประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์	83

## สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า	
1.1	พื้นที่รับผิดชอบในปัจจุบันของการไฟฟ้านครหลวง	1
1.2	ระบบส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง	2
1.3	ประเภทเสาไฟฟ้าที่ใช้ในการติดตั้งสายอากาศเหนือดิน	3
2.1	เมฆฝนฟ้าคะนอง	10
2.2	ลักษณะของการเกิดฟ้าผ่า	11
2.3	การเกิดลัมฟ้าผ่านำทาง	12
2.4	ขั้นตอนของการเกิดฟ้าผ่าสู่ผิวโลก	14
2.5	ฟ้าผ่าลง – ฟ้าผ่าขึ้น	15
2.6	จำนวนฟ้าผ่าซ้ำชั่วลบ-ชั่วบวกจากเครื่องนับฟ้าผ่า	16
2.7	คลื่นกระแสฟ้าผ่าบวก-กระแสฟ้าผ่าลบ	16
2.8	สถิติของกระแสฟ้าผ่าที่บันทึกได้	17
2.9	กระบวนการฟ้าผ่าซ้ำ	18
2.10	เครื่องนับฟ้าผ่า	19
2.11	คลื่นแรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายส่ง	22
2.12	การเกิดแรงดันเกินเมื่อฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้าของระบบสายส่งย่อย	24
2.13	การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเมื่อฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้าของระบบสายส่งย่อย	24
2.14	เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าขณะเกิดฟ้าผ่า	25
2.15	อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่มนุษย์	26
2.16	อันตรายจากแรงดันชวงก้าวและแรงดันสัมผัส	27
2.17	ความเสียหายจากฟ้าผ่าต่อสิ่งปลูกสร้างแยกตามจุดฟ้าผ่า	29
2.18	ฟ้าผ่าโดยตรงที่สายเฟส	30
2.19	ฟ้าผ่าโดยตรงไปที่สายล่อฟ้า	30
2.20	ฟ้าผ่าไปยังจุดใกล้เคียงระบบจำหน่าย	31
2.21	ค่าความชันหน้าคลื่นตามมาตรฐาน IEC60060-1	31
2.22	แผนที่ Isokeraunic Map ข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี	33
2.23	การกระจายแบบสะสมของโอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสฟ้าผ่าขนาดต่างๆ	34

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

ภาพ	หน้า
2.24 เครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน	36
2.25 ผลการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่าศูนย์กลางแห่งหลักดิน	37
2.26 ความยาวแห่งหลักดินต่อค่าความต้านทานดิน	37
3.1 EMTP-ATP Module	43
3.2 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวงที่มีทั้งระบบ 69 กิโลโวลต์ และ 24 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต	45
3.3 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวงที่มีทั้งระบบ 69 กิโลโวลต์ และ 24 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล	46
3.4 แสดงการป้อนข้อมูลแบบจำลองสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ และสายจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต	48
3.5 แสดงการป้อนข้อมูลแบบจำลองสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ และสายจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล	48
3.6 ลักษณะตัวแปรโครงสร้างเสาไฟฟ้าโมโนโพล	50
3.7 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าโมโนโพลและแบบจำลองสายดินเพิ่มนอกเสาส่ง	52
3.8 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีต	52
3.9 ลูกถ้วยที่ใช้ในระบบ 24 กิโลโวลต์ และ 69 กิโลโวลต์	53
3.10 วงจรสมมูลของรากสายดิน	56
3.11 การสร้างแบบจำลองความต้านทานของรากสายดินแบบแบ่ง	56
3.12 การสร้างแบบจำลองตัวเหนี่ยวนำของรากสายดินแบบแบ่ง	56
3.13 การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุของรากสายดินแบบแบ่ง	57
3.14 การติดตั้งสายล่อฟ้าของเสาไฟฟ้าชนิดคอนกรีตในระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์	57
3.15 ลักษณะฐานรากของเสาไฟฟ้าโมโนโพล	58
3.16 การติดตั้งสายล่อฟ้าของเสาไฟฟ้าโมโนโพลในระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์	58
3.17 การติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาส่งระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์	59
3.18 ไดอะแกรมการติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสาส่ง	60
3.19 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่ใช้ในการวิเคราะห์	61

**สารบัญภาพ(ต่อ)**

ภาพ		หน้า
3.20	แบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสฟ้าผ่าขนาด 34.4 กิโลแอมป์ ความชันคลื่น 10/350 ไมโครวินาที	62
3.21	กระบวนการประมวลผลของแบบจำลอง	62
3.22	ไดอะแกรมการจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP	63
3.23	แบบจำลองของโปรแกรม ATP-EMTP บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต ระบบ 69 กิโลโวลต์	63
3.24	แบบจำลองของโปรแกรม ATP-EMTP บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต ระบบ 69 กิโลโวลต์ กรณีการติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา	64
3.25	แบบจำลองของโปรแกรม ATP-EMTP บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ระบบ 69 กิโลโวลต์	64
4.1	ลักษณะแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยของเฟสต่างๆ ขณะเกิดฟ้าผ่าโดยตรงลงสายล่อฟ้า	74



# บทที่ 1

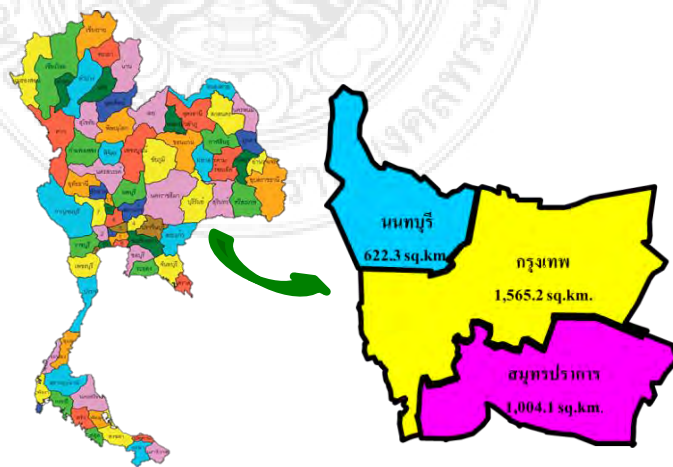
## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) หรือ Metropolitan Electricity Authority (MEA) มีสถานะเป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจที่จัดตั้งขึ้น เมื่อวันที่ 1 สิงหาคม พ.ศ. 2501 ตามพระราชบัญญัติการไฟฟ้านครหลวง พ.ศ. 2501 ในสังกัดภายใต้ความรับผิดชอบของกระทรวงมหาดไทย ซึ่งมีภารกิจดังนี้ คือ

1. ดำเนินธุรกิจไฟฟ้าที่มีคุณภาพ เชื่อถือได้ และปลอดภัย
2. ให้บริการเชิงรุกโดยมุ่งเน้นลูกค้า
3. พัฒนาและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน
4. พัฒนาการบริหารจัดการองค์กรอย่างยั่งยืน รวมทั้งรับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อม

การไฟฟ้านครหลวง มีพื้นที่บริการในปัจจุบันได้แก่ กรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี และ จังหวัดสมุทรปราการ โดยแบ่งออกเป็น 18 เขต และ 14 สาขาย่อย ซึ่งอดีตการไฟฟ้านครหลวงเคยให้บริการจำหน่ายไฟฟ้าครอบคลุมถึงจังหวัดปทุมธานี แต่ภายหลังได้โอนกิจการดังกล่าวให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ปัจจุบันการไฟฟ้านครหลวงพื้นที่บริการประมาณ 3,192 ตารางกิโลเมตร มีผู้ใช้ไฟจำนวน 3,529,651 ราย (มกราคม 2559) มีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุด (Peak Demand) ประมาณ 8,062.95 เมกะวัตต์ (ธันวาคม 2558) [1] ดังภาพที่ 1.1



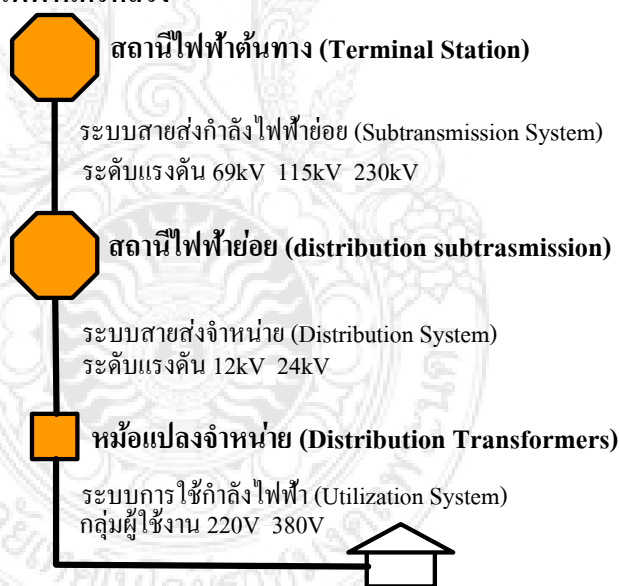
ภาพ 1.1 พื้นที่รับผิดชอบในปัจจุบันของการไฟฟ้านครหลวง

ตามมติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2555 เห็นชอบแผนปรับปรุงและขยายระบบจำหน่ายพลังไฟฟ้า ฉบับที่ 10 ปี 2551 - 2555 (ฉบับปรับปรุง) เพื่อรองรับความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จำนวน 600 เมกะวัตต์ หรืออัตราเพิ่มเฉลี่ยร้อยละ 1.89 ต่อปี วงเงินลงทุนรวม 26,364.92 ล้านบาท และแผนปรับปรุงและขยายระบบจำหน่ายพลังไฟฟ้า ฉบับที่ 11 พ.ศ. 2555 - 2559 เพื่อรองรับความต้องการไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จำนวน 1,361 เมกะวัตต์ หรืออัตราเพิ่มเฉลี่ยร้อยละ 3.08 ต่อปี วงเงินลงทุนรวม 55,167.37 ล้านบาท ตามที่กระทรวงมหาดไทยเสนอ

แผนฉบับที่ 11 ของการไฟฟ้านครหลวง เน้นเรื่องการทบทวนการกำหนดเป้าหมายด้านความเชื่อถือได้ของระบบในลักษณะเชิงรุก การทำความเข้าใจแก่ผู้ใช้ไฟฟ้าเกี่ยวกับวิธีการใช้ไฟฟ้าอย่างประหยัด การประชาสัมพันธ์และด้านการตลาด เป็นต้น

การส่งจ่ายไฟฟ้าพื้นที่บริการของการไฟฟ้านครหลวง ประกอบด้วย 1) ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย ระดับแรงดัน 230 กิโลโวลต์ 115 กิโลโวลต์ และ 69 กิโลโวลต์ 2) ระบบสายส่งจำหน่าย ระดับแรงดัน 12 กิโลโวลต์ และ 24 กิโลโวลต์ ดังภาพที่ 1.2

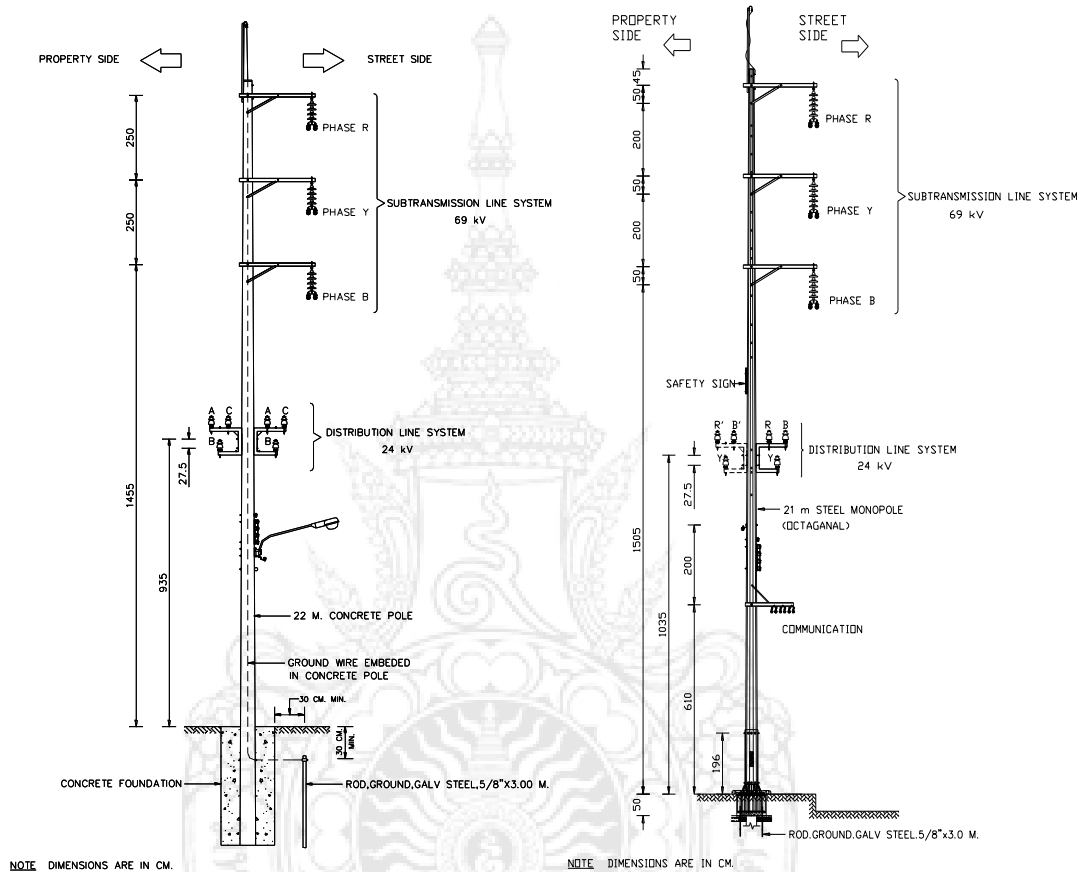
#### การไฟฟ้านครหลวง



ภาพ 1.2 ระบบส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวง

หากพิจารณาที่ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย ของการไฟฟ้านครหลวง 69 กิโลโวลต์ โดยประมาณร้อยละ 94 จะเดินประเภทสายอากาศเหนือดิน ด้วยเสาไฟฟ้าคอนกรีต แต่ในระยะหลังจะเริ่มมีการติดตั้งเสาไฟฟ้าโมโนโพล เพื่อใช้ติดตั้งตามสภาพความเหมาะสมในพื้นที่ เนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งที่ฐานรากน้อยกว่าเสาไฟฟ้าคอนกรีต ประกอบกับข้อจำกัดขอบเขตทาง และอุปสรรคของการติดตั้งใกล้ระบบสาธารณูปโภคที่กีดขวาง การไฟฟ้านครหลวง

จึงดำเนินการติดตั้งระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ บนเสาต้นเดียวกันกับระบบสายส่งจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ โดยส่วนปลายเสาจะติดตั้งสายล่อฟ้า (Overhead Ground Wire :OHGW) เพื่อลดผลกระทบจากฟ้าผ่าให้ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย ซึ่งเป็นปัญหาฟ้าผ่าเป็นปัญหาที่เกิดตามธรรมชาติที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ ลักษณะการติดตั้ง ดังภาพที่ 1.3



(ก) เสาไฟฟ้าคอนกรีต

(ข) เสาไฟฟ้าไมโนโพล

ภาพ 1.3 ประเภทเสาไฟฟ้าที่ใช้ในการติดตั้งสายอากาศเหนือดิน

การเกิดฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย ถือว่าเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการจ่ายไฟฟ้าของระบบจำหน่าย เรียกว่า แรงดันเกินฟ้าผ่า ถือเป็นปัจจัยภายนอกระบบที่ส่งผลกระทบเป็นวงกว้างต่อผู้ใช้ไฟฟ้า ขณะที่เกิดฟ้าผ่าโดยตรงลงบนสายส่งหรือสายจำหน่ายจะเกิดคลื่นแรงดันเกินฟ้าผ่าขนาดใหญ่ที่มีความชันหน้าคลื่นสูงมากตกคร่อมลูกถ้วย เป็นผลทำให้มีโอกาสที่จะเกิดแรงดันวาบไฟตามผิวของลูกถ้วย (Flashover) แต่จากข้อมูลทางสถิติที่มีการจัดเก็บพบว่า ฟ้าผ่าโดยตรงลงบนสายส่งหรือ สายจำหน่ายมีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อย เนื่องจากมีระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยตรงด้วยสายล่อฟ้า ดังนั้นจึงพบว่า สภาวะชั่วคราวส่วนใหญ่ที่เกิดจากสาเหตุนี้มักเป็นผล



มาจากคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่กระทำต่อสายล่อฟ้า หรือวัตถุข้างเคียงแล้วเหนี่ยวนำให้เกิดสภาวะชั่วคราวขึ้นในลักษณะของแรงดันเกินบนระบบจำหน่ายไฟฟ้า ระดับความรุนแรงของแรงดันเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฟ้าผ่า ระยะห่างระหว่างวัตถุที่ถูกฟ้าผ่ากับสายส่งหรือสายจำหน่ายและความเร็วของ Return Stroke เป็นสำคัญในกรณีที่ฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้า นอกจากจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนสายส่งหรือสายจำหน่ายแล้ว ยังจะทำให้มีแรงดันเกินขนาดใหญ่ปรากฏขึ้นที่สายตัวนำลงดินเป็นผล ให้มีโอกาสเกิดการวาบไฟย้อนกลับ (Backflash) และจะนำมาซึ่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าต่อไป

## 1.2 กรอบแนวคิด

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าดัชนี ที่นำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ของการไฟฟ้านครหลวง โดยสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าโมโนโพล และจำลองการเกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายล่อฟ้าด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เพื่อทำการวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

## 1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาการสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าโมโนโพล และจำลองการเกิดฟ้าผ่าในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ด้วยโปรแกรม Alternative Transients Program-Electromagnetic Transients Program (ATP-EMTP)
2. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่นำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง
3. เพื่อทำการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าโมโนโพลของการไฟฟ้านครหลวง

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. สร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าโมโนโพล และจำลองระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ กรณีที่เกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายล่อฟ้า (Overhead Ground Wire) ตรงตำแหน่งหัวเสาและประมวลผลโดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP (Alternative Transients Program-Electromagnetic Transients Program)
2. ประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ของการไฟฟ้านครหลวง

### 1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษามาตรฐานที่ใช้ในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง
2. รวบรวมข้อมูลทางสถิติต่างๆ ที่นำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย
3. ศึกษาทฤษฎีแรงดันเกินเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟ้าผ่า
4. สร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าโมโนโพล และจำลองระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ กรณีที่เกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายล่อฟ้า(Overhead Ground Wire) โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP เพื่อการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย
5. ประมวลผลด้วยโปรแกรมและสรุปผลการทดลอง
6. ศึกษาข้อกำหนด ความหมายที่เกี่ยวข้อง โดยค้นคว้าจากเอกสาร และวรรณกรรมปริทัศน์ในอดีตที่เกี่ยวข้อง
7. รวบรวมข้อมูล เรียบเรียง ตรวจสอบ และจัดทำเอกสารรายงานผลการวิจัยและเผยแพร่เกี่ยวกับวิทยานิพนธ์

### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. สามารถประเมินสมรรถนะระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ของการไฟฟ้านครหลวงได้
2. สามารถสร้างแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมมาช่วยวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังได้
3. นำผลการวิเคราะห์ที่ได้ไปหาค่าดัชนีเพื่อประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์
4. ศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าของระบบ สายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวงต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

เสถียรภาพของระบบไฟฟ้า (Power system stability) คือ ความสามารถของระบบไฟฟ้าที่ยังคงทำงานอยู่ได้อย่างสมดุล ในขณะที่เกิดการรบกวน (Disturbances) ขึ้นในระบบไฟฟ้า และระบบยังต้องสามารถกลับมาสมดุล ที่ยอมรับได้ภายหลังเกิดการรบกวนในระบบไฟฟ้า ซึ่งหน่วยงานที่ทำหน้าที่รับผิดชอบเกี่ยวกับการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าของไทย ได้แก่ การไฟฟ้าฝ่ายผลิต การไฟฟ้านครหลวง และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ได้ให้ความสำคัญ เรื่องเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เพื่อสนองความต้องการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นด้วยคุณภาพและความเชื่อถือได้ให้ดียิ่งขึ้นแต่ถ้าหากระบบไฟฟ้าไม่มีเสถียรภาพ ก็ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าโดยตรง โดยเฉพาะเขตกรุงเทพมหานคร เขตปริมณฑล และเขตนิคมอุตสาหกรรม เป็นต้น

การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) หรือ Metropolitan Electricity Authority (MEA) เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบเกี่ยวกับการผลิตและส่งจ่ายไฟฟ้าในเขตพื้นที่ กรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี และจังหวัดสมุทรปราการ โดยดำเนินธุรกิจไฟฟ้าที่มีคุณภาพ เชื่อถือได้ปลอดภัย ซึ่งข้อมูลในปี พ.ศ. 2559 ของ กฟน. มีการติดตั้งเป็นสายเป็นสายอากาศ (Overhead) ร้อยละ 94 ที่เหลือร้อยละ 6 จะติดตั้งเป็นสายใต้ดิน (Underground) โดยแบ่งระดับแรงดันของการจ่ายไฟฟ้า ดังนี้ คือ [2]

1) ระบบส่งกำลังไฟฟ้าย่อย (Subtransmission System) ซึ่งรับกำลังไฟฟ้ามาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเพื่อส่งกำลังไฟฟ้าให้กับเขตพื้นที่บริการ แบ่งเป็นระดับแรงดัน 230 กิโลโวลต์ 115 กิโลโวลต์ และ 69 กิโลโวลต์

2) ระบบจำหน่าย (Distribution System) ซึ่งจะรับไฟฟ้าจากระบบการส่งกำลังไฟฟ้าย่อยเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นระดับแรงดัน 24 กิโลโวลต์ หรือ 12 กิโลโวลต์

3) ระบบใช้กำลังไฟฟ้า (Utilization System) รับกำลังไฟฟ้าจากระบบการจำหน่ายและแปลงแรงดันลงให้เป็นแรงดันต่ำ คือ 380 โวลต์ สำหรับจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับบริษัท เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ

หากพิจารณาที่ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย ของการไฟฟ้านครหลวง 69 กิโลโวลต์ โดยประมาณร้อยละ 94 จะเดินประเภทสายอากาศเหนือดิน ด้วยเสาไฟฟ้าคอนกรีต แต่ในระยะหลัง เริ่มมีการติดตั้งเสาไฟฟ้าโมโนโพล เพื่อใช้ติดตั้งตามสภาพความเหมาะสมในพื้นที่ เนื่องจากใช้พื้นที่ การติดตั้งที่ฐานรากน้อยกว่าเสาไฟฟ้าคอนกรีต ประกอบกับข้อจำกัดของเขตทาง รวมถึงอุปสรรค ของการติดตั้งใกล้ระบบสาธารณูปโภคที่เกิดขวาง การไฟฟ้านครหลวงจึงดำเนินการติดตั้งระบบ สายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ บนเสาต้นเดียวกับระบบสายส่งจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ โดยส่วนปลายเสาจะติดตั้งสายล่อฟ้าหรือสายดินซึ่งอากาศ เพื่อทำหน้าที่นำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน

แต่ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อยและระบบสายส่งจำหน่าย ที่เดินสายลักษณะการเดิน สายอากาศ (Overhead) ก็มีโอกาสเกิดปัญหาไฟฟ้าขัดข้อง (Interruption) ได้จากการเกิดฟ้าผ่า ซึ่งถือเป็นปัจจัยภายนอกที่ก่อให้เกิดไฟฟ้าขัดข้อง อีกทั้งก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้า ด้วย การเกิดไฟฟ้าขัดข้องเนื่องจากฟ้าผ่านั้น โดยส่วนใหญ่เกิดจากกรณีที่ฟ้าผ่าโดยตรงลง สายล่อฟ้า จะเกิดคลื่นฟ้าผ่า เกิดกระแสฟ้าผ่าที่มีค่ามาก และหากกระแสฟ้าผ่าทำให้แรงดันที่ตก คร่อมลูกถ้วยสูงมากกว่าที่แรงดันที่พวงลูกถ้วยสามารถที่ทนได้ หรือความต้านทานของรากสายดิน มีค่ามาก ซึ่งทำให้แรงดันระหว่างสายเฟสของตัวนำ และสายล่อฟ้าเหนือศีรษะมีค่ามากกว่า แรงดันวาทไฟวิกฤต ก็จะทำให้เกิดการวาทไฟตามผิวลูกถ้วย ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่า การเกิด วาทไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับไปที่ระบบไฟฟ้า (Back flashover) ซึ่งถือเป็นดัชนีที่สำคัญใน การประเมินสมรรถ หรือประเมินประสิทธิภาพของการป้องกันฟ้าผ่าของระบบส่ง

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชูวงศ์ วัฒนศักดิ์ภูบาล [3] นำเสนอการวิจัยเรื่อง “การลดปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้องเนื่อง จากฟ้าผ่าสายส่ง 115 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยการต่อลงดินนอกเสา” โดยการ เชื่อมต่อสายตัวนำระหว่างสายตัวนำล่อฟ้ากับจุดต่อลงดิน นอกเสาเรียกว่าการต่อลงดินนอกเสา เพื่อที่จะลดค่าความต้านทานของรากสายดินและค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา ซึ่งจะส่งผลให้แรงดัน เกินฟ้าผ่าที่ตกคร่อมลูกถ้วย การเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับลดลง และยังสามารถลดความรุนแรง ของเสิร์จที่เดินทางเข้าสู่สถานีจำหน่ายไฟฟ้า

กิตติ เลียงคเรีย [4] นำเสนอบทความเรื่อง “แรงดันเหนียวนำเนื่องจากฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ที่อยู่บนเสาต้นเดียวกับระบบ 115 กิโลโวลต์” ใช้โปรแกรม ATP-EMTP ศึกษาผลของการติดตั้งระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ได้ระบบสายส่ง 115 กิโลโวลต์ บนเสาต้นเดียวกันตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ที่กำหนดให้ความต้านทานดินฐานเสามีค่าไม่เกิน 10 โอห์ม โดยพิจารณาถึงอัตราการเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับที่ถูกด้วยระบบ 22 กิโลโวลต์ จากการศึกษพบว่าโอกาสการเกิดอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับที่ความชันหน้าคลื่น 1, 5 และ 10 มีอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับที่ถูกด้วยระบบ 22 กิโลโวลต์ จำนวน 185, 105 และ 76 ครั้ง/100 กม.-ปี ตามลำดับ

นายดา คล้ายเรือง [5] สุดารัตน์ สมคะเน และอรรถพงษ์ เสาะสุวรรณ นำเสนอเรื่อง “การประเมินสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าเพื่อปรับปรุงระบบป้องกันฟ้าผ่าสายเหนือดิน 115 กิโลโวลต์” เป็นการประเมินหาดัชนีแสดงสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าทั้งก่อนและหลังการปรับปรุง สำหรับระบบป้องกันฟ้าผ่าของสายจำหน่ายเหนือดินระบบ 115 กิโลโวลต์ กับสาย 7 รูปแบบ ตามมาตรฐานการจัดวางสายของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ค่าดัชนีแสดงด้วยอัตราการเกิดวาบไฟที่ผิวนอนเมื่อมุมป้องกันล้มเหลวทำให้ฟ้าผ่าลงสายเฟสตัวนำ และอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับกรณีฟ้าผ่าลงสายดิน ซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงไว้ 5 วิธีด้วยกัน คือ การลดค่าความต้านทานการต่อลงดินที่ฐานเสา เพิ่มจำนวนลูกถ้วยแขวน เพิ่มขนาดสายตัวนำลงดินข้างเสา ลดมุมป้องกันโดยการเพิ่มสายดินเป็น 2 เส้น และการติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่เฟสล่างสุด จากผลการวิเคราะห์พบว่า ก่อนการปรับปรุงระบบป้องกันฟ้าผ่า อัตราการเกิดวาบไฟที่ผิวนอนของการจัดวางสายทุกรูปแบบมีค่าอยู่ในช่วง 13-15 ครั้ง/100 กิโลเมตร/ปี และอัตราการเกิดวาบไฟลดลงเหลือ 4-13 ครั้ง /100 กิโลเมตร/ปี หลังจากปรับปรุง ดังกล่าว

สุชาติ แซ่หลี่ [6] นำเสนองานวิจัยเรื่อง “การวิเคราะห์สมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งด้วยโปรแกรม TFlash” เป็นการวิเคราะห์สมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่ง โดยพิจารณาจากอัตราการเกิดวาบไฟเนื่องจากฟ้าผ่า ที่ทำให้เกิดจากการป้องกันล้มเหลวจากการเกิดวาบไฟย้อนกลับหรือจากแรงดันเกินเหนียวนำ เมื่อฟ้าผ่าลงบริเวณข้างเคียง การศึกษาใช้โปรแกรม TFlash คำนวณอัตราการเกิดวาบไฟของระบบสายส่งดังกล่าว ซึ่งมีระดับแรงดัน

22 กิโลโวลต์ 2 วงจร บนเสาคอนกรีต 22 เมตร ค่าความต้านทานดินที่ฐานเสา 16.4-167.5 โอห์ม ระยะห่างระหว่างเสา 34-80 เมตร สายตัวนำเป็นสายอะลูมิเนียมเปลือย ขนาดพื้นที่หน้าตัด 400 ตารางมิลลิเมตร มีสายล่อฟ้าขนาดพื้นที่หน้าตัด 35 ตารางมิลลิเมตร 1 เส้น ลูกถ้วยฉนวนเป็นชนิดลูกถ้วยแขวนแบบ ค(52-3) ตามมาตรฐาน มอก.354 จำนวน 3 ลูกต่อเฟส มีค่าเฉลี่ยวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤติทางลบ 345 กิโลโวลต์ พิจารณาที่ความชันหน้าคลื่นกระแสฟ้าผ่า 2/50 ไมโครวินาที อัตราการเกิดวาทไฟของระบบสายส่ง 12.813 ครั้ง/ความยาวสาย 100 กิโลเมตร.ปี เมื่อศึกษาการปรับปรุงระบบ โดยกำหนดวงเงินลงทุนไม่เกิน 100,000 บาท ด้วยการติดตั้งอะเรสเตอร์, แท่งกราวด์เพิ่ม

Mamis [7] นำเสนอการวิเคราะห์ Lightning Surge เสาของระบบส่งต้องมีการจำลอง Nonuniform Line แต่สายอากาศจะสมมติให้เป็น Uniform หากพิจารณาผลของการ Sags การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์สายอากาศ ก็จะพิจารณาเป็นแบบ Nonuniform Tower Surge Response จะคำนวณโดยใช้ Nonuniform แบบ Single Phase Line Models ทั้งเสาส่งและสายกราวด์โดยการใส่สภาวะของสายจะได้ผลตอบสนองรวมของระบบใน S-Domain ใช้ Fast Inverse Laplace Transform เพื่อแปลงจาก Frequency เป็น Time Domain ผลของ Losses ถูกนำมาเสนอด้วย

### 2.3 ความรู้เบื้องต้นของการเกิดฟ้าผ่า [8]

การเกิดฟ้าผ่า (Lightning) เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ ที่สร้างความเสียหายให้แก่ชีวิตและทรัพย์สินอย่างมหาศาล ที่เกิดจากการคายประจุ (Discharge) จำนวนมากที่สะสมอยู่ในก้อนเมฆไปยังก้อนเมฆที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง หรือจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลก ที่เป็นไปตามหลักการเกิดดิซชาร์จเบรกดาวนีในก๊าซ การเกิดฟ้าผ่านั้น เริ่มจากการสะสมประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆที่มีอนุภาคที่แตกต่างกันของบรรยากาศ โดยส่วนที่มีอนุภาควัสดุร้อน ไปปะทะกับส่วนที่มีอนุภาคน้ำเย็นกว่า จะสร้างสมลระของน้ำในบรรยากาศให้รวมตัวจนมีสภาพกลายเป็นก้อนเมฆ และสามารถพัฒนาสภาพก้อนเมฆให้กลายเป็น “เมฆฟ้าผ่า” หรือ คิวมูลอนิมบัส คลาวด์ (Cumulonimbus Cloud) ทำให้เกิดเป็นศักย์ไฟฟ้าขึ้นในก้อนเมฆ ตั้งแต่ 10 เมกะโวลต์ ถึง 100 เมกะโวลต์ และถึงจุดวิกฤตจะเกิดการถ่ายเทศักย์ไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก เรียกว่า “ฟ้าผ่า” และหากเกิดการ

ถ่ายเทระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือภายในก้อนเมฆเดียวกัน เรียกว่า “ฟ้าแลบ” เป็นผลทำให้อากาศที่อยู่在线เส้นทางเดินของลำฟ้าผ่าเสียสภาพการเป็นฉนวนไปชั่วขณะหนึ่ง หรือเกิดการเบรกดาวนในอากาศนั่นเอง ดังภาพที่ 2.1

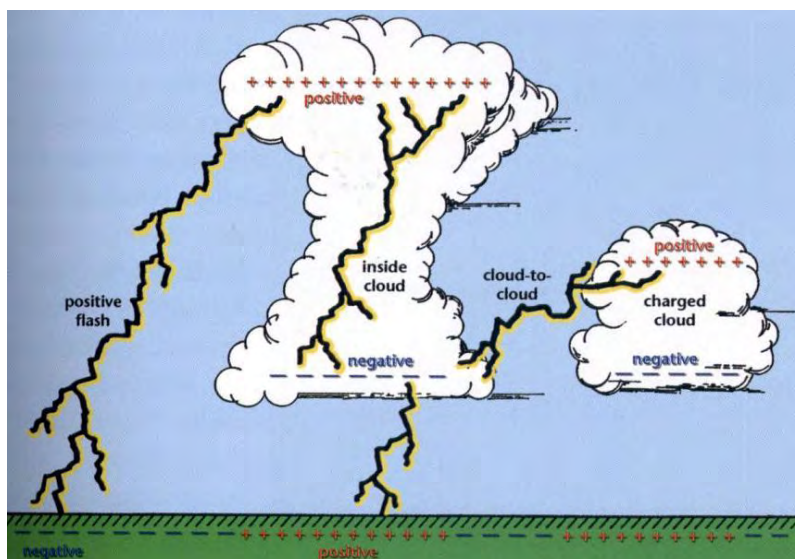


ภาพ 2.1 เมฆฝนฟ้าคะนอง (ถ่ายโดย เฮอริเบิร์ต แคมป์เบลล์)

เมื่อฟ้าผ่าขึ้น จะเกิดจากการปลดปล่อยประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ ซึ่งเกิดจากการเชื่อมโยงบริเวณ 2 แห่งที่มีประจุต่างกันจะพบว่าฟ้าผ่าสามารถเกิดขึ้นอย่างน้อยได้ 4 กรณีตามรูปแบบ ได้แก่ [9]

1. ฟ้าผ่าภายในก้อนเมฆ คือ ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นโดยมีการเชื่อมต่อประจุลบด้านล่างกับประจุบวกด้านบนเข้าด้วยกันภายในก้อนเมฆ ซึ่งฟ้าผ่าแบบนี้เกิดมากที่สุด
2. ฟ้าผ่าจากเมฆก้อนหนึ่งไปยังเมฆอีกก้อนหนึ่ง คือ ฟ้าผ่าที่เกิดจากประจุลบในเมฆก้อนหนึ่งไปยังประจุบวกในเมฆอีกก้อนหนึ่ง
3. ฟ้าผ่าจากฐานเมฆลงสู่พื้น คือ ฟ้าผ่าที่เป็นการปลดปล่อยประจุลบออกจากก้อนเมฆลงสู่พื้นซึ่งเรียกว่า ฟ้าผ่าแบบลบ (Negative Lightning)
4. ฟ้าผ่าจากยอดเมฆลงสู่พื้น คือ ฟ้าผ่าที่เป็นการปลดปล่อยประจุบวกออกจากก้อนเมฆลงสู่พื้นซึ่งเรียกว่า ฟ้าผ่าแบบบวก (Positive Lightning)

กล่าวได้ว่า เมื่อเกิดฟ้าผ่าภายในก้อนเมฆ (แบบที่ 1) และฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆ (แบบที่ 2) นั้นทำให้เมฆเปล่งแสงกะพริบที่เรียกว่าฟ้าแลบ สำหรับฟ้าผ่าที่ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและทรัพย์สินต่างๆ ที่อยู่บนพื้น ได้แก่ ฟ้าผ่าแบบลบ (แบบที่ 3) และฟ้าผ่าแบบบวก (แบบที่ 4) ดังภาพที่ 2.2



ภาพ 2.2 ลักษณะของการเกิดฟ้าผ่า

ผลกระทบจากการเกิดฟ้าผ่า สามารถจำแนกได้ 2 รูปแบบ คือผลกระทบในทางตรง (Direct Lightning) จะสร้างความเสียหายกับชีวิตและสิ่งปลูกสร้าง ที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าได้ผ่าโดยตรงมายังจุดที่เกิดฟ้าผ่า รวมถึงบริเวณใกล้เคียง ซึ่งเกิดกระแสฟ้าผ่าสูงเป็นร้อยกิโลแอมป์ ส่งผลให้เกิดความร้อนสูง โดยเฉพาะที่แกนลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูง ซึ่งสามารถทำให้เกิดเพลิงไหม้แก่สิ่งที่ถูกผ่าได้ และผลกระทบในทางอ้อม (Indirect Lightning) จะเกิดไฟกระชาก (Surge) เกิดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการจ่ายไฟฟ้าของระบบจำหน่าย ทำให้ความเชื่อถือได้ (Reliability) ในระบบการจ่ายไฟลดลง ทำให้ระบบไฟฟ้าขาดความมั่นคง และอาจเกิดฟ้าผ่าดับในที่สุด ซึ่งส่งผลกระทบเป็นวงกว้างต่อผู้ใช้ไฟฟ้า ทั้งนี้ เมื่อเกิดฟ้าผ่าจะมีกระแสสูงเกิดขึ้นอยู่ในช่วงระยะเวลาสั้นและรวดเร็ว จึงทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปรบกวนในระบบสื่อสารด้วย

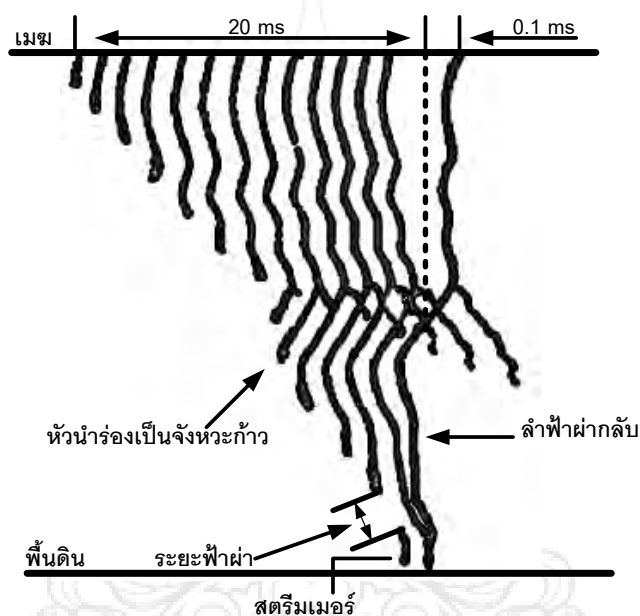
ถึงแม้จะทราบว่าฟ้าผ่านั้นทำให้เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ซึ่งมนุษย์ก็ไม่อาจห้ามการเกิดฟ้าผ่าได้ ดังนั้น ในทางปฏิบัติจะทำได้เพียงหาแนวทาง เพื่อการป้องกันอันตรายอันเนื่องมาจากผลของฟ้าผ่าให้มีประสิทธิผลและประสิทธิภาพ เท่านั้น

## 2.4 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า

การเกิดฟ้าผ่าจะเริ่มต้นในก้อนเมฆที่มีประจุสะสม ระดับสูง 1.5 กิโลเมตร ถึง 10 กิโลเมตรเหนือพื้นโลกซึ่งมีการกระจายของประจุ ที่ฐานของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบ ส่วนบนของก้อนเมฆเป็นประจุบวก โดยจุดเริ่มต้นของการเกิดฟ้าผ่า ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่กลุ่มประจุลบ คือ ที่ฐานของ



ก้อนเมฆเพราะอยู่ใกล้พื้นโลก เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าถึงจุดวิกฤติในก้อนเมฆ จะทำให้เกิดการดีสชาร์จในก๊าซ ส่งผลให้เกิดเป็นหัวนําร่อง หรือลีดเดอร์ (Leader Stroke) มีทิศทางลงสู่พื้นโลก ในลักษณะแบบไม่แน่นอน เมื่อลำฟ้าผ่านลำทางเคลื่อนที่ลงสู่พื้นดินในลักษณะจังหวะก้าว ในทิศทางที่มีการแตกตัวง่ายที่สุด เรียกว่า ลำฟ้าผ่านลำทางเป็นขั้น (Stepped Leader Stroke) มีช่วงก้าวตั้งแต่ 3-200 เมตร และ ค่าเฉลี่ยช่วงก้าว มีค่าประมาณ 50 เมตร ดังภาพที่ 2.3



ภาพ 2.3 การเกิดลำฟ้าผ่านำทาง

เมื่อลำฟ้าผ่านลำทางเคลื่อนที่ใกล้พื้นดิน จะเกิดการเหนี่ยวนำที่พื้นดินและเกิดเป็นสตรีมเมอร์ (Streamer) มีความยาวประมาณ 1-100 เมตร ซึ่งค่าเฉลี่ย มีค่า 20 เมตร วิ่งเข้าสู่ทิศทางของลำฟ้าผ่านลำทางระยะก้าวสุดท้ายที่ลำฟ้าผ่านลำทางเคลื่อนที่กระโดดเข้าหาสตรีมเมอร์นั้นเรียกว่าระยะฟ้าผ่า (Striking Distance) มีระยะเฉลี่ยประมาณ 50 เมตร เมื่อลำฟ้าผ่าพบกับสตรีมเมอร์ เกิดมีแสงจ้าและมีเสียงดังขึ้น เรียกว่าฟ้าผ่าหลังจากนั้นเกิดเป็นลำฟ้าผ่าขนาดใหญ่ขึ้น และเคลื่อนที่จากพื้นดินกลับไปยังก้อนเมฆเรียกว่า ลำฟ้าผ่ากลับ (Return Stroke) ซึ่งการเคลื่อนที่ของประจุในลำฟ้าผ่านั้น หมายถึง ขบวนการเกิดฟ้าผ่านั่นเอง

กระบวนการเกิดฟ้าผ่าสามารถอธิบายขบวนการเกิดฟ้าผ่าตามขั้นตอน ดังนี้ คือ

1. อิเล็กตรอน ซึ่งมีประจุลบ กลุ่มแรกเคลื่อนที่ออกจากบริเวณฐานเมฆลงมา เรียกว่า “กระแสนำกรุยทาง หรือ Pilot Leader” ตามมาด้วยอิเล็กตรอนอื่นๆ ที่เคลื่อนที่ลงมาในลักษณะซิกแซกและแตกแขนงเป็นชั้นๆ เรียกว่า กระแสแบบขั้น หรือ กระแสนำแบบขั้นแต่ ละชั้นยาวประมาณ 50 เมตร และจะคงอยู่นานราว 1 ไมโครวินาทีระหว่างกระแสแต่ละชั้นจะมีช่วงหยุดสั้นๆราว 50 ไมโครวินาที โดยกระแสจะเลือกทิศทางใหม่ที่จะพุ่งออกไป ทำให้สายฟ้ามีลักษณะซิกแซก
2. เมื่อกระแสนำแบบขั้นลงมาใกล้พื้น จะดึงดูดให้ประจุบวกบนพื้นไหลขึ้นมาที่ปลายวัตถุที่อยู่สูง อาทิ ต้นไม้และหลังคาบ้าน กระแสไฟที่เกิดจากประจุบวกนี้เรียกว่า กระแสสตรีมเมอร์ (Streamer)
3. เมื่อกระแสนำแบบขั้น (ประจุลบ) และกระแสสตรีมเมอร์ (ประจุบวก) เคลื่อนที่ มาพบกัน (ที่ความสูงจากพื้นดินในช่วง 30-100 เมตร) ก็จะทำให้ประจุลบเคลื่อนที่ลงไป ในขณะที่เดียวกันประจุบวกก็จะเริ่มไหลจากพื้นดินย้อนขึ้นไปตามช่องทางที่ประจุลบเคลื่อนที่ลงมาก่อนหน้านี้
4. กระแสไฟฟ้าประจุบวกที่ไหลขึ้นนี้เรียกว่า กระแสโต้กลับ (Return Stroke) ประจุบวกในกระแสโต้กลับนี้เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วสูงมากถึง 96,000 กิโลเมตร/วินาที ซึ่งแสงสว่างมองเห็นคือแสงที่เกิดขึ้นเกิดจากกระแสโต้กลับนั่นเอง
5. หากภายในก้อนเมฆยังมีประจุลบเหลืออยู่ เป็นไปได้อีกที่ประจุเหล่านี้จะถ่ายเทลงมาอีก แต่ถ่ายเทประจุครั้งใหม่จะเรียกว่า กระแสนำฉับพลัน (Dart Leader) เพราะจะไหลลงมาตามช่องทางเดิมที่มีอยู่ก่อนแล้ว (ไม่ซิกแซกแตกแขนงเหมือนกระแสนำแบบขั้น) เมื่อกระแสนำฉับพลันลงมาใกล้พื้น ก็จะเหนี่ยวนำกระแสสตรีมเมอร์ชุดใหม่จากพื้นอีกครั้งกระบวนการถ่ายเทประจุตามเส้นทาง ของสายฟ้าในเส้นแรกนี้อาจเกิดขึ้นได้หลายครั้งภายในเวลาไม่ถึงครึ่งวินาที ทำให้สายฟ้าดูเหมือนเกิดการกระพริบ



ก) กระบวนการเกิดฟ้าผ่าขั้นที่ 1 ข) กระบวนการเกิดฟ้าผ่าขั้นที่ 2 ค) กระบวนการเกิดฟ้าผ่าขั้นที่ 3



ง) กระบวนการเกิดฟ้าผ่าขั้นที่ 4 จ) กระบวนการเกิดฟ้าผ่าขั้นที่ 5

ภาพ 2.4 ขั้นตอนของการเกิดฟ้าผ่าสู่ผิวโลก (ภาพจาก [www.srn.noaa.gov](http://www.srn.noaa.gov))

## 2.5 คุณลักษณะฟ้าผ่าพื้นโลก [10]

คุณลักษณะที่สำคัญของฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกสามารถอธิบายได้ด้วยลักษณะดังต่อไปนี้

1. ฟ้าผ่าลงหรือฟ้าผ่าขึ้น
2. ขั้วของกระแสฟ้าผ่า
3. ลักษณะรูปคลื่นฟ้าผ่า
4. ขนาดของกระแสฟ้าผ่า
5. ฟ้าผ่าซ้ำ

### 2.5.1 ฟผ่าล่างหรือฟผ่าขึ้น

ฟผ่าล่าง คือปรากฏการณ์ธรรมชาติ ที่เกิดจากการคายประจุในก้อนเมฆลงสู่พื้นโลก ตามกระบวนการข้างต้นที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น การเกิดฟผ่าจะมีกระบวนการในระยะเวลาอันสั้น และรวดเร็วมาก โดยกระบวนการเกิดจะไม่สามารถสังเกตเห็นขั้นตอนได้ แต่สามารถพิจารณาได้จากลำแสงของฟผ่า ยกตัวอย่างเช่น กรณีเกิดฟผ่าล่าง จะสังเกตเห็นลำฟผ่ากระจายลงสู่พื้นโลก ที่มีลักษณะเป็นเส้นแตกแขนงคล้ายรากต้นไม้ ดังภาพที่ 2.5



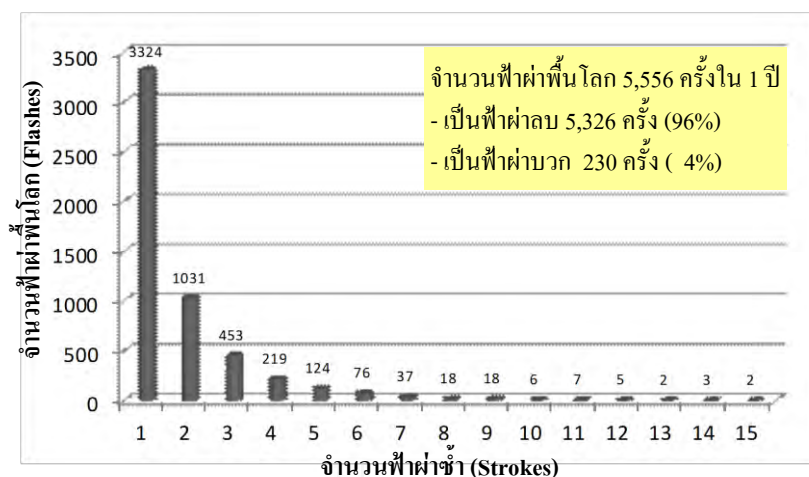
(ก) ฟผ่าล่าง (ภาพโดย National Geographic)      (ข) ฟผ่าขึ้น (ภาพโดย Tom A. Warner)

### ภาพ 2.5 ฟผ่าล่าง – ฟผ่าขึ้น

การเกิดฟผ่าอาจจะเริ่มผ่าจากพื้นโลกไปสู่ก้อนเมฆ โดยลำแสงของฟผ่าจะมีลักษณะคล้ายรากต้นไม้ เรียกว่าฟผ่าขึ้น นั่นคือ หัวนำร่องจะเริ่มก่อตัวจากวัตถุ หรือสิ่งปลูกสร้างสูงๆ โดยเริ่มจากยอดโครงสร้างที่สูงจากพื้นดินตั้งแต่ 100 เมตรขึ้นไป เช่น ยอดเสาส่งสัญญาณโทรทัศน์ หอคอย สิ่งปลูกสร้างที่อยู่บนยอดเขาสูง และมีกระบวนการคืบหน้าของหัวนำร่องในทิศทางขึ้นไปสู่ก้อนเมฆ จากการสังเกตจะพบว่าฟผ่าขึ้นมักจะเป็นผลสืบเนื่องจากฟผ่าล่าง ซึ่งฟผ่าอาจเกิดขึ้นได้ทั้ง 2 กรณี

### 2.5.2 ขั้วของฟผ่าเป็นบวกหรือลบ

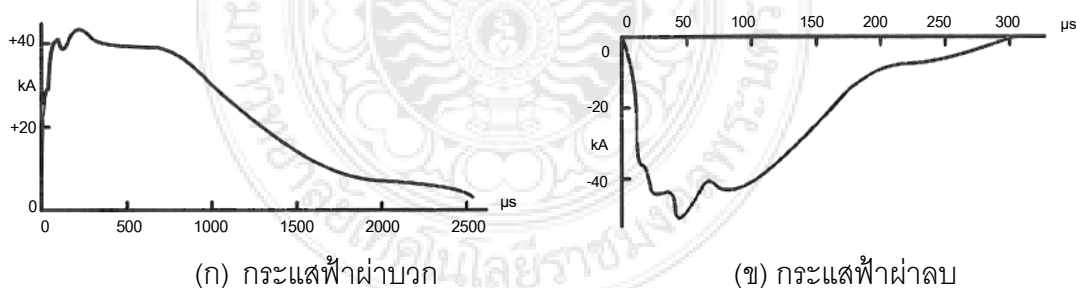
“ฟผ่าลบ” หมายถึงการเกิดฟผ่าโดยที่ลำฟผ่าที่นำประจุลบจากก้อนเมฆลงไปสู่พื้นโลก ในทางกลับกัน หากเกิดฟผ่าโดยที่ลำฟผ่าที่นำประจุบวกจากก้อนเมฆลงไปสู่พื้นโลก จะเรียกว่า “ฟผ่าบวก” โดยจากข้อมูลการเกิดฟผ่าที่บันทึกได้ในต่างประเทศพบว่า มากกว่าร้อยละ 80 ลักษณะฟผ่าที่เกิดขึ้นเป็นฟผ่าลบ และฟผ่าลบมักเป็นฟผ่าซ้ำหลายลำ ส่วนฟผ่าบวกมักเป็นลำฟผ่าเดี่ยว ดังนั้น สรุปได้ว่ากระแสฟผ่ามีลักษณะเป็นกระแสที่ไหลในทางเดียว (Unidirection) นั่นคือ อาจเกิดเป็นขั้วฟผ่าบวกหรือลบก็ได้ ดังภาพที่ 2.6



ภาพ 2.6 จำนวนฟ้าผ่าซ้ำซ้ำลบ-ซ้ำบวกจากเครื่องนับฟ้าผ่า

### 2.5.3 ลักษณะรูปคลื่นฟ้าผ่า

หากพิจารณาลักษณะของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่า อาจพิจารณาได้จากเวลาช่วงหน้าคลื่น และเวลาช่วงหางคลื่น โดยเวลาช่วงหน้าคลื่น หมายถึง เวลาที่กระแสเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนถึงค่ายอดสูงสุดของคลื่น ส่วนเวลาช่วงหางคลื่น หมายถึง เวลาตั้งแต่เริ่มต้นคลื่นจนถึงค่าที่กระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด ลักษณะที่สำคัญของช่วงหน้าคลื่น คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส เรียกว่า ความชัน ( $di/dt$ ) มีหน่วยเป็นกิโลแอมป์ต่อไมโครวินาที และเมื่อฟ้าผ่าจะมีค่าความเหนี่ยวนำในอุปกรณ (Self Inductance) ทำให้เกิดแรงดันเกินตกคร่อมหรือแรงดันเหนี่ยวนำที่อุปกรณส่งผลให้เกิดความเสียหาย  $V = L(di/dt)$  ถือเป็นสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบสายล่อฟ้า ลักษณะคลื่นฟ้าผ่าดังภาพที่ 2.7

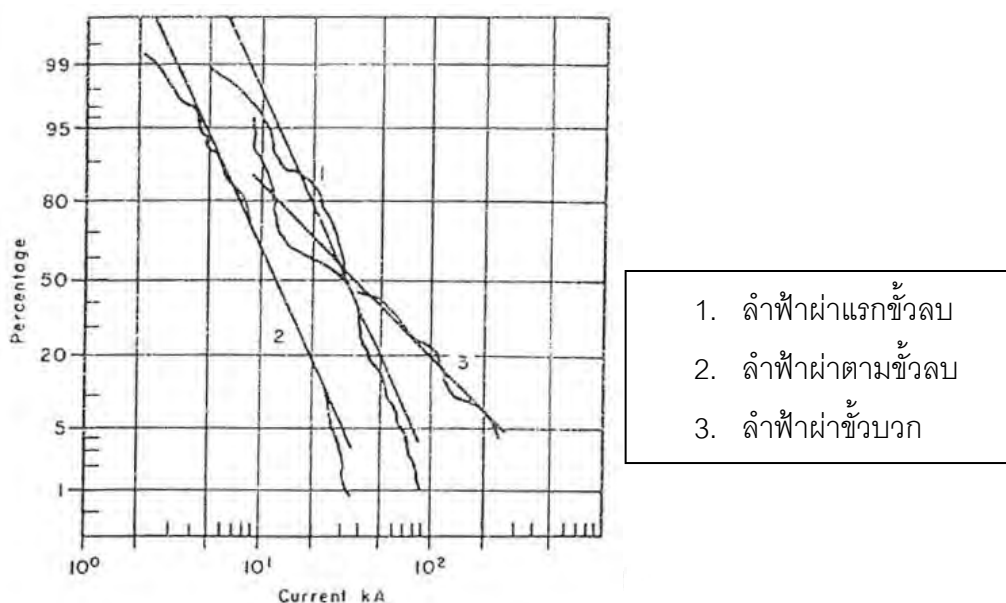


ภาพ 2.7 คลื่นกระแสฟ้าผ่าบวก-กระแสฟ้าผ่าลบ

### 2.5.4 ขนาดของกระแสฟ้าผ่า

ขนาดของกระแสฟ้าผ่า หมายถึง การวัดค่ายอดของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ซึ่งขนาดของกระแสฟ้าผ่าจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของประจุดีสชาร์จและขึ้นอยู่กับช่วงของกระแสฟ้าผ่าว่าเป็นบวกหรือลบ โดยตัวอย่างจากการบันทึกข้อมูลฟ้าผ่าระหว่างปี 1963 ถึง

1971 ที่วัดได้ในประเทศ สวิตเซอร์แลนด์ จากสถานีวิจัยฟ้าผ่าบนยอดเขา San Salvatore ที่อยู่ทางภาคใต้ของประเทศ พบว่ากระแสฟ้าผ่ามีค่าเฉลี่ย (ที่ความน่าจะเป็น 50%) ชั่วลบประมาณ 30 กิโลแอมป์ สำหรับฟ้าผ่าลำแรก และลำฟ้าผ่าตามชั่วลบประมาณ 12 กิโลแอมป์ และโดยเฉลี่ยของฟ้าผ่าบวกประมาณ 35 กิโลแอมป์ ดังภาพที่ 2.8



ภาพ 2.8 สถิติของกระแสฟ้าผ่าที่บันทึกได้

หากพิจารณาขนาดค่าสูงสุดของกระแสฟ้าผ่าตาม EIT Standard 2007-53 [11] ตามระดับการป้องกันฟ้าผ่า โดยที่ฟ้าผ่าลำแรกจะมีขนาดกระแส 200 กิโลแอมป์ ความชันหน้าคลื่น 10/350 ไมโครวินาที (ความหมายคือที่กระแสฟ้าผ่า 200 กิโลแอมป์ ด้วยคลื่น 10/350 ไมโครวินาที นั้น คือการเกิดกระแสฟ้าผ่าสูงสุด 200 กิโลแอมป์ ภายในระยะเวลา 10 ไมโครวินาที และมีขนาดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งเมื่อระยะเวลาผ่านไป 350 ไมโครวินาที) และที่ฟ้าผ่าลำถัดมา มีขนาดกระแส 50 กิโลแอมป์ ความชันหน้าคลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที จะสังเกตได้ว่าฟ้าผ่าลำแรกจะมีขนาดกระแสสูงกว่าฟ้าผ่าลำถัดมา

### 2.5.5 จำนวนฟ้าผ่าซ้ำหลายลำ

โดยธรรมชาติของการเกิดฟ้าผ่า จะมีลักษณะเป็นได้ทั้งการผ่าหรือดิสชาร์จเพียงครั้งเดียวในการเกิดฟ้าผ่า 1 ครั้ง หรือเป็นการผ่าหรือดิสชาร์จหลายๆ ครั้งต่อการเกิดขึ้นของฟ้าผ่า 1 ครั้ง ซึ่งจะเรียกว่า การเกิดฟ้าผ่าซ้ำ หรือ Multi-Stroke การเกิดฟ้าผ่าซ้ำหรือ Multi-Stroke สามารถตรวจสอบได้โดยการใช้เครื่องมือวัดเฉพาะทางหรือการจับภาพด้วยกล้องถ่ายภาพที่มี

ความไวสูง และลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของฟ้าผ่าก็คือ จำนวนฟ้าผ่าซ้ำซ้อนในแต่ละครั้ง โดยถ้าสังเกตดูลำฟ้าผ่าขณะที่เกิดฟ้าผ่า จะพบว่า มีลำฟ้าผ่าซ้ำตามแนวลำฟ้าผ่าครั้งแรกๆ ซึ่งบางทีก็มีการผ่าซ้ำหลายครั้ง ปรากฏการณ์นี้อาจอธิบายได้ว่า ในก้อนเมฆอาจมีศูนย์กลางรวมกลุ่มของประจุหลายแห่ง และเมื่อกลุ่มประจุใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤติก่อน ก็จะได้สสารจลลงสู่พื้นโลกเป็นลำฟ้าผ่าแรก ดังภาพที่ 2.9



ภาพ 2.9 กระบวนการฟ้าผ่าซ้ำ (ภาพโดยบัญชา ธนบุญสมบัติ)

ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของฟ้าผ่าก็คือ จำนวนฟ้าผ่าซ้ำซ้อนในแต่ละครั้ง เมื่อลำฟ้าผ่าวิ่งไปตามแนวที่เกิดการแตกตัวของอากาศระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดินแล้ว เนื่องจากกระแสมีค่าสูงมากและไหลอยู่เป็นเวลานาน เช่นเมื่อผ่าลงมาแล้วถึง 10 มิลลิวินาที แต่ยังคงมีกระแสไหลอยู่ถึง 200-300 แอมป์ หรือแม้ว่ากระแสจะหยุดไหลไปแล้วตั้ง 10 - 100 มิลลิวินาที ก็ตามแต่อากาศในแนว ที่ลำฟ้าผ่าวิ่งผ่านลงมานั้นยังไม่คืนตัวเป็นฉนวนได้ทันที จึงเป็นเหตุให้ประจุในก้อนเมฆที่เกิดขึ้นใหม่สามารถคายประจุติดต่อกันได้อีกซึ่งเรียกว่าฟ้าผ่าตาม ซึ่งอาจเกิดซ้ำซ้อนได้หลายครั้ง ฟ้าผ่าตามนี้จะสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีแขนง จากการบันทึกข้อมูลฟ้าผ่าของการผ่าซ้ำซ้อนหลายๆ ครั้งพบว่าประมาณร้อยละ 30-60 เป็นการผ่าซ้ำซ้อน 2 ครั้ง ร้อยละ 20 เป็นการผ่าซ้ำซ้อน 5 ครั้ง และการผ่าซ้ำซ้อนอาจผ่าซ้ำได้ถึง 40 ครั้ง แสดงภาพตัวอย่างเครื่องนับฟ้าผาดังภาพที่ 2.10



ภาพ 2.10 เครื่องนับฟ้าผ่า

(ภาพจาก <http://indelec-ua.com.ua/>)

## 2.6 ผลจากฟ้าผ่า

เมื่อเกิดฟ้าผ่าขึ้นสามารถก่อให้เกิดอันตรายโดยตรงและทางอ้อม ซึ่งสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

### 2.6.1 ผลทางความร้อน

### 2.6.2 ผลทางแรงกล

### 2.6.3 ผลทางไฟฟ้า

#### 2.6.1 ผลทางความร้อน

ความร้อนที่เกิดจากฟ้าผ่า ทำให้เกิดเพลิงไหม้แก่สิ่งที่ถูกฟ้าผ่า โดยความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถสังเกตได้จากลำแสงจ้าของฟ้าผ่า ซึ่งแกนของลำแสงมีเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเซนติเมตร และมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 เคลวิน จะก่อให้เกิดเพลิงไหม้แก่วัสดุติดไฟได้ แม้ว่าช่วงระยะเวลาไหลของกระแสจะสั้นรวดเร็วก็ตาม แต่หากเกิดฟ้าผ่าลงบนโลหะ มักจะมีรอยรอยของการถูกฟ้าผ่าเกิดขึ้นตรงตำแหน่งที่ผ่า ที่เป็นเช่นนี้เพราะ กระแสฟ้าผ่า เมื่อแปลงเป็นพลังงานความร้อน จะมีค่ามากพอทำให้ประจุเกิดการสีกกร่อนทางอาร์ค ส่งผลให้โลหะหลอมละลาย เกิดประกายไฟที่เกิดจากแรงดันเกินที่คาบเกี่ยวทางความต้านทานและความเหนียวหนา เนื่องจากการไหลผ่านของกระแสฟ้าผ่า บางส่วนอีกทั้งก่อให้เกิดการแผ่รังสีความร้อนขณะฟ้าผ่า (Thermal Radiation) อีกด้วย



## 2.6.2 ผลทางแรงกล

ผลกระทบที่เกิดจากฟ้าผ่าอีกประการหนึ่ง คือการเกิดแรงกลระเบิด ที่เกิดขึ้นในขณะที่เกิดความร้อนจากฟ้าผ่า ส่งผลให้เกิดความเสียหายทางกลทันที อาจเกิดไฟไหม้และ/หรือการระเบิด เนื่องจากความร้อนจากอาร์ก พลาสมาฟ้าผ่าเอง เป็นผลจากการที่กระแสไหลผ่านค่าความต้านทานตัวนำที่เกิดความร้อนเกิน จะทำให้เกิดแรงบิดขึ้นแก่ตัวนำ ซึ่งเป็นแรงดึงดูหรือแรงผลัก ทั้งนี้ ผลทางกลที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าขึ้นอยู่กับขนาดและช่วงเวลาของกระแส และคุณลักษณะยืดหยุ่นของโครงสร้างทางกลที่ได้รับผลกระทบ ผลทางกลยังขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนของระบบป้องกันฟ้าผ่าที่สัมผัสกัน นอกจากนี้ฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงมาก จนทำให้อากาศโดยรอบมีอุณหภูมิสูงด้วยนั้น ฟ้าผ่าจะขยายตัวออกอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดคลื่นความดันในย่านความเร็วเหนือเสียงแผ่กระจายออกไป รอบลำฟ้าผ่า เกิดเป็นเสียงดังสนั่นหวั่นไหว เรียกว่า ฟ้าร้อง

การหลอมละลาย ของโลหะสามารถคำนวณผลทางความร้อนต่อผิวโลหะ ณ จุดที่ลำฟ้าผ่าเกาะอยู่เพื่อความง่ายในการคำนวณ มาตรฐานนี้จะใช้เฉพาะแบบจำลองแรงดันตกคร่อมแอโนดหรือแคโทด โดยป้อนพลังงานที่จุดกำเนิดอาร์ก ให้มีค่าเท่ากับ แรงดันตกคร่อมแอโนด/แคโทด คูณกับประจุของกระแสฟ้าผ่าปริมาตรของโลหะที่หลอมเหลว จากการอาร์ก เมื่อกระแสฟ้าผ่าเปลี่ยนแปลงไปเป็นพลังความร้อน ซึ่งเป็นสมการที่นำไปสู่การประเมินปริมาตรหลอมเหลวของโลหะ สามารถคำนวณได้จากสมการ 2.1 [11]

$$W = U \int_0^{\infty} i dt = U_{a,c} \cdot Q \quad (2.1)$$

$$V = \frac{u_{a,c} Q}{\gamma} \cdot \frac{1}{C_w (\theta_s - \theta_u) + c_s} \quad (2.2)$$

เมื่อ	$W$	คือ	พลังงานที่จุดกำเนิดอาร์ก
	$V$	คือ	ปริมาตรของโลหะที่หลอมเหลว (ลูกบาศก์เมตร)
	$U_{a,c}$	คือ	แรงดันตกคร่อมแอโนด/แคโทด จะมีค่าคงที่ 20-30 โวลต์ (โวลต์)
	$Q$	คือ	ประจุของกระแสฟ้าผ่า (คูลอมบ์)

$\gamma$	คือ	ความหนาแน่นของวัสดุ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
$C_w$	คือ	ความจุความร้อน (จูล/กิโลกรัม-เคลวิน)
$\theta_s$	คือ	อุณหภูมิหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)
$\theta_u$	คือ	อุณหภูมิแวดล้อม (องศาเซลเซียส)
$c_s$	คือ	ความร้อนแฝงของการหลอมเหลว (จูล/กิโลกรัม)

ในกรณีทราบชนิดของโลหะก็สามารถคำนวณปริมาตรของโลหะที่หลอมละลายได้ เช่น

ทองแดงได้	5.4	ลูกบาศก์มิลลิเมตร
อะลูมิเนียมได้	12	ลูกบาศก์มิลลิเมตร
เหล็กได้	4.4	ลูกบาศก์มิลลิเมตร

ดังนั้น ในการออกแบบสายล่อฟ้า ซึ่งเป็นจุดที่ให้ฟ้าผ่าลงและมีสายตัวนำลงดิน ทำหน้าที่เป็นตัวนำให้กระแสฟ้าที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสู่ระบบรากสายดินโดยเร็วที่สุด โดยจะต้องไม่ทำให้สายตัวนำลงดินหลอมละลาย หรือเกิดความร้อน จนเป็นเหตุให้เกิดเพลิงไหม้ นั้นหมายถึง สายตัวนำลงดิน จะต้องมียี่พื้นที่ภาคตัดขวางขนาดโตพอ นั้นเอง

### 2.6.3 ผลทางไฟฟ้า

#### การรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference : EMI)

การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า คือ การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ทำให้การทำงานของ อุปกรณ์ ระบบ และเครื่องมือ ทำงานผิดพลาดจะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความไวต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำ ถ้าแรงดันเหนี่ยวนำสูงพอก็อาจเกิดการสปาร์กได้

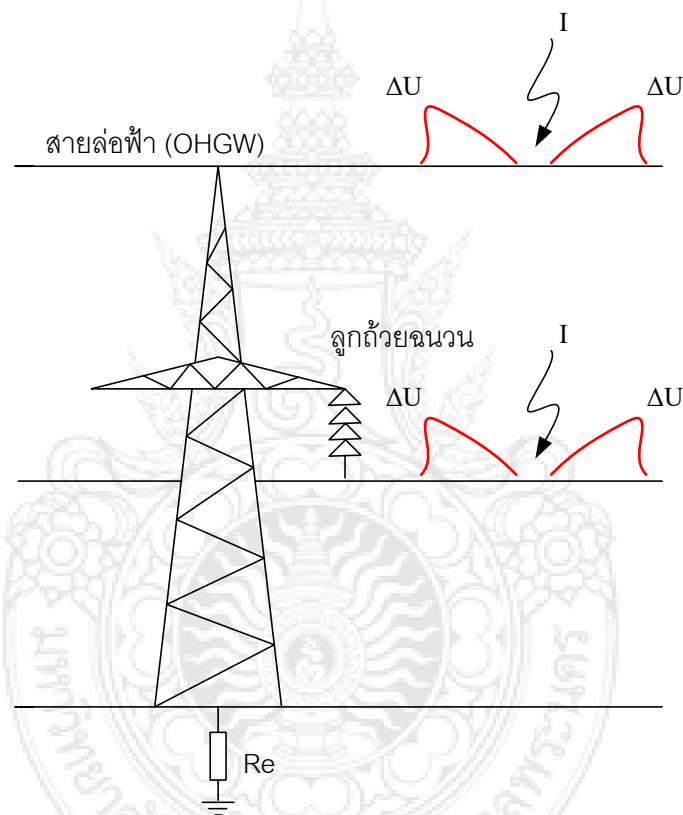
#### แรงดันสปาร์กต้านข้าง

ถ้ากระแสฟ้าผ่าไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ และมีความต้านทานของดิน จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำ และความต้านทาน ซึ่งอาจคำนวณได้จากสมการ 2.3 – 2.4

$$\Delta U = i \cdot \left( \frac{Z_w}{2} \right) \quad (2.3)$$

$$\Delta U = R_c i + L \left( \frac{di}{dt} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อ	$\Delta U$	คือ	แรงดันเกินเสิร์จฟ้าผ่า (กิโลโวลต์)
	$i$	คือ	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)
	$R_e$	คือ	ความต้านทานรากสายดิน (โอห์ม)
	$Z_w$	คือ	เสิร์จอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
	$L$	คือ	ความเหนี่ยวนำของเสาไฟฟ้า (เฮนรี่)
	$\frac{di}{dt}$	คือ	ความชันของคลื่นกระแสฟ้าผ่า (ไมโครวินาที)



ภาพ 2.11 คลื่นแรงดันเกินที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายส่ง

ถ้าหากความต้านทานของรากสายดิน หรือความเหนี่ยวนำของสายตัวนำลงดินมีค่าสูง จะทำให้ศักย์ไฟฟ้า  $\Delta U$  มีค่าสูงอาจมากพอที่จะทำให้เกิดสปาร์กด้านข้าง หรือกระโดดเข้าหาส่วนที่ต่อลงดินอย่างดี ซึ่งการเกิดสปาร์กด้านข้างนี้อาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ ถ้ามีสิ่งที่เป็นเชื้อเพลิงอยู่ในบริเวณนั้น โดยความเร็วคลื่นในสายซึ่งอากาศ จะมีค่าเร็วประมาณความเร็วแสงคือ 300 เมตรต่อไมโครวินาที

### แรงดันเกินบนสายส่งจ่าย [12]-[13]

ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยตรง ย่อมทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายส่ง คือ ล้ำฟ้าผ่าเปรียบเสมือนเป็นต้นกำเนิดของตัวจ่ายกระแส เมื่อมีกระแสฟ้าผ่าวิ่งลงบนสายส่ง ซึ่งมีค่าเสรีจิมพีแดนซ์  $Z_w$  จะเกิดแรงดันสูงเป็นคลื่นจร วิ่งไปบนสายส่งทั้งสองทางของจุดที่ผ่าลง ดังสมการ 2.3 แรงดันเกินเสรีจฟ้าผ่านี้ เมื่อวิ่งไปถึงจุดที่มีอุปกรณ์ไฟฟ้าต่ออยู่ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า อาจทำให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์เหล่านั้นได้ คำนวณได้จาก 2.6

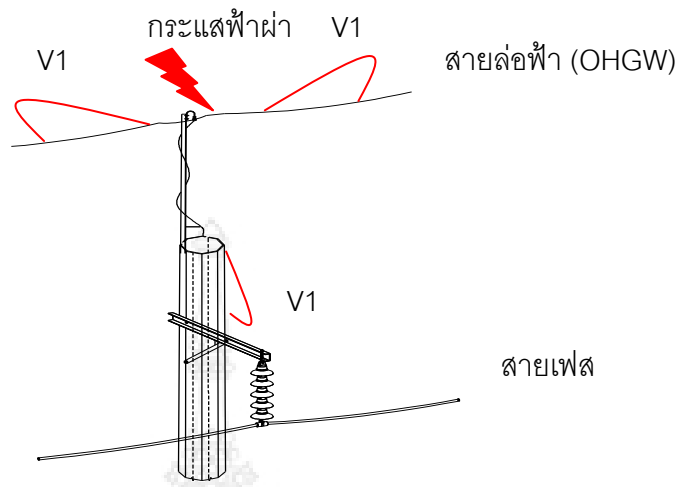
$$V_1 = Z_{total} \cdot I \quad (2.5)$$

$$V_p = k \cdot V_1 \quad (2.6)$$

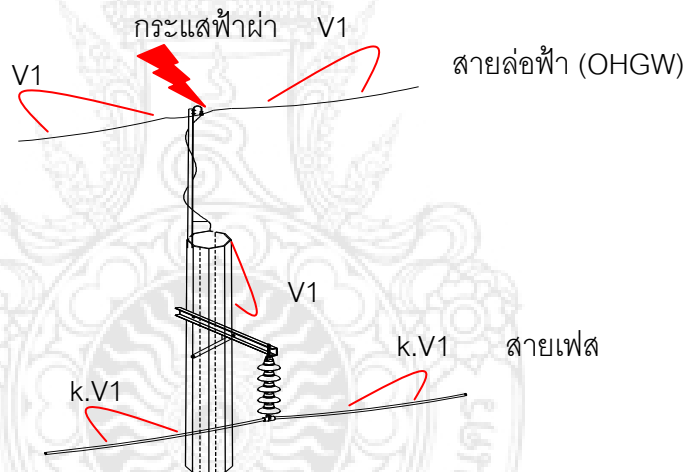
เมื่อ	$V_p$	คือ	แรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟส (กิโลโวลต์)
	$V_1$	คือ	แรงดันในล่อฟ้า (กิโลโวลต์)
	$I$	คือ	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)
	$Z_{total}$	คือ	เสรีจิมพีแดนซ์รวม (โอห์ม)
	$k$	คือ	Coupling Factor มีค่าประมาณ 0.2-0.3

จากภาพ 2.11 กรณีฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้าที่ซึ่งอยู่เหนือสายส่งกำลัง โดยสายล่อฟ้าทำหน้าที่ป้องกันมิให้เกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งกำลังโดยตรง เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า หากตัวนำลงดิน หรือเสาไฟฟ้ามีความเหนี่ยวนำ ค่าความต้านทานของรากสายดินมีค่าสูง จะทำให้เกิดแรงดันเกินซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.5 และอาจมีค่าสูงมากพอที่จะทำให้การเกิดวาบไฟตามผิวของพวก ลูกถ้วยฉนวน ที่ใช้ยึดหรือรองรับสายไฟได้ เรียกว่า เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Backflash Over) เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน อาจทำให้เกิดการเจาะทะลุบนลูกถ้วยฉนวน เกิดลัดวงจรลงดินเกิดความผิดปกติขึ้นในระบบล้วนแล้วแต่กระทบต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ในระบบส่งจ่าย

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้า ทำให้เกิดแรงดันในสายล่อฟ้า ( $V_1$ ) และเกิดเหนี่ยวนำในสายเฟส ( $V_p$ ) ซึ่งจะมีค่าประมาณ 20-30% ของแรงดันเกินในสายดิน แรงดันในสายดินสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.5 ดังภาพที่ 2.12 - 2.13



ภาพ 2.12 การเกิดแรงดันเกินเมื่อฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้าของระบบสายส่งย่อย



ภาพ 2.13 การเกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายเฟสเมื่อฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้าของระบบสายส่งย่อย

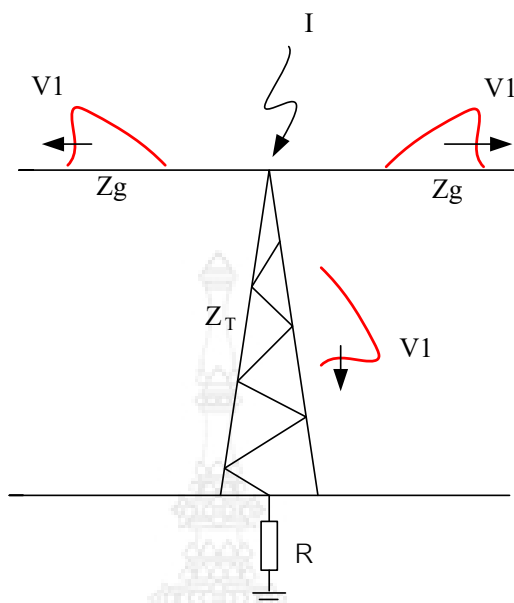
โดยเสิร์จอิมพีแดนซ์รวม คำนวณได้จากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินและเสาขนานกัน

ตามสมการที่ 2.7 [14]

$$Z_{\text{total}} = \frac{Z_g \cdot Z_T}{(Z_g + 2Z_T)} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $Z_g$  คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน (โอห์ม)

$Z_T$  คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา (โอห์ม)



ภาพ 2.14 เสรีจิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าขณะเกิดฟ้าผ่า

แรงดันคร่อมฉนวนลูกถ้วย คำนวณได้จากสมการ 2.8 โดยแรงดันคร่อมฉนวน ขึ้นอยู่กับแรงดันเกินในสายดิน ซึ่งมีผลมาจากเสรีจิมพีแดนซ์ของสายดิน เสรีจิมพีแดนซ์ของเสา และกระแสฟ้าผ่า ดังนั้นเมื่อเกิดฟ้าผ่าบนสายเฟสหรือสายดินอาจทำให้เกิดโคโรนา ซึ่งจะเสมือนขนาดสายเพิ่มขึ้นทำให้ค่า Coupling Factor เพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยลดลง

$$V_{ins} = V_1 - V_P = (1 - k) \cdot V_1 \quad (2.8)$$

เมื่อ  $V_{ins}$  คือ แรงดันตกคร่อมฉนวนลูกถ้วย

หากพิจารณาเฉพาะแรงดันเกินที่เกิดขึ้นที่สายดิน และแรงดันเกินเหนี่ยวนำที่สายเฟสจะทำให้การเกิดวาปไปตามผิวฉนวนของลูกถ้วยนั้นเกิดขึ้นได้ง่าย ในทางปฏิบัติผลของการเกิดแรงดันเกินยังมีในส่วนของความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาเป็นปัจจัยหนึ่งในการส่งผลต่อการเกิดแรงดันเกิดดังกล่าวด้วย เพราะฉะนั้นจึงควรคำนึงถึงความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาดังกล่าวด้วย

### แรงดันเกินในระบบแรงดันต่ำ

แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในลักษณะที่กล่าวแล้วข้างต้น อาจเกิดขึ้นในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงต่ำได้ เช่นกัน แรงดันดังกล่าวนี้ อาจจะมีค่าไม่สูงเหมือนเช่นที่เกิดในระบบสายส่งกำลังแรงสูง แต่มีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดความสูญเสียแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในบ้าน ภายในอาคารสำนักงาน หรือโรงงาน

เพราะอุปกรณ์แรงต่ำเหล่านี้ การชนวนมีค่าต่ำ ไม่อาจจะทนแรงดันเกินที่มีค่าเป็นสิบบากิโลโวลต์ได้ และถ้ายังเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น ยิ่งมีความไวต่อแรงดันเกินเป็น อย่างยิ่งย่อมก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์เหล่านี้ได้ง่าย

### อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่มนุษย์โดยตรง

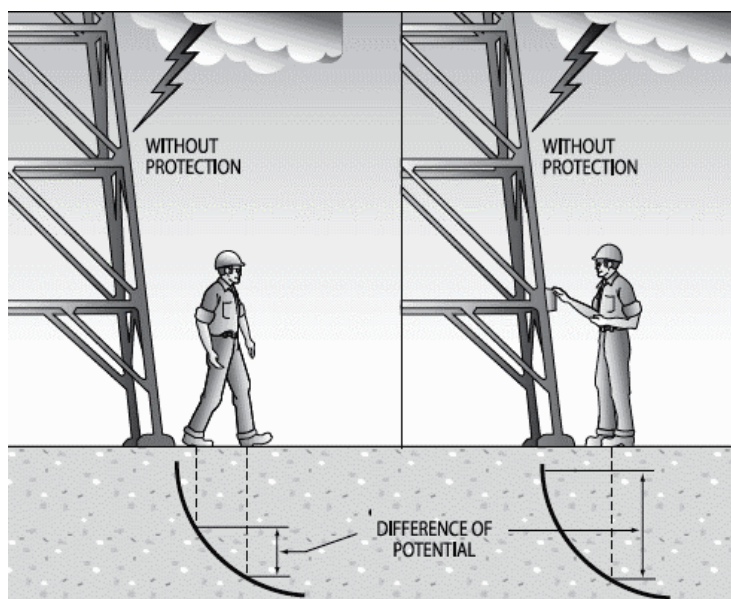
โดยธรรมชาติแล้ว ฟ้าจะผ่าลงสิ่งที่อยู่สูงเด่นกว่าสิ่งอื่นเช่น สิ่งก่อสร้างหรืออาคารสูง ต้นไม้สูง หรือแม้กระทั่งระฆังมปลายนานาที่ไม่มีต้นไม้ หรือสิ่งอื่นในบริเวณใกล้เคียงที่สูงกว่า หรือมนุษย์ที่ยืนในที่โล่งแจ้ง อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นแก่มนุษย์ที่อยู่นอกอาคารบ้านเรือนนั้น มีโอกาสเป็นไปได้ ถ้าหากไปยืนเด่นในที่กลางแจ้ง เช่น ท้องทุ่งนา สนามบริเวณกว้างปราศจากต้นไม้ ในแม่น้ำกว้างใหญ่ในทะเล ตัวอย่างเช่น กรณีนักกีฬาฟุตบอลใน ถูกนำส่งโรงพยาบาล เนื่องจากฟ้าผ่าลงในสนามขณะแข่งขันฟุตบอลในกรุงเทพมหานคร ประเทศกัมพูชา ดังภาพที่ 2.15



ภาพ 2.15 อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดแก่มนุษย์ (ภาพโดย <http://www.manager.co.th>)

### อันตรายจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส [15]

แรงดันช่วงก้าว (Step Voltage) คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมอยู่ระหว่างเท้าทั้งสองข้างของมนุษย์ โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านจากเท้าข้างหนึ่งไปสู่เท้าอีกข้างหนึ่ง และ แรงดันสัมผัส (Touch Voltage) คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ร่างกายของมนุษย์ โดยเกิดจากการที่มนุษย์ได้สัมผัสกับตัวถังของเครื่องมืออุปกรณ์ไฟฟ้า หรือ โครงสร้างของเสา-รับส่งสัญญาณเป็นต้น ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า จะเกิดขึ้นระหว่างจุดที่สัมผัสกับเท้าทั้งสองของมนุษย์ซึ่งสัมผัสกับดิน ดังภาพที่ 2.16



ภาพ 2.16 อันตรายจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส

ผลของฟ้าผ่าที่มีอันตรายต่อมนุษย์และสัตว์ นอกเหนือจากถูกฟ้าผ่าโดยตรงแล้ว ในทางอ้อมยังได้รับอันตรายจาก แรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัส อันเป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าผ่าไหลลงสู่พื้นดินซึ่งมีความต้านทาน การออกแบบระบบรากสายดินที่ดีและถูกต้อง จะต้องคำนึงถึงการป้องกันอันตรายแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัสสองประการนี้แก่มนุษย์และสัตว์ด้วย ในการวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ที่เกิดจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส ซึ่งสามารถการคำนวณตามหลักการวงจรสมมูลย์เทวินิน (Thevinin Equivalent Circuit)

## 2.7 ความเสียหายจากฟ้าผ่าต่อสิ่งปลูกสร้าง [16]

ฟ้าผ่าสิ่งปลูกสร้างสามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้าง ผู้อยู่อาศัยและสิ่งของที่อยู่ภายในรวมทั้งระบบภายในล้มเหลว ความเสียหายและความล้มเหลวอาจขยายไปยังบริเวณโดยรอบสิ่งปลูกสร้างและยังอาจส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมบริเวณนั้น ขอบเขตการขยายความเสียหายมาน้อยขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของสิ่งปลูกสร้างและคุณลักษณะของวาบฟ้าผ่าแยกตามจุดที่เกิดฟ้าผ่า คือ การวาบฟ้าผ่าลงสิ่งปลูกสร้าง, การวาบฟ้าผ่าใกล้สิ่งปลูกสร้าง, การวาบฟ้าผ่าลงสายสาธารณูปโภคที่ต่อกับสิ่งปลูกสร้าง และการวาบฟ้าผ่าใกล้สายสาธารณูปโภคที่ต่อกับสิ่งปลูกสร้าง โดยอาจสร้างความเสียหายจากฟ้าผ่าต่อสิ่งปลูกสร้าง ดังนี้



### 2.7.1 วาบฟ้าผ่าลงสิ่งปลูกสร้างสามารถทำให้เกิด (S1)

- ความเสียหายทางกลทันที ไฟไหม้และ/หรือการระเบิด เนื่องจากความร้อนจากอาร์ก พลาสมาฟ้าผ่าเนื่องจากกระแสไหลผ่านความต้านทานของตัวนำ ทำให้ตัวนำเกิดความร้อนเกิน หรือเนื่องจากประจุทำให้เกิดการสีกกร่อนทางอาร์ก ที่ทำให้โลหะหลอมละลาย
- เกิดไฟไหม้หรือเกิดการจุดระเบิด โดยประกายซึ่งเกิดจากแรงดันเกินที่เกิดจากการคาบเกี่ยวทางความต้านทานและความเหนี่ยวนำ เนื่องจากการไหลผ่านของกระแสฟ้าผ่าบางส่วน
- การบาดเจ็บของสิ่งมีชีวิตจากการช็อกทางไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว ซึ่งมีสาเหตุจากการคาบเกี่ยวทางความต้านทานและทางความเหนี่ยวนำ
- ความล้มเหลวหรือการทำงานผิดพลาดของระบบภายในเนื่องจากอิมพัลส์แม่เหล็กไฟฟ้าจากฟ้าผ่า

### 2.7.2 วาบฟ้าผ่าใกล้สิ่งปลูกสร้างสามารถทำให้เกิด (S2)

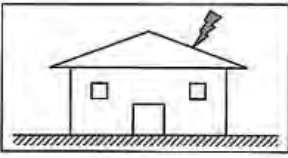
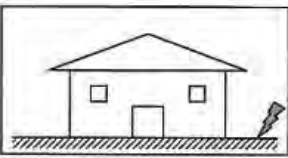
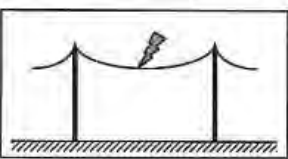
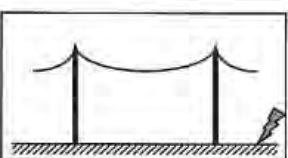
- ความล้มเหลวหรือการทำงานผิดพลาดของระบบภายในเนื่องจากอิมพัลส์แม่เหล็กไฟฟ้าจากฟ้าผ่า

### 2.7.3 วาบฟ้าผ่าลงระบบสาธารณูปโภคที่ต่อกับสิ่งปลูกสร้างสามารถทำให้เกิด (S3)

- ไฟไหม้ หรือการจุดระเบิด โดยประกายที่เกิดจากแรงดันเกินและกระแสฟ้าผ่าที่ส่งผ่านระบบสาธารณูปโภคที่ต่ออยู่
- การบาดเจ็บของสิ่งมีชีวิตจากการช็อกทางไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันสัมผัสภายในสิ่งปลูกสร้างซึ่งมีสาเหตุจากกระแสฟ้าผ่าที่ส่งผ่านสายสาธารณูปโภคที่ต่ออยู่
- ความล้มเหลวหรือการทำงานผิดพลาดของระบบภายในเนื่องจากแรงดันเกินที่ปรากฏบนสายที่ต่ออยู่และส่งผ่านเข้าสู่สิ่งปลูกสร้าง

### 2.7.4 วาบฟ้าผ่าใกล้ระบบสาธารณูปโภคที่ต่อกับสิ่งปลูกสร้างสามารถทำให้เกิด (S4)

- ความล้มเหลวหรือการทำงานผิดพลาดของระบบภายใน เนื่องจากแรงดันเกินที่เหนี่ยวนำบนสายที่ต่ออยู่และส่งผ่านเข้าสู่สิ่งปลูกสร้าง

จุดฟ้าผ่า	ภาพแสดงจุดฟ้าผ่า	แหล่งกำเนิดความเสียหาย
ลงสิ่งปลูกสร้าง		S1
ใกล้สิ่งปลูกสร้าง		S2
ลงระบบ สาธารณูปโภคที่ต่อ กับสิ่งปลูกสร้าง		S3
ใกล้กับระบบ สาธารณูปโภค		S4

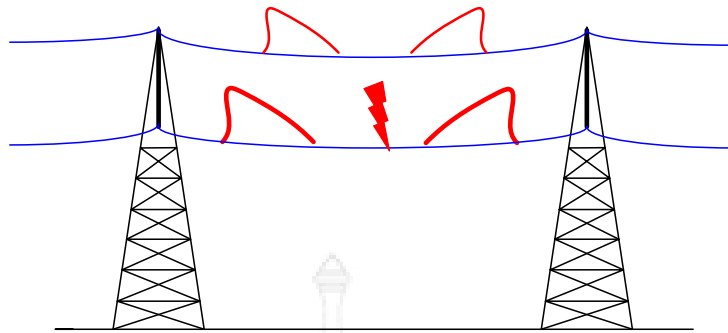
ภาพ 2.17 ความเสียหายจากฟ้าผ่าต่อสิ่งปลูกสร้างแยกตามจุดฟ้าผ่า

## 2.8 ลักษณะของฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย

สำหรับการเกิดฟ้าผ่าขึ้นในระบบจำหน่าย ที่ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบ แบ่งได้เป็น 3 กรณี ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการเกิดฟ้าผ่า ดังนี้ คือ

### 2.8.1 แรงดันเกินจากฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟส (Stroke to Phase)

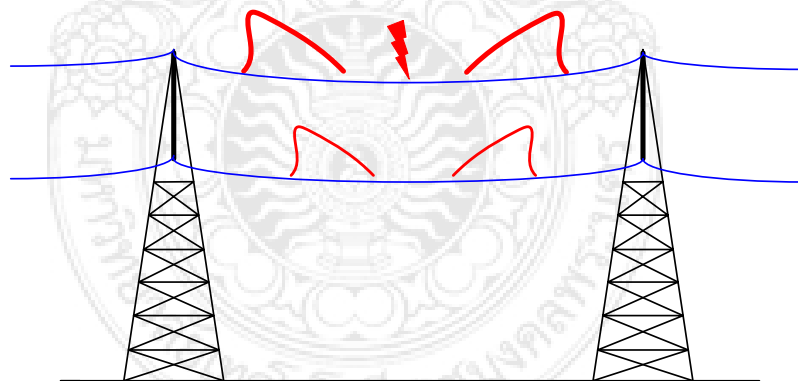
ทำให้เกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าสูงเกินกว่าความคงทนต่อแรงดันของฉนวน มีผลทำให้เกิดความวับไฟที่ฉนวน เรียกรวมการเกิดวับไฟในลักษณะนี้ว่า "Shielding Failure Flashover" ซึ่งการเกิดฟ้าผ่าในลักษณะนี้มักส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่สายจำหน่าย โดยเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งจะทำให้กระแสฟ้าผ่าวิ่งไปตามสายส่งในรูปแบบของคลื่นจร (Traveling Wave) กระแสฟ้าผ่าแยกออกเป็นสองส่วนวิ่งไปตามสาย และแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับอิมพีแดนซ์เสิร์จของตัวนำ หากแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นฉนวนมีค่ามากกว่าแรงดันวิกฤตที่ทำให้เกิดการวับไฟตามฉนวนของลูกถ้วย (Critical Flashover Voltage หรือ CFO) จะทำให้เกิดการวับไฟตามฉนวนของลูกถ้วย (Flashover) ดังภาพที่ 2.18



ภาพ 2.18 ฟ้ำผ่าโดยตรงที่สายเฟส

### 2.8.2 ฟ้ำผ่าโดยตรงไปที่สายล่อฟ้า (Overhead Ground Wire หรือ OHGW)

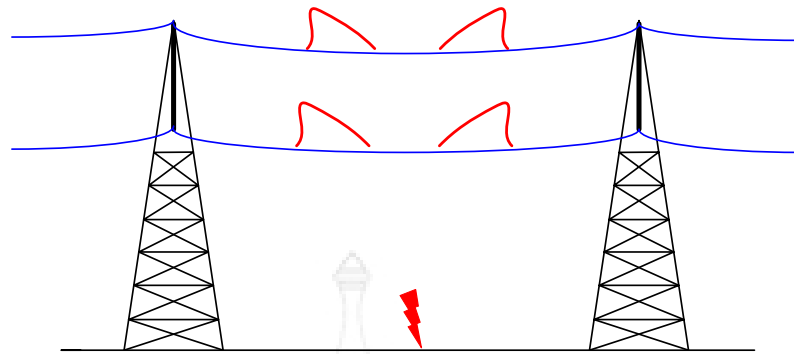
กรณีนี้ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำในสายเฟส เป็นการผ่าลงสายล่อฟ้าจะทำให้มีคลื่นฟ้ำผ่าจากหัวเสาผ่านเส้นทางตัวนำในเสาสูงสู่พื้นดิน โดยคลื่นกระแสฟ้ำผ่าจะมองโครงสร้างเสาเป็นเสิร์จอิมพีแดนซ์ค่าหนึ่ง และถ้ารากสายดินมีค่าความต้านทานรากสายดินสูงกว่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเป็นบวก เพราะความต้านทานรากสายดินสูง และเกิดคลื่นสะท้อนกลับเป็นลบได้หากมีค่าต่ำกว่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา จะมีการรวมกันของคลื่นสะท้อนมารวมกัน ทำให้โครงสร้างเสามีแรงดันสูงขึ้นมากจนเลยค่า CFO เกิดวาบไฟตามผิวเรียกวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flash Over) ดังภาพที่ 2.19



ภาพ 2.19 ฟ้ำผ่าโดยตรงไปที่สายล่อฟ้า

### 2.8.3 ฟ้ำผ่าไปยังจุดใกล้เคียงระบบจำหน่าย

กรณีฟ้ำผ่าไปยังจุดใกล้เคียงระบบจำหน่าย หรือบนพื้นดินจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่สายเฟสโดยที่หากค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้มีค่าเกินกว่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤตที่จะเกิดวาบไฟตามผิวของฉนวน การวาบไฟตามผิวก็จะเกิดขึ้นที่ฉนวน แรงดันไฟฟ้าเกินจากกรณีนี้สามารถพบได้บ่อยกว่า และเกิดแรงดันเกินที่น้อยกว่า 2 กรณีที่กล่าวไว้ข้างต้น ดังภาพที่ 2.20

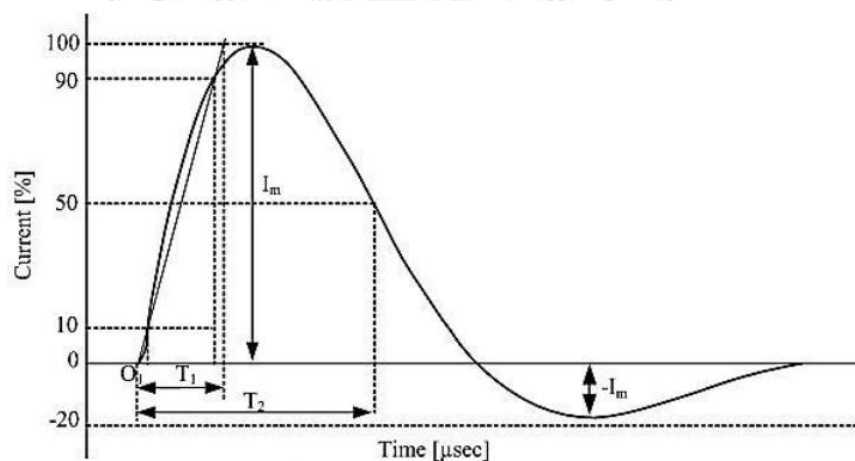


ภาพ 2.20 ฟาผ่าไปยังจุดใกล้เคียงระบบจำหน่าย

สำหรับงานวิจัยนี้ทำการศึกษาที่จะมุ่งเน้นการนำเสนอ กรณีการเกิดฟาผ่าลงสายล่อฟ้าโดยตรง ที่ระบบ 69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ของการไฟฟ้านครหลวง ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

## 2.9 ค่าความชันหน้าคลื่น

ทรานเซียนต์ (Transient) คือ ปรากฏการณ์ที่มีปริมาณแปรเปลี่ยนไประหว่างสถานะที่คงที่สองสถานะและมีช่วงเวลาที่สั้นระหว่างสถานะทั้งสอง แต่ค่าความชันหน้าคลื่น หมายถึง อัตราความเร็วในการเพิ่มขึ้นของรูปคลื่น จะทำให้วัสดุสารกึ่งตัวนำได้รับความเสียหายหรือเสื่อมสภาพได้ แต่ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแบบเดินสายอากาศ จะใช้ลูกถ้วยฉนวนเพื่อรองรับสายไฟ มีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ป้องกันไม่ให้เกิดกระแสฟ้ารั่วลงดิน แต่เมื่อเกิดฟาผ่าที่มีค่ายอดสูงและความชันหน้าคลื่นสูง และหากมีค่าสูงเกินพิกัดใช้งาน จะทำให้ลูกถ้วยฉนวนเกิดการเจาะทะลุได้ ทำให้มีปริมาณกระแส ที่รั่วไหลมีจำนวนมาก อาจทำอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายตัดวงจรออก ส่งผลให้การจ่ายไฟในระบบหยุดชะงักได้ ดังภาพที่ 2.21



ภาพ 2.21 ค่าความชันหน้าคลื่นตามมาตรฐาน IEC60060-1

เมื่อ $I$	คือ	กระแสค่ายอด
$O_1$	คือ	จุดเสมือน (Virtual origin)
$T_1$	คือ	เวลาหน้าคลื่น (Front Time)
$T_2$	คือ	เวลาหางคลื่น (Tail Time)

**เวลาหน้าคลื่น** (Front Time,  $T_1$ ) คือ เวลาที่กระแสเริ่มจากศูนย์จนถึงค่ายอดเวลาในช่วงที่กระแสเพิ่มค่าจาก 10% - 90% ของค่ายอด ซึ่งจุดเริ่มต้นของกระแสอยู่ที่จุด  $O_1$  คือจุดตัดแกนนอนกับเส้นตรง ที่ลากผ่านจุด 10% และ 90% ของค่ายอดที่หน้าคลื่น

**เวลาหางคลื่น** (Tail Time,  $T_2$ ) หรือเรียกอีกอย่างว่า เวลาหลังคลื่นครึ่ง หมายถึง เวลาหางคลื่นจะคำนวณจากจุดเริ่มต้นของกระแสจนถึงจุดที่กระแสลดค่าลงสู่ 50% ของค่ายอด

## 2.10 ข้อมูลสำหรับการประเมินสมรรถนะป้องกันฟ้าผ่า

### 2.10.1 ข้อมูลสถิติการเกิดฟ้าผ่า

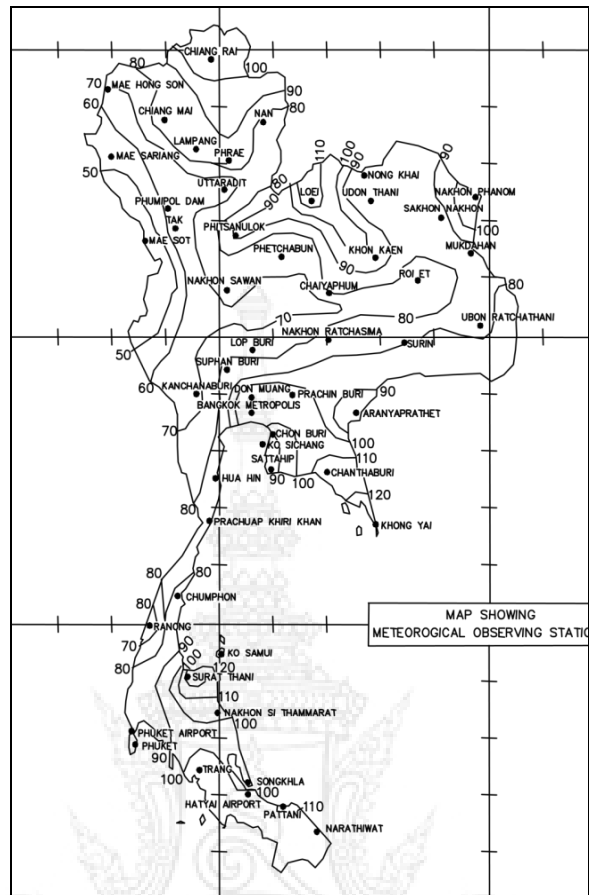
สถิติข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (Thunderstorm days per year :  $T_d$ ) ของประเทศไทยได้มาจากการรวมข้อมูล โดยกรมอุตุนิยมวิทยา เป็นแผนที่ Isokeraunic Map ตามเส้นที่ลากผ่านบริเวณที่มี  $T_d$  เท่ากัน

สำหรับข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีในเขตพื้นที่รับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวง ช่วง พ.ศ. 2543-2558 แสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งค่า  $T_d$  ดังกล่าวจะนำไปใช้คำนวณค่าความหนาแน่นของฟ้าผ่าลงสู่ดิน (Ground Flash Density (GFD):  $N_g$ ) ดังสมการที่ 2.9 [3],[17]-[19]

$$N_g = 0.0133T_d^{1.25} \quad (2.9)$$

เมื่อ $N_g$	คือ	ความหนาแน่นของฟ้าผ่าลงสู่ดิน (ครั้ง/ตารางกิโลเมตร/ปี)
$T_d$	คือ	จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี (วัน/ปี)

สถิติข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี แสดงแผนที่ Isokeraunic Map ตามเส้นที่ลากผ่านดังภาพที่ 2.22



ภาพ 2.22 แผนที่ Isokeraunic Map ข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี

ตารางที่ 2.1 จำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของรับผิดชอบของการไฟฟ้านครหลวง.เฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2543-2558

สถานีตรวจวัด	จำนวนวันฝนตกเฉลี่ยต่อปี( $T_d$ )
สถานีสำนักงานอุตุนิยมวิทยาทางทะเลท่าเรือคลองเตย	69
สถานีเรดาร์ตรวจอากาศดอนเมือง	99
สถานีตรวจอากาศเฉลิมพระเกียรติกรุงเทพมหานคร	104
สถานีตรวจอากาศ ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ	117
สถานีตรวจอากาศเกษตรบางนา	122

### 2.10.2 ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า

ค่ากระแสคายยอด หรือค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า ข้อมูลเหล่านี้ค่าที่ได้จาก เครื่องมือตรวจหาตำแหน่งฟ้าผ่าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (Lightning location system : LLS) ที่ตรวจวัดข้อมูลฟ้าผ่าตามพิกัดของเหตุการณ์ที่เกิดฟ้าผ่าและพายุฝนฟ้าคะนอง เพื่อใช้ประโยชน์ ในงานวิศวกรรมต่างๆ ข้อมูล LLS ทำให้ทราบค่ากระแสฟ้าผ่าเฉลี่ยในพื้นที่นั้นๆ และทราบถึง โอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสฟ้าผ่าขนาดต่างๆ ซึ่งการกระจายสะสมของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าใน ประเทศไทย เป็นไปตามภาพที่ 2.23 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.10 ได้ดังนี้

$$P(I) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{I}{M}\right)^B\right)} \quad (2.10)$$

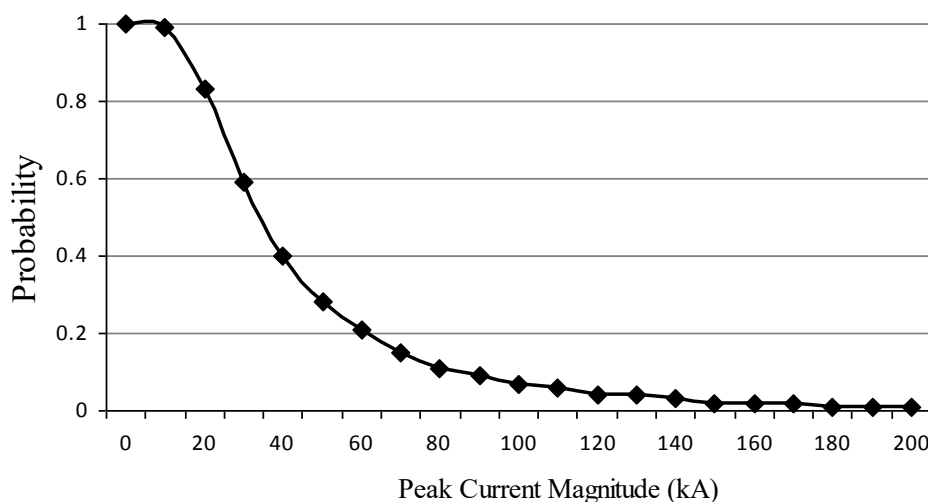
เมื่อ  $P(I)$  คือ ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับค่ายอดกระแสฟ้าผ่า (%)

$I$  คือ กระแสฟ้าผ่าค่ายอด (kA)

$M$  คือ กระแสฟ้าผ่าค่ามัธยฐานเท่ากับ 34.4 kA

$B$  คือ ค่าคงที่สำหรับประเทศไทยเท่ากับ 2.5

จากสมการที่ 2.10 เมื่อนำมาแสดงในกราฟจะได้ดังภาพที่ 2.23



ภาพ 2.23 การกระจายแบบสะสมของโอกาสการเกิดฟ้าผ่าที่กระแสฟ้าผ่าขนาดต่างๆ

### 2.10.3 ข้อมูลระบบสายส่ง

ในการประเมินสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าของระบบสาย จำเป็นต้องทราบข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ชนิดลูกถ้วย การต่อลงดิน ขนาดสายไฟฟ้า และรูปแบบการจัดวางสาย ซึ่งงานวิจัยนี้จัดทำการศึกษากรณีการวางสายของระบบสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล แบบลูกถ้วยแขวน (Suspension Insulator String) โดยข้อมูลต่างๆ ของระบบจะนำมาใช้ในการคำนวณ และการจำลองประมวลผล โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ซึ่งจากกล่าวในบทที่ 3 ต่อไป

### 2.11 อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate: BFOR)

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงสายดินจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือฟ้าผ่าที่หัวเสา และฟ้าผ่าที่กลางสาย การเกิดฟ้าผ่าที่หัวเสาจะทำให้เกิดแรงดันเกินที่มีค่าสูงกว่ากรณีฟ้าผ่ากลางสาย ดังนั้นจึงพิจารณาเฉพาะกรณีฟ้าผ่าที่หัวเสาไฟฟ้าคอนกรีต กระแสฟ้าผ่าส่วนหนึ่งจะกระจายลงสู่ดิน และอีกส่วนหนึ่ง จะไหลไปตามสายล่อฟ้าไปยังเสาข้างเคียงในลักษณะของคลื่น และเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งทำให้เกิดการหักล้าง หรือเสริมกันกับแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นบนยอดเสา ทำให้เกิดแรงดันในสายดิน ( $V_1$ ) และเกิดเหนี่ยวนำในสายเฟส ( $V_p$ ) ซึ่งจะมีค่าประมาณ 20-30 % ของแรงดันเกินในสายดิน ทำให้มีแรงดันคร่อมพวงฉนวนลูกถ้วย เกิดขึ้นตามสมการที่ 2.8 โดยแรงดันคร่อมฉนวนนี้ ขึ้นอยู่กับแรงดันเกินในสายดิน ซึ่งมีผลมาจากเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา และค่ากระแสฟ้าผ่า

ถ้าแรงดันเกินในสายดินและแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในสายเฟสมีค่าแตกต่างกันมากกว่า ค่าความคงทนของฉนวนลูกถ้วย(CFO) จะทำให้เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover) ของฉนวนลูกถ้วย และอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดไฟฟ้าดับต่อมา ซึ่งในทางปฏิบัติ แรงดันเกินที่เกิดขึ้นมีผลมาจากความต้านทานดิน และระยะห่างระหว่างเสาด้วย สำหรับสมการที่ใช้คำนวณหา ค่าอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ซึ่งถือเป็นดัชนีที่สำคัญในการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าต่อไป จะเป็นตามสมการที่ 2.11 ดังนี้

$$\text{BFOR} = P(I \geq I_c) \times N_1 \quad (2.11)$$

$$N_1 = N_g \left( \frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (2.12)$$

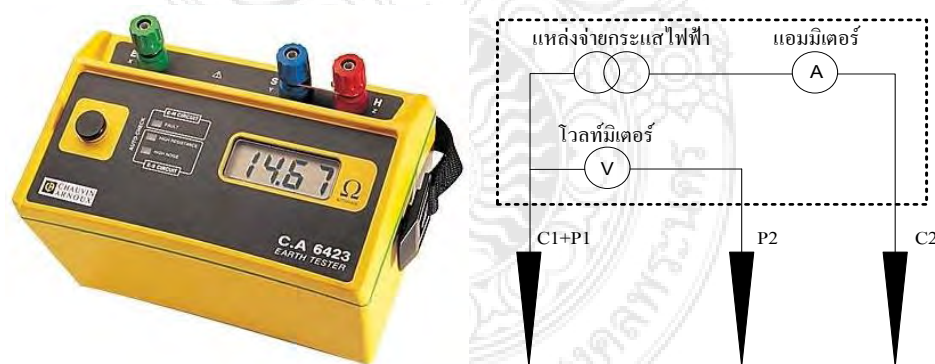


เมื่อ	BFOR	คือ	อัตราการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
	$P (I \geq I_c)$	คือ	ความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่า $I$ สูงกว่าหรือเท่ากับกระแสวิกฤต
	$h$	คือ	ความสูงเฉลี่ยของสายดินป้องกัน (เมตร)
	$N_f$	คือ	จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกัน (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)
	$b$	คือ	ระยะห่างระหว่างสายดิน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

## 2.12 แนวทางการปรับปรุงหลักดินเพื่อลดค่าความต้านทานดิน

### 2.12.1 วิธีการปักแท่งหลักดินเพิ่ม [20]

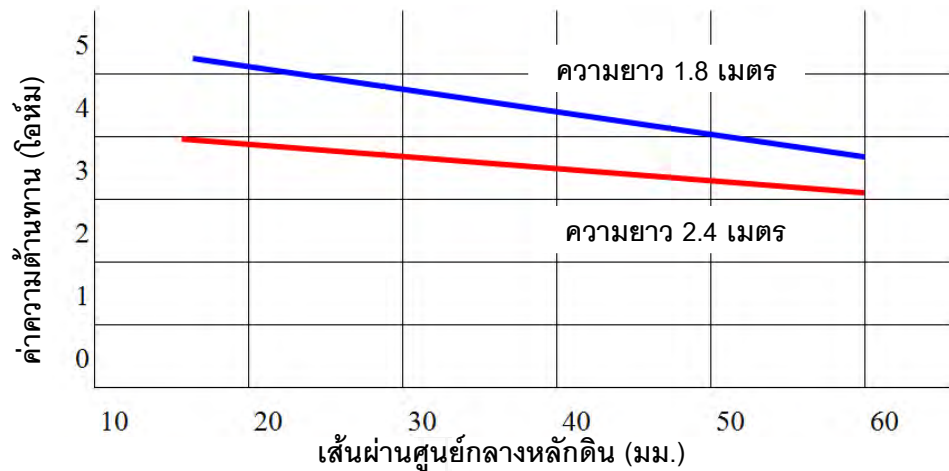
ตามมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556 กำหนดให้ค่าความต้านทานระหว่างหลักดินกับดิน (Resistance to Ground) เพื่อจำกัดแรงดันเกินจากฟ้าผ่า โดยค่าความต้านทานของหลักดินกับดินต้องไม่เกิน 5 โอห์ม ยกเว้น พื้นที่ที่ยากในการปฏิบัติและได้รับการเห็นชอบจากการไฟฟ้าซึ่งกำหนดให้ค่าความต้านทานของหลักดินมีค่าไม่เกิน 25 โอห์ม หากทำการวัดแล้วยังมีค่าเกินให้ปักหลักดินเพิ่มอีก 1 แท่ง แสดงลักษณะการวัดความต้านทานดิน ดังภาพที่ 2.24



ภาพ 2.24 เครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน (ภาพจาก [www.asras.com](http://www.asras.com))

### 2.12.2 วิธีการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งหลักดิน [21]

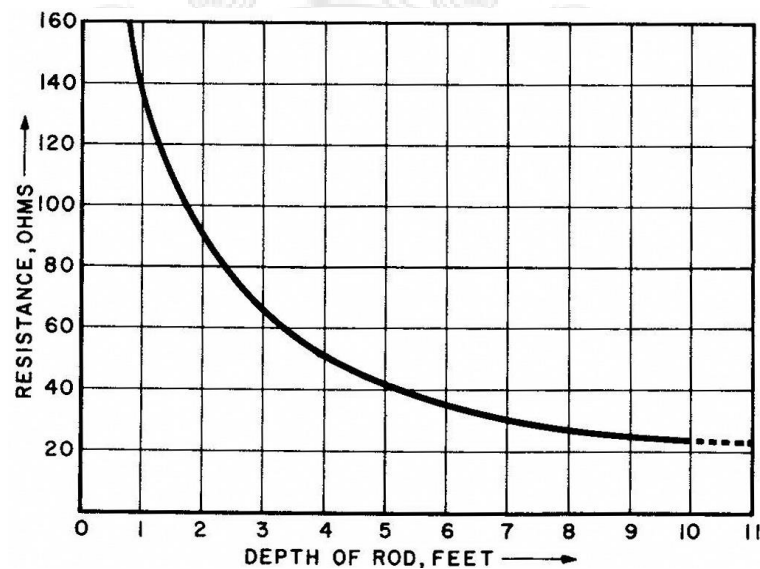
เป็นวิธีการเพิ่มพื้นที่สัมผัสดิน เพื่อลดความต้านทานดิน ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ความต้านทานดินลดลงเล็กน้อย ในทางปฏิบัติจึงไม่นิยมลดความต้านทานด้วยวิธีการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งหลักดินซึ่งความสัมพันธ์ของความต้านทานดินที่ลดลงเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลักดิน ดังภาพที่ 2.25



ภาพ 2.25 ผลการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่าศูนย์กลางแท่งหลักดิน

### 2.12.3 วิธีการเพิ่มขนาดความยาวของแท่งหลักดิน

เป็นวิธีที่ใช้ในทางปฏิบัติอย่างทั่วไป โดยปกติจะมีความยาวไม่เกิน 3 เมตร ในกรณีที่แท่งหลักดินมีความยาวมาก ในการติดตั้งอาจทำได้ยากหรือต้องใช้เครื่องจักรเจาะดินช่วยในการฝังแท่งหลักดินในการเพิ่มความยาวหลักดินสามารถทำให้ความต้านทานลดลงเมื่อความยาวของหลักดินเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 2.26



ภาพ 2.26 ความยาวแท่งหลักดินต่อค่าความต้านทานดิน (ภาพจาก [www.megger.com](http://www.megger.com))

## บทที่ 3

### หลักการของโปรแกรม ATP-EMTP และการจำลองระบบ

#### 3.1 บทนำ

เนื่องจากการทดสอบการเกิดฟ้าผ่าเพื่อประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า ย่อยในวิทยานิพนธ์นี้ ไม่สามารถที่จะทราบหรือกำหนดสถานการณ์ของการเกิดฟ้าผ่าจริงได้ จึงต้องใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองสถานการณ์ดังกล่าว ด้วยโปรแกรม Alternative Transients Program-Electromagnetic Transients Program หรือ ATP-EMTP ซึ่งเป็นโปรแกรม ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย ในการจำลองปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าในสถานะชั่วคราว (Transient Response) จึงได้นำมาใช้ในการจำลองในระบบสายส่งและสายจำหน่ายอันประกอบไปด้วย แบบจำลองสายส่ง แบบจำลองเสาไฟฟ้า แบบจำลองลูกถ้วย แบบจำลองความต้านทานที่ฐานเสา แบบจำลองสายตัวนำลงดินนอกเสา แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า เพื่อประเมินสมรรถนะการป้องกัน ฟ้าผ่าของระบบจำหน่ายไฟฟ้าย่อย ต่อไป

โดยในปี ค.ศ.1960 ได้เริ่มมีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้งานอย่างกว้างขวางทั่วโลก การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจึงเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากระบบอนาล็อกมาใช้คอมพิวเตอร์ ในการคำนวณ Dr.Dommel แห่งมหาวิทยาลัย Munich ประเทศเยอรมันได้เริ่มพัฒนาโปรแกรม สำหรับการคำนวณภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้าแบบดิจิทัลขึ้น โดยอาศัยงานของ Schnyder Bergeron เป็นวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกทาง Benneville Power Administration (BPA) ซึ่งจัดตั้งโดยกระทรวงพลังงานของสหรัฐมีความสนใจในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เชิญ Dr. Dommel มาเป็นนักวิจัยเพื่อทำการพัฒนาโปรแกรมหดดังกล่าวจนในปี ค.ศ.1968 Transient Program Model ซึ่งมีประมาณ 4,000 บรรทัด ก็เสร็จสมบูรณ์ออกมาเผยแพร่

ต่อมาในปี ค.ศ. Dr.Dommel ลาออกจาก BPA โดยมี Dr.W.Scott-Meyer เป็นผู้รับผิดชอบ ช่วงต่อในการพัฒนาโปรแกรมหดจนในปี ค.ศ.1976 ก็มีนักวิจัยอีกหลายคนเข้าร่วมในการพัฒนา โปรแกรมเช่น Dr.Tse-Huei Liu และ Dr.Akihiro Ametani นอกจากนี้ Mr.L. Dube ผู้พัฒนา TACS/MODEL Dr.V. Brandwain ผู้พัฒนาโครงสร้างเครื่องจักรไฟฟ้า Prof. A. Semlyen ผู้พัฒนา โมเดลของสายส่งเข้าร่วมทำให้โปรแกรม EMTP มีความสามารถมากยิ่งขึ้นจนในช่วงทศวรรษ 1980 โปรแกรม EMTP M 31 ซึ่งมีประมาณ 100,000 บรรทัดก็เสร็จสมบูรณ์ และมีการนำไป ใช้งานในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลก

การพัฒนาโปรแกรมดำเนินมาเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบันโปรแกรม EMTP แยกออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ด้วยกันคือ EMTP ของ BPA DCG/EPRI และ ATP-EMTP ของ Dr.Scott-Meyer โดยโปรแกรมที่เราจะนำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะฟ้าผ่าของระบบส่งในงานวิจัยนี้คือ ATP-EMTP เป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมในการใช้วิเคราะห์สภาวะชั่วคราว ซึ่งในงานวิจัยหลายๆด้านก็ได้ใช้โปรแกรมนี้ในการศึกษาถึงผลกระทบต่างๆ ในสภาวะชั่วคราวเช่นเดียวกัน

การใช้โปรแกรม EMTP วิเคราะห์สภาวะชั่วคราว (Transient) ในระบบไฟฟ้าให้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้นั้นจำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลองคุณสมบัติของอุปกรณ์และปรากฏการณ์ในระบบให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด ในบางครั้งจึงมีความยุ่งยากและซับซ้อนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ของการวิเคราะห์ด้วย

### 3.2 หลักการทั่วไปและความสามารถของโปรแกรม ATP-EMTP [22]

#### 3.2.1 หลักการทั่วไป

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังหากจัดกลุ่มตามลักษณะผลลัพธ์ที่ได้ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม

##### 3.2.1.1 การวิเคราะห์ในกรอบของความถี่ (Frequency Domain Analysis)

เป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้ผลตอบสนองแรงดันหรือกระแสเป็นขนาดและมุมเฟส โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์ผลตอบสนองเชิงความถี่จะใช้กับการวิเคราะห์ที่ระบบไฟฟ้าที่อยู่ในสภาวะปกติ เช่น การวิเคราะห์การไหลของกำลังไฟฟ้า (Power Flow Analysis) หรือระบบไฟฟ้าที่กลับเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (Steady State) ภายหลังที่เกิดสภาวะชั่วคราว เช่น การคำนวณกระแสไฟฟ้าผิดพ่วง (Fault Current Analysis) เพื่อใช้ในการประสานสัมพันธ์อุปกรณ์ป้องกันในระบบไฟฟ้า เป็นต้น

##### 3.2.1.2 การวิเคราะห์ในกรอบของเวลา (Time Domain Analysis)

เป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้ผลตอบสนองของแรงดันหรือกระแสเป็นขนาดในแต่ละช่วงเวลา การวิเคราะห์ในลักษณะดังกล่าวเหมาะสมกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดหรืออยู่ในสภาวะชั่วคราวเช่นการสับปลด (Switching Operation) การเกิดความผิดพ่วง (Fault) หรือการรบกวนภายนอกอื่นๆ เช่นฟ้าผ่า ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถใช้แนวคิดของการวิเคราะห์เชิงความถี่ในการวิเคราะห์หรือกำหนดแนวทางการแก้ไขปัญหาได้

ในอดีตที่ผ่านมาเทคโนโลยียังไม่ก้าวหน้า รูปแบบของผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในเชิงเวลามักจะเป็นสมการในเชิงคณิตศาสตร์ที่ได้จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์ หากระบบไฟฟ้ามีขนาดใหญ่หรือปัญหาที่มีความซับซ้อนก็จะต้องกำหนดสมมติฐานเป็นจำนวนมากจนทำให้ผลตอบสนองที่ได้อาจไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวอีกแบบหนึ่งที่นิยมก็คือ Transient Network Analyzer (TNA) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่จำลองระบบไฟฟ้า โดยการย่อระบบไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลงแล้วทำการจำลองความต้องการแต่ TNA นั้นมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก และการปรับเปลี่ยนมีข้อจำกัดการวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวในปัจจุบันจึงได้ปรับเปลี่ยนไปสู่ดิจิทัลคอมพิวเตอร์มากขึ้น การวิเคราะห์สภาวะชั่วคราวโดยใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์เริ่มขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 โดยใช้เทคนิค Bewley's Lattice Diagram และวิธีของ Bergeron เทคนิคเหล่านี้สามารถใช้กับวงจรที่มีขนาดเล็ก ที่มีพารามิเตอร์ขององค์ประกอบเป็นแบบกระจาย (Distributed Parameter) หรือแบบกลุ่มก้อน (Lumped Parameter) ทั้งที่เป็นแบบเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้น ต่อมา H.W.Domel ได้เสนอเทคนิคที่นำเอา Trapezoidal Rule และวิธีของ Bergeron สร้างเป็นอัลกอริทึมที่นำมาแก้ปัญหาภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถใช้กับวงจรข่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้นวิธีการดังกล่าวเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์สภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Transient Program: EMTP) Trapezoidal Rule จะทำการแปลงสมการดิฟเฟอเรนเชียลขององค์ประกอบในวงจรข่ายให้เป็นสมการทางพีชคณิต (Algebraic Equation) ที่เกี่ยวข้องกับแรงดัน กระแสที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในสมการ 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

แหล่งจ่ายแรงดันของวงจรจ่ายส่วนมากจะต่อลงกราวด์ เพราะฉะนั้นจะสามารถแยกสมการออกเป็นสองส่วนคือแรงดันที่ไม่ทราบค่า [ส่วน A] และแรงดันที่ทราบค่า [ส่วน B] ดังสมการ 3.2

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

คำตอบของภาวะชั่วคราวจะหาได้โดยใช้ Triangular Factorization ซึ่งมีข้อดีคือสามารถประยุกต์ใช้กับวงจรที่มีขนาดใหญ่ให้อยู่ในรูปอย่างง่าย อย่างไรก็ตามพารามิเตอร์ในระบบจริงจะแปรตามความถี่ จึงต้องมีการสร้างแบบจำลองที่สามารถรองรับเงื่อนไขดังกล่าว และปัญหาอีกอย่างคือคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นและการแปรตามเวลาขององค์ประกอบ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า หรือกับดักไฟฟ้า การแก้ปัญหาคคุณลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นดังกล่าวจะใช้การแทนแบบ Piecewise Linear

ในปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างจาก Trapezoidal Rule นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการจำลองภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากสามารถเข้าใจอัลกอริทึมได้ง่าย แต่ข้อเสียของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างจาก Trapezoidal Rule คือ การใช้ขนาดของ Time Step ที่คงที่อาจทำให้เกิดการสั่นของสัญญาณ (Numerical Oscillation) ได้ เนื่องจากค่า Time Step กำหนดมาจากความถี่ที่ใช้ในการจำลองความถี่ของปรากฏการณ์ภาวะชั่วคราวที่เกิดขึ้นอาจเกิดทั้งความถี่สูงและความถี่ต่ำในเวลาเดียวกันแต่ต่างโหนดเพราะฉะนั้นการใช้ค่า Time Step เพียงค่าเดียวอาจเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดการแกว่งของสัญญาณในหลายกรณี เช่น การสวิตชิง หรือการเปลี่ยนช่วงการทำงานในขั้นตอนของ Piecewise Linear อาจทำให้เกิดการแกว่งของสัญญาณได้ เทคนิคต่างๆ ถูกนำมาใช้ เช่น ต้องมีการเพิ่มอุปกรณ์หน่วง (Damping) เพื่อลดการเกิดการแกว่งของสัญญาณ โดยใช้ตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำและอนุกรมกับตัวเก็บประจุต่อคร่อมอุปกรณ์สวิตชิงซึ่งเทคนิคที่ใช้กันอยู่มาก เช่น การต่อวงจร snubber เบอร์ (Snubber Circuit) ขนานกับสวิตช์ ซึ่งวงจรมีดังกล่าวดังกล่าวสามารถพบได้ทั่วไปในส่วนของวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ส่วนวิธีการลดการแกว่งของสัญญาณแบบอื่นๆ อาจทำได้อีกหลายวิธี เช่น ใช้เทคนิค Critical Damping Adjustment (CDA)

ขั้นตอนการแก้ปัญหาภาวะชั่วคราวแม่เหล็กไฟฟ้าที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นหรือจุดที่เริ่มเกิดภาวะชั่วคราว การแก้ปัญหาจะเริ่มจากหาเงื่อนไขของสภาวะอยู่ตัวซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการคำนวณของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ คำตอบของสภาวะอยู่ตัวของวงจรข่ายแบบเชิงเส้นที่ความถี่หนึ่งๆ หาได้จากการใช้สมการโหนดแอดมิตแตนซ์ (Nodal Admittance Equation) ตามสมการ 3.3

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

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

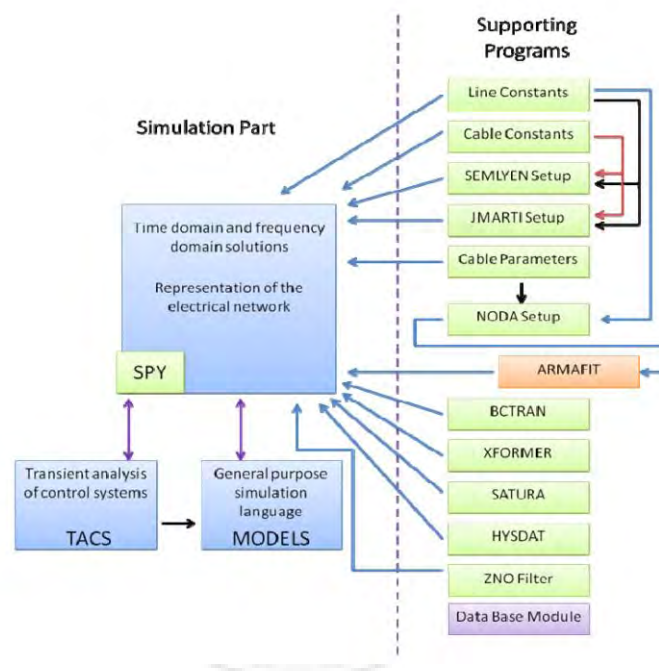
สำหรับการแทนองค์ประกอบของวงจรข่ายนั้นในการวิเคราะห์ภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้าให้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ จำเป็นต้องอาศัยการสร้างแบบจำลอง เพื่อจำลองคุณลักษณะและคุณสมบัติของอุปกรณ์และปรากฏการณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้า ให้ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด แต่การแทนองค์ประกอบของวงจรข่าย ให้มีความถูกต้องครอบคลุมความถี่ทุกช่วงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากคุณลักษณะทางกายภาพของแต่ละองค์ประกอบของวงจรข่ายจะมีผลโดยตรงกับภาวะชั่วคราวของปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีการจัดกลุ่มภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง สำหรับการศึกษาดังวิธี Time Domain โดยแบ่งตามช่วงความถี่ในแต่ละกลุ่มและความซับซ้อนที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ตามข้อเสนอแนะของ Cigre

### 3.2.2 ความสามารถของโปรแกรม ATP-EMTP

โปรแกรม ATP-EMTP พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ในการจำลองและวิเคราะห์เหตุการณ์ในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัวในระบบไฟฟ้ากำลัง 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	แรงดันเกินสวิตซ์ (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 อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ไฟฟ้าแต่ละชนิดที่มีมาให้นั้น มีคุณสมบัติและเงื่อนไขการใช้งานที่ต่างกัน ผู้ใช้งานจำเป็นต้องเลือกใช้งานให้ถูกต้อง มิเช่นนั้นจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ผิดจากความเป็นจริง ตามที่แสดงในภาพที่ 3.1



ในการใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP จะประกอบไปด้วย 3 โปรแกรมย่อยจะทำให้การใช้งานเป็นไปอย่างสมบูรณ์ ประกอบไปด้วย

- ATPDraw ในส่วนนี้ใช้ในการสร้างแบบจำลองและสร้างวงจรทางไฟฟ้า โดยจะมีอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าให้ใช้ในการสร้างแบบจำลอง
- PlotXY ส่วนนี้ใช้ในการแสดงผลการคำนวณในรูปแบบของกราฟซึ่งต้องใช้ร่วมกับ ATPDraw
- Watcom ส่วนนี้ใช้ในการแปลงภาษาระดับสูง โดยแปลงแบบจำลองจาก ATPDraw ให้เป็นภาษาฟอร์แทรน (Fortran) ซึ่งจะประมวลผลในดอส (DOS)

### 3.3 การสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า

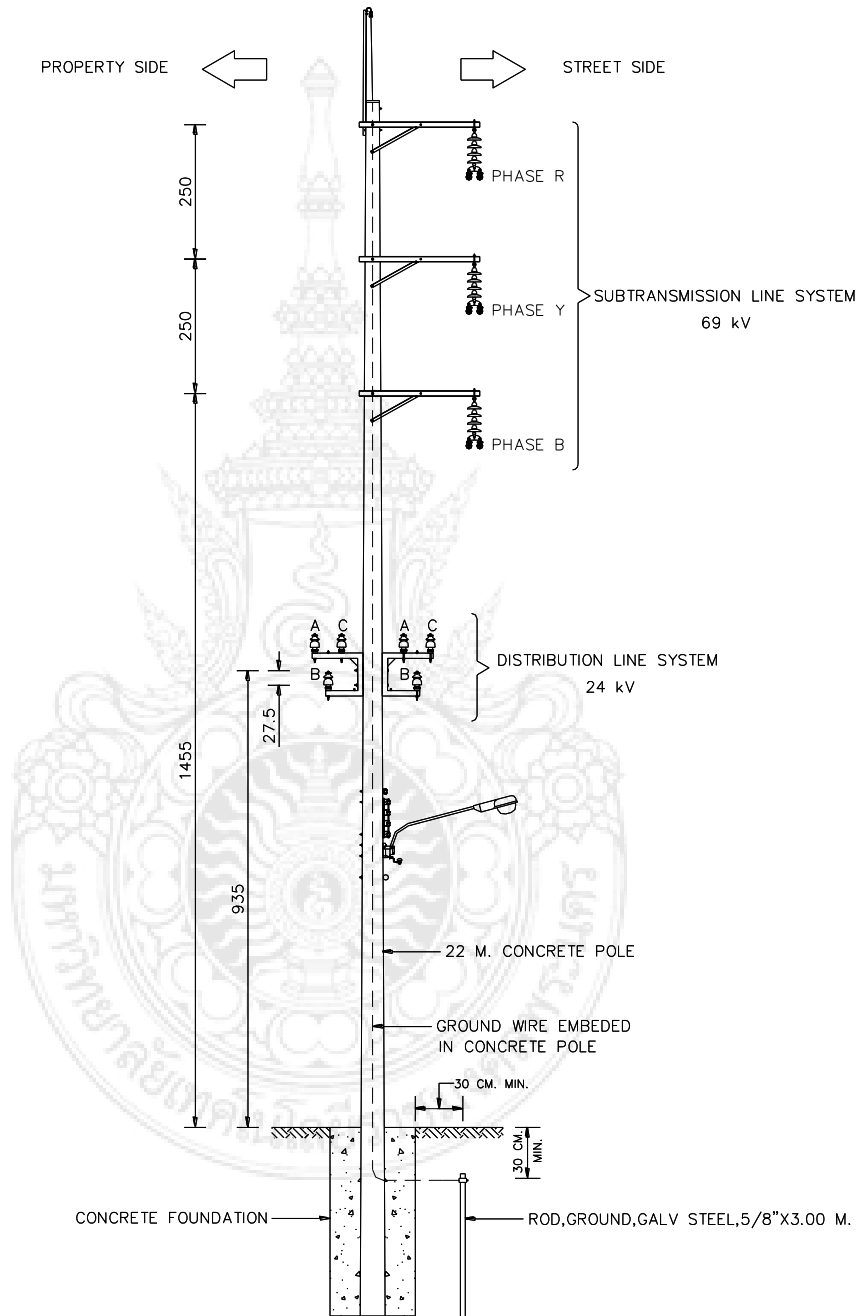
การศึกษานี้จะใช้โปรแกรม ATP-EMTP เป็นเครื่องมือจำลององค์ประกอบในระบบสายส่งและสายจำหน่ายอันประกอบไปด้วยแบบจำลองสายส่ง แบบจำลองเสาไฟฟ้า แบบจำลองลูกถ้วย แบบจำลองความต้านทานที่ฐานเสา แบบจำลองสายตัวนำลงดินนอกเสา แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า

#### 3.3.1 แบบจำลองสายส่งย่อยและสายจำหน่ายเหนือดิน

แบบจำลองสายส่งและสายจำหน่ายเหนือดินแบบหลายตัวนำตามสภาพการใช้งานจริงสำหรับการศึกษาปรากฏการณ์ฟ้าผ่านั้นแบบจำลองที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและเหมาะสมคือแบบจำลองที่แปรผันตามความถี่ (Frequency Dependent Line Model: J. Marti Model) อยู่ในโปรแกรม EMTP ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการใช้แบบจำลองสายส่งและสายจำหน่ายเหนือดินแบบหลายตัวนำแปรผันตามความถี่ในการวิเคราะห์คือการกำหนดช่วงความถี่ที่ทำการศึกษาซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ช่วงด้วยกันตามตารางที่ 3.1 และค่าช่วงเวลาที่ใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลขในโปรแกรมจะต้องน้อยกว่า  $1/10.f_{max}$  โดยในงานวิจัยนี้ได้กำหนดช่วงที่ทำการศึกษาไว้ที่ 10Hz–3MHz ค่าช่วงเวลาไว้ที่  $1E-9$

แบบจำลองสายส่งย่อยและสายจำหน่ายเป็นแบบวงจรเดี่ยวตัวนำคู่ที่มีการจัดวางสายเฟสในแนวตั้งประกอบด้วย ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ซึ่งเป็นสายตัวนำคู่จำนวน 2 วงจร และสายล่อฟ้า 1 เส้น โดยใช้ข้อมูลตัวแปรสายที่ใช้สร้างแบบจำลองในตาราง 3.2

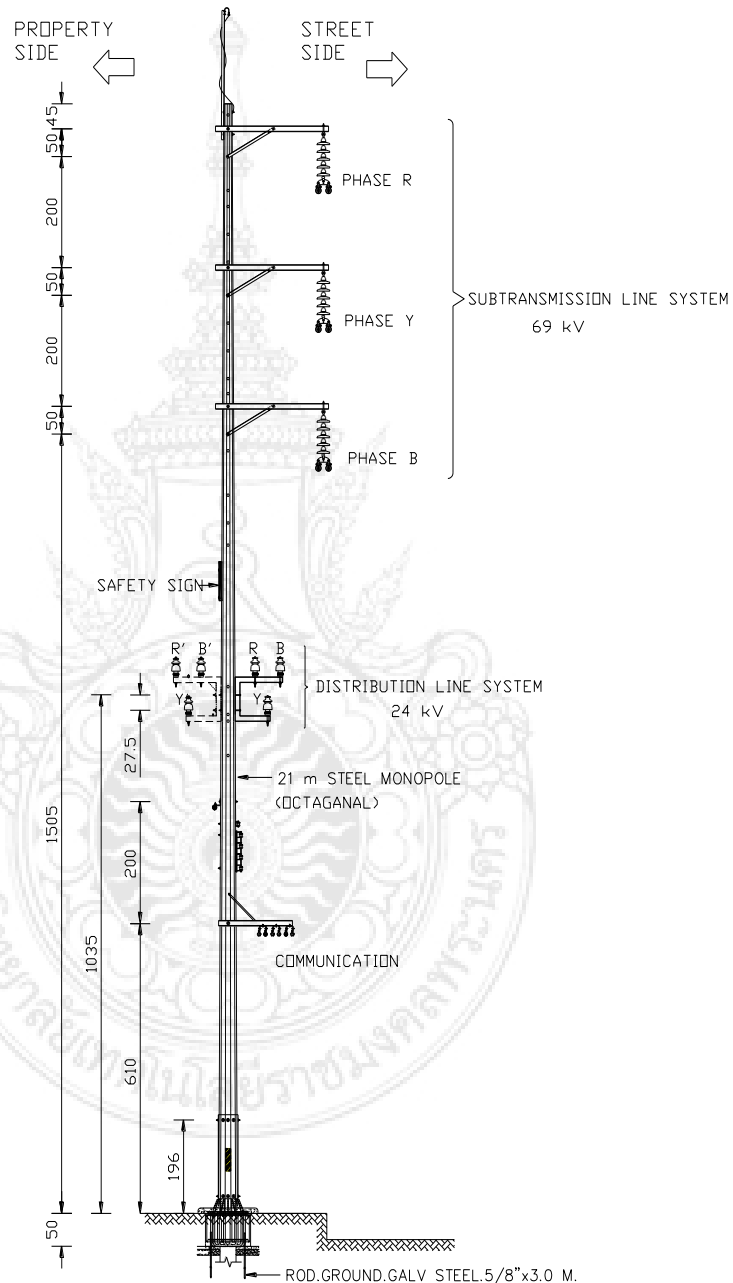
ซึ่งเป็นโครงสร้างของระบบส่ง 69 กิโลโวลต์ และ 24 กิโลโวลต์ ที่ติดตั้งอยู่บนต้นเดียวกับเสาไฟฟ้าโมโนโพล และเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ใช้สำหรับสายส่งนั้นมีความสูงของเสา 21 และ 22 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเสาไฟฟ้าคอนกรีตฝังดินจะมีส่วนที่อยู่เหนือผิวดินประมาณ 20 เมตร ดังภาพที่ 3.2 [23]



NOTE DIMENSIONS ARE IN CM.

ภาพ 3.2 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวง  
ที่มีทั้งระบบ 69 กิโลโวลต์ และ 24 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต

เสาไฟฟ้าโมโนโพล ระบบไฟฟ้ากำลัง 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง เป็นเสาโครงเหล็กสูง 21 เมตร เป็นเหล็กนำมาต่อกัน 2 ท่อน ซึ่งท่อนบนยาว 11.27 เมตร และท่อนล่าง 9.73 เมตรมีลักษณะของพื้นหน้าตัดเสาเป็นรูป 8 เหลี่ยมปลายเรียว ส่วนฐานรากจะมีแท่งกราวด์จำนวน 2 แท่ง ลักษณะการจัดวางวงจรเหมือนกับเสาไฟฟ้าคอนกรีต ดังภาพที่ 3.3 [24]



NOTE DIMENSIONS ARE IN CM.

ภาพ 3.3 การจัดวางโครงสร้างระบบสายส่งย่อยแบบของการไฟฟ้านครหลวง ที่มีทั้งระบบ 69 กิโลโวลต์ และ 24 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการติดตั้งสายส่งในระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์ ชนิดลูกถ้วยแขวน (Suspension Insulator String) ของการไฟฟ้านครหลวง โดยจะเดินสายประเภทสายอากาศเหนือดิน และทำการติดตั้งสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ด้วยสายอลูมิเนียมดีเกิลีว (AAC) ขนาด 2x400 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 1 วงจร ไว้บนเสาส่งต้นเดียวกันกับสายส่งในระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ ด้วยสาย spaced aerial cable (ASC) ขนาด 1x185 ตารางมิลลิเมตร จำนวน 2 วงจร และส่วนปลายเสาจะติดตั้งสายล่อฟ้า (Overhead Ground Wire : OHGW) เพื่อป้องกันไม่ให้ฟ้าผ่าโดยตรงไปยังสายไฟ และทำหน้าที่นำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน ให้กับสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ระบบรวมกันกับสายส่งในระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ แสดงข้อมูลตัวแปรสายในตาราง 3.2

ตาราง 3.2 ข้อมูลตัวแปรสายที่ใช้สร้างแบบจำลอง

ชนิด	ขนาด (ตร.มม.)	จำนวนเส้นลวด (เส้น)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง ภายนอก (มม.)	ความต้านทาน กระแสตรง (โอห์ม/กม.)
สายล่อฟ้า	38.32	7	7.94	4.5733
สายตัวนำ 24 kV	185	30	15.35	0.16456
สายตัวนำ 69 kV	400	61	25.65	0.0778
สายตัวนำ 115 kV	400	61	25.65	0.0778

สายส่งนี้ถูกแทนด้วยแบบจำลองที่แปรผันกับความถี่ (Frequency-Dependent Line Model) โดยแต่ละช่วงความยาวสาย ซึ่งในแบบจำลองใช้ความยาวระยะห่างเสาที่ 80 เมตร จะสามารถคำนวณหาความถี่ได้จากสมการที่ 3.4 [12, 25]

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

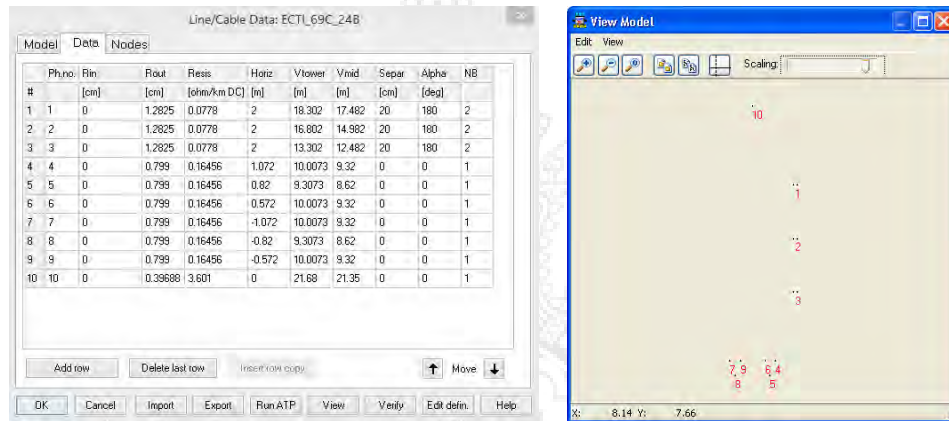
เมื่อ  $f$  คือ ความถี่สำหรับการจำลองสาย (เฮิรตซ์)

$l_{line}$  คือ ความยาวสาย (เมตร)

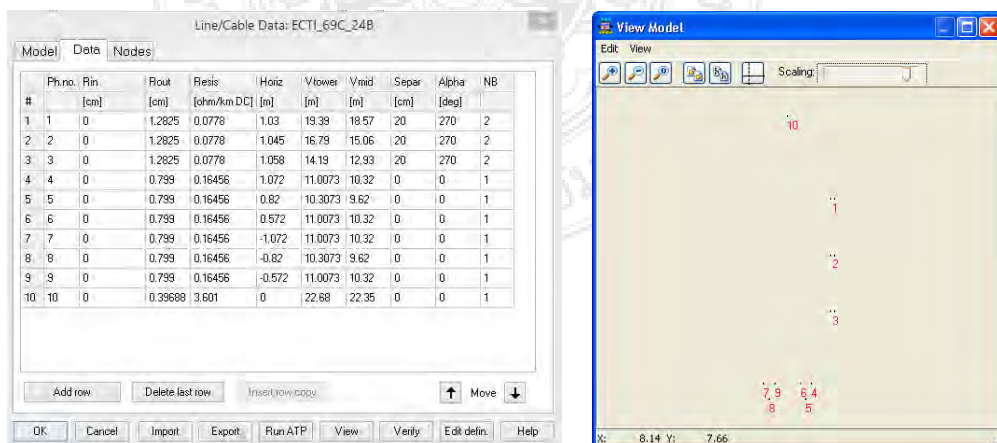
ตาราง 3.3 ความถี่ของความยาวสายที่พิจารณา

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

ในการศึกษาเลือกใช้แบบจำลองแบบ J. Marti ลักษณะเป็นสายความสูญเสียต่ำที่ความถี่สูงโดยใช้โปรแกรม ATP Line Constant (ATPLCC) สร้างแบบจำลอง ดังแสดงในภาพที่ 3.4 – 3.5 โดยจะประกอบด้วยสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ จำนวน 1 วงจร และสายจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ จำนวน 2 วงจร



ภาพ 3.4 แสดงการป้อนข้อมูลแบบจำลองสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ และสายจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต



ภาพ 3.5 แสดงการป้อนข้อมูลแบบจำลองสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ และสายจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

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

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

### 3.3.2 ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้า

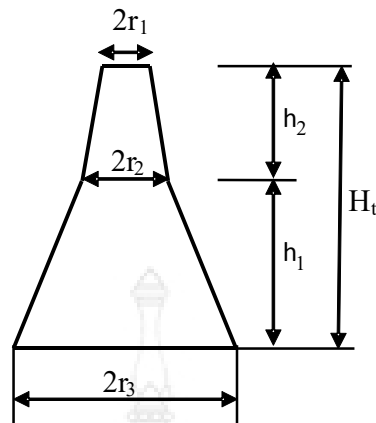
งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการติดตั้งสายส่งในระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์ ชนิดลูกถ้วยแขวน (Suspension Insulator String) ของการไฟฟ้านครหลวง บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ความสูง 21 เมตรจะมีการติดตั้งระบบสายรากสายดินกับสายสายล่อฟ้าเหนือศีรษะ โดยส่วนปลายเสาจะเดินสายลวดเหล็กเคลือบสังกะสี เข้ากับโครงเสาซึ่งเป็นเหล็ก และจะต่อกับแท่งกราวด์ มีความยาว 3 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.875 มิลลิเมตร จำนวน 2 แท่ง ที่บริเวณโคนเสา ซึ่งใช้โครงเหล็กของเสาไฟฟ้าโมโนโพล เป็นทางเดินให้กระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน ซึ่งการหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าโมโนโพล สามารถหาได้จากสมการที่ 3.6 – 3.7 [26]

$$Z_T = 60 \ln \left\{ \cot \left[ 0.5 \tan^{-1} \left( \frac{r_{avg}}{H_t} \right) \right] \right\} \quad (3.6)$$

$$r_{avg} = \frac{r_1 h_2 + r_2 H_t + r_3 h_1}{H_t} \quad (3.7)$$

เมื่อ	$Z_T$	=	เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าโมโนโพล (โอห์ม)
	$H_t$	=	ความสูงของเสา (เมตร)
	$r_{avg}$	=	รัศมีเฉลี่ยทางเรขาคณิตของเสา (เมตร)
	$r_1, r_2, r_3$	=	รัศมีของตัวแปรโครงสร้างเสา ตามภาพที่ 3.6
	$h_1, h_2$	=	ความสูงตัวแปรโครงสร้างเสา ตามภาพที่ 3.6

ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) ของเสาไฟฟ้าโมโนโพล เป็นอิมพีแดนซ์ของระบบดินของเสาจะขึ้นอยู่กับความสูงและรัศมีของหน้าตัด โครงสร้างของแต่ละลวดก่อนตามภาพที่ 3.6



ภาพ 3.6 ลักษณะตัวแปรโครงสร้างเสาไฟฟ้าโมโนโพล

ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) ของเสาไฟฟ้าคอนกรีตสามารถคำนวณหาโดยการนำคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของคอนกรีตมาคำนวณได้ตามสมการ 3.8 [27]

$$Z_T = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r - j\sigma / (\epsilon_o \omega)}} \ln \left( \frac{h + \sqrt{h^2 + R_{avg}^2}}{R_{avg}} \right) \quad (3.8)$$

- เมื่อ
- $Z_T$  = เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีต (โอห์ม)
  - $h$  = ความสูงของเสา (เมตร)
  - $R_{avg}$  = รัศมีเฉลี่ยของเสาไฟฟ้าคอนกรีต (เมตร)
  - $\epsilon_o$  = ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของสุญญากาศ ( $=8.854 \times 10^{-12}$  farad/m)
  - $\epsilon_r$  = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีต ( $=5.94$ )
  - $\sigma$  = ค่าการนำไฟฟ้าของเสาไฟฟ้าคอนกรีต (siement/m)
  - $\omega$  = ความถี่เชิงมุม (rad/s)

แต่หากต้องการหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีตนั้น โดยง่ายซึ่งอาจพิจารณาตามความสูงของเสาคอนกรีตได้จากสมการที่ 3.9 [12, 28]

$$Z_T = 60 \ln \left( \frac{H}{r} \right) + 90 \left( \frac{r}{H} \right) - 60 \quad (3.9)$$

- เมื่อ
- $Z_T$  คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีต (โอห์ม)
  - $H$  คือ ความสูงของเสา (เมตร)
  - $R$  คือ รัศมีของตัวนำสายดิน (เมตร)

ตาราง 3.4 ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ที่นำมาใช้ในแบบจำลอง

ชนิดของเสาไฟฟ้า	เสิร์จอิมพีแดนซ์ (โอห์ม)
เสาไฟฟ้าโมโนโพล (สมการ 3.6)	269.14
เสาไฟฟ้าป้อนคอนกรีต (สมการ 3.8)	226.96
เสาไฟฟ้าป้อนคอนกรีต (สมการ 3.9)	451.50
แบบจำลองสายดินเพิ่มนอกเสาส่ง (สมการ 3.15)	411.27

เมื่อคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีการสูญเสีย จะทำให้เกิดการหน่วง ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากต้องมียางส่วนหนึ่งที่จะต้องกระทำ เพื่อเอาชนะแรงหน่วงนี้ ดังนั้นความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่น ขึ้นอยู่กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์และความนำไฟฟ้าของคอนกรีตและความถี่ตามสมการ 3.10 [29]

$$\mu = \frac{C}{\sqrt{\mu_r (\epsilon_r - j\sigma / \epsilon_0 \omega)}} \quad (3.10)$$

- เมื่อ  $\mu$  คือ ความเร็วของคลื่นที่เคลื่อนที่ภายในเสาไฟฟ้าคอนกรีต (เมตรต่อวินาที)
- $C$  คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  (เมตรต่อวินาที)
- $\mu_r$  คือ Relative Permeability ของคอนกรีตมีค่าเท่ากับ 1
- $\epsilon_r$  คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของตัวกลางคอนกรีตเท่ากับ 5.94

แบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีตจะทำการสร้างโดยใช้ฟังก์ชัน Line Distributed / Transp. Lines โดยมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ และความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นภายในเสาไฟฟ้าคอนกรีต และเสาไฟฟ้าโมโนโพล สามารถคำนวณจากสมการที่ 3.6 สมการที่ 3.8 และ สมการที่ 3.9 ตามลำดับ

งานวิจัยของ สำเร็จ ได้ทำการทดสอบเพื่อหาความเร็วของคลื่นภายในคอนกรีตที่มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ในช่วง 25 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยพบว่าค่าตามในตาราง 3.5

ตาราง 3.5 ความเร็วคลื่นภายในคอนกรีตที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่

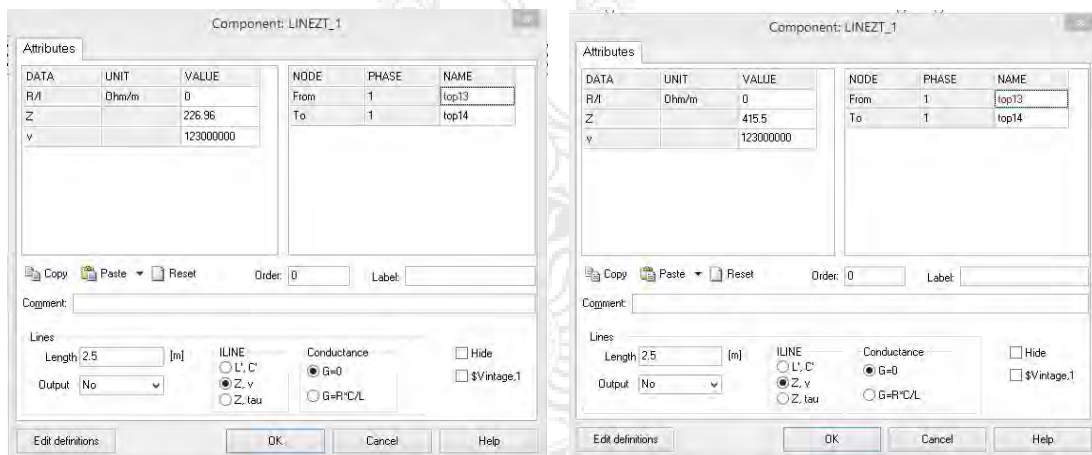
ความถี่ (kHz)	25	40	63	100	160	250	400	630	1,000
ความเร็วคลื่น (m/ $\mu$ s)	96	100	105	109	112	115	118	120	123



ในการทำแบบจำลองของวิทยานิพนธ์นี้ ความเร็วคลื่นภายในเสาไฟฟ้าคอนกรีตนี้จะใช้ 123 เมตรต่อไมโครวินาที [13] สำหรับความเร็วคลื่นภายในเสาไฟฟ้าโมโนโพล และสายดินภายนอกเสาจะใช้ 300 เมตรต่อไมโครวินาที ตามภาพที่ 3.7-3.8 [10, 30]



ภาพ 3.7 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าโมโนโพลและแบบจำลองสายดินเพิ่มนอกเสาส่ง



ภาพ 3.8 การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าคอนกรีต

### 3.3.3 แบบจำลองพวงลูกถ้วย

มาตรฐานการก่อสร้างระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล จะใช้ลูกถ้วยหมายเลข 52-3 ตามมาตรฐาน มอก.354 จำนวน 5 ลูก สำหรับระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ใช้ลูกถ้วยหมายเลข 56/57-2 ตามมาตรฐาน มอก.1251 จำนวน 1 ลูกถ้วย

และมาตรฐานการก่อสร้างระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต ของการไฟฟ้านครหลวงกำหนดให้ใช้ลูกถ้วยหมายเลข 52-3 ตามมาตรฐาน มอก.354 จำนวน 4 ลูก แต่ระยะหลัง

กฟน. ทำการติดตั้งจำนวน 7 ลูก เนื่องจาก การเปลี่ยนระดับแรงดันเป็นระบบ 115 กิโลโวลต์ โดยไม่ต้องทำการดับไฟเพื่อติดตั้งลูกถ้วยเพิ่ม โดยปัจจุบันส่วนใหญ่จะยังคงใช้จำนวน 4 ลูก ส่วนระบบ 24 กิโลโวลต์กำหนดให้ใช้ลูกถ้วยหมายเลข 56/57 ตามมาตรฐาน มอก.1251 จำนวน 1 ลูก ตามภาพที่ 3.9



(ก) ลูกถ้วยชนิด 52-3 ในระบบ 69 กิโลโวลต์ (ข) ลูกถ้วยชนิด 56/57-2 ในระบบ 24 กิโลโวลต์

ภาพ 3.9 ลูกถ้วยที่ใช้ในระบบ 24 กิโลโวลต์ และ 69 กิโลโวลต์

คุณลักษณะของการวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วย (Critical Impulse Flashover Voltage: CFO) ดังแสดงตาราง 3.6 โดยใช้ค่าของสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient Variance) เท่ากับ 3 % [28]

ตาราง 3.6 คุณลักษณะของการวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของลูกถ้วยในการจำลอง [31-33]

ชนิดของฉนวน	ผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วย (กิโลโวลต์)		สัมประสิทธิ์ของความผันแปร (กิโลโวลต์)	
	ลำดับบวก	ลำดับลบ	ลำดับบวก	ลำดับลบ
52-3 (4 unit)	440	415	426.80	402.55
52-3 (5 unit)	525	495	509.25	480.15
52-3 (7 unit)	695	670	674.15	649.90
56/57-2 (1unit)	180	205	174.60	198.85

### 3.3.4 แบบจำลองความต้านทานอิมพัลส์ [34-35]

สำหรับการศึกษานี้ได้พิจารณาลักษณะของความต้านทานดิน เมื่อมีกระแสแพร่กระจายในดิน หากกระแสฟ้าผ่ามีขนาดสูงพอที่จะสนามไฟฟ้าสูงกว่าสนามไฟฟ้าวิกฤตของดิน ณ จุดที่ติดตั้งตัวนำลงดินจะทำให้ดินรอบๆ ตัวนำนั้นเสียสภาพการเป็นฉนวน กลายเป็นตัวนำไฟฟ้าแทน เสมือนว่าตัวนำลงดินนั้นขยายใหญ่ขึ้น ออกเป็นรูปครึ่งทรงกลม

โดยทั่วไปค่าความต้านทานดินที่ฐานเสา ได้จากการวัดในภาคสนาม หรือได้จากการคำนวณโดยใช้สูตรตามมาตรฐาน ขึ้นอยู่กับรูปทรงของตัวนำลงดิน ค่าเหล่านี้เป็นค่าความต้านทานที่ความถี่กำลัง แต่ในความเป็นจริงความต้านทานดินที่ฐานเสาลดลง เมื่อมีกระแสฟ้าผ่า ความถี่สูงไหล

มาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวง ใช้ตัวนำลงดินเป็นชนิดแท่ง ความต้านทานดินที่ความถี่กำลังที่ฐานเสาหาได้จากสมการ 3.11

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (3.11)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง กับความต้านทานดินอิมพัลส์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.12

$$R_i = \alpha R_0 \quad (3.12)$$

เมื่อ  $R_i$  คือ ความต้านทานดินอิมพัลส์ (โอห์ม)

$R_0$  คือ ความต้านทานดินที่ความถี่กำลัง (โอห์ม)

$\rho$  คือ ความต้านทานดินจำเพาะ (โอห์ม.เมตร)

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์อิมพัลส์ของความต้านทานดิน

เนื่องจากค่าความต้านทานดิน ขึ้นกับชนิดและลักษณะของดินเป็นหลัก และในการปฏิบัติงานภาคสนามมีความไม่แน่นอนของลักษณะของดิน ขึ้นอยู่กับพื้นที่ปฏิบัติงาน ดังนั้นในการศึกษาโดยโปรแกรม ATP-EMTP จึงทำโดยการแปรผันค่าความต้านทานดินอิมพัลส์เป็นหลายค่า เพื่อพิจารณาผลของความต้านทานดินอิมพัลส์ที่มีผลต่อแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าในที่นี้แปรผันค่าดังนี้ 5, 25, 50, 75 และ 100 โอห์ม แต่สำหรับค่าความต้านทานดินจำเพาะในพื้นที่ของการไฟฟ้านครหลวงนั้นจากการสำรวจพื้นที่โดยทั่วยุพบว่ามีคุณลักษณะเป็นดินสองชั้นโดยดินชั้นบนมีค่าความต้านทานดินจำเพาะไม่เกิน 5 โอห์มเมตรและมีความหนาไม่เกิน 2 เมตรส่วนดินชั้นบนมีค่าความต้านทานดินจำเพาะไม่เกิน 100 โอห์มเมตร แต่ในการทำกรณีศึกษานี้จะไม่ได้พิจารณาค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ที่ต่ำกว่า 5 โอห์ม เนื่องจากพิจารณาเป็นกรณีเลวร้ายสุดว่ากรณีที่ค่าของความต้านทานดินที่ความถี่กำลังเป็น 5 โอห์มนั้น ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์ไม่มีทางเกิน 5 โอห์ม

ความต้านทานจำเพาะของดินขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่นความชื้นของดิน ส่วนประกอบทางเคมี ความเข้มข้นของเกลือที่อยู่ในดิน ขนาดของเม็ดดิน ชนิดของเนื้อดิน ดิน หินทราย กรวด ฯลฯ ซึ่งโดยส่วนใหญ่ชนิดของดินแบบต่างๆสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.7

ตาราง 3.7 ความต้านทานจำเพาะของดินแบบต่างๆ [36]

ชนิดของดิน	ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม.เมตร)
ดินเปียก	10
ดินชื้น	100
ดินแห้ง	1,000
หินใต้ดิน	10,000

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ระบบรากสายดิน จะแพร่กระจายไหลในดิน แรงดันที่รากสายดินจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา ทำให้มีการนำกระแสเพิ่มขึ้น ดังนั้นความจุของดินหาได้ตามสมการ 3.13

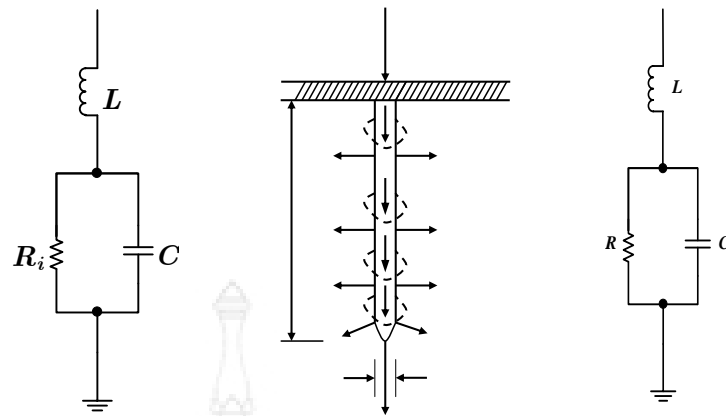
$$C = \frac{\epsilon_r l}{18 \ln\left(\frac{4l}{d}\right)} \times 10^{-9} \quad (3.13)$$

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านรากสายดิน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำที่รากสายดินดังสมการที่ 3.14

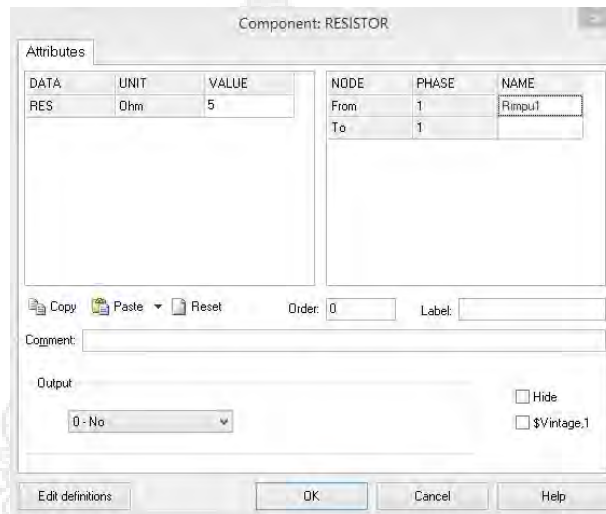
$$L = 2l \cdot \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \times 10^{-7} \quad (3.14)$$

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

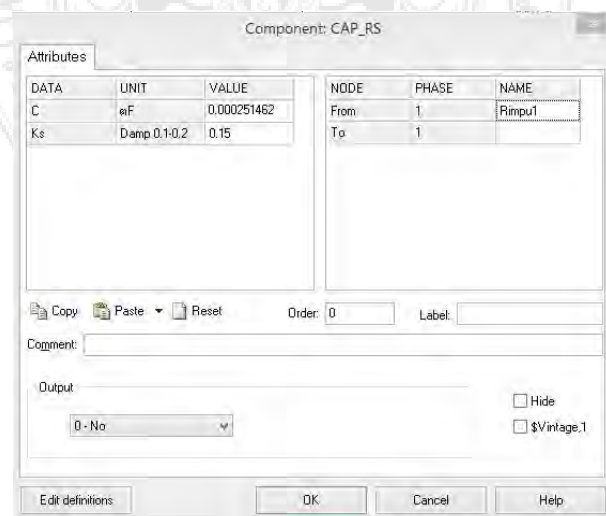
ดังนั้นวงจรสมมูลของรากสายดิน เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ระบบรากสายดิน จะประกอบด้วย ความต้านทานดินอิมพีแดนซ์ คาปาซิแตนซ์ และอินดักแตนซ์ ดังภาพที่ 3.10



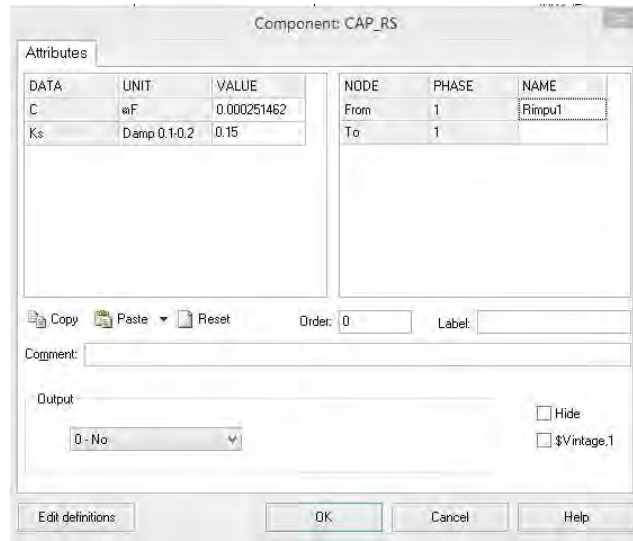
ภาพ 3.10 วงจรสมมูลของรากสายดิน [35]



ภาพ 3.11 การสร้างแบบจำลองความต้านทานของรากสายดินแบบแท่ง

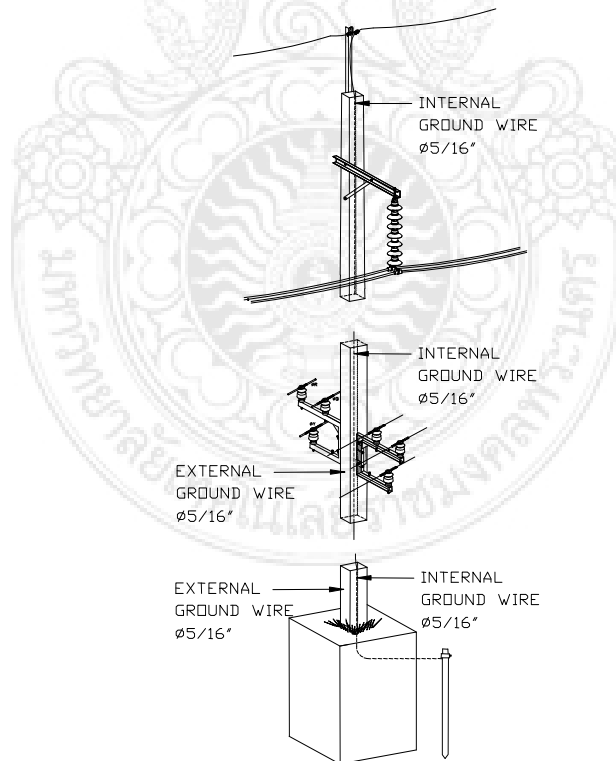


ภาพ 3.12 การสร้างแบบจำลองตัวเหนี่ยวนำของรากสายดินแบบแท่ง



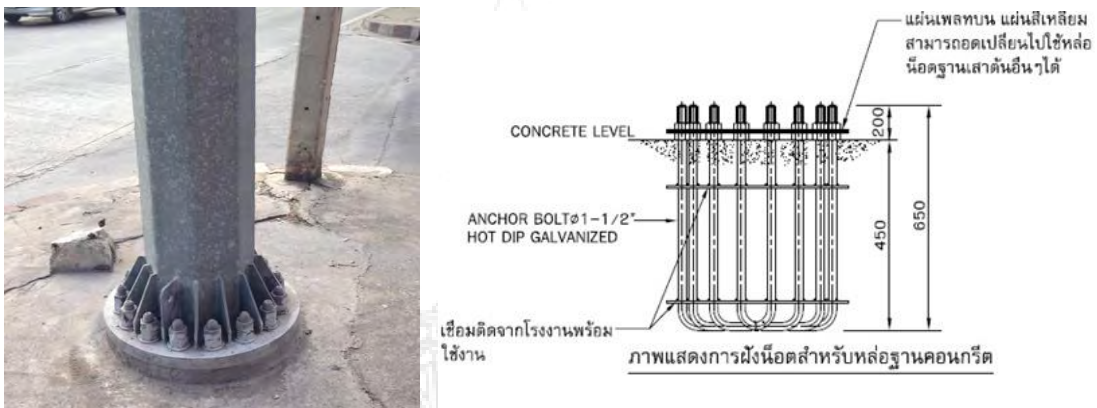
ภาพ 3.13 การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุของรากสายดินแบบแบ่ง

การติดตั้งระบบสายรากสายดินกับสายสายล่อฟ้าเหนือศีรษะของเสาไฟฟ้าคอนกรีตจะทำการต่อลงดิน โดยผ่านสายตัวนำที่เป็นลวดเหล็กเคลือบสังกะสี ที่ฝังอยู่ในเสา ลงสู่แท่งกราวด์ที่มีความยาว 3 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.875 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.14

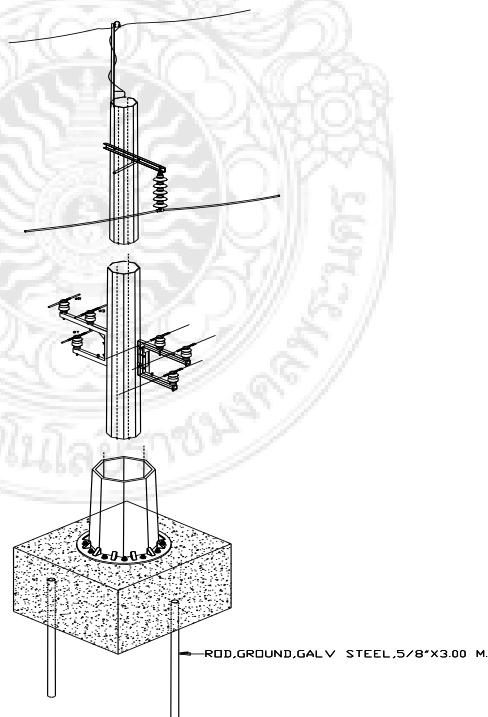


ภาพ 3.14 การติดตั้งสายล่อฟ้าของเสาไฟฟ้าชนิดคอนกรีตในระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์

สำหรับฐานรากเสาไฟฟ้าโมโนโพล จะติดตั้งบนฐานโดยการจับยึด Bolt ด้วยการน็อตในแต่ ละจุดลักษณะ ดังภาพ 3.15 โดยการติดตั้งระบบสายรากสายดินกับสายสายล่อฟ้าเหนือศีรษะ โดยส่วนปลายเสาจะเดินสายลวดเหล็กเคลือบสังกะสี เข้ากับโครงเสาซึ่งเป็นเหล็ก และจะต่อกับ แท่งกราวด์มีความยาว 3 เมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.875 มิลลิเมตร จำนวน 2 แท่ง ที่บริเวณโคนเสา ซึ่งใช้โครงเหล็กของเสาไฟฟ้าโมโนโพลเป็นทางเดินให้กระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน ซึ่งแสดงลักษณะการติดตั้งสายล่อฟ้าของเสาไฟฟ้าโมโนโพล ดังภาพ 3.16



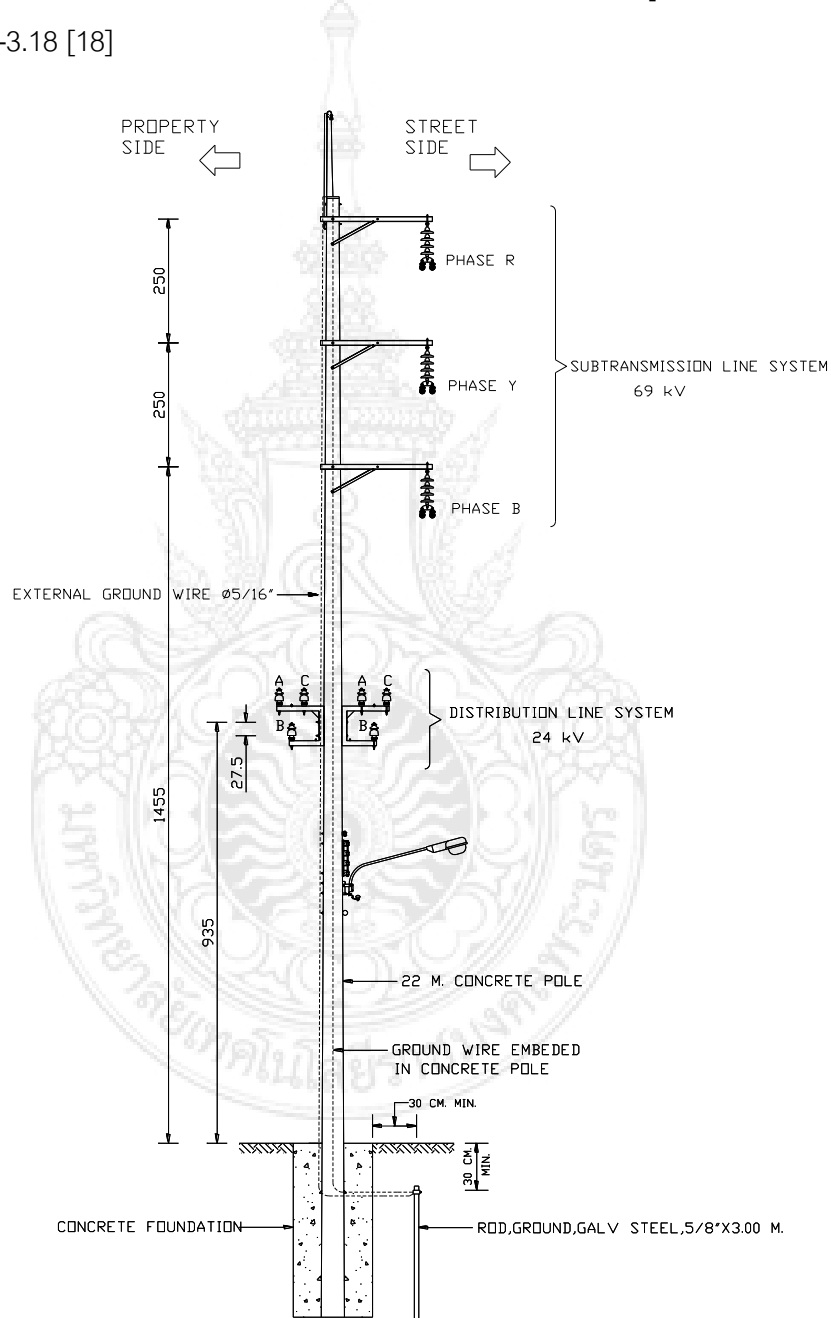
ภาพ 3.15 ลักษณะฐานรากของเสาไฟฟ้าโมโนโพล



ภาพ 3.16 การติดตั้งสายล่อฟ้าของเสาไฟฟ้าโมโนโพลในระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์

### 3.3.5 แบบจำลองสายดินเพิ่มนอกเสาสูง

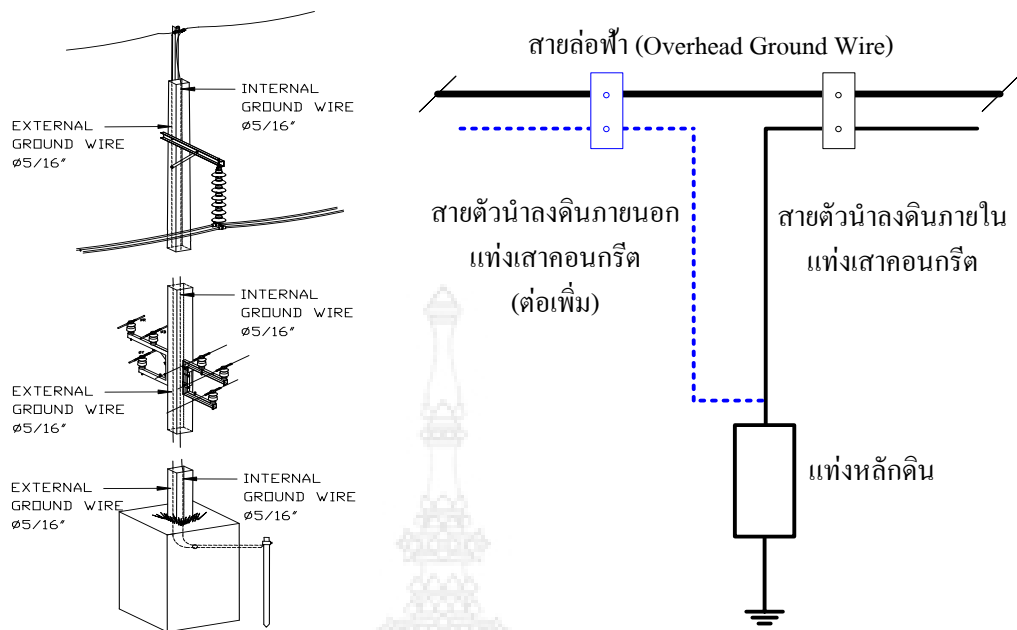
สำหรับการติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาสูง หรือสายดินเพิ่มนอกเสา เป็นการศึกษา โดยใช้เทคนิคการติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาไฟฟ้าคอนกรีต (External Ground Wire) เพื่อศึกษาการลดผลกระทบจากฟ้าผ่า โดยเชื่อมต่อเพิ่มระหว่างสายล่อฟ้าไปยังแท่งหลักดิน โคนเสา โดยใช้ขนาดลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี ที่เก็ลยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.93 มิลลิเมตร ดังภาพที่ 3.17-3.18 [18]



NOTE DIMENSIONS ARE IN CM.

ภาพ 3.17 การติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาสูงระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์





ภาพ 3.18 ไตอะแกรมการติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสาส่ง

แบบจำลองสายดินเพิ่มนอกเสา จะเลือกใช้ลวดเหล็กเคลือบสังกะสีดีเยี่ยมต่อขนานภายนอกลงมากับเสาไฟฟ้าคอนกรีต สามารถคำนวณค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินภายนอกจากสมการ 3.15 [37]

$$Z_{gc} = 60 \ln(h / er) - k \cdot \ln[1 + (rc / D)] \quad (3.15)$$

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

โดยคำนวณค่า  $k$  จากสมการ (3.16)

$$k = 0.096 \cdot r_c + 13.95 \quad (3.16)$$

เมื่อ	$k$	คือ	ค่าคงที่
	$r_c$	คือ	รัศมีเสาไฟฟ้าคอนกรีต (เมตร)

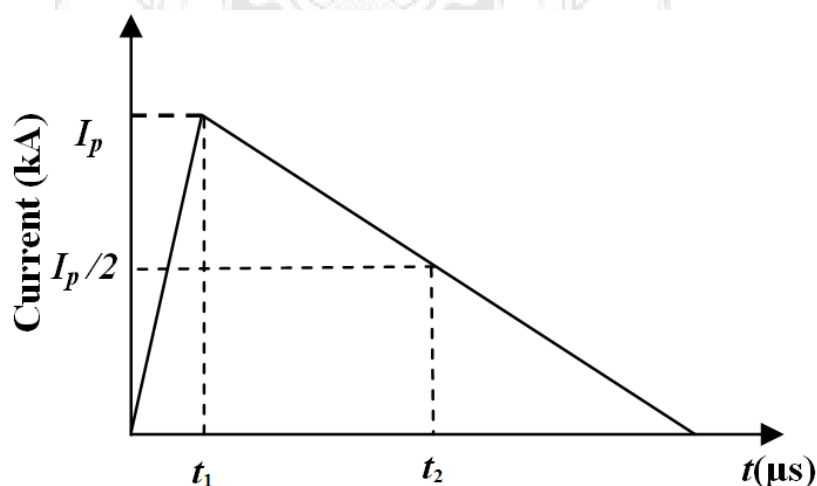
ตาราง 3.8 พารามิเตอร์สำหรับหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินเพิ่มนอกเสา

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

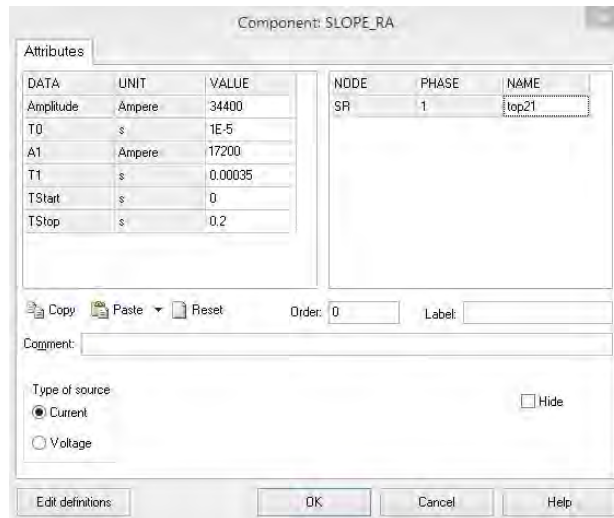
สร้างแบบจำลองสายดินเพิ่มนอกเสาด้วยฟังก์ชัน Line Distributed / Transp.Lines โดยมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินนอกเสาตามการคำนวณจากสมการที่ 3.15

### 3.3.6 แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า

แบบจำลองกระแสฟ้าผ่า จะแทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสอิมพัลส์ต่อขนานอยู่กับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของลัมฟ้าผ่า และเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์ จะกำหนดให้รูปคลื่นอิมพัลส์มีค่าเพิ่มขึ้นและลดลงแบบเป็นเชิงเส้น โดยมีเวลาหน้าคลื่นช่วงเวลาเป็น แอมป์ต่อไมโครวินาที ต่อช่วงเวลาหลังคลื่นไมโครวินาที เช่น 0.25/100, 1/100 ,2/100 ,3/100 ,4/100 และ 10/350 ไมโครวินาที ( $T_1/T_2$ ) ซึ่งแทนหน่วยเป็นไมโครวินาที ( $\mu\text{s}$ ) ตามลำดับ และการกำหนดค่าขนาดกระแสฟ้าผ่า (Amplitude) ดังแสดงในภาพที่ 3.19 ซึ่งในโปรแกรม ATP-EMTP ได้เลือกใช้แบบจำลองแหล่งกำเนิดแบบ Slop Ramp ดังภาพที่ 3.20 [10, 14]

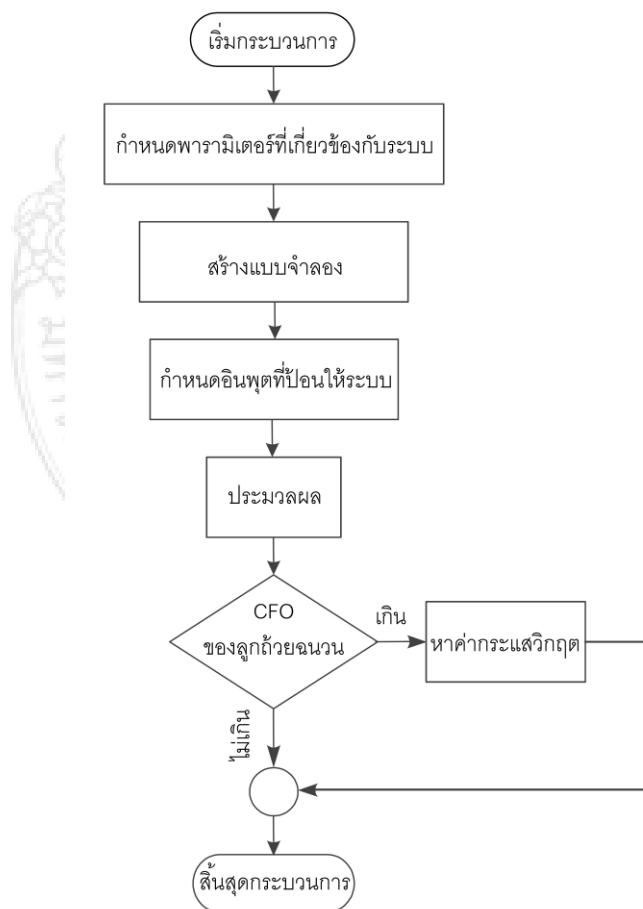


ภาพ 3.19 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่ใช้ในการวิเคราะห์



ภาพ 3.20 แบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าขนาด 34.4 กิโลแอมป์  
ความถี่คลื่น 10/350 ไมโครวินาที

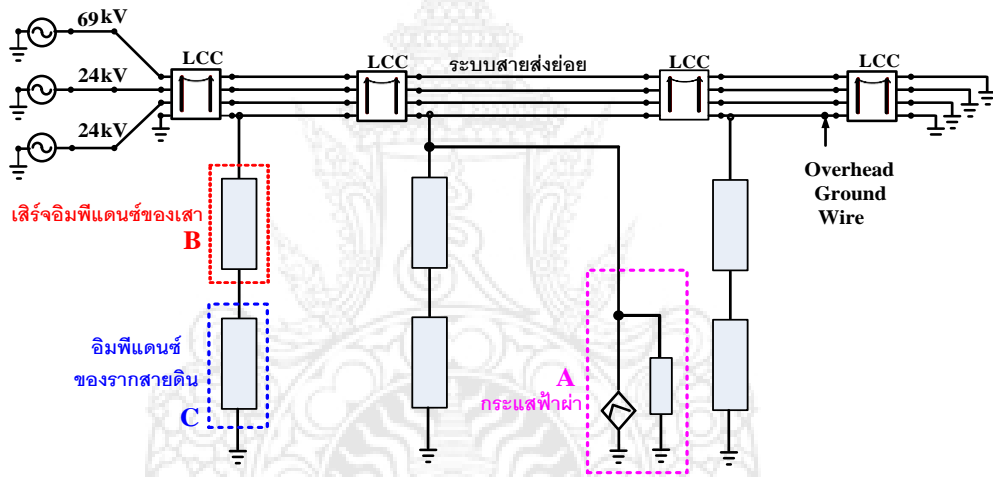
### 3.4 กระบวนการประมวลผลของแบบจำลอง



ภาพ 3.21 กระบวนการประมวลผลของแบบจำลอง

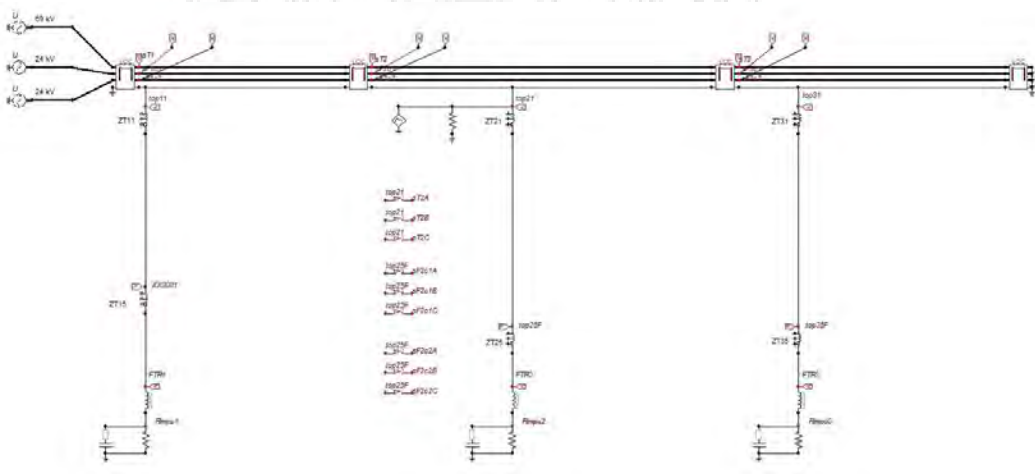
### 3.5 แบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP

การสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าโมโนโพล และจำลองการเกิดฟ้าผ่ากรณีฟ้าผ่าโดยตรงลงสายล่อฟ้า ในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP (Alternative Transients Program-Electromagnetic Transients Program) และทำการวิเคราะห์สมรรถนะ การป้องกันฟ้าผ่า ในการสร้างแบบจำลองสายส่งและสายป้อนเหนือดินแบบหลายตัวนำตามสภาพการใช้งานจริง จะเลือกใช้แบบจำลองของ J. Marti Mode ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ในโปรแกรม ATP-EMTP โดยตัวอย่างแบบจำลองประกอบไปด้วย แหล่งจ่าย 3 เฟส ระดับ 69 กิโลโวลต์ จำนวน 1 วงจร และ 24 กิโลโวลต์ จำนวน 2 วงจร, สายล่อฟ้าเหนือศีรษะ, กระแสฟ้าผ่า (บล็อก A), เลิฟจิมพีแดนซ์ของเสา (บล็อก B), อิมพีแดนซ์ของรากสายดิน (บล็อก C) ดังภาพ 3.22 และแสดงแบบจำลองดังภาพ 3.23-25



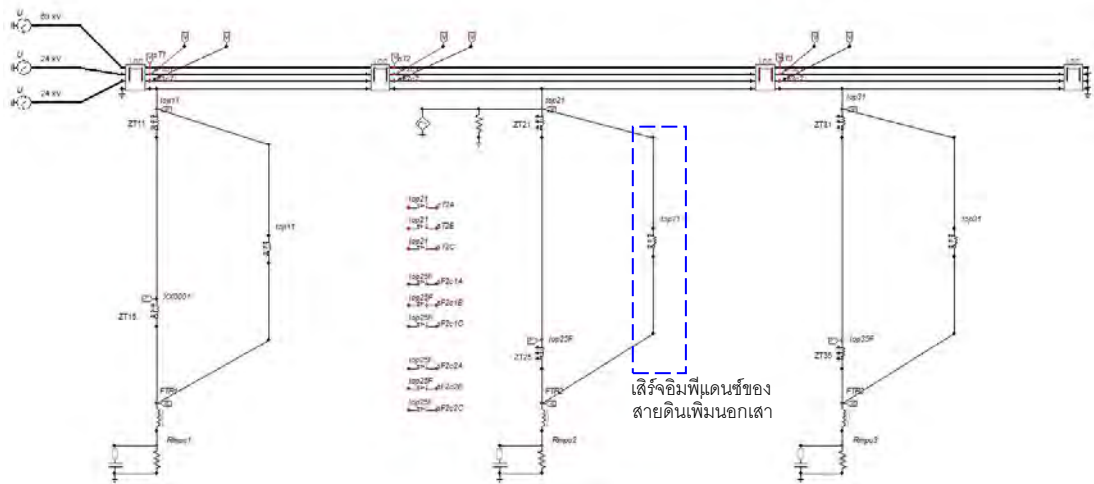
ภาพ 3.22 ไดอะแกรมการจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP

#### 3.5.1 แบบจำลองกรณีใช้เสาไฟฟ้าคอนกรีต



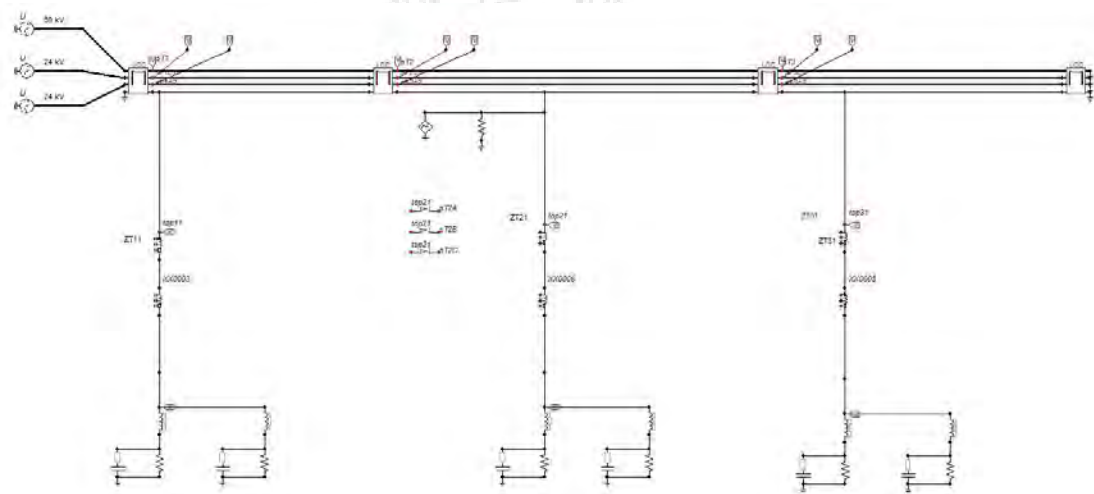
ภาพ 3.23 แบบจำลองของโปรแกรม ATP-EMTP บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต ระบบ 69 กิโลโวลต์

### 3.5.2 แบบจำลองโดยใช้เสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีการติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา



ภาพ 3.24 แบบจำลองของโปรแกรม ATP-EMTP บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต ระบบ 69 กิโลโวลต์ กรณีการติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา

### 3.5.3 แบบจำลองโดยใช้เสาไฟฟ้าโมโนโพล



ภาพ 3.25 แบบจำลองของโปรแกรม ATP-EMTP บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ระบบ 69 กิโลโวลต์

ตาราง 3.9 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

รายละเอียด	Concrete Pole	External Ground	Monopole
<b>1. Lightning Current</b>			
- Amplitude (kA)	Input Value	Input Value	Input Value
- Front Time/Tail Time ( $\mu$ s)	Input Value	Input Value	Input Value
<b>2. OHGW</b>			
- Diameter (mm)	7.94	7.94	7.94
- DC Resistance ( $\Omega$ )	3.60	3.60	3.60
<b>3. Phase Conductor of 69 kV</b>			
- Diameter (mm)	25.65	25.65	25.65
- DC Resistance ( $\Omega$ )	0.0778	0.0778	0.0778
<b>4. Phase Conductor of 24 kV</b>			
- Diameter (mm)	15.35	15.35	15.35
- DC Resistance ( $\Omega$ )	0.164	0.164	0.164
<b>5. Pole</b>			
- Height (m)	20	20	21
- Span (m)	80	80	80
- Surge Impedance ( $\Omega$ )	226.96	226.96	269.14
- Wave Velocity (m/ $\mu$ s)	123	123	300
<b>6. External Ground Wire</b>			
- Diameter (mm)	-	7.94	-
- Length (m)	-	20	-
- Surge Impedance ( $\Omega$ )	-	411.27	-
- Wave Velocity (m/ $\mu$ s)	-	300	-
<b>7. Ground Rod</b>			
- Ground Rod Quantity (unit)	1	1	2
- Diameter (mm)	16	16	16
- Length (m)	3	3	3
- Impulse Resistance ( $\Omega$ )	5-100	5-100	5-100
<b>8. Insulator Quantity/Circuit</b>			
- 69 kV :Type 52-3 (unit)	4	4	5
- 24 kV :Type 56/57-2 (unit)	1	1	1

## บทที่ 4

### การศึกษาแบบจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP

#### 4.1 คำนำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ของการไฟฟ้านครหลวง โดยการสร้างแบบจำลองของเสาไฟฟ้าโมโนโพล และจำลองการเกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายล่อฟ้า ตรงตำแหน่งหัวเสา ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองตามตาราง 3.9 และทำการจำลองด้วยแบบจำลองโดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ตามหัวข้อ 3.5 พร้อมทั้งทำการศึกษาค่าดัชนี ที่นำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง โดยทำการศึกษาเป็น 9 กรณี (4.2.1 - 4.2.9)

#### 4.2 การศึกษาของแบบจำลองในกรณีต่างๆ

##### 4.2.1 การศึกษาขนาดของกระแสฟ้าผ่าที่มีผลต่อแรงดันหัวเสา

การศึกษาหัวข้อนี้ เป็นการศึกษากรณีเกิดฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้าเหนือศีรษะ เพื่อศึกษาขนาดของกระแสฟ้าผ่าที่ส่งผลต่อแรงดันหัวเสา โดยการทดลองทำการเพิ่มขนาดกระแสฟ้าผ่า ตั้งแต่ 10, 20, 30 34.4, 40, 50 และ 60 กิโลแอมป์ ด้วยรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกคือ 10/350 ไมโครวินาที จากนั้นบันทึกค่าแรงดันหัวเสา ที่ค่าของความต้านทานอิมพัลส์ 5, 10, 25, 50, 75 และ 100 โอห์ม ตามลำดับ ของเสาแต่ละประเภท

จากตารางที่ 4.1 – 4.3 เมื่อขนาดของกระแสฟ้าผ่ามีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แรงดันหัวเสามีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งเกิดทั้งเสาไฟฟ้าคอนกรีต (Concrete), เสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีติดตั้งสายดินนอกเสา และเสาไฟฟ้าโมโนโพล เช่น ตารางที่ 4.1 พิจารณาที่ความต้านทาน 5 โอห์ม เมื่อเกิดฟ้าผ่า 10 กิโลแอมป์ จะทำให้เกิดแรงดันหัวเสา 54.47 กิโลโวลต์ เมื่อเพิ่มความขนาดกระแสฟ้าผ่า 20 กิโลแอมป์ จะทำให้เกิดแรงดันหัวเสา 128.52 กิโลโวลต์ และหากเพิ่มขนาดกระแสฟ้าผ่าขึ้นไปเรื่อยๆ จะส่งผลให้แรงดันหัวเสามีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งในตาราง 4.2 และ 4.3 แรงดันหัวเสามีลักษณะที่เพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสฟ้าผ่า เช่นกัน

ตาราง 4.1 แรงดันหัวเสา (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต

$R_i$ ( $\Omega$ )	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)						
	10	20	30	34.4	40	50	60
5	54.47	128.52	159.34	182.50	212.45	265.56	318.62
10	68.53	137.08	205.45	235.71	272.74	342.69	411.01
25	103.17	209.29	313.91	359.99	418.59	523.24	627.88
50	134.28	269.29	403.92	463.21	537.14	671.42	807.84
75	148.81	296.35	444.39	509.62	592.58	740.65	888.86
100	154.03	308.82	463.23	531.17	617.62	772.05	926.39

ตาราง 4.2 แรงดันหัวเสา (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที บนเสาไฟฟ้าคอนกรีตติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา

$R_i$ ( $\Omega$ )	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)						
	10	20	30	34.4	40	50	60
5	45.19	90.52	135.78	155.74	180.61	226.31	271.32
10	64.79	131.02	196.44	225.35	262.03	327.41	393.05
25	104.41	208.84	313.28	359.20	417.61	522.09	626.24
50	135.68	271.42	407.13	466.34	542.83	678.54	814.25
75	149.16	298.36	447.52	512.67	596.68	745.74	895.08
100	155.11	310.27	465.40	533.15	620.50	775.67	930.73



ตาราง 4.3 แรงดันหัวเสา (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

$R_i (\Omega)$	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)						
	10	20	30	34.4	40	50	60
5	33.38	66.77	99.83	114.62	133.11	166.65	200.00
10	45.70	91.41	136.57	157.22	184.63	229.58	272.66
25	74.06	148.14	228.69	254.08	296.29	370.36	444.34
50	104.55	209.15	325.06	359.75	418.32	522.90	627.48
75	123.50	246.79	370.80	428.18	494.40	617.96	741.59
100	135.91	271.91	407.80	467.71	543.82	678.77	815.77

หากพิจารณาตาราง 4.1 – 4.3 จะพบอีกว่า กรณีที่กระแสฟ้าผ่าคงที่ แต่ค่าความต้านทานอิมพัลส์มีค่าสูงขึ้น ตั้งแต่ 5, 10, 25, 50, 75 และ 100 โอห์ม ตามลำดับ จะส่งผลให้แรงดันหัวเสา มีค่าสูงขึ้น ตามลำดับ เช่น ตารางที่ 4.3 หากพิจารณาที่กระแสฟ้าผ่า 34.4 กิโลแอมป์ เมื่อความต้านทานอิมพัลส์ 5 โอห์ม จะส่งผลให้แรงดันหัวเสามีค่า 114.62 กิโลโวลต์ เมื่อความต้านทานอิมพัลส์ 10 โอห์ม จะส่งผลให้แรงดันหัวเสามีค่า 157.22 กิโลโวลต์ และเมื่อความต้านทานอิมพัลส์ 15 โอห์ม จะส่งผลให้แรงดันหัวเสามีค่า 254.08 กิโลโวลต์ ซึ่งแรงดันหัวเสาจะสูงขึ้นตามลำดับ

จากตาราง 4.1 – 4.3 หากต้องการเปรียบเทียบแรงดันที่หัวเสา ของเสาไฟฟ้าคอนกรีต เสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีติดตั้งสายดินนอกเสา และเสาไฟฟ้าโมโนโพล ที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์ และค่ากระแสฟ้าผ่าช่วงค่าต่างๆ เพื่อให้เปรียบเทียบค่าโดยง่ายจะนำข้อมูลจากตาราง 4.1-4.3 มาเขียนใหม่เป็นตาราง 4.4

ตาราง 4.4 แรงดันหัวเสา (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที บนเสาไฟฟ้าประเภทต่างๆ

$R_f(\Omega)$	ชนิดเสาส่ง	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)						
		10	20	30	34.4	40	50	60
5	Concrete	54.47	128.52	159.34	182.50	212.45	265.56	318.62
	External	45.19	90.52	135.78	155.74	180.61	226.31	271.32
	Monopole	33.38	66.77	99.83	114.62	133.11	166.65	200.00
10	Concrete	68.53	137.08	205.45	235.71	272.74	342.69	411.01
	External	64.79	131.02	196.44	225.35	262.03	327.41	393.05
	Monopole	45.70	91.41	136.57	157.22	184.63	229.58	272.66
25	Concrete	103.17	209.29	313.91	359.99	418.59	523.24	627.88
	External	104.41	208.84	313.28	359.20	417.61	522.09	626.24
	Monopole	74.06	148.14	228.69	254.08	296.29	370.36	444.34
50	Concrete	134.28	269.29	403.92	463.21	537.14	671.42	807.84
	External	135.68	271.42	407.13	466.34	542.83	678.54	814.25
	Monopole	104.55	209.15	325.06	359.75	418.32	522.90	627.48
75	Concrete	148.81	296.35	444.39	509.62	592.58	740.65	888.86
	External	149.16	298.36	447.52	512.67	596.68	745.74	895.08
	Monopole	123.50	246.79	370.80	428.18	494.40	617.96	741.59
100	Concrete	154.03	308.82	463.23	531.17	617.62	772.05	926.39
	External	155.11	310.27	465.40	533.15	620.50	775.67	930.73
	Monopole	135.91	271.91	407.80	467.71	543.82	678.77	815.77

จากตาราง 4.4 หากพิจารณาที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์เดียวกัน และค่ากระแสฟ้าผ่าเท่ากัน แต่ประเภทของเสาไฟฟ้าต่างกัน คือเสาไฟฟ้าคอนกรีต, เสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา และเสาไฟฟ้าโมโนโพล ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าที่เสาไฟฟ้าโมโนโพลจะเกิดแรงดันฟ้าผ่าหัวเสาค่าน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับเสาไฟฟ้าคอนกรีต และเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา เนื่องจากเป็นเสาโครงเหล็ก คลื่นฟ้าผ่าสามารถวิ่งผ่านลงสู่พื้นได้เร็ว เช่นที่ค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์ 5 โอห์ม กระแสฟ้าผ่า 34.4 กิโลแอมป์ กรณีเสาไฟฟ้าคอนกรีตมีค่า

แรงดันหัวเสา 182.5 กิโลโวลต์ ที่กรณีติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสามีค่าแรงดันหัวเสา 155.74 กิโลโวลต์ และที่เสาไฟฟ้าโมโนโพล มีค่าแรงดันหัวเสา 114.62 กิโลโวลต์ ซึ่งจากผลการทดลองกล่าวได้ว่า บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล จะเกิดแรงดันฟ้าผ่าหัวเสาน้อยที่สุด แต่ที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์ 100 โอห์ม กระแสฟ้าผ่าขนาด 34.4 กิโลแอมป์ กรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตมีค่าแรงดันหัวเสา 531.17 กิโลโวลต์ ที่เสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสามีค่าแรงดันหัวเสา 533.15 กิโลโวลต์ และที่เสาไฟฟ้าโมโนโพล มีค่าแรงดันหัวเสา 467.71 กิโลโวลต์ ซึ่งสรุปได้ว่าที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์เดียวกัน และค่ากระแสฟ้าผ่าเท่ากัน ผลที่เกิดขึ้นบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล จะเกิดแรงดันฟ้าผ่าหัวเสาน้อยที่สุด

แต่หากเปรียบเทียบแรงดันหัวเสาระหว่างกรณีเสาไฟฟ้าคอนกรีต และเสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา ตามตาราง 4.4 พบว่าที่ค่ากระแสฟ้าผ่าเท่ากัน แต่ค่าความต้านทานอิมพัลส์มีค่าสูงขึ้น ตั้งแต่ 5, 10, 25, 50, 75 และ 100 โอห์ม ตามลำดับ กรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ความต้านทานอิมพัลส์ 5 - 10 โอห์ม แรงดันหัวเสาจะสูงกว่า บนเสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสาส่ง หากกรณีที่ความต้านทานอิมพัลส์ 25 โอห์ม แรงดันหัวเสาหัวของเสาไฟฟ้าคอนกรีต และเสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสามีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่หากที่ความต้านทานอิมพัลส์ 50 - 100 โอห์ม แรงดันหัวเสาคงจะน้อยกว่ากรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา

ดังนั้นในทางปฏิบัติกรณีติดตั้งระบบสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพลที่เกิดฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้าจะทำให้เกิดแรงดันฟ้าผ่าที่หัวเสาค่าน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีต และบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา แต่หากพิจารณาการนำเสนอเทคนิคการติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสาสำหรับเสาไฟฟ้าคอนกรีต หากค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่ 5 - 10 โอห์ม จะสามารถลดแรงดันหัวเสาได้มากกว่ากรณีที่เป็นบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตทั่วไป แต่ในทางกลับกัน เมื่อความต้านทานอิมพัลส์ 50 - 100 โอห์ม จะทำให้เกิดแรงดันหัวเสามากที่สุดกว่าทุกกรณี ดังนั้นในทางปฏิบัติเทคนิคการติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสาจะเป็นประโยชน์ต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า เมื่อควบคุมค่าความต้านทานดินให้อยู่ระหว่าง 5 - 10 โอห์ม ซึ่งเมื่อแรงดันที่หัวเสามีค่าเพิ่มขึ้นตาม ค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากแรงดันที่หัวเสาไม่สามารถทำให้ลดลงด้วยคลื่นสะท้อนที่มาจากอิมพีแดนซ์ของรากสายดิน เพราะว่าความเร็วของการเดินทางย้อนกลับผ่านสายดินที่อยู่ในเสาไฟฟ้าคอนกรีตมีความเร็ว 123 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งช้ากว่าความเร็วของตัวนำสายดิน ที่เดินนอกเสาคอนกรีต ดังนั้นแรงดันที่หัวเสาคงจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของราก

สายดิน แต่เมื่อทำการติดตั้งสายดินนอกเสาเพิ่มนั้น จะช่วยลดแรงดันที่หัวเสา สามารถช่วยลดแรงดันที่หัวเสาได้ เนื่องจากความเร็วของคลื่นที่สะท้อนจากระบบรากสายดิน ผ่านมาทางลวดตัวนำของสายดินนอกเสาที่ติดตั้งเพิ่มนั้น มีความเร็ว 300 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งเร็วกว่าการเดินทางย้อนกลับผ่านสายดินที่อยู่ในเสาไฟฟ้าคอนกรีต โดยจะเห็นได้ว่าความเร็วของคลื่นไฟฟ้าผ่านวัสดุต่างๆ และความต้านอิมพัลส์ที่ฐานรากดินจะส่งผลต่อแรงดันหัวเสาด้วย

#### 4.2.2 การศึกษาอัตราการวบไฟย้อนกลับที่ส่งผลต่อค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์และจำนวนลูกถ้วย

การศึกษาหัวข้อนี้ เป็นการศึกษากรณีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีต 2 ค่า ตามสมการ 3.8, 3.9 และเสิร์จอิมพีแดนซ์สายดินนอกเสาสูง ตามสมการ 3.15 เพื่อทำการศึกษาผลของแรงดันหัวเสา และอัตราการวบไฟย้อนกลับที่พวงลูกถ้วย โดยศึกษาในกรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีต และในกรณีติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา โดยใช้สถิติข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี ( $T_d$ ) เท่ากับ 116 วัน กระแสฟ้าผ่า 34.4 กิโลแอมป์ รูปคลื่น 10/350 ไมโครวินาที โดยค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาตามสมการ 3.8 มีค่า 226.96 โอห์ม และตามสมการ 3.9 มีค่า 451.4 โอห์ม จากตาราง 3.4

ตาราง 4.5 แรงดันหัวเสา (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที ที่ผลต่อเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา

$Z_{pole}(\Omega)$	Concrete		External	
	226.96	451.4	226.96	451.4
5	182.50	250.68	155.74	161.26
10	235.71	270.03	225.35	228.54
25	359.99	363.75	359.20	359.94
50	463.21	457.38	466.34	465.03
75	509.62	504.70	512.67	512.81
100	531.17	528.07	533.15	534.19

ตารางที่ 4.5 จากค่าค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาสูงตามสมการ 3.8 มีค่า 226.96 โอห์ม และตามสมการ 3.9 มีค่า 451.4 โอห์ม กรณีเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่มีค่าค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์น้อยจะส่งผลให้เกิดแรงดันหัวเสาที่น้อยกว่า กรณีที่ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของมากกว่า เช่น กรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่มีค่าค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์เสา 226.96 โอห์ม มีค่าแรงดันหัวเสา 182.50 กิโลโวลต์ แต่กรณีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ 451.4 โอห์ม ค่าแรงดันหัวเสา 250.68 กิโลโวลต์ แต่สำหรับกรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา หากความต้านอิมพัลส์เพิ่มขึ้น 50 - 100 โอห์ม จะทำให้เกิดแรงดันหัวเสามากขึ้น โดยที่ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ 451.4 โอห์ม จะทำให้เกิดแรงดันหัวเสามากที่สุด

ตาราง 4.6 กระแสวิกฤต (กิโลแอมป์) ,คลื่น 10/350 ไมโครวินาที ที่มีผลต่อลูกถ้วยจำนวน 4 ลูก

$Z_{pole}(\Omega)$	Concrete		External	
	226.96	451.4	226.96	451.4
5	87.70	62.10	104.40	100.70
10	68.50	59.90	72.00	63.40
25	45.20	44.48	45.20	44.48
50	35.10	35.00	34.90	34.80
75	32.00	31.30	31.70	31.00
100	30.70	30.00	30.50	29.80

ตาราง 4.7 กระแสวิกฤต (กิโลแอมป์) ,คลื่น 10/350 ไมโครวินาที ที่มีผลต่อลูกถ้วยจำนวน 7 ลูก

$Z_{pole}(\Omega)$	Concrete		External	
	226.96	451.4	226.96	451.4
5	110.20	102.70	179.60	166.50
10	106.20	99.00	124.70	117.50
25	78.80	73.40	79.90	74.50
50	63.25	58.80	61.95	57.50
75	57.35	53.40	56.35	52.40
100	55.80	51.10	55.10	50.40

จากตาราง 4.6 – 4.7 แสดงค่ากระแสวิกฤตที่ส่งผลของต่อจำนวนลูกถ้วย โดยทำการเปรียบเทียบกรณีที่ใช้ลูกถ้วย 4 ลูก และ 7 ลูก ตามลำดับ พบว่าบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่มีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์เสาเดียวกัน กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูก จะเกิดกระแสวิกฤติได้ง่ายกว่ากรณีที่ใช้ลูกถ้วย 7 ลูก นั้นหมายถึงหากเลือกใช้ลูกถ้วยจำนวน 7 ลูก จะทำให้พวงลูกถ้วยสามารถทนกระแสสูงสุดก่อนที่จะเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ได้มากกว่ากรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูก และหากค่าความต้านทานฐานเสามีค่าสูงขึ้นจะทำให้กระแสฟ้าผ่านั้นลดลง และกรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสา ก็มีค่าไปในทางเดียวกันกับกรณีเสาไฟฟ้าคอนกรีต ทั้งนี้การศึกษาค่ากระแสวิกฤตที่พวงลูกถ้วยจะสามารถนำไปคำนวณอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ได้ดังตาราง 4.8 - 4.9

ตาราง 4.8 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ที่  $T_0$  เท่ากับ 116 วันต่อปี กรณีใช้ลูกถ้วยจำนวน 4 ลูก

$Z_{pole}(\Omega)$	Concrete		External	
	226.96	451.4	226.96	451.4
5	7.89	16.69	5.27	5.73
10	13.61	17.95	12.24	16.00
25	30.14	30.95	30.14	30.95
50	43.76	43.92	44.08	44.25
75	48.94	50.17	49.47	50.70
100	51.24	52.50	51.60	52.86

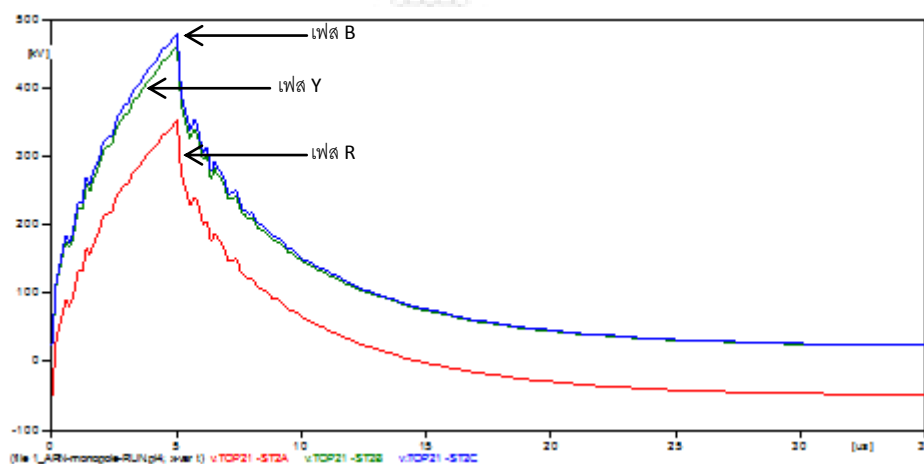
ตาราง 4.9 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี) ที่  $T_0$  เท่ากับ 116 วันต่อปี กรณีใช้ลูกถ้วยจำนวน 7 ลูก

$Z_{pole}(\Omega)$	Concrete		External	
	226.96	451.4	226.96	451.4
5	4.64	5.52	1.42	1.72
10	5.06	6.02	3.45	4.01
25	10.04	11.84	9.74	11.46
50	16.08	18.79	16.78	19.64
75	19.57	22.63	20.25	23.44
100	20.64	24.55	21.14	25.17

จากตาราง 4.8 – 4.9 แสดงค่าการเกิดการรบกวนไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับ (BFOR) ที่ส่งผลของต่อจำนวนลูกถ้วยแขวน โดยทำการเปรียบเทียบกรณีที่ใช้ลูกถ้วย 4 ถ้วย และ 7 ถ้วย ตามลำดับ พบว่าบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่มีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาเดียวกัน กรณีที่ใช้ลูกถ้วย 4 ลูก จะเกิดการรบกวนไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับได้ง่ายกว่ากรณีที่ใช้ลูกถ้วย 7 ลูก ซึ่งหมายถึงว่าหากเลือกใช้ลูกถ้วยจำนวน 7 ลูก จะทำให้เกิดการทนต่อการรบกวนไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับ อันส่งผลให้โอกาสเกิดแรงดันเกินในระบบจำหน่ายไฟฟ้าย่อยจาก BFOR ได้น้อยกว่ากรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูก จากการจำลองโดยโปรแกรม ATP-EMTP ทำให้ทราบว่าหากเพิ่มจำนวนของพวงลูกถ้วยจะสามารถลดอัตราการรบกวนไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับ ที่ส่งผลดีต่อระบบจำหน่ายไฟฟ้าย่อยได้

#### 4.2.3 การศึกษาแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยที่มีผลต่อขนาดกระแสฟ้าผ่าบนเสาโมโนโพล

สืบเนื่องจากตาราง 4.3 กรณีแรงดันหัวเสาเมื่อขนาดกระแสฟ้าผ่าเพิ่มขึ้นกรณีเสาไฟฟ้าโมโนโพล พบว่าขนาดของกระแสฟ้าผ่ามีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้แรงดันหัวเสาของเสาไฟฟ้าโมโนโพล มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงดันหัวเสาจะสูงขึ้น ดังนั้นการศึกษาค่าแรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วย จะทำให้ทราบถึงโอกาสการเกิดแรงดันเกินในสายดินและแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในสายเฟสมีค่าแตกต่างกัน ซึ่งหากมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของฉนวนลูกถ้วย(CFO) จะทำให้เกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover) ที่ฉนวนลูกถ้วย และอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดไฟฟ้าดับต่อมา ซึ่งในแบบจำลองจะใช้รูปคลื่นกระแสความชัน 10/350 ไมโครวินาที



ภาพ 4.1 ลักษณะแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยของเฟสต่างๆ ขณะเกิดฟ้าผ่าโดยตรงลงสายล่อฟ้า

ตาราง 4.10 แรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วย (กิโลโวลต์), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

$R_f(\Omega)$	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมป์)						
	10	20	30	34.4	40	50	60
5	51.30	70.40	104.87	116.66	131.65	158.44	185.22
10	61.22	97.92	134.63	150.78	171.33	208.03	244.73
25	83.97	143.42	202.87	229.03	262.32	321.76	381.21
50	108.45	192.37	276.30	313.24	360.23	444.15	527.04
75	123.66	222.76	321.91	365.53	421.04	502.17	619.30
100	133.49	241.76	351.39	399.38	460.31	569.37	678.34

จากภาพ 4.1 แสดงลักษณะแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยในเฟสต่างๆ ขณะเกิดฟ้าผ่าโดยตรงลงสายล่อฟ้าบนเสาไฟฟ้าโมโนโพลพบว่าที่สายส่งในระบบ 69 กิโลโวลต์ ที่เฟส B ซึ่งเป็นเฟสที่อยู่ในตำแหน่งต่ำสุด (ตามภาพ 3.3) และมีความแตกต่างของแรงดันเกินระหว่างสายดินและแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในสายเฟสมีค่าแตกต่างกันมากกว่าเฟสอื่นๆ ซึ่งหากมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของฉนวนลูกถ้วยจะทำให้เกิดวาทไฟตามฉนวนย้อนกลับ (Back Flashover) ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นในการศึกษาแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยจะพิจารณาที่เฟส B

จากตาราง 4.10 เมื่อขนาดของกระแสฟ้าผ่ามีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วย ของเสาไฟฟ้าโมโนโพลมีค่าเพิ่มขึ้น เช่น ที่ความต้านทาน 5 โอห์ม เมื่อเกิดฟ้าผ่า 10 กิโลแอมป์ จะทำให้เกิดแรงดันหัวเสา 51.30 กิโลโวลต์ เมื่อเพิ่มความขนาดกระแสฟ้าผ่า 20 กิโลแอมป์ จะทำให้เกิดแรงดันหัวเสา 70.40 กิโลโวลต์ และหากเพิ่มขนาดกระแสฟ้าผ่าขึ้นไปเรื่อยๆ จะส่งผลให้แรงดันหัวเสามีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ

กรณีที่กระแสฟ้าผ่าคงที่ แต่ค่าความต้านทานอิมพัลส์มีค่าสูงขึ้น จะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วย มีค่าสูงขึ้นตามลำดับ หากพิจารณาที่ กระแสฟ้าผ่า 34.4 กิโลแอมป์ เมื่อความต้านทานอิมพัลส์ 5 โอห์ม จะส่งผลให้ แรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วย มีค่า 116.66 กิโลโวลต์ เมื่อความต้านทานอิมพัลส์ 10 โอห์ม มีค่า 150.78 กิโลโวลต์ และเมื่อความต้านทานอิมพัลส์ 15 โอห์ม จะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วยมีค่า 229.03 กิโลโวลต์ ซึ่งค่าความต้านทานอิมพัลส์มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วยสูงขึ้น

#### 4.2.4 การศึกษาความชันคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่มีผลต่อแรงดันหัวเสาบนเสาโมโนโพล

การศึกษาหัวข้อนี้ เป็นการศึกษากรณีความชันหน้าคลื่น และหลังคลื่นของกระแสฟ้าผ่าขนาด 34.4 กิโลแอมป์ [18] ซึ่งเป็นค่ากระแสมาตรฐานปี พ.ศ. 2536-2540 ที่มีลักษณะของช่วงหน้าคลื่น คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส เรียกว่า ความชันรูปคลื่น ที่มีหน่วย ไมโครวินาที ซึ่งมีผลสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายตัวนำที่มีผลต่อแรงดันหัวเสา บนเสาโมโนโพล อันส่งผลให้ลูกถ้วยฉนวนที่มีคุณสมบัติ ป้องกันไม่ให้เกิดกระแสฟ้าผ่ารั่วลงดิน แต่เมื่อเกิดฟ้าผ่าที่มีค่ายอดสูงและความชันหน้า คลื่นสูง และหากมีค่าสูงเกินพิกัดใช้งาน จะทำให้ลูกถ้วยฉนวนเกิดการเจาะทะลุได้ ทำให้มีปริมาณกระแสที่รั่วไหลมีจำนวนมาก อาจทำอุปกรณ์ป้องกันที่ติดตั้งในระบบจำหน่ายตัดวงจรออกส่งผลให้การจ่ายไฟในระบบหยุดชะงักได้ รวมถึงจะทำให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าได้รับความเสียหายหรือเสื่อมสภาพ



ตาราง 4.11 แรงดันไฟฟ้าหัวเสา (กิโลโวลต์) ที่มีผลต่อรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

$R_f(\Omega)$	รูปคลื่นฟ้าผ่า (ไมโครวินาที)				
	0.25/100	10/100	10/350	8/20	5/300
5	355.15	114.85	114.62	131.86	194.49
10	394.84	157.22	157.22	172.74	325.51
25	505.74	254.81	254.08	281.46	354.57
50	672.81	395.75	359.75	404.72	509.95
75	846.33	425.15	428.18	486.02	625.57
100	992.75	467.61	467.71	542.65	715.22

จากตาราง 4.11 พบว่าจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP โดยใช้ค่ากระแสฟ้าผ่า 34.4 กิโลแอมป์ ด้วยรูปคลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที จะให้ค่าของแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาสูงกว่าเมื่อทดสอบด้วยรูปคลื่น 10/100 ไมโครวินาที เนื่องจาก รูปคลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที มีความชันหน้าคลื่นมากกว่าและมีช่วงเวลาหน้าคลื่นสั้นกว่า จึงทำให้คลื่นที่สะท้อนมาจากฐานเสาไม่สามารถมาหักล้างยอดคลื่นได้ทันแต่สำหรับรูปคลื่น 10/100 ไมโครวินาที มีค่าแรงดันไฟฟ้าหัวเสาต่ำกว่ามากเพราะว่าคลื่นจากฐานเสาสามารถไปหักล้างยอดคลื่นได้ทัน และพบว่าทั้งสองรูปคลื่นมีค่าของแรงดันไฟฟ้าหัวเสาเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของความต้านทานอิมพีแดนซ์เพิ่มมากขึ้นด้วย

แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความชันหลังรูปคลื่น โดยกำหนดให้ช่วงเวลาหน้าคลื่นคงที่แต่เปลี่ยนค่าของช่วงเวลาหลังคลื่น จากตาราง 4.11 พบว่า ที่รูปคลื่น 10/100 ไมโครวินาที และ 10/350 ไมโครวินาที จะพบว่าแรงดันไฟฟ้าหัวเสามีค่าใกล้เคียงกันทุกค่า ที่ความต้านทานอิมพีแดนซ์เท่ากันหมายความว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นมีผลต่อแรงดันไฟฟ้าหัวเสามากกว่า แม้ว่าค่าของช่วงเวลาหลังคลื่นต่างกัน

#### 4.2.5 การศึกษาความชันคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมพวงลู่ก๊วยบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

การศึกษาหัวข้อนี้ เป็นการศึกษากรณีความชันคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่มีผลต่อแรงดันตกคร่อมพวงลู่ก๊วยบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ด้วยกระแสฟ้าผ่าขนาด 34.4 กิโลแอมป์

ตาราง 4.12 แรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วย (กิโลโวลต์) ที่มีผลต่อรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

$R_f(\Omega)$	รูปคลื่นฟ้าผ่า (ไมโครวินาที)				
	0.25/100	10/100	10/350	8/20	5/300
5	319.48	116.65	116.66	131.30	185.66
10	352.19	150.78	150.78	165.17	218.99
25	443.34	229.03	229.03	251.30	314.23
50	576.51	313.24	313.24	350.81	440.79
75	720.55	365.55	365.53	416.15	534.85
100	841.97	399.32	399.38	461.49	607.69

จากตาราง 4.12 พบว่าที่ค่ากระแสฟ้าผ่า 34.4 กิโลแอมป์ ด้วยรูปคลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที จะให้ค่าของแรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วยสูงกว่าทุกกรณี เช่นที่รูปคลื่น 10/100 ไมโครวินาที เนื่องจาก รูปคลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที มีความชันหน้าคลื่นมากกว่าและมีช่วงเวลาหน้าคลื่นสั้นกว่า จึงทำให้คลื่นที่สะท้อนมาจากฐานเสาไม่สามารถมาหักล้างยอดคลื่นได้ทันแต่สำหรับรูปคลื่น 10/100 ไมโครวินาที มีค่าแรงดันไฟฟ้าหัวเสาต่ำกว่ามากเพราะว่าคลื่นจากฐานเสาสามารถไปหักล้างยอดคลื่นได้ทัน และพบว่าทั้งสองรูปคลื่นมีค่าของแรงดันไฟฟ้าหัวเสาเพิ่มขึ้นเมื่อค่าของความต้านทานอิมพัลส์เพิ่มมากขึ้นด้วย ทั้งนี้แรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วยจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันตกคร่อมที่หัวเสา

แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความชันหลังรูปคลื่น โดยกำหนดให้ช่วงเวลาหน้าคลื่นคงที่แต่เปลี่ยนค่าของช่วงเวลาหลังคลื่น จากตาราง 4.12 พบว่า ที่รูปคลื่น 10/100 ไมโครวินาที และ 10/350 ไมโครวินาที จะพบว่าแรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วยบนเสาโมโนโพล จะมีค่าใกล้เคียงกันทุกค่าที่ความต้านทานอิมพัลส์นั้น คือ ช่วงเวลาหน้าคลื่นส่งผลต่อแรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วย แต่ช่วงเวลาหลังคลื่นแทบไม่ส่งผลต่อแรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วย

#### 4.2.6 การศึกษาความชันคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่มีผลกระแสวิกฤติของพวงลูกถ้วยบนเสาโมโนโพล

สืบเนื่องจากตาราง 4.6 – 4.7 แสดงค่ากระแสวิกฤติที่ส่งผลของต่อจำนวนลูกถ้วยแขวน โดยทำการเปรียบเทียบกรณีที่ใช้ลูกถ้วย 4 ลูก และ 7 ลูก ตามลำดับ พบว่าเสาคอนกรีตที่มีค่าความต้านทานเสาเดียวกัน กรณีใช้ลูกถ้วย 4 ลูก จะเกิดช่วงกระแสวิกฤติได้ง่ายกว่ากรณีที่ใช้ลูกถ้วย 7 ลูก และการศึกษาหัวข้อนี้เป็นการศึกษากรณีความชันหน้าคลื่น และหลังคลื่นของกระแสไฟฟ้า

ผ่าขนาด 34.4 กิโลแอมป์ ที่มีผลกระแสวิกฤติของลูกถ้วยแขวน บนเสาโมโนโพล ตามตาราง 4.13 เมื่อเปรียบเทียบความชันหน้าคลื่นของรูปคลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที กับรูปคลื่น 10/100 ไมโครวินาที ที่ความต้านทานอิมพัลส์ 5 – 50 โอห์ม เมื่อความชันหน้าคลื่นสูงจะทำให้ค่ากระแสวิกฤติของลูกถ้วยมีค่าน้อย เนื่องจากกระแสวิกฤติจะมีผลต่อสัดส่วนของแรงดันหัวเสาต่อค่าความต้านทานอิมพัลส์ในระบบ นั่นคือเมื่อแรงดันหัวเสาสูงจะทำให้ค่ากระแสวิกฤติของลูกถ้วยมีค่าน้อย แต่หากความต้านทานอิมพัลส์ที่ระบบภาคดินสูงกว่า 75 โอห์ม จะทำให้คลื่นสะท้อนกลับไปหักล้างแรงดันหัวเสาได้น้อยลง ค่ากระแสวิกฤติของลูกถ้วยจึงมีค่าสูงขึ้น

แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความชันหลังรูปคลื่น โดยกำหนดให้ช่วงเวลาหน้าคลื่นคงที่ แต่เปลี่ยนค่าของช่วงเวลาหลังคลื่น จากตาราง 4.13 พบว่า ที่รูปคลื่น 10/100 ไมโครวินาที และ 10/350 ไมโครวินาที จะพบว่ากระแสวิกฤติของลูกถ้วยแขวนบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล จะมีค่าใกล้เคียงกันทุกค่าที่ความต้านทานอิมพัลส์ นั้นหมายความว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นที่ต่างกันจะส่งผลต่อกระแสวิกฤติของลูกถ้วยแขวนแม้ว่าค่าของช่วงเวลาทั้งนี้การศึกษาค่ากระแสวิกฤติที่พวงลูกถ้วยจะสามารถนำไปคำนวณอัตราการเกิดวาบไฟตามผิวที่เกิดจากฟ้าผ่าลงสายดินซึ่ง ในอากาศทำให้เกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (Back Flashover Rate: BFOR)

ตาราง 4.13 กระแสวิกฤต (กิโลแอมป์) ที่มีผลต่อรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

$R_f(\Omega)$	รูปคลื่นฟ้าผ่า (ไมโครวินาที)				
	0.25/100	10/100	10/350	8/20	5/300
5	64.40	170.20	170.70	147.00	97.20
10	63.80	124.00	124.40	111.60	80.60
25	62.00	76.80	76.80	69.20	54.10
50	59.80	54.30	54.40	48.10	37.70
75	58.19	46.00	46.10	40.00	30.75
100	56.80	41.85	41.90	35.90	26.90

#### 4.2.7 การศึกษาความชันคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่มีผลต่อความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่าหรือเท่ากับค่ายอดกระแสฟ้าผ่าบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

สมการ 2.10 แสดงความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่า หรือเท่ากับกระแสค่ายอด (Probability) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ได้แสดงค่าไว้ในบทที่ 2 ค่าเป็นสมการที่ได้เป็นไปตามพื้นที่และใช้ค่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 34.4 กิโลแอมป์มาใช้ในการพิจารณา และใช้ค่ากระแสวิกฤติของลูกถ้วยบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ตามตาราง 4.13 เพื่อใช้ในการคำนวณ ตามสมการ 2.10

ตาราง 4.14 ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤติ(%) บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

$R_f(\Omega)$	รูปคลื่นฟ้าผ่า (ไมโครวินาที)				
	0.25/100	10/100	10/350	8/20	5/300
5	0.1726	0.0180	0.0179	0.0258	0.0693
10	0.1759	0.0390	0.0387	0.0501	0.1063
25	0.1865	0.1184	0.1184	0.1484	0.2438
50	0.2006	0.2421	0.2413	0.3019	0.4430
75	0.2118	0.3260	0.3248	0.4068	0.5696
100	0.2221	0.3799	0.3792	0.4733	0.6490

จากตาราง 4.14 พบว่าที่รูปคลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที จะทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤติสูงกว่าทุกกรณี เนื่องจาก รูปคลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที มีความชันหน้าคลื่นมากกว่าและมีช่วงเวลาหน้าคลื่นสั้นกว่า จึงทำให้คลื่นที่สะท้อนมาจากฐานเสาไม่สามารถมาหักล้างยอดคลื่นได้ทัน แต่สำหรับรูปคลื่น 10/100 ไมโครวินาที มีค่ากระแสวิกฤติของลูกถ้วยแขนงต่ำกว่ามาก จึงทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤติต่ำกว่ามากเช่นกัน เนื่องจากคลื่นจากฐานเสาสามารถไปหักล้างยอดคลื่นได้ทัน และพบว่าทั้งสองรูปคลื่นมีความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤติ เพิ่มขึ้นเมื่อค่าของความต้านทานอิมพีแดนซ์เพิ่มมากขึ้นด้วย ทั้งนี้ความน่าจะเป็นที่กระแสฟ้าผ่ามากกว่าหรือเท่ากับกระแสฟ้าผ่าวิกฤติ จะมีความสัมพันธ์กับแรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วย แรงดันตกคร่อมที่หัวเสา กระแสวิกฤติของลูกถ้วยแขนงด้วย

#### 4.2.8 การศึกษาความชันคลื่นกระแสฟ้าผ่าที่มีผลอัตราการวบไฟย้อนกลับบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

การศึกษาหัวข้อนี้ เป็นการศึกษากรณีอัตราการวบไฟย้อนกลับที่พวงถูกถั่ว (Back Flashover Rate : BFOR) ของเสาไฟฟ้าโมโนโพล โดยจำลองกรณีเกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายล่อฟ้าเหนือศีรษะ ใช้สถิติข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี ( $T_d$ ) สูงสุดเท่ากับ 122 วัน กระแสฟ้าผ่า 34.4 กิโลแอมป์ โดยใช้ข้อมูลจากตาราง 4.14 มาทำการคำนวณโดยใช้สมการ 2.9, 2.10, 2.11 และ 2.12 ซึ่งจากการคำนวณอัตราการวบไฟย้อนกลับแสดงตามตาราง 4.15

ตาราง 4.15 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี),  $T_d$  เท่ากับ 122 วันต่อปี กรณีบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

$R_f(\Omega)$	รูปคลื่นฟ้าผ่า (ไมโครวินาที)				
	0.25/100	10/100	10/350	8/20	5/300
5	16.95	1.77	1.76	2.54	6.81
10	17.28	3.83	3.80	4.92	10.45
25	18.33	11.63	11.63	14.58	23.95
50	19.71	23.79	23.70	29.67	43.52
75	20.81	32.03	31.91	39.97	55.97
100	21.82	37.32	37.25	46.51	63.77

จากตาราง 4.15 พบว่า เมื่อความต้านทานอิมพัลส์ 5 – 10 โอห์ม ที่รูปคลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที จะทำให้อัตราการวบไฟย้อนกลับมีค่าสูงกว่าทุกกรณี เนื่องจาก รูปคลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที มีความชันหน้าคลื่นมากกว่าและมีช่วงเวลาหน้าคลื่นสั้นกว่า จึงทำให้คลื่นที่สะท้อนมาจากฐานเสาไม่สามารถมาหักล้างยอดคลื่นได้ทัน แต่เมื่อ ความต้านทานอิมพัลส์สูงขึ้น 25 – 100 โอห์ม จะทำให้อัตราการวบไฟย้อนกลับมีค่าสูงขึ้น แต่หากเปรียบเทียบกับรูปคลื่น 10/100 ไมโครวินาที มีความชันหน้าคลื่นมากกว่าและมีช่วงเวลาหลังคลื่นที่เท่ากัน ความต้านทานอิมพัลส์ 5 – 10 โอห์ม จะทำให้อัตราการวบไฟย้อนกลับมีค่าต่ำกว่าทุกกรณี แต่เมื่อ ความต้านทานอิมพัลส์สูงขึ้น 25 – 100 โอห์ม จะทำให้อัตราการวบไฟย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นแต่ยังมีค่าน้อยกว่ากรณี รูปคลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที

แต่สำหรับรูปคลื่น 10/100 ไมโครวินาที และ 10/350 ไมโครวินาที มีความชันหน้าคลื่นเท่ากัน และมีช่วงเวลาหลังคลื่นที่แตกต่างกัน ความต้านทานอิมพัลส์เท่ากัน จะเกิดอัตราการวบไฟย้อนกลับเท่ากัน ซึ่งอาจสรุปได้ว่ามีช่วงเวลาหลังคลื่นแทบไม่ส่งผลต่ออัตราการวบไฟย้อนกลับมากนัก

#### 4.2.9 การศึกษาสถิติข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี ( $T_p$ ) ที่มีผลอัตราการวาบไฟย้อนกลับบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

จากตารางที่ 2.1 แสดงจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีของรับผิดชอบของ กฟน. เฉลี่ยในช่วงปี พ.ศ. 2543-2558 ซึ่งแบ่งการเก็บข้อมูลตามพื้นที่ โดย ซึ่งสถิติข้อมูลต่ำสุดคือ 69 วันต่อปี และสูงสุด 122 วันต่อปี โดยใช้ความชันหน้าคลื่นจากกระแสฟ้าผ่าลำแรก 10/350 ไมโครวินาที และลำฟ้าผ่าลำต่อมา 0.25/100 ไมโครวินาที ซึ่งกระแสฟ้าผ่าลำแรกจะมีค่ากระแสยอดที่สูงกว่าลำฟ้าผ่าลำต่อมา สำหรับค่ากระแสฟ้าผ่า 20 กิโลแอมป์ (ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานในปี พ.ศ. 2550) [38] และค่ากระแสฟ้าผ่า 34.4 กิโลแอมป์ (ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานในปี พ.ศ. 2540) ดังนั้นการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล จะใช้คลื่นจากกระแสฟ้าผ่าลำแรก 10/350 ไมโครวินาที และจะเลือกใช้ค่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 34.4 กิโลแอมป์ เนื่องจากเกิดความรุนแรงมากกว่า มาทำการศึกษาดูด้วยแบบจำลอง ซึ่งในการศึกษาหัวข้อนี้ศึกษากรณีสถิติข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี ( $T_p$ ) ที่มีผลอัตราการวาบไฟย้อนกลับบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล กรณีที่เกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายล่อฟ้า โดยใช้ข้อมูล จากตาราง 4.14 (ที่คลื่นฟ้าผ่า 10/350 ไมโครวินาที และ 0.25/100 ไมโครวินาที) มาทำการคำนวณอัตราการวาบไฟย้อนกลับบนโดยใช้สมการ 2.9, 2.10, 2.11 และ 2.12 ได้ผลตามตาราง 4.16 – 4.17

ตาราง 4.16 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี), คลื่น 10/350 ไมโครวินาที, ที่สถิติข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปีต่างกัน บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

$R_f(\Omega)$	ข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี ( $T_p$ )				
	69	99	104	117	122
5	0.86	1.35	1.44	1.67	1.76
10	1.86	2.93	3.11	3.60	3.80
25	5.70	8.96	9.53	11.04	11.63
50	11.63	18.26	19.42	22.50	23.70
75	15.65	24.58	26.14	30.28	31.91
100	18.27	28.69	30.52	35.36	37.25

ตาราง 4.17 BFOR (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี), คลื่น 0.25/100 ไมโครวินาที, ที่สถิติข้อมูลจำนวน วันพายุฟ้าคะนองต่อปีต่างกัน บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล

$R_f(\Omega)$	ข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี ( $T_d$ )				
	69	99	104	117	122
5	8.32	13.06	13.89	16.09	16.95
10	8.48	13.31	14.16	16.40	17.28
25	8.99	14.12	15.01	17.39	18.33
50	9.67	15.18	16.15	18.71	19.71
75	10.21	16.03	17.05	19.75	20.81
100	10.70	16.80	17.87	20.71	21.82

จากตาราง 4.16-4.17 พบว่าในกรณีที่ความต้านทานอิมพัลส์เพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการรวบไฟ ย้อนกลับ มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อสถิติข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี ( $T_d$ ) เพิ่มขึ้นจะทำให้ อัตราการรวบไฟย้อนกลับ มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน แต่หากพิจารณาจากรูปคลื่นที่แตกต่างกัน ที่คลื่นฟ้าผ่า 0.25/100 ไมโครวินาที ที่กระแสฟ้าผ่าขนาด 34.4 กิโลแอมป์ จะส่งผลให้เกิดอัตราการรวบไฟย้อนกลับสูงกว่า คลื่นฟ้าผ่า 10/350 ไมโครวินาที แต่จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าสถิติการ เกิดฟ้าผ่า ที่ล้าฟ้าผ่าล้าต่อมา 0.25/100 ไมโครวินาที จะมีขนาดค่ากระแสยอดต่ำ ดังนั้นในการ ประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า จึงเลือกพิจารณาคลื่นจากกระแสฟ้าผ่าล้าแรก คือ 10/350 ไมโครวินาที

#### 4.3 สรุปวิธีการทดลองและผลการทดลอง

ผลจากแบบจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP เพื่อประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า ในกรณีเกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายล่อฟ้าของระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านคร หลวง บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต บนเสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสาส่ง และบนเสา ไฟฟ้าโมโนโพล ที่กระแสฟ้าผ่า 34.4 กิโลแอมป์ รูปคลื่น 10/350 ไมโครวินาที จำนวนวันพายุฟ้า คะนอง 122 วันต่อปี และค่าความต้านทานอิมพัลส์ 5 โอห์ม ตามตาราง 4.18

ตาราง 4.18 ผลประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์

หัวข้อการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า	Concrete	External	Monopole
แรงดันที่หัวเสา (kV)	182.50	155.74	114.62
กระแสวิกฤต (kA)	87.80	104.5	170.70
ค่าความคงทนของฉนวนลูกถ้วย (CFO)	402.55	402.55	480.15
จำนวนลูกถ้วยในพวงลูกถ้วยแขวน (ลูก)	4	4	5
ความหนาแน่นของฟ้าผ่าลงสู่ดิน (Ng) (ครั้ง/ตารางกิโลเมตร/ปี)	5.39	5.39	5.39
ความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่าสูงกว่าหรือเท่ากับ กระแสวิกฤต หรือ Probability (%)	0.0877	0.0585	0.0179
จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดินป้องกัน (NI) (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)	95.63	95.63	98.25
อัตราการเกิดการวาวไฟย้อนกลับ (BFOR) (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)	8.38	5.60	1.76

จากข้อมูลไฟฟ้าขัดข้องในระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์ ซึ่งเก็บรวบรวมโดยฝ่ายควบคุมระบบไฟฟ้า ของการไฟฟ้านครหลวงนั้น พบว่าในปี พ.ศ.2557 พบว่า เกิดจากฟ้าผ่าทำให้ไฟฟ้าดับถาวร คือ การเกิดไฟฟ้าดับมากกว่าหรือเท่ากับ 1 นาที จำนวน 17 ครั้ง และเกิดไฟฟ้าดับชั่วคราว คือ การเกิดไฟฟ้าดับน้อยกว่า 1 นาที จำนวน 44 ครั้ง สำหรับความยาวของสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ คือ 480.30 วงจร-กิโลเมตร โดยข้อมูลดังกล่าว สามารถนำไปคำนวณค่าของอัตราการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ ได้ค่า 9.95 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี แต่จากแบบจำลองโมเดลด้วยโปรแกรม ATP-EMTP กรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีต เกิดอัตราการวาวไฟตามผิวย้อนกลับมีค่า 8.38 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี กรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่ติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสาส่ง เกิดอัตราการวาวไฟตามผิวย้อนกลับมีค่า 5.60 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี และกรณีบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล เกิดอัตราการวาวไฟตามผิวย้อนกลับมีค่า 1.76 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี



จากแบบจำลองทำให้ทราบว่าที่ระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง  
ปัจจุบันที่ติดตั้งระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต หากดำเนินการติดตั้งสาย  
ดินเพิ่มนอกเสาสูงจะสามารถลดอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับลงได้ร้อยละ 33.17 แต่หาก  
เลือกติดตั้งบนเสาไฟฟ้าโมโนโพลจะสามารถลดอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับลงได้ร้อยละ 79  
โดยต้องควบคุมค่าความต้านทานอิมพัลส์รากดินที่ 5 โอห์ม



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำเสนอการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า หรือประเมินประสิทธิภาพการป้องกันฟ้าผ่า ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงดัน 69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ของการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) หรือ Metropolitan Electricity Authority (MEA) โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้สำหรับวิเคราะห์ในสถานะชั่วคราวมาสร้างแบบจำลองเสาไฟฟ้าโมโนโพล และจำลองระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงดัน 69 กิโลโวลต์ กรณีเกิดฟ้าผ่าลงที่สายล่อฟ้า (Overhead Ground Wire) และทำการประมวลผลจากแบบจำลองโดยมีเป้าหมายเพื่อทราบถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในระบบ และศึกษาค่าดัชนีที่นำมาใช้ในการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่ง สำหรับรองรับผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคต

#### 5.2 สรุปผลการวิจัย

การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงดัน 69 กิโลโวลต์ สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเป็น 3 กรณี คือแบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีตแบบจำลองเสาไฟฟ้าคอนกรีตกรณีติดตั้งเพิ่มสายตัวนำลงดินนอกเสา และแบบจำลองเสาไฟฟ้าโมโนโพล โดยใช้มาตรฐานการติดตั้งเสาไฟชนิดพวงลูกถ้วยแขวน (Suspension Insulator String) ของการไฟฟ้านครหลวง ภายใต้เงื่อนไขรูปคลื่นฟ้าผ่า กระแสฟ้าผ่าขนาดต่างๆ และค่าความต้านทานอิมพัลส์ต่างๆ พบว่าระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงดัน 69 กิโลโวลต์ ที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าคอนกรีต จะเกิดแรงดันหัวเสาที่มีค่าสูงกว่า กรณีติดตั้งบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล เนื่องจากความเร็วของการเดินทางย้อนกลับผ่านสายดินที่อยู่ในเสาไฟฟ้าคอนกรีตมีความเร็ว 123 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งช้ากว่าความเร็วของตัวนำสายดินผ่านโครงสร้างเหล็กของเสาไฟฟ้าโมโนโพลที่มีความเร็ว 300 เมตรต่อไมโครวินาที ซึ่งแรงดันหัวเสาจะสอดคล้องกับแรงดันตกคร่อมพวงลูกถ้วย ส่งผลให้ค่ากระแสวิกฤตที่เกิดขึ้นบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตจะมีค่าน้อยกว่า กรณีบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ซึ่งหมายถึง เสาไฟฟ้าโมโนโพลจะสามารถทนต่อกระแสวิกฤตได้มากกว่า จึงทำให้เกิดอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับได้น้อยครั้งกว่ากรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีต ถือได้ว่าสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าบนเสาไฟฟ้าโมโนโพลจะดีกว่าเสาไฟฟ้าคอนกรีต

กรณีจำนวนของลูกถ้วยในพวงลูกถ้วยที่แตกต่างกัน เช่นในระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ที่มีลูกถ้วยในพวงลูกถ้วยจำนวน 5 ลูก จะทำให้ค่าความคงทนของฉนวนลูกถ้วย (CFO) มีค่าสูงกว่า กรณีจำนวนพวงลูกถ้วย 4 ลูก บนเสาไฟฟ้าคอนกรีต ซึ่งจะทำให้เสาไฟฟ้าโมโนโพล สามารถทนต่อกระแสวิตได้มากกว่าจึงทำให้เกิดอัตราการรวบไฟตามผิวย้อนกลับได้น้อยครั้งกว่ากรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีต และถ้าหากพิจารณาผลที่เกิดจากช่วงเวลาหน้าคลื่นและหลังคลื่นของกระแสฟ้าผ่า จะพบว่าช่วงเวลาหน้าคลื่นที่มีความชันมาก (ช่วงเวลาหน้าคลื่นที่สั้น) จะส่งผลต่อแรงดันหัวเสาและกระแสวิต ที่มีค่าสูงกว่ากรณีในช่วงเวลาหน้าคลื่นที่มีความชันน้อยกว่า ซึ่งส่งผลต่อการเกิดอัตราการรวบไฟตามผิวย้อนกลับให้มีค่าสูงด้วย สำหรับช่วงเวลาหลังคลื่นที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อแรงดันหัวเสา กระแสวิต และการเกิดอัตราการรวบไฟตามผิวย้อนกลับที่ใกล้เคียงกัน

จากข้อมูลไฟฟ้าขัดข้องในระบบจำหน่ายย่อย 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวงในปี พ.ศ.2557 [39]สามารถคำนวณหาอัตราการรวบไฟตามผิวย้อนกลับ ได้ค่า 9.95 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปีซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่นำสถิติข้อมูลจำนวนวันพายุฟ้าคะนองต่อปี ( $T_p$ ) กรณีบนเสาไฟฟ้าคอนกรีตอัตราการรวบไฟตามผิวย้อนกลับที่มีค่า 8.38 ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี และเมื่อนำเทคนิคการติดตั้งสายดินนอกเสาส่งมาใช้ ซึ่งจะส่งผลดีต่อสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า โดยต้องควบคุมค่าความต้านอิมพัลส์ให้อยู่ระหว่าง 5 – 10 โอห์ม ดังนั้น หากดำเนินการติดตั้งสายดินเพิ่มนอกเสาส่งจะสามารถลดอัตราการรวบไฟตามผิวย้อนกลับลงร้อยละ 33.17 แต่หากการไฟฟ้านครหลวงเลือกติดตั้งใหม่บนเสาไฟฟ้าโมโนโพล จะสามารถลดอัตราการรวบไฟตามผิวย้อนกลับลงร้อยละ 79

ดังนั้น ในการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า หรือประเมินประสิทธิภาพการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อยแรงดัน 69 กิโลโวลต์ ชนิดเดินสายอากาศเหนือดินที่มีมากถึงร้อยละ 94 ของการไฟฟ้านครหลวงนั้น ถือเป็นเรื่องที่สำคัญในการให้บริการระบบไฟฟ้าที่มีเสถียรภาพและเชื่อถือได้ของระบบในลักษณะเชิงรุก จากการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พบว่าสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าบนเสาไฟฟ้าโมโนโพล ดีกว่าบนเสาไฟฟ้าคอนกรีต และกรณีเสาไฟฟ้าคอนกรีตที่นำเทคนิคการติดตั้งสายดินนอกเสาส่งมาใช้ ที่จะส่งผลดีต่อสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่า โดยต้องควบคุมค่าความต้านอิมพัลส์ที่สายจากดินให้เหมาะสมด้วย และหากเมื่อสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าที่ดีขึ้นจะสามารถลดปัญหาไฟฟาดับที่เกิดจากฟ้าผ่าได้ อันจะส่งผลดีต่อผู้ใช้ไฟฟ้า อีกทั้งการจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงจะมีเสถียรภาพและเชื่อถือได้มากขึ้น

หากพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายในการลงทุนติดตั้งเสาไฟฟ้าโมโนโพล ซึ่งค่าวัสดุและค่าแรงในการติดตั้งจะใช้งบโดยประมาณ 10 ล้านบาท/วงจร-กิโลเมตร และสำหรับค่าใช้จ่ายในการลงทุนติดตั้งเสาไฟฟ้าคอนกรีตรวมค่าวัสดุและค่าแรงในการติดตั้งจะใช้งบโดยประมาณ 5 ล้านบาท/วงจร-กิโลเมตร จะพบว่าต้นทุนสำหรับการติดตั้งเสาไฟฟ้าโมโนโพล จะสูงกว่าเสาไฟฟ้าคอนกรีตประมาณ 2 เท่า แต่ถ้าการไฟฟ้านครหลวงเลือกทำการติดตั้งระบบเป็นสายใต้ดินเฉพาะที่เป็นส่วนของสายส่งย่อย ก็มีราคาต้นทุนที่สูงกว่าการก่อสร้างสายอากาศอีกประมาณ 10 เท่า ทั้งนี้ถ้าดำเนินการเปลี่ยนเป็นระบบสายใต้ดินทั้งหมดไปจนถึงระดับแรงต่ำ ก็จะต้องทำการเปลี่ยนสถานีไฟฟ้าย่อยเป็นสถานีไฟฟ้าย่อยใต้ดิน รวมทั้ง Ring Main Unit (RMU) อีกด้วย ก็จะแพงกว่าระบบสายอากาศมากถึง 25-30 เท่า

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 การประเมินสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังไม่ได้เอาทฤษฎีการประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่ากรณีฟ้าผ่าลงสายเฟส และควรทำการประเมินสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ ที่ติดตั้งบนเสาไฟฟ้าต้นเดียวกันด้วย

5.3.2 การประเมินสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังไม่ได้ทำการศึกษากฎเกณฑ์ความปลอดภัยของแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและช่วงก้าวสูงสุด ในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าลงระบบส่ง เนื่องจากการสร้างแบบจำลองของกรณีดังกล่าวต้องพัฒนาด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ซึ่งจะต้องมีการพัฒนาด้วยความรอบคอบเพื่อให้ผลที่ได้ออกมาที่มีความถูกต้อง ซึ่งเมื่อได้แบบจำลองดังกล่าว แล้วก็ต้องทำการเปรียบเทียบกับโปรแกรมที่มีความน่าเชื่อถือ เช่น โปรแกรม CDEGS และ TFlash เป็นต้น

5.3.3 การไฟฟ้านครหลวงควรทำการสำรวจค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในพื้นที่บริการเป็นระยะ เช่นทุก 2-3 ปี/ครั้ง หรือในช่วงที่พื้นที่ใดมีปัญหาเกิดไฟฟ้าดับเนื่องจากฟ้าผ่าบ่อยเพื่อจะได้ทำการปรับปรุงเป็นเฉพาะจุดลงไป เพื่อให้ทราบถึงโครงสร้างและคุณลักษณะของดินได้ถูกต้องและเป็นประโยชน์ สำหรับการจัดทำฐานข้อมูลและการจัดทำมาตรฐานของการไฟฟ้านครหลวงต่อไป

5.3.4 ในการประเมินสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่า นั้น ควรนำข้อมูลสถิติปรับปรุงล่าสุดมาใช้ในการประเมินซึ่งจะทำให้ผลของการศึกษาใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

5.3.5 การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าในระบบสายส่งย่อย 69 กิโลโวลต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ยังไม่ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุนในการติดตั้งเสาไฟฟ้าชนิดต่างๆ ดังนั้นเพื่อให้มีข้อมูลที่สนับสนุนการตัดสินใจแผนงานโครงการในอนาคตของการไฟฟ้านครหลวง เห็นควรทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลตอบแทนด้านเศรษฐศาสตร์การลงทุน และคำนึงถึงประโยชน์ของผู้ใช้ไฟเพื่อให้ได้ระบบไฟฟ้าที่มีความมั่นคงและเชื่อได้ในอนาคตต่อไป



## เอกสารอ้างอิง

- [1] ข้อมูลสถิติจำนวนผู้ใช้ไฟฟ้าและความต้องการใช้ไฟฟ้าสูงสุด <http://www.mea.or.th/>
- [2] มนตรี เงามเดช “ระบบการส่งกำลังไฟฟ้า” สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี เชียงใหม่
- [3] ชูวงศ์ วัฒนศักดิ์ภูบาล, “การลดปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้องเนื่องจากฟ้าผ่าสายส่ง 115 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2546
- [4] กิตติ เลียงเครือ นำเสนอบทความเรื่อง “แรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย 22 กิโลโวลต์ ที่อยู่บนเสาต้นเดียวกับระบบ 115 กิโลโวลต์” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมไฟฟ้า) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545
- [5] นาดยา ค่ายเรือง สุदारัตน์ สมคะเน และอรรถพงศ์ เสาะสุวรรณ, “การประเมินสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าเพื่อปรับปรุงระบบป้องกันฟ้าผ่าสายเหนือดิน 115 กิโลโวลต์” การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ ครั้งที่ 48, 2553
- [6] สุชาติา แซ่หลี่, “การวิเคราะห์สมรรถนะป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่ง ด้วยโปรแกรม TFlash” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมไฟฟ้า) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2547
- [7] M. Salih Mamis, Asim Kaygusuz, and Erhan Akin นำเสนอเรื่อง “s-Domain Analysis of Lightning Surge Response of a Transmission Tower with Phase Conductors” International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003 in New Orleans, USA
- [8] คู่มือถามตอบปัญหาเทคนิคด้านคุณภาพไฟฟ้าอุตสาหกรรม การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พฤษภาคม พ.ศ. 2548

- [9] บทความเผยแพร่ “20 แง่มุมที่คุณควรรู้เกี่ยวกับฟ้าผ่า” โดย ดร.บัญญัติ ธนบุญสมบัติ  
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
- [10] หนังสือ “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง” โดย ดร.สำรวย สังข์สะอาด, มีนาคม พ.ศ. 2549
- [11] มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า ภาคที่ 1 หลักการทั่วไป โดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย  
ในพระบรมราชูปถัมภ์, ธันวาคม พ.ศ. 2553
- [12] ชำนาญ ห่อเกียรติ. ถาม-ตอบ ไฟฟ้ากำลัง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : จรัสสินทวงศ์การพิมพ์, 2552
- [13] เทพกัญญา ชัดิแสง. “การต่อลงดินและการติดตั้งอะเรสเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับระบบ  
22-24 กิโลโวลต์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- [14] Hileman, A. R. “Insulation Coordination for Power Systems” 999 by Taylor & Francis  
Group, LLC
- [15] บทความคุณภาพไฟฟ้ากำลัง “แรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว” โดย วัฒนา สุนทรานุรักษ์  
Oppo Company Limited, กุมภาพันธ์ 2548
- [16] มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่า ภาคที่ 2 การบริหารความเสี่ยง โดยวิศวกรรมสถานแห่ง  
ประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ธันวาคม พ.ศ. 2553
- [17] Diesendorf, W. Insulation Co-ordination in High-voltage Electric Power Systems.  
England : Butterworth & Co (Publishers) Ltd., 1974
- [18] 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. Vol. 3, No. 1 (March 2009) : 31-38.
- [19] Data Base of Thai Meteorological Department (TMD), year 2000-2015.
- [20] EIT Standard 2001-56 “มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556”  
โดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
- [21] เอกสารเรื่อง “ประมวลหลักปฏิบัติวิชาชีพ ด้าน การออกแบบ ติดตั้ง ตรวจสอบและทดสอบการ  
ต่อลงดิน” โดยสภาวิศวกร, เมษายน พ.ศ. 2554

- [22] คู่มือการใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP โดยคณะทำงานจัดทำคู่มือการใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, พฤษภาคม พ.ศ. 2551
- [23] Power System Planning Department, Metropolitan Electricity Authority, "MEA Overhead Subtransmission Construction Standard," DWG. No. 10A4-0524, 2000.
- [24] Power System Planning Department, Metropolitan Electricity Authority, "69 kV Single Circuit 2-Bundled Conductor Tangent Structure Type MP-TS-69(CA)" DWG. No. 10A4-0813, 2014.
- [25] R. Alberto and et al., "Non Uniform Line Tower Model for Lightning Transient Studies," In Proceedings of Power System Transients, pages. 1-7, June, 2001.
- [26] P.C.A. Mota, M.L R. Chaves, J.R.Camacho "Power Line Tower Lightning Surge Impedance Computation a Comparison of Analytical and Finite Element Methods" International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPO'12) Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012
- [27] S. Hintamai and J.Hokierti, "Surge Impedance of Concrete Pole due to Effect of the Electrical Properties of Concrete," (IEEE TENCON 2004, Vol. 3, pages. 397-400, November, 2004.)
- [28] W. Diesendrof, "Insulation Co-ordination in High-Voltage Electric Power Systems," (Butterworth & Co (Publishers) Ltd., pages. 27-46, 1974.)
- [29] สำเร็จ อินท่าไม้. เสรีจิมพีแดนซ์ของเสาไฟฟ้าคอนกรีต อันเนื่องมาจากผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคอนกรีต. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548
- [30] R. Zylfi and A. Mucka, "Lightning Simulation Study on Line Insulators" International Students' Conference of Civil Engineering, ISCCE 2012, 10-11 May 2012, Epoka University, Tirana, Albania
- [31] TIS.354-1985, Suspension Insulator Type 52-3, Thai Industrial Standards Institute, 1985.



- [32] TIS.1251-1994, Pin Post Insulator Type 56/57-2, Thai Industrial Standards Institute, 1994.
- [33] Power System Planning Department, Metropolitan Electricity Authority, "Standard String Flashover Data for Suspension Insulators," (DWG. No. RC-013.)
- [34] El-Morshedy, A., et al. High-Voltage Engineering. New York : Marcel Dekker & Co. (Publishers) Ltd., 2000.
- [35] 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, Vol. 1, pages. 156-162, August. 1998.)
- [36] "การต่อหลักดิน" มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556 ฉบับปรับปรุง โดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ธันวาคม พ.ศ. 2553
- [37] 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, pages. 1-6, June, 2001.)
- [38] 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.
- [39] กมล สุภานัส. การประเมินสมรรถนะการป้องกันฟ้าผ่าระบบสายส่งย่อยและสายจำหน่ายของ กฟน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร, 2558

## ภาคผนวก ก

### บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

#### บทความวิชาการที่ตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ

1. A. Songsang, N. Rugthaicharoencheep and A. Phayomhom, "Grounding Design Improvement to Reduce Back Flashover Rate of 69 kV Subtransmission Line in Power's Distribution System" Applied Mechanics and Materials Vol 781 (2015) pp 250-253
2. A. Songsang, N. Rugthaicharoencheep, K. Supanus and A. Phayomhom, "Study Reduce The Effect of Lightning by Down Conductor Improvement on Distribution System" The 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology (EENET2015), Chonburi Province, Thailand, May27–29,2015
3. A. Songsang, N. Rugthaicharoencheep and A. Phayomhom, "Case Studies Reducing The Impact of Lightning On Distribution System by Down Conductor Improvement" The Journal of Industrial Technology (JIT), Vol. 12, No. 1 January – April 2016

## ภาคผนวก ข

# เนื้อหาบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

*Applied Mechanics and Materials Vol 781 (2015) pp 250-253*  
© (2015) Trans Tech Publications, Switzerland  
doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.781.250

*Submitted: 2014-11-03*  
*Revised: 2015-03-30*  
*Accepted: 2015-04-06*

### Grounding Design Improvement to Reduce Back Flashover Rate of 69 kV Subtransmission Line in Power's Distribution System

Arnon Songsang<sup>1,a</sup> Nattachote Rugthaichareoncheep<sup>1,b\*</sup>  
and Att Phayomhom<sup>1,2,c</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon  
1381, Pracharat 1 Rd., Bang Sue, Bangkok, 10800, Thailand

<sup>2</sup>Metropolitan Electricity Authority  
Pleonchit Road, Lumpini, Patumwan, Bangkok, 10330, Thailand

<sup>a</sup>email: arnon\_s@prd.go.th, <sup>b</sup>email: nattachote.r@rmutp.ac.th\* <sup>c</sup>email: attp@mea.or.th

**Keywords:** Back Flashover Rate, External Grounding, Lightning, Distribution System, ATP-EMTP

**Abstract.** This paper presents the grounding design improvement to reduce back flashover rate from the lightning of distribution system. The Purpose to reduce effects of lightning overvoltage from back flashover. And study analysis of the condition effects of lightning performance of 69 kV on Metropolitan Electricity Authority (MEA)'s distribution system of Thailand. The technique objective function is an attachment the external ground wire connected between the overhead ground wires and a ground rod for reduce back flashover. Back flashover is one of the major causes of sustained interruption data. Occurs when the amplitude of lightning overvoltage is more than the limit of insulator strings specification. Then generated flashover on insulator skin and induces the voltage line. This paper simulation with Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program (ATP-EMTP) and analysis of lightning performance in terms evaluated pole top voltage and back flashover rate (BFOR). Result after installing the external grounding design system can reduce the effects of lightning and can improve the reliability in distribution system. And the grounding systems designed is can use for guide line to the features typically at locations subject to lightning damage.

#### Introduction

Metropolitan Electricity Authority (MEA)'s distribution system of Thailand distributes the voltage level on subtransmission systems which are 69 kV and 115 kV, and distribution systems are 12 kV and 24 kV. In case of subtransmission and distribution line are to be on the same route. More than 90% installed in the subtransmission systems 69 kV circuit with distribution systems 24 kV circuit on the same concrete pole. And has an overhead ground wire (OHGW) for protecting against lightning stroke hits on both the phase conductors of the 69 kV and 24 kV system. This paper considers the pole top voltage and back flashover rate, After lightning stroke hits on 69 kV circuits system. And it analyzes lightning performance improvement of 69 kV circuits by external grounds (diameter wire 7.94 mm) for each scheme of improvement the problem with Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program (ATP-EMTP).

Simulation results with and without external grounds for different values of impulse resistance of ground rod (5 – 100 ohm) will be presented. The study's result after installing the external grounds wire is that it can reduce pole top voltage and back flashover rate. This grounding system design study can be used for improvement to impact the Metropolitan Electricity Authority (MEA) subtransmission systems.

### The installation internal and external ground wire

The MEA recoding on year 2014 of interruption data in the 69 kV circuits is lightning strokes resulted in 17 sustained. If calculated refer the number of interruptions and the total length is 9.95 flashes/100 km/year. This paper study of 69 kV subtransmission line and the 24 kV feeders installing condition shown in Fig.1[1]. The high of concrete pole is 20 m. The 69 kV circuit setup insulator type 52-3 (7 unit). Consists of  $2 \times 400 \text{ mm}^2$  conductor (AAC) per phase. And the double circuits of the 24 kV feeder setup insulator type 56/57-2 (1 unit). consists of  $1 \times 185 \text{ mm}^2$  conductor (ASC) per phase. The overhead ground wire setup zinc-coated steel  $1 \times 38.32 \text{ mm}^2$  connected wire embedded in the concrete pole to a ground rod a 3m-long ground (diameter of  $15.875 \text{ mm}^2$ )

This paper technique of external ground is applied to Metropolitan Electricity Authority (MEA)'s distribution network to reduce the back flashover rate (BFOR) value. The external ground wire is implemented by attaching a  $1 \times 38.32 \text{ mm}^2$  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 in Fig. 2 [2].

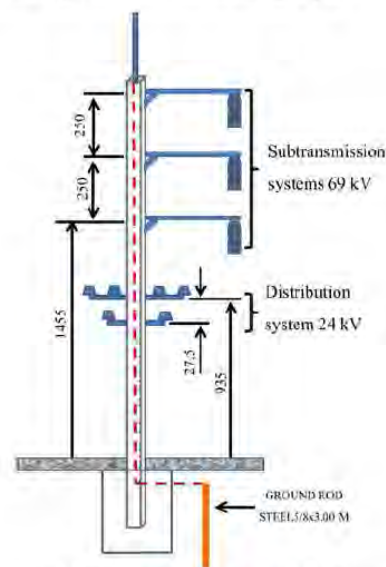


Fig. 1 Installation concrete pole MEA's network



Fig. 2 External ground wire install

### ATP-EMTP model

Simulation of J. Marti's line model. Subtransmission systems 69 kV circuits and distribution system 24 kV circuits refer the constants standard of MEA. The overhead ground wire (OHGW), subtransmission, and distribution lines are model by line constants. The ATP-EMTP model used to analyze lightning performance is shown in Fig. 3 [3].

Explanation a block diagram of ATP-EMTP model needs following parameters at below:

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

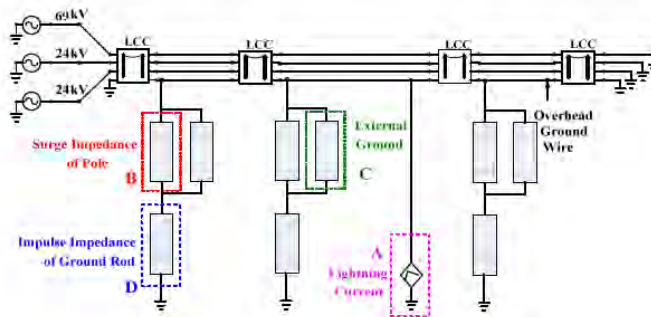


Fig. 3 Typical diagram of ATP-EMTP model

**The Lightning performance**

The pole top voltage in a 69 kV subtransmission line and underbuilt 24 kV feeders is a voltage-to-ground of the overhead ground wire. 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 [2-4] :

$$BFOR = N_f \cdot P(I) \tag{1}$$

$$P(I) = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{I}{A}\right)^B\right)} \tag{2}$$

$$N_f = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10}\right) \tag{3}$$

$$N_g = 0.0133T_d^{1.25} \tag{4}$$

- where *BFOR* is back flashover rate (flashes/100 km/year)
- 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<sub>f</sub>* is number of lightning strikes (flashes/100 km/year)
- N<sub>g</sub>* is ground flash density (flashes/km<sup>2</sup>/year)
- h* is average conductor height (m)
- b* is separation distance of overhead ground wire (m)
- T<sub>d</sub>* is number of thunderstorms (days/year)

**Case Study**

The typical diagram of ATP-EMTP model in Fig. 3. The lightning performance analyzed on lightning current waveforms 10/350 μs. Thunderstorm days (*T<sub>d</sub>*) in Bangkok, Thailand over the period from 2006 to 2012, the maximum is 116 days. Lightning strikes to top pole without and with an external ground for different impulse resistances of 5-100 ohm. Parameters for simulation refer MEA standard. The pole top for different impulse resistances by lightning strikes to top of the pole as shown in Table. 1 and BFOR for 10/ 350 μs waveform as shown in Table. 2

Table. 1 Pole top voltage (kV).

<i>Ri</i> (Ohm)	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	504.7	512.81
100	528.07	534.19

Table. 2 BFOR. ( $T_d=116$ )

<i>Ri</i> (Ohm)	External ground wire	
	Without	With
5	5.52	1.72
10	6.02	4.01
25	11.84	11.46
50	18.79	19.64
75	22.63	23.44
100	24.55	25.17

In Table. 1, the set defined of lightning current value at 34.4 kA, And consider the pole top voltage of stroke peak current magnitude. If impulse resistance are 5, 10 and 25 ohm, The condition with the external ground wire can reduce the pole top voltage. In Table. 2, If consider the back flashover rate at thunderstorm days is 116 days. And impulse resistance are 5, 10 and 25 ohm, The condition with the external ground wire can reduce the back flashover rate. However, if impulse resistance value is between 50-100 ohm, with external ground wire is not necessary because the value of pole top voltage and back flashover rate increases.

### Conclusion

This paper has presented the grounding design improvement to reduce back flashover rate from the lightning of distribution system. And condition the effects of lightning performance of 69 kV on Metropolitan Electricity Authority (MEA)'s distribution system of Thailand. The technique function is an attachment the external ground wire connected between the overhead ground wires and a ground rod for reduce back flashover. The lightning performance is evaluated by 10/350  $\mu$ s lightning current waveforms and different impulse resistances. The test results from the Alternative Transient Program-Electromagnetic Transient Program (ATP-EMTP) impulse resistance are 5, 10 and 25 ohm is can reduce the pole top voltage and BFOR. And this paper technique can for a guideline in grounding system design of subtransmission line and modification of grounding standards in Metropolitan Electricity Authority (MEA)'s distribution system.

### Acknowledgment

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

### References

- [1] MEA Overhead Subtransmission Construction Standard, Power System Planning Department, Metropolitan Electricity Authority, DWG. No. 10A4-0524, 2000.
- [2] K. Supanus, W. Thansiphraerth, N. Rugthaicharoencheep, and A. Phayomhom "External Grounding Design to Reduce Effects of Lightning Damage in Distribution System" IET Conference on power electronics, machines and drives, April 2014.
- [3] N. Rugthaicharoencheep, W. Thansiphraerth, and A. Phayomhom "Comparison Voltage Across Insulator Strings of 69 kV And 24 kV Lines Due to Lightning Strokes to Top Pole and Mid Span," 47<sup>th</sup> Universities Power Engineering Conference, pp. 1-5, September 2012.
- [4] J. T. Whitehead, and et al. "Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II – Updates to Analytical Models." IEEE Working Group Report, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 3, pp. 1254-1267, July 1993.
- [5] Data Base of Thai Meteorological Department (TMD), year 2003-2012.

บทความวิจัย  
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7  
Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

**ศึกษาการลดผลกระทบจากฟ้าผ่าโดยการปรับปรุงสายตัวนำลงดินในระบบจำหน่าย**  
**Study Reduce The Effect of Lightning by Down Conductor Improvement on Distribution System**

อานนท์ ส่งแสง<sup>1</sup> นัฐโชติ รัตไทยเจริญชีพ<sup>1</sup> กมล สุภานันต์<sup>1</sup> และ อรรถ พยอมหอม<sup>2</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

1381 อ.ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงษ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800 โทรศัพท์ : 02-8363000 ต่อ 4150 E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th

<sup>2</sup>งานโครงข่ายอัจฉริยะ กองวิศวกรรมไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง

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

**บทคัดย่อ**

บทความนี้มีนัยเสนอการศึกษาการลดผลกระทบจากฟ้าผ่า โดยการปรับปรุงสายตัวนำลงดินในระบบจำหน่าย และนำเสนอลักษณะ การเกิดฟ้าผ่า ที่สร้างการรบกวนต่อคุณภาพไฟฟ้า ด้วยการเกิดแรงดัน วาบไฟตามผิวอิมพัลส์สวิตช์ของหม้อแปลง ซึ่งก่อให้เกิดแรงดันเกิน เหนือกว่าขึ้นในระบบจำหน่าย หรือนำเสนอแนวทางการปรับปรุง สายตัวนำลงดิน ด้วยเทคนิคการติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาส่ง คอนกรีต โดยจะทำการเชื่อมต่อสายล่อฟ้า (Overhead Ground Wire) ไปยังแท่งเหล็กค้ำเพื่อลดอัตราการวาบไฟตามผิวอิมพัลส์ และทดลองผลการปรับปรุงด้วยโปรแกรมจำลอง ATP-EMTP ในระบบ จำหน่ายไฟฟ้า แรงดัน 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง จากการศึกษาพบว่าปรับปรุงดังกล่าว สามารถลดอัตราการวาบไฟ ตามผิวอิมพัลส์ของหม้อแปลงได้

คำสำคัญ: การเกิดฟ้าผ่า, วาบไฟตามผิวอิมพัลส์, ปรับปรุงสายตัวนำลงดิน

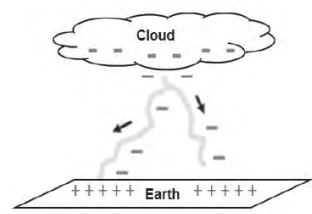
**Abstract**

This paper presents the study reduce impact of lightning by down conductor improvement on distribution system. Presents type condition of lightning strike area. The noise effect power quality from back flashover at insulators. Will occur the induced overvoltage in distribution system. And presents improved lightning performance by attachment the external down conductor connected between overhead ground wires and a ground rod. And measurement the improvement by program ATP-EMTP model for 69 kV circuit in Metropolitan Electricity Authority (MEA)'s distribution system. The study results show that the external down conductor is can reduce blackflash over of lightning effect on distribution system

**Keywords:** lightning, back flashover, down conductor improvement

**1. บทนำ**

ฟ้าผ่า (Lightning) คือปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดจาก การเริ่มก่อตัวของเมฆฟ้าผ่า (Cumulonimbus Cloud) มีทั้งประจุบวก และประจุลบที่อยู่ก่อนเมฆ หากเกิดการสะสมประจุมากขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน และหากเกิดการสะสม ประจุมากขึ้นจนถึงจุดสูงสุด ที่ทำให้เกิดการถ่ายประจุไฟฟ้าปริมาณ มหาศาลระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน นั้นเรียกว่า “การเกิดฟ้าผ่า” สำหรับอันตรายของฟ้าผ่าสามารถจำแนกออกมาได้ 2 รูปแบบ คือผลกระทบในทางตรง (Direct Lightning) และผลกระทบในทางอ้อม (Indirect Lightning) ซึ่งอันตรายจากฟ้าผ่าในรูปแบบผลกระทบทางตรง นั้นคือความเสียหาย ความสูญเสียที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าได้ลงมา โดยตรง ส่วนผลกระทบทางอ้อมจากฟ้าผ่า ได้แก่ ไฟกระชอก (Surge) และสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการจ่าย ไฟฟ้าของระบบจำหน่าย ส่งผลกระทบเป็นวงกว้างคือผู้ใช้ไฟฟ้า ตามที่แสดงในรูปที่ 1 [1]



รูปที่ 1 ลักษณะการเกิดฟ้าผ่า

การไฟฟ้านครหลวง มีระบบส่งกำลังไฟฟ้า และระบบ จำหน่าย ประกอบด้วย ระบบสายส่งระดับ และระบบจำหน่ายที่เป็น สายอากาศและสายใต้ดิน โดยมีระดับแรงดันสายส่งในระดับ 230 กิโลโวลต์ 115 กิโลโวลต์ และ 69 กิโลโวลต์ ในระบบจำหน่าย จะมีระดับแรงดันของสายป้อน คือ 12 กิโลโวลต์ 24 กิโลโวลต์ ตามที่แสดงในรูปที่ 2

**บทความวิจัย**

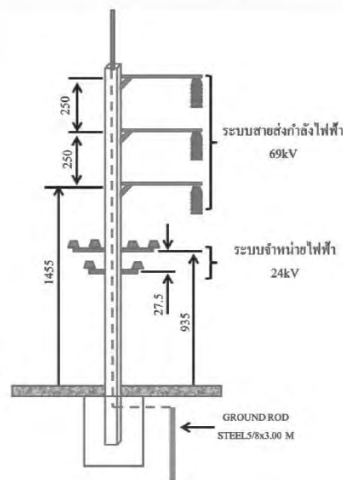
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)



รูปที่ 2 ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง

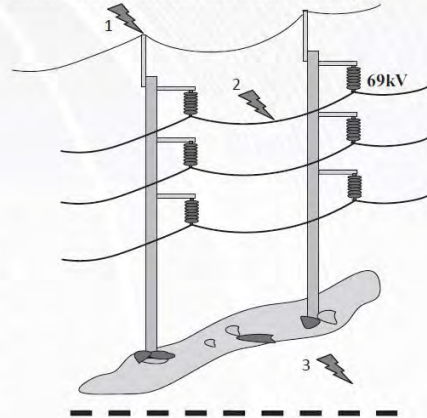
ในระบบส่งจ่ายของการไฟฟ้านครหลวง ส่วนมากจะใช้สายอากาศเหนือนดิน โดยติดตั้งสายล่อฟ้า (Overhead Ground Wire) เพื่อลดผลกระทบจากฟ้าผ่า โดยจะติดตั้งอยู่ด้านบนสุดของเสาไฟฟ้าพร้อมติดตั้งระบบจำหน่ายขนาด 24 กิโลโวลต์ และระบบส่งย่อยขนาด 69 กิโลโวลต์ บนเสาด้านเดียวกัน โดยจะติดตั้งสายล่อฟ้าที่ปลายเสาซึ่งเพื่อลดผลกระทบจากฟ้าผ่า ซึ่งจะเชื่อมต่อกับสายตัวนำลงดินภายในเสาคอนกรีต ไปยังแท่งเหล็กดินตามที่แสดงในรูปที่ 3 [2]



รูปที่ 3 เสาไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง

**2. การเกิดฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย**

ลักษณะของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบจำหน่าย ที่สร้างผลกระทบให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบ โดยทำให้เกิดการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กรณี ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการเกิดฟ้าผ่า ดังนี้คือ 1) ฟ้าผ่าโดยตรงที่สายล่อฟ้า 2) ฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟสและ 3) ฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียงสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ลักษณะฟ้าผ่าที่เกิดการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

บทความวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการนำเสนอ การเกิดฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้าโดยตรง ในระบบ 24 กิโลโวลต์ และ 69 กิโลโวลต์ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสายเฟส เมื่อเกิดฟ้าผ่าจะมีคลื่นจากหัวเสาวิ่งผ่านสายตัวนำภายในเสาคอนกรีตลงสู่พื้นดิน ตัวนำในเสาคอนกรีตจะมีความต้านทานอิมพีแดนซ์อยู่ค่าหนึ่ง ที่เรียกว่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ และในกรณีที่ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์มีค่าต่ำกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่แท้จริง จะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเป็นบวก ในกรณีที่ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์มีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่แท้จริงจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเป็นลบ หากมีการรวมกันของคลื่นที่ทำให้โครงสร้างเสาคอนกรีตมีแรงดันสูงเกิดค่า CFO ก็จะทำให้เกิดการวับไฟลามตัวฉนวนถูกด้วยย้อนกลับเข้าระบบ (Black Flash Over: BFO) ซึ่งปรากฏการณ์การเกิดวับไฟลามตัวฉนวนย้อนกลับนั้นเป็นดัชนีที่สำคัญในการประเมินสมรรถนะของระบบสายส่ง ซึ่งกรณีการเกิดฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟส จะทำให้ระบบเกิดแรงดันเกินที่รุนแรงที่สุด จาก 3 กรณีที่ได้กล่าวมา แต่การเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบ จะพบบ่อยจากกรณีที่เกิดฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียงสายส่ง



**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

**2.1 ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา**

ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) ของเสาคอนกรีตในระบบส่งจ่าย เป็นอิมพีแดนซ์ของระบบดินของเสา จะขึ้นอยู่กับขนาดและความสูงในระบบเสาส่ง ตามลักษณะมาตรฐานของการใช้งาน และตามระดับของแรงดันไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของเสาขึ้นอยู่กับความสูงของเสาและขนาดของสายตัวนำลงดิน แสดงในสมการที่ 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 ( $\Omega$ )
- $H$  คือ ความสูงของเสาคอนกรีต (m)
- $r$  คือ รัศมีของสายตัวนำลงดิน (m)

**2.2 การวางไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วย**

ในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง ตามมาตรฐานการก่อสร้างกำหนดให้ใช้ลูกถ้วยหมายเลข 52-3 ตามมาตรฐาน มอก.354 โดยการไฟฟ้านครหลวงใช้จำนวน 7 ลูกถ้วย เพื่อให้ระบบจำหน่ายรองรับ การเปลี่ยนระดับแรงดันระบบ 115 กิโลโวลต์

สำหรับระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง ใช้ลูกถ้วยหมายเลข 56/57-2 จำนวน 1 ลูกถ้วย โดยมีคุณสมบัติของการวางไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วย (Critical Impulse Flashover Voltage: CFO) ดังแสดงตารางที่ 1 โดยใช้ค่าของสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient Variance) เท่ากับ 3 %

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของฉนวนลูกถ้วย [4]

ชนิดของฉนวน	ผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วย (กิโลโวลต์)		สัมประสิทธิ์ของวงวนสัมประ (กิโลโวลต์)	
	ค่าขั้นต่ำ	ค่ามัธย	ค่าขั้นต่ำ	ค่ามัธย
52-3 (7 unit)	695	670	674.15	649.90
56/57-2 (1unit)	180	205	174.60	198.85

ลูกถ้วยที่ใช้ในระบบ 69kV



Type 52-3 จำนวน 7 ลูกถ้วย

ลูกถ้วยที่ใช้ในระบบ 24kV

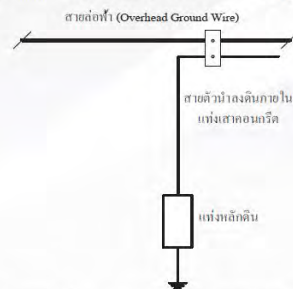


Type 56/57-2 จำนวน 1 ลูกถ้วย

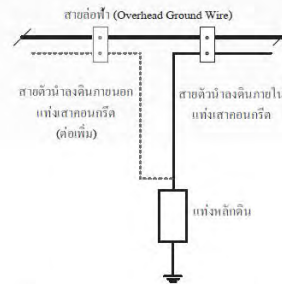
**3. การศึกษาเพื่อลดผลกระทบจากป้องกันฟ้าผ่า**

**3.1 การติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาส่งคอนกรีต**

เทคนิคการติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาส่งคอนกรีต (External Down Conductor) เพื่อลดค่าของอัตราการวางไฟตามผิวย้อนกลับ ซึ่งเชื่อมต่อเพิ่มระหว่างสายล่อฟ้าไปยังแท่งหลักดินที่โคนเสา โดยใช้ขนาดลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี ดีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.93 มิลลิเมตร (1x38.32 mm OHGW) ดังแสดงในรูปที่ 5



(ก) แสดงรูปการเชื่อมต่อสายล่อฟ้าและแท่งหลักดินก่อนการปรับปรุง



(ข) แสดงรูปการเชื่อมต่อสายตัวนำลงดินนอกเสาส่งคอนกรีต

รูปที่ 5 แบบจำลองก่อนและหลังการติดตั้งสายดินนอกเสา

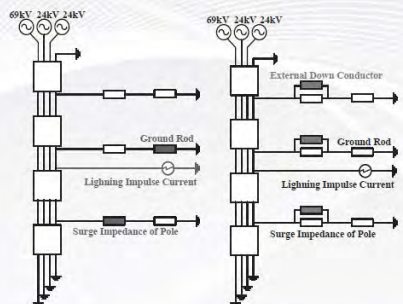
**3.2 แบบจำลอง**

แบบจำลองการวิเคราะห์ได้ใช้โปรแกรม ATP-EMTP (Alternative Transient Program - Electromagnetic Transient Program) มาประมวลผลของสมรรถนะฟ้าผ่าที่เกิดในระบบส่ง โดยใช้ค่าคงที่ของสายรูปแบบ J.Marti's ซึ่งแบบจำลองในการวิเคราะห์นั้นประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสสลับ 3 เฟส สายล่อฟ้าเหนือศีรษะ สายส่งย่อยและสายจำหน่าย ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ดังแสดงในรูปที่ 6

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

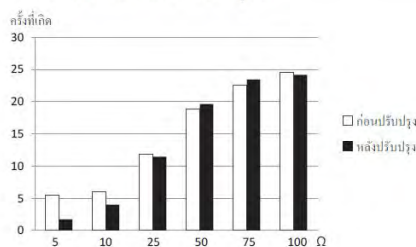


(ก) ก่อนการปรับปรุง (ข) หลังการติดตั้งเพิ่มสายตัวนำลงดิน

รูปที่ 6 แบบจำลองระบบโดยโปรแกรม ATP-EMTP

4. การประมวลผลของโปรแกรม

จากการศึกษาได้ทำการทดลองกับระบบจำหน่ายไฟฟ้าของกรฟฟ้านครหลวง ระดับแรงดัน 69 กิโลโวลต์ ด้วยแบบจำลองโปรแกรมจำลอง กรณีที่พม่าที่ตำแหน่งห้วเสา ขนาดคลื่น 10/350  $\mu$ s และเปลี่ยนค่าความต้านทานอิมพีดส์ตั้งแต่ 5 10 25 50 75 และ 100  $\Omega$  ด้วยค่ากระแสฟ้าฟ้าขนาด 34.4 kA ซึ่งเป็นค่ากระแสมีขฐานของประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ.2536-2540 ใช้ค่าของจำนวนวันที่พายุฟ้าคะนองต่อปีเท่ากับ 16 วัน[5] หรือเปรียบเทียบค่าการเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับ (BFOR) ก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงสายตัวนำลงดิน แสดงผลตามที่แสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 ค่า BFOR ก่อนและหลังการปรับปรุงสายตัวนำลงดิน

จากรูปที่ 7 พบว่าที่ค่าความต้านทานอิมพีดส์ที่ 5 10 และ 25  $\Omega$  เมื่อทำการปรับปรุงสายตัวนำลงดินนอกเสาตั้งคอนกรีต สามารถลดค่าการเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับ (Black Flashover) ได้ แต่กรณีที่ค่าความต้านทานอิมพีดส์ที่ 50 75 และ 100  $\Omega$  จะทำให้ค่าการเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับเพิ่มขึ้น

5. สรุปผล

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการลดผลกระทบจากฟ้าผ่า โดยการปรับปรุงสายตัวนำลงดินในระบบจำหน่าย ด้วยการติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสา ซึ่งเชื่อมต่อเพิ่มเติมระหว่างสายล่อฟ้าไปยังแท่งเหล็กดินที่โคนเสา วัตถุประสงค์เพื่อลดค่าของอัตราการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ โดยใช้โปรแกรมจำลอง ATP-EMTP ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 69 กิโลโวลต์ และทำการเปลี่ยนค่าความต้านทานอิมพีดส์ระหว่าง 5 10 25 50 75 และ 100  $\Omega$  จากแบบจำลองพบว่าที่ความต้านทานอิมพีดส์ 5 10 และ 25  $\Omega$  เมื่อทำการปรับปรุงสายตัวนำลงดิน ดังกล่าว จะสามารถลดการวาวไฟตามผิวย้อนกลับลงได้ แต่เมื่อความต้านทานอิมพีดส์ 50 75 และ 100  $\Omega$  จะไม่สามารถลดการวาวไฟตามผิวย้อนกลับลงได้ ซึ่งสามารถนำไปเป็นแนวทางในการปรับปรุงมาตรฐานการต่อลงดินในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของกรฟฟ้านครหลวง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้านครหลวง และ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนความช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้ ซึ่งทำให้เกิดความสำริ่ใจอย่างสมบูรณ์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] วัฒนา สุพทรบุรีภักย์ บทความ "The Impact of Lightning on Power Quality" ตุลาคม 2548 Oppo Company Limited
- [2] K. Supamus, W. Thansiphserth, N. Rugthaicharoencheep, A. Phayomhom "External Grounding Design to Reduce Effects of Lightning Damage in Distribution System" IEEE Conference April 2014.
- [3] N. Rugthaicharoencheep, W. Thansiphserth, N. Suwannachot and A. Phayomhom "Comparison Voltage across Insulator Strings of 69 kV and 24 kV Lines due to Lightning Strokes to Top Pole and Mid Span" Journal of Energy and Power Engineering 2013.
- [4] A. Phayomhom, S. Sirisumrannuku, T. Kasirawat, A. Puttarach "Economic Assessment of Lightning Performance Improvement of 69 kV Subtransmission Line in MEA's Power Distribution System" IEEE Proceedings of the International Electrical Engineering Congress 2014.
- [5] Data Base of Thai Meteorological Department (TMD), year 2003-2012.

## กรณีศึกษาการลดผลกระทบจากฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย โดยการปรับปรุงสายตัวนำลงดิน

อานนท์ สังกแสง<sup>1</sup> นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ<sup>1\*</sup> และ อรรถ พยอมหอม<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาการลดผลกระทบจากฟ้าผ่าโดยการปรับปรุงสายตัวนำลงดินในระบบจำหน่าย พร้อมนำเสนอลักษณะการเกิดฟ้าผ่าที่สร้างการรบกวนต่อคุณภาพไฟฟ้าด้วยการเกิดแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วยซึ่งก่อให้เกิดแรงดันเกินเหนี่ยวนำขึ้นในระบบจำหน่าย พร้อมนำเสนอแนวทางการปรับปรุงสายตัวนำลงดินด้วยเทคนิคการติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาส่งคอนกรีตโดยทำการเชื่อมต่อสายล่อฟ้า (Overhead Ground Wire) ไปยังแท่งหลักดินเพื่อลดอัตราการวาทไฟตามผิวย้อนกลับและทดลองผลการปรับปรุงด้วยโปรแกรมจำลอง ATP-EMTP ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าแรงดัน 69 กิโลโวลต์ของการไฟฟ้านครหลวง จากการศึกษาพบว่า การปรับปรุงดังกล่าวสามารถลดแรงดันหัวเสาและสามารถลดอัตราการวาทไฟตามผิวย้อนกลับของลูกถ้วยลงได้

**คำสำคัญ:** การเกิดฟ้าผ่า, วาทไฟตามผิวอิมพัลส์, ปรับปรุงสายตัวนำลงดิน, ความต้านทานดิน

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

<sup>2</sup> ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้านครหลวง

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: nattachote.r@rmutp.ac.th รับเมื่อ 13 ตุลาคม 2558 ตอบรับเมื่อ 28 มีนาคม 2559

## Case Studies Reducing The Impact of Lightning On Distribution System by Down Conductor Improvement

Arnon Songsang<sup>1</sup> Nattachote Rugthaichareoncheep<sup>1\*</sup> and Att Phayomhom<sup>2</sup>

### Abstract

This paper presents the study on reducing the lightning impact in distribution systems by down conductor improvement and the interference of lightning on power quality by impulse surface flashover on suspension insulators. This causes the induced voltages in distribution systems. The paper also presents a technique of attachment on external down conductor connecting between overhead ground wires and ground rods to reduce the back flashovers. The study has been done by ATP-EMTP simulation in 69 kV system of Metropolitan Electricity Authority (MEA). The results show that the external down conductor can reduce the pole top voltages and back flashover in distribution systems.

**Keywords :** lightning, back flashover, down conductor improvement, ground resistance

---

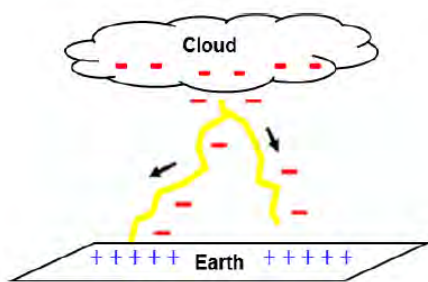
<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Bangkok.

<sup>2</sup> Metropolitan Electricity Authority Pleonchit Road, Lumpini, Patumwan, Bangkok.

\* Corresponding author, E-mail: nattachote.r@mutp.ac.th Received 13 October 2015, Accepted 28 March 2016

## 1. บทนำ

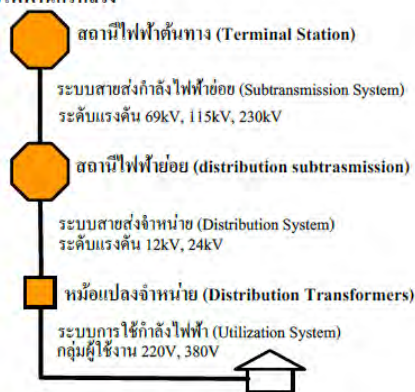
ฟ้าผ่า (Lightning) คือปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดจากการเริ่มก่อตัวของเมฆฟ้าผ่า (Cumulonimbus Cloud) มีทั้งประจุบวกและประจุลบที่อยู่ในก้อนเมฆ จนเกิดการสะสมประจุมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้เกิดศักย์ไฟฟ้า หากการสะสมประจุมากจนถึงจุดสูงสุด จะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไฟฟ้าปริมาณมหาศาลระหว่างก้อนเมฆกับพื้นดิน ที่เรียกว่า ฟ้าผ่า อันก่อให้เกิดผลกระทบซึ่งสามารถจำแนกออกได้ 2 รูปแบบ คือ ผลกระทบทางตรง (Direct Lightning) และผลกระทบทางอ้อม (Indirect Lightning) ซึ่งผลกระทบจากฟ้าผ่าทางตรงคือความเสียหายที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าที่ผ่าลงมาโดยตรงที่วัตถุ ก่อให้เกิดแรงระเบิด แรงกล ความร้อน ส่วนผลกระทบทางอ้อมจากฟ้าผ่า ได้แก่ ไฟกระชอก (Surge) เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร และสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการจ่ายไฟฟ้าของระบบจำหน่าย ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดไฟฟ้าดับ และส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ไฟฟ้าตามที่แสดงในรูปที่ 1 [1]



รูปที่ 1 ลักษณะการเกิดฟ้าผ่า

การไฟฟ้านครหลวง มีระบบส่งกำลัง ไฟฟ้าย่อย และระบบสายส่งจำหน่าย ซึ่งมีลักษณะการเดินสายส่งไฟฟ้า เป็นประเภทสายอากาศเหนือดิน (Overhead) และระบบสายใต้ดิน (Underground) โดยแยกเป็นระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย มีระดับแรงดัน 230 กิโลโวลต์ 115 กิโลโวลต์ และ 69 กิโลโวลต์ ผ่านสถานีไฟฟ้าย่อย และลดระดับแรงดัน ในระบบสายส่งจำหน่าย ให้มีระดับแรงดัน 12 กิโลโวลต์ และ 24 กิโลโวลต์ ก่อนผ่านหม้อแปลงจำหน่าย เพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้าให้กับกลุ่มผู้ใช้ไฟฟ้า ตามที่แสดงในรูปที่ 2 [2]

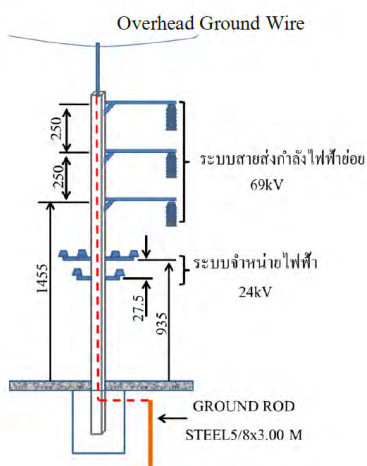
### การไฟฟ้านครหลวง



รูปที่ 2 ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง

หากพิจารณาที่ระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย ร้อยละ 90 จะเดินสายประเภทสายอากาศเหนือดิน (Overhead) การไฟฟ้านครหลวงจะทำการติดตั้งสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ไว้บนเสาคอนกรีตค้ำเดียวกันกับสายส่งในระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ และส่วนปลายเสาจะติดตั้งสายล่อฟ้า (Overhead Ground Wire) ซึ่งเชื่อมต่อ

สายจึงอากาศผ่านสายตัวนำภายในเสาคอนกรีต ไปยังแท่งเหล็กดินที่โคนเสาเพื่อป้องกันไม่ให้ฟ้าผ่าโดยตรงไปยังสายไฟ และลดผลกระทบจากฟ้าผ่าโดยทำหน้าที่นำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน ให้กับสายส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ และระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ แสดงในรูปที่ 3 [3]

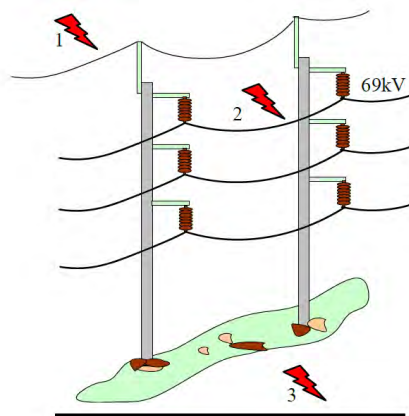


รูปที่ 3 เสาไฟฟ้าในระบบจำหน่ายของ กฟน.

โดยก่อนหน้านี้น ชูวงศ์ วัฒนศักดิ์ภูบาล [4] เคยนำเสนอการวิจัย การลดปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้องเนื่องจากฟ้าผ่าสายส่ง 115 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยการต่อลงดินนอกเสา ซึ่งทำการเชื่อมต่อสายตัวนำระหว่างสายตัวนำต่อฟ้ากับจุดต่อลงดินนอกเสา เพื่อลดค่าความต้านทานของรากสายดินและค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันเกินฟ้าผ่าที่ตกคร่อมลูกถ้วยการเกิดวาทไฟตามผิวย้อนกลับลดลง และยังสามารถลดความรุนแรงของเสิร์จที่เดินทางเข้าสู่สถานีจำหน่ายไฟฟ้า

## 2. การเกิดฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย

การเกิดแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าในระบบจำหน่ายจะส่งผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบ อันทำให้เกิดการเจาะทะลุบนลูกถ้วย จนเกิดลัดวงจรลงดิน และเกิดความผิดปกติในระบบจำหน่าย ส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพ และความเชื่อถือได้ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งลักษณะการเกิดฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย ได้เป็น 3 กรณี (IEEE Standard 1410, 2004) ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการเกิดฟ้าผ่า ดังนี้ 1) ฟ้าผ่าโดยตรงที่สายล่อฟ้า 2) ฟ้าผ่าโดยตรงลงสายเฟส และ 3) ฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียงสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 4 [5]



รูปที่ 4 ลักษณะการเกิดฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย

บทความวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการนำเสนอ การเกิดฟ้าผ่าลงสายล่อฟ้าโดยตรง ที่ระบบส่งกำลังไฟฟ้าย่อย 69 กิโลโวลต์ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสายเฟส เมื่อเกิดฟ้าผ่าจะมีคลื่นจากหัวเสา วิ่งผ่านสาย

ตัวนำภายในเสาคอนกรีตลงสู่พื้นดินตัวนำในเสาคอนกรีตจะมีค่าความต้านทานอิมพีแดนซ์อยู่ค่าหนึ่ง ที่เรียกว่า เสิร์จอิมพีแดนซ์ (Surge Impedance) และในกรณีที่เสิร์จอิมพีแดนซ์มีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่แท่งกรวดจะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเป็นบวก ในกรณีที่ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ มีค่ามากกว่าค่าอิมพีแดนซ์ที่แท่งกรวดก็ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับเป็นลบ หากมีการรวมกันของคลื่นที่ทำให้โครงสร้างเสาคอนกรีตมีแรงดันสูงเกิดกว่าค่าการวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วย (Critical Impulse Flashover Voltage: CFO) ก็จะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับเข้าสู่ระบบ (Back Flashover :BFO) [6] ซึ่งการเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนย้อนกลับนั้นเป็นดัชนีที่สำคัญในการประเมินประสิทธิภาพการป้องกันฟ้าผ่าในระบบสายส่ง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การเกิดวาบไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับ

ซึ่งกรณีการเกิดฟ้าผ่าโดยตรง ลงสายเฟส จะทำให้ฉนวนในระบบเกิดความเสียหายและเกิดแรงดันเกิน

ที่รุนแรงที่สุด จาก 3 กรณีที่ได้กล่าวมา แต่การเกิดแรงดันไฟฟ้าเกินในระบบจะพบบ่อยจากกรณีที่เกิดฟ้าผ่าในบริเวณใกล้เคียงสายส่ง

## 2.1 ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา

เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาคอนกรีตในระบบส่งจ่าย เป็นอิมพีแดนซ์ของระบบดินของเสา จะขึ้นอยู่กับขนาดและความสูงในระบบเสาส่ง ตามลักษณะมาตรฐานของการใช้งาน และตามระดับของแรงดันไฟฟ้าในระบบ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ของเสาขึ้นอยู่กับความสูงของเสาและขนาดของสายตัวนำลงดิน แสดงในสมการที่ 1 [7]

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

เมื่อ  $Z_T$  คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา (โอห์ม)  
 $H$  คือ ความสูงของเสาคอนกรีต (เมตร)  
 $r$  คือ รัศมีของสายตัวนำลงดิน (เมตร)

## 2.2 การวาบไฟผิวอิมพัลส์วิกฤตของลูกถ้วย

ลูกถ้วยที่ใช้ในระบบสายส่ง 69 กิโลโวลต์ ของการไฟฟ้านครหลวง ตามมาตรฐานการก่อสร้าง กำหนดให้ใช้ลูกถ้วยชนิด 52-3 ตามมาตรฐาน มอก.354 จำนวน 7 ลูกถ้วย เพื่อให้ระบบจำหน่ายรองรับการเปลี่ยนระดับแรงดันไปเป็น 115 กิโลโวลต์ สำหรับระบบจำหน่าย 24 กิโลโวลต์ ใช้ลูกถ้วยชนิด 56/57-2 จำนวน 1 ลูกถ้วย โดยลูกถ้วยมีคุณสมบัติของการวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวงลูกถ้วย ดังแสดงตารางที่ 1 โดยใช้ค่าของสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient Variance) เท่ากับ 3 %

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของฉนวนลูกถ้วย [8 - 9]

ชนิดของ ฉนวน	ผิวสัมผัสผิวกดของ พวงลูกถ้วย (กิโลโวลต์)		สัมประสิทธิ์ของ ความต้านแปร (กิโลโวลต์)	
	ลำดับบวก	ลำดับลบ	ลำดับบวก	ลำดับลบ
52-3	695	670	674.15	649.90
56/57-2	180	205	174.60	198.85



ก) ลูกถ้วยชนิด 52-3 ใช้จำนวน 7 ลูก

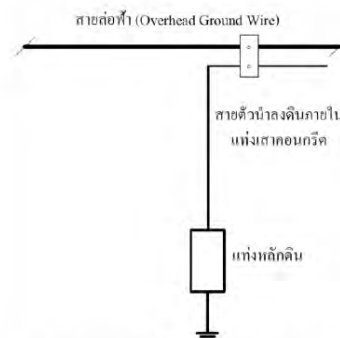


ข) ลูกถ้วยชนิด 56/57-2 ใช้จำนวน 1 ลูก  
รูปที่ 6 ลูกถ้วยที่ใช้ในระบบ 24 และ 69 กิโลโวลต์

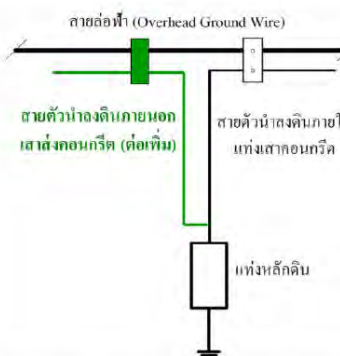
### 3. การศึกษาเพื่อลดผลกระทบจากฟ้าผ่า

#### 3.1 การติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาส่ง

เทคนิคการติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาส่งคอนกรีต เพื่อศึกษาการลดค่าของอัตราความไวไฟตามผิวย้อนกลับ ซึ่งเชื่อมต่อเพิ่มระหว่างสายล่อฟ้าไปยังแท่งหลักดินที่โคนเสาโดยใช้ขนาดลวดเหล็กกล้าเคลือบสังกะสี ดีเกลียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.93 มิลลิเมตร ตามที่แสดงในรูปที่ 7



ก) แสดงรูปการเชื่อมต่อสายตัวนำ ก่อนปรับปรุง



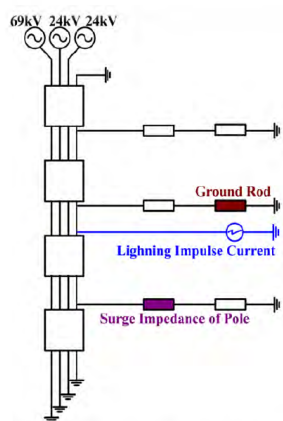
ข) แสดงรูปการเชื่อมต่อสายตัวนำ หลังปรับปรุง  
รูปที่ 7 ลักษณะการเชื่อมต่อสายตัวนำลงดินก่อนและหลังการปรับปรุง

#### 3.2 การสร้างแบบจำลอง

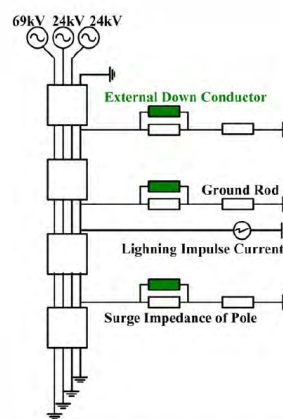
ในการสร้างแบบจำลองการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP (Alternative Transient Program -Electromagnetic Transient Program) มาประมวลผลเพื่อประเมินประสิทธิภาพการป้องกันฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบส่ง โดยใช้ค่าคงที่ของสายรูปแบบ J.Marti's



ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายกระแสสลับ 3 เฟส สายส่งย่อย สายจำหน่าย และสายล่อฟ้าเหนือศีรษะตามที่แสดงในรูปที่ 8



ก) แสดงแบบจำลอง ก่อนปรับปรุง



ข) แสดงแบบจำลอง หลังปรับปรุง

รูปที่ 8 แบบจำลองระบบโดยโปรแกรม ATP-EMTP

### 3.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยใช้โปรแกรม ATP-EMTP มีข้อมูล ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลอง

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

#### 4. ดัชนีที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการป้องกันฟ้าผ่า

ดัชนีที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพการป้องกันฟ้าผ่า มีดังนี้ คือ 1) แรงดันไฟฟ้าหัวเสา 2) กระแสวิกฤต 3) อัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ โดยพิจารณาแรงดันไฟฟ้าที่หัวเสาแรงดันเทียบกับดิน กระแสวิกฤตคือค่ากระแสที่ทำให้เริ่มเกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับที่พวงถูกด้วย หลังจากนั้นก็จะนำไปคำนวณค่าอัตราการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ตามสมการ 2-5 [10 - 11]

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

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

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

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

เมื่อ BFOR คือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)

P(I) คือ ความน่าจะเป็นสะสมที่กระแสฟ้าผ่า I สูงกว่าหรือเท่ากับ กระแสวิกฤต (%)

I คือ กระแสฟ้าผ่าค่ายอด

M คือ กระแสฟ้าผ่ามาตรฐาน 34.4 กิโลแอมป์

B คือ ค่าคงที่สำหรับประเทศไทย 2.5

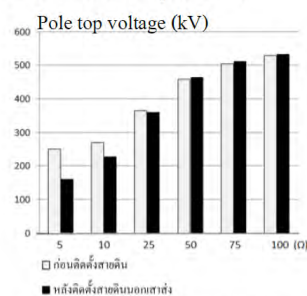
h คือ ความสูงเฉลี่ยของสายดิน (เมตร)

$N_1$  คือ จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าจะผ่าลงสายดิน (ครั้ง/100 วงจร-กม./ปี)

b คือ ระยะห่างระหว่างสายดิน (เมตร)

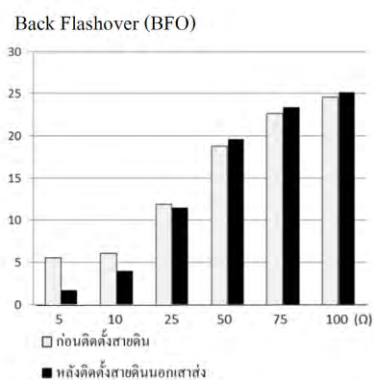
#### 5. การประมวลผลของโปรแกรม

จากกรณีศึกษาได้ทำการทดลองกับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้านครหลวง ระดับแรงดัน 69 กิโลโวลต์ กรณีฟ้าผ่าโดยตรงที่ตำแหน่งหัวเสา ด้วยคลื่น 10/350 ไมโครวินาที และเปลี่ยนค่าความต้านทานอิมพัลส์ตั้งแต่ 5, 10, 25, 50, 75 และ 100 โอห์ม ด้วยค่ากระแสฟ้าผ่าขนาด 34.4 กิโลแอมป์ ซึ่งเป็นค่ากระแสมาตรฐานของ ประเทศไทยใน ช่วงปี พ.ศ. 2536-2540 ใช้ค่าของจำนวนวันที่พายุฟ้าคะนองต่อปีเท่ากับ 116 วัน [12] พร้อมเปรียบเทียบค่าแรงดันหัวเสา (Pole top voltage) และอัตราการเกิด การวาบไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับ ก่อนและหลังปรับปรุงสายตัวนำลงดินแสดงผลในรูปแบบที่ 9 – 10



รูปที่ 9 เปรียบเทียบค่าแรงดันหัวเสา

จากรูปที่ 9 พบว่าที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่ 5, 10 และ 25 โอห์ม เมื่อทำการปรับปรุงสายตัวนำลงดินนอกเสาส่งคอนกรีตสามารถลดค่าแรงดันหัวเสาได้ แต่กรณีที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่ 50, 75 และ 100 โอห์ม จะทำให้ค่าแรงดันหัวเสาเพิ่มขึ้น



รูปที่ 10 เปรียบเทียบอัตราเกิด BFO

จากรูปที่ 10 พบว่าที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่ 5, 10 และ 25 โอห์ม เมื่อทำการปรับปรุงสายตัวนำลงดินนอกเสาส่งคอนกรีต สามารถลดค่าการเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับ ได้แต่กรณีที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์ที่ 50, 75 และ 100 โอห์ม จะทำให้ค่าการเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดคลื่นสะท้อนที่การรวมกันของคลื่นที่ทำให้โครงสร้างเสาคอนกรีตมีแรงดันสูงเกิดค่าการวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของพวกถูกถ้วยก็จะทำให้เกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับเข้าระบบ

## 6. สรุปผล

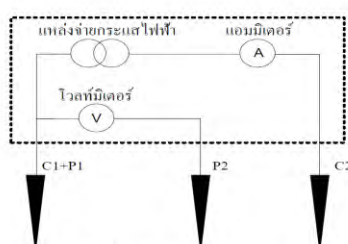
บทความนี้นำเสนอการศึกษาการลดผลกระทบจากฟ้าผ่าโดยการปรับปรุงสายตัวนำลงดินในระบบจำหน่ายด้วยการติดตั้งสายตัวนำลงดินเพิ่มนอกเสาส่งซึ่งเชื่อมต่อเพิ่มเติมระหว่างสายล่อฟ้าไปยังแท่งหลักดินที่โคนเสา วัตถุประสงค์เพื่อลดค่าของอัตราการวาวไฟตามผิวย้อนกลับ โดยใช้โปรแกรมจำลอง ATP-EMTP ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าระดับแรงดัน 69 กิโลโวลต์ และทำการเปลี่ยนค่าความต้านทาน อิมพัลส์ระหว่าง 5, 10, 25, 50, 75 และ 100 โอห์ม พบว่าที่ค่าความต้านทานอิมพัลส์ 5, 10 และ 25 โอห์ม เมื่อทำการปรับปรุงสายตัวนำลงดิน ดังกล่าว จะสามารถลดค่าแรงดันหัวเสา และสามารถลดอัตราการเกิดการวาวไฟตามผิวฉนวนลูกถ้วยย้อนกลับ แต่เมื่อความต้านทานอิมพัลส์ 50, 75 และ 100 โอห์ม จะไม่สามารถลดการวาวไฟตามผิวย้อนกลับลงได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชวงศ์ วัฒนศักดิ์ภูบาล ที่สามารถลดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ตกคร่อมลูกถ้วย ส่งผลให้การเกิดวาวไฟตามผิวย้อนกลับลดลงด้วย ดังนั้นในทางปฏิบัติต้องหาแนวทางเพื่อลดค่าความต้านทานดินที่โคนเสา ให้มีค่าไม่เกิน 25 โอห์ม ซึ่งกรณีศึกษานี้สามารถนำไปเป็นแนวทางการปรับปรุงมาตรฐานการต่อลงดินในระบบจำหน่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้านครหลวงได้

## 7. ข้อเสนอแนะเพื่อลดความต้านทานดิน

### 7.1 วิธีการปักแท่งหลักดินเพิ่ม

ตามมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย พ.ศ. 2556 กำหนดให้ค่าความต้านทานระหว่างหลักดินกับดิน (Resistance to Ground) เพื่อจำกัดแรงดันเกินจากฟ้าผ่า โดยค่าความต้านทานของหลักดินกับดิน

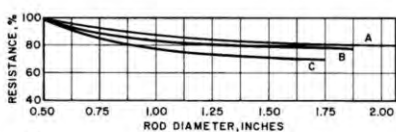
ต้องไม่เกิน 5 โอห์ม ยกเว้น พื้นที่ที่ขาดการปฏิบัติ และ ได้รับการเห็นชอบจากการไฟฟ้าซึ่งกำหนดให้ค่าความต้านทานของหลักดินมีค่าไม่เกิน 25 โอห์ม หากทำการวัดแล้วยังมีค่าเกินให้ปักหลักดินเพิ่มอีก 1 แท่ง [13] แสดงหลักการวัด ในรูปที่ 11



รูปที่ 11 เครื่องมือวัดค่าความต้านทานดิน [14]

7.2 วิธีการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งหลักดิน

เป็นวิธีการเพิ่มพื้นที่สัมผัสดิน เพื่อลดความต้านทานดิน ซึ่งวิธีนี้จะทำให้ความต้านทานดินลดลงเล็กน้อย ในทางปฏิบัติจึงไม่นิยมลดความต้านทานด้วยวิธีการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งหลักดิน ซึ่งความสัมพันธ์ของความต้านทานดินที่ลดลงเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลักดิน แสดงในรูป 12 [15]

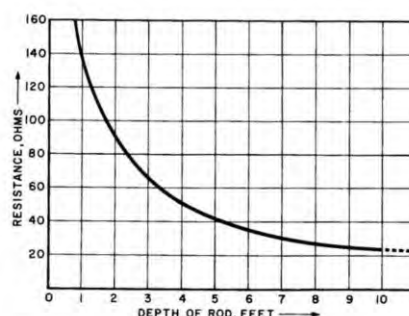


รูปที่ 12 ผลการเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งหลักดิน

7.3 วิธีการเพิ่มขนาดความยาวของแท่งหลักดิน

เป็นวิธีที่ใช้ในทางปฏิบัติอย่างทั่วไป โดยปกติจะมีความยาวไม่เกิน 3 เมตร ในกรณีนี้ที่แท่งหลักดิน

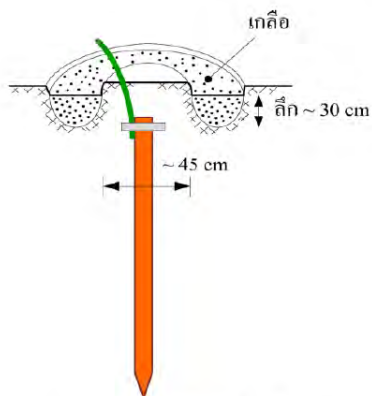
มีความยาวมาก ในการติดตั้งอาจทำได้ยากหรือต้องใช้เครื่องจักรเจาะดินช่วยในการฝังแท่งหลักดิน ในการเพิ่มความยาวหลักดินสามารถทำให้ความต้านทานลดลงเมื่อความยาวของหลักดินเพิ่มขึ้น แสดงความสัมพันธ์ ในรูปที่ 13



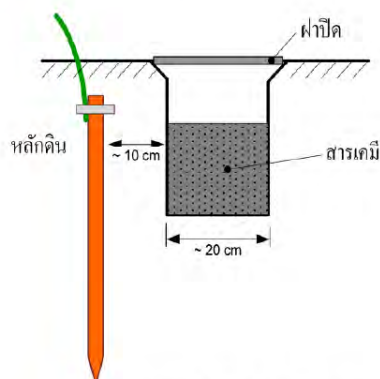
รูปที่ 13 ความยาวแท่งหลักดินต่อค่าความต้านทานดิน

7.4 วิธีการใช้สารเคมีปรับปรุงความต้านทานดิน

ในพื้นที่ที่มีความต้านทานจำเพาะของดินสูงสามารถลดความต้านทานดินโดยการเติมสารเคมีลงในดิน ซึ่งเป็นสารเคมีประเภทเกลือ ที่นิยมใช้คือ โซเดียมคลอไรด์ (เกลือ), คอปเปอร์ซัลเฟต และแมกนีเซียม ซัลเฟต ในที่นี้สาร แมกนีเซียม ซัลเฟต จะเป็นสารเคมีที่ทำให้เกิดการกัดกร่อนน้อยที่สุด โดยวิธีการเติมสารเคมีลงในดิน เช่น วิธีขุดวาง วิธีกลบทับ และวิธีการใช้กระบอกบรรจุสารเคมี แต่วิธีขุดวาง และวิธีกลบทับ หากมีฝนตกลงมา จะทำให้เกลือละลายในดินอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความต้านทานลดลงรวดเร็วไปด้วย แต่ถ้าฝนตกลงมามากเกลือจะละลายหายไปจึงต้องคอยตรวจสอบความต้านทานดิน และเติมสารเคมีเป็นประจำ แสดงในรูปที่ 14 [16]



ก) แสดงการขุดวางแล้วเติมเกลียว

ข) แสดงการใช้สลาร์เคมีฝังกระบอก  
รูปที่ 14 การใช้สลาร์เคมีปรับปรุงความต้านทานดิน

### 8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร และการไฟฟ้านครหลวง ที่ให้การสนับสนุนความช่วยเหลือในการจัดทำบทความนี้ ซึ่งทำให้เกิดความสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

### 9. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Shuntranurak, "The Impact of Lightning on Power Quality", Oppo Company Limited, October 2005. (in Thai)
- [2] K. Supanus, "External Grounding Design to Reduce Effects of Lightning Damage in Distribution System", IEEE Conference April 2014.
- [3] MEA Overhead Subtransmission construction standard, power system planning department, Metropolitan Electricity Authority, DWG. No. 10A4-0524. 2000.
- [4] C. Wattanasakpubal, "Improve Lightning Performance 115 kV Transmission Line's PEA by External Ground", Master Thesis, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, 2003. (in Thai)
- [5] IEEE Standard 1410-2004. "Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines".
- [6] P. Sirajansawang, "Assessment of Lightning Performance on Distribution System 24kV", Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2013. (in Thai)
- [7] Z. Zhang, W. Sima, Y. Zhang, and L. Shu, "The simulation model for calculating the surge impedance of a tower", in Proc. IEEE Conf. Electrical Insulation, 2004, pp. 331 – 334.
- [8] TIS.354-1985. Suspension insulator type 52-3. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute, 1985.

- [9] TIS.1251-1994. Pin post insulator type 56/57-2. Bangkok: Thai Industrial Standards Institute, 1994.
- [10] IEEE Std. 1243-1997. “Guide for improving the lightning performance of transmission lines”.
- [11] IEEE Working Group Report. “Estimation lightning performance of transmission lines II – updates to analytical models” IEEE Transactions on Power Delivery 8(3), 1993, pp. 1254-1267.
- [12] Data Base of Thai Meteorological Department (TMD), 2003-2012.
- [13] EIT Standard 2001-56. The Engineering Institute of Thailand under H.M.The King’s Patronage, 2001. (in Thai)
- [14] W. Shuntranurak, “Measuring ground resistance by Fall of Potential method”, Oppo Company Limited. January 2005. (in Thai)
- [15] Megger.com A practical guide to earth resistance testing, “Getting Down to Earth”, Internet website at [http://www.weschler.com/\\_upload/sitepdfs/techref/gettingdowntoearth.pdf](http://www.weschler.com/_upload/sitepdfs/techref/gettingdowntoearth.pdf) (accessed on 20 May 2015)
- [16] Council of engineers Thailand, “Code of practice for design, installation, inspection and testing of grounding system”, April 2011.

## ประวัติการศึกษาและการทำงาน



ชื่อ นามสกุล นายอานนท์ ส่งแสง  
วัน เดือน ปีเกิด 2 มิถุนายน 2526  
ภูมิลำเนา อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด

### ประวัติการศึกษา

วุฒิการศึกษา	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ปวช.	วิทยาลัยเทคนิคปราจีนบุรี	2544
ปวส.	วิทยาลัยเทคนิคสหัสขันธ์	2546
ปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (นครราชสีมา)	2549

### ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน

วิศวกรไฟฟ้าปฏิบัติการ (ข้าราชการพลเรือนสามัญ) ส่วนวิชาการวิศวกรรม  
สำนักส่งเสริมและพัฒนางานเทคนิค กรมประชาสัมพันธ์ สังกัดสำนักนายกรัฐมนตรี