

การศึกษาเวลาเฉลี่ยที่จะเกิดความเสียหายในสถานีไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่าลงบนสายส่ง



นายวิภูวนันต์ ภัคดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

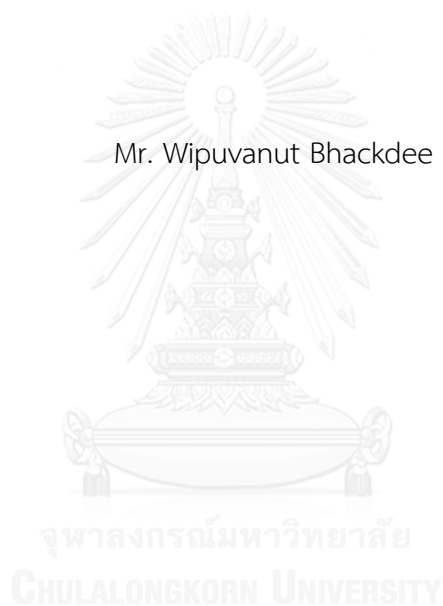
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF MEANTIME BETWEEN FAILURE OF SUBSTATION DUE TO LIGHTNING
STRIKE ON TRANSMISSION LINE

Mr. Wipuvanut Bhackdee



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering
Department of Electrical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014
Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การศึกษาเวลาเฉลี่ยที่จะเกิดความเสียหายในสถานีไฟฟ้า เนื่องจากฟ้าผ่าลงบนสายส่ง |
| โดย | นายวิภูวนันต์ ภัคดี |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไฟฟ้า |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรัักษ์ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรัักษ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ณัฐพงศ์ ตันชนูช)

วิทยานิพนธ์ ภัคดี : การศึกษาเวลาเฉลี่ยที่จะเกิดความเสียหายในสถานีไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่าลงบนสายส่ง (A STUDY OF MEANTIME BETWEEN FAILURE OF SUBSTATION DUE TO LIGHTNING STRIKE ON TRANSMISSION LINE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. คมสัน เพ็ชรรักรักษ์, 67 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับโปรแกรมการคำนวณผลจากความเสียหายอันเนื่องมาจากการเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้าแรงสูงซึ่งยึดหลักทฤษฎีพื้นฐานในการคำนวณ โดยจะมุ่งเน้นไปที่การอธิบายตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ และการเกิดการป้องกันลัมเพลว ซึ่งเป็นปัญหาหลักจากการเกิดฟ้าผ่าในสายส่ง หลังจากนั้นจะทำการรวมค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นทั้งหมดแล้วนำไปคำนวณค่า "อัตราการเกิดแรงดันเกิน (MTBF: Mean Time Between Failure)" และสามารถเลือกใช้ทฤษฎีระยะเฉื่อยได้ 3 ทฤษฎีซึ่งสามารถนำไปสู่การออกแบบการป้องกันได้ โปรแกรมการคำนวณจะแยกออกเป็น 2 โปรแกรม ได้แก่ โปรแกรมการคำนวณเสาแบบเรียงสายส่งสายเฟสแนวนอน และโปรแกรมการคำนวณเสาแบบเรียงสายส่งสายเฟสแนวตั้ง พัฒนาโดยใช้ซอฟต์แวร์ของ Visual Studio 2008 ผลจากการทดลองโปรแกรมแสดงให้เห็นว่าสามารถคำนวณค่าความเสียหายต่าง ๆ ได้ และสามารถชี้ให้เห็นถึงตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดความเสียหายได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5570375721 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: MEAN TIME BETWEEN FAILURE , BACK FLASHOVER , SHIELDING FAILURE ,
TRANSMISSION LINE

WIPIUVANUT BHACKDEE: A STUDY OF MEANTIME BETWEEN FAILURE OF
SUBSTATION DUE TO LIGHTNING STRIKE ON TRANSMISSION LINE. ADVISOR:
ASST. PROF. KOMSON PETCHARAKS, 67 pp.

This thesis presents a development of a calculating program for finding the damages from lightning strike on transmission line that depends on the basic lightning analysis. The main purpose is to describe the values that impact on the failures from lightning, namely a shielding failure and a back flashover. After that, the program will gather all of the failures and calculate the MTBF (Mean Time Between Failure) from three striking distance equations that could lead to estimate a protection level. There are two programs for calculating both three phase horizontal and vertical transmission line. The Visual Studio 2008 is used for creating the calculation program. The test result show that the calculation programs can work and point out the impacted value properly.



Department: Electrical Engineering Student's Signature

Field of Study: Electrical Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมสัน เพ็ชรรักษ์ อาจารย์ที่
ปรีชาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ท่านได้ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนข้อคิดที่มีค่าอย่างยิ่งใน
งานวิจัย นอกจากนี้ยังได้ถ่ายทอดข้อคิดที่มีค่าอย่างยิ่งในการทำงาน พร้อมคำปรึกษาด้วยดีเสมอมา

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ดร.ชาญนรงค์ บาลมงคล ประธานกรรมการ และดร.ณัฐ
พงศ์ ตัณฑนุช กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำและถ่ายทอดความรู้เป็นผลให้งานวิจัยฉบับนี้มีความ
สมบูรณ์แบบมากยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ รุ่นพี่ และ เพื่อน ๆ ที่ห้องปฏิบัติการ
ไฟฟ้าแรงสูงทุกท่าน ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้คำปรึกษาในงานวิจัยอย่างดีเสมอมา

ท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และ ญาติพี่น้อง ของข้าพเจ้า ผู้ที่คอย
มอบความรัก กำลังใจ และเป็นห่วงเป็นใยข้าพเจ้าเสมอมาจนงานวิจัยสำเร็จลุล่วง อนึ่งประโยชน์
และคุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบให้แก่ บิดา-มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณ
ทุกท่าน

สารบัญ

หน้า

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| สารบัญรูป..... | ญ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 14 |
| 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 14 |
| 1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 15 |
| 1.3. ขอบเขตของงานวิจัย..... | 15 |
| 1.4. ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย..... | 15 |
| 1.5. ขอบเขตของการวิจัย..... | 15 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการคำนวณเสถียรภาพแบบเรียงสายส่งแนวนอน..... | 16 |
| 2.1. ระยะเฉื่อย (Striking distance)..... | 16 |
| 2.2. ค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า (N_g ; ground flash density)..... | 18 |
| 2.3. การป้องกันล้มเหลวทำให้เกิดวาทไฟตามผิว (Shielding failure flashover)..... | 19 |
| 2.4. มุมป้องกันในอุดมคติ (Perfect shielding angle)..... | 24 |
| 2.5. จำนวนฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในสายดินป้องกัน (The numbers of stroke that terminate on the ground wire)..... | 26 |
| 2.6 ทฤษฎีการเกิดวาทไฟผิวย้อนกลับ (The Back flashover)..... | 28 |
| 2.6.1 การเกิดฟ้าผ่าในสายดินป้องกัน..... | 34 |
| 2.6.2 ความต้านทานดินกระแสสูงหรือความต้านทานอิมพัลส์..... | 36 |
| 2.6.3 ผลของแรงดันความถี่กำลัง (Effect of power frequency voltage)..... | 39 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.6.4 ค่าวาบไฟผิดปกติแบบไม่มาตรฐาน (Non-standard CFO)..... | 41 |
| 2.6.5 ขั้นตอนการคำนวณหาอัตราการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ..... | 43 |
| 2.7 เวลาเฉลี่ยที่จะเกิดความเสียหาย | 45 |
| บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการคำนวณเสาสายส่งแบบเรียงสายส่งแนวตั้ง..... | 46 |
| 3.1 การเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ..... | 46 |
| 3.2 การเกิดการป้องกันลัมเพลว | 46 |
| บทที่ 4 โปรแกรมการคำนวณ..... | 50 |
| 4.1 โปรแกรมการคำนวณของเสาสายส่งเสาแบบเรียงสายส่งแนวนอน | 50 |
| 4.2 โปรแกรมการคำนวณของเสาสายส่งแบบเรียงสายส่งแนวตั้ง | 52 |
| บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการใช้โปรแกรม..... | 54 |
| 5.1 ผลการใช้โปรแกรม..... | 54 |
| 5.1.1 เสาแบบเรียงสายส่งแนวนอน | 54 |
| 5.1.2 เสาแบบเรียงสายส่งแนวตั้ง..... | 56 |
| บทที่ 6 บทสรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ | 59 |
| 6.1 บทสรุป | 59 |
| 6.2 ข้อเสนอแนะ | 64 |
| รายการอ้างอิง | 65 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 67 |

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าระยะเผื่อของทฤษฎีต่าง ๆ 18



สารบัญรูป

| | หน้า |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| รูปที่ 2.1 เสาแบบเรียงสายส่งแนวนอน | 16 |
| รูปที่ 2.2 กระจกภายในก้อนเมฆ..... | 17 |
| รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดฟ้าผ่า..... | 17 |
| รูปที่ 2.4 จำนวนของวันที่จะเกิดฟ้าผ่า (Td; Thunder storm days)..... | 19 |
| รูปที่ 2.5 ภาพเรขาคณิตแสดงระยะที่สามารถเกิดฟ้าผ่าในสายส่งไฟฟ้า | 20 |
| รูปที่ 2.6 แสดงมุมภายในสายส่งไฟฟ้า..... | 20 |
| รูปที่ 2.7 แสดงค่าของกระแส I_m | 22 |
| รูปที่ 2.8 หากค่าแรงดันสูงกว่าค่า CFO จะเกิดการรวบไฟตามผิว | 23 |
| รูปที่ 2.9 ประเภทของมุมป้องกัน | 24 |
| รูปที่ 2.10 การหาตำแหน่งการจัดวางสายดินป้องกัน..... | 25 |
| รูปที่ 2.11 รูปแบบทางเรขาคณิตของการเกิดฟ้าผ่าในสายดินป้องกันชนิดสายเดี่ยว | 26 |
| รูปที่ 2.12 รูปแบบทางเรขาคณิตของการเกิดฟ้าผ่าในสายดินป้องกันชนิดสายคู่..... | 27 |
| รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการเกิดการรวบไฟผิวย้อนกลับ..... | 28 |
| รูปที่ 2.14 การเกิดฟ้าผ่าลงบนเสาสายส่ง | 29 |
| รูปที่ 2.15 Lattice diagram ของการเกิดฟ้าผ่าในเสาสายส่ง..... | 29 |
| รูปที่ 2.16 Lattice diagram ผลจากการสะท้อนของเสาข้างเคียง | 31 |
| รูปที่ 2.17 ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่าลงบนเสาสายส่ง | 33 |
| รูปที่ 2.18 การเกิดฟ้าผ่าในสายป้องกัน | 35 |
| รูปที่ 2.19 ตัวแปรต่าง ๆ ณ จุดที่เกิดฟ้าผ่าในสายป้องกัน | 35 |
| รูปที่ 2.20 เมื่อค่ากระแสสูงขึ้นพื้นที่ของหลักดินจะเริ่มเปลี่ยนเป็นทรงกลม..... | 37 |
| รูปที่ 2.21 เมื่อค่ากระแสสูงขึ้นพื้นที่ของหลักดินมากกว่าหนึ่งหลักจะเริ่มเปลี่ยนเป็นทรงกลม..... | 38 |
| รูปที่ 2.22 อิเล็กโทรดรูปครึ่งวงกลม | 38 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| รูปที่ 2.23 ค่าความต้านทานอิมพัลส์ในพื้นดิน | 39 |
| รูปที่ 2.24 เสาคี่งมีค่าแรงดันและค่าแฟกเตอร์การคู่ควบแตกต่างกัน | 39 |
| รูปที่ 2.25 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน | 42 |
| รูปที่ 2.26 การเกิดเบรกดาวน | 42 |
| รูปที่ 3.1 เสาคี่งแบบเรียงสายส่งแนวตั้ง | 46 |
| รูปที่ 3.2 ภาพเสาคี่งจำลองจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย | 47 |
| รูปที่ 3.3 แสดงระยะที่อาจก่อให้เกิดการเกิดการป้องกันล้มเหลว | 47 |
| รูปที่ 3.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบโอกาสในการเกิดฟ้าผ่าลงบนทั้ง 3 เฟส | 48 |
| รูปที่ 3.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบโอกาสในการเกิดฟ้าผ่าลงบนทั้ง 3 เฟส | 48 |
| รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบโอกาสในการเกิดฟ้าผ่าลงบนทั้ง 3 เฟส | 49 |
| รูปที่ 4.1 ลักษณะของโปรแกรมคำนวณสำหรับเสาคี่งเรียงสายส่งแนวนอน | 50 |
| รูปที่ 4.2 ลักษณะของโปรแกรมคำนวณสำหรับเสาคี่งเรียงสายส่งแนวตั้ง | 52 |
| รูปที่ 5.1 ผลการคำนวณของโปรแกรมสำหรับเสาคี่งแบบเรียงสายส่งแนวนอน | 55 |
| รูปที่ 5.2 ตัวอย่างของเสาคี่งไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการคำนวณ | 56 |
| รูปที่ 5.3 ผลการคำนวณของโปรแกรมสำหรับเสาคี่งแบบเรียงสายส่งแนวตั้ง | 57 |
| รูปที่ 6.1 กราฟแสดงค่าความต้านทานดินที่มีผลต่อการเกิด BFR และ SFFOR | 60 |
| รูปที่ 6.2 กราฟแสดงค่าความต้านทานเสิร์จของสายดินป้องกัน | 61 |
| รูปที่ 6.3 กราฟแสดงค่าความต้านทานเสิร์จของสายส่งไฟฟ้า | 62 |
| รูปที่ 6.4 กราฟแสดงค่าความไวพินวิฤตที่มีผลต่อการเกิด BFR และ SFFOR | 63 |
| รูปที่ 6.5 กราฟแสดงค่าระยะห่างระหว่างสายป้องกัน | 63 |

คำอธิบายสัญลักษณ์

| | |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| r_g | ค่าระยะเผื่อจากก้อนเมฆถึงพื้นดิน |
| r_c | จากก้อนเมฆถึงสายป้องกันหรือสายเฟสตามลำดับ |
| N_g | ค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า |
| T_d | จำนวนของวันที่เกิดฟ้าผ่าซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ที่สนใจ |
| k, a | ค่าคงที่ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ที่สนใจ |
| D_g | ระยะฟ้าผ่าลงบนสายดินป้องกัน |
| D_c | ระยะฟ้าผ่าลงบนสายเฟส |
| h | ความสูงของสายดินป้องกัน |
| y | ความสูงของสายเฟส |
| a | ความยาวของแขนของสายส่งไฟฟ้า |
| c | ค่าระยะห่างในแนวทแยงระหว่างส่วนต่างของความสูงของสายป้องกัน กับสายเฟส และความยาวของแขนของสายส่งไฟฟ้า |
| L | ค่าความยาวของสายส่ง |
| I_m | ค่ากระแสสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดการป้องกันล้มเหลว |
| I_c | ค่ากระแสวิกฤตที่เมื่อเกิดการป้องกันล้มเหลวแล้วจะไม่ทำให้เกิดวาปไฟตามฉนวน ถ้วย ***หมายเหตุค่า I_c ในการหาค่าของของ BFR และ SFR,SFFOR เป็นคนละค่ากัน โดย สำหรับการหาค่า SFR,SFFOR ; $I_c = \frac{2CFO}{Z_c}$ |
| $f(z)$ | ค่าฟังก์ชันของค่ากระแส |
| M | ค่าคงที่ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 61.1 เมื่อกระแสมีค่าระหว่าง 3-20 kA และจะมีค่าเท่ากับ 33.3 เมื่อกระแสมีค่ามากกว่า 20 kA |
| B | ค่าคงที่ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1.33 เมื่อกระแสมีค่าระหว่าง 3-20 kA และจะมีค่าเท่ากับ 0.605 เมื่อกระแสมีค่ามากกว่า 20 kA |
| E | ค่าแรงดันที่ตกคร่อมในสายเฟส |
| Z_c | ค่าความต้านทานเสิร์จในสายเฟส |
| α_p | ขนาดมุมป้องกันในอุดมคติ |

| | |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I | ค่ากระแสฟ้าผ่า |
| Z_g | ค่าความต้านทานเสิร์จของสายดินป้องกัน |
| Z_T | ค่าความต้านทานเสิร์จของเสาสายส่ง |
| N_L | จำนวนอัตราการเกิดฟ้าผ่าลงในสายป้องกันในรอบ 1 ปี |
| $P(I_C)$ | ความน่าจะเป็นที่ค่ากระแสนั้นจะสูงกว่าค่ากระแสวิกฤต |
| E_0 | ค่าเกรเดียนท์วิกฤตซึ่งมีค่าเท่ากับ 400 |
| ρ | ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (soil resistivity) |
| K_{PF} | ค่าแฟกเตอร์แรงดัน 50 Hz ขณะที่เกิดฟ้าผ่า <ul style="list-style-type: none"> - สำหรับเสาแบบเรียงสายส่งแนวอนนมีค่าเท่ากับ 0.7 - สำหรับเสาแบบเรียงสายส่งแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.4 |
| C_A | ค่าแฟกเตอร์คู่ควบที่มีค่าน้อยที่สุด |
| R_0 | ความต้านทานดินกระแสต่ำ |
| R_i | ค่าความต้านทานดินอิมพัลส์หรือความต้านทานดินกระแสสูง |
| R_e | ความต้านทานดิน |
| Z_g | ค่าความต้านทานเสิร์จของสายดินป้องกัน |
| I_C | ค่ากระแสวิกฤตในการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ ***หมายเหตุค่า I_C ในการหาค่าของของ BFR และ SFR,SFFOR เป็นคนละค่ากัน โดย สำหรับการหาค่า BFR; $I_C = \frac{CFONS - K_{PF}V_{LN}}{(1 - C_A K_{TT})K_{TA}}$ |
| S | ระยะห่างระหว่างเสา |
| V_S | ค่าแรงดันระบบ |
| I_R | ค่ากระแสที่เกิดขึ้นในความต้านทานดิน |
| I_g | ค่ากระแสการเกิดเบรกดาวนในพื้นที่ดิน |
| MTBF | ช่วงเวลาการเกิดแรงดันเกิน |
| L | ระยะอันตรายที่สุดหากเกิดฟ้าผ่าลงบริเวณนี้ กำหนดให้เป็นระยะห่างจากสถานี 3 ช่วงเสา |
| SFR | อัตราการเกิดป้องกันลัมเหลว |
| SFFOR | อัตราการเกิดป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิว |
| BFR | อัตราการเกิดการวาบไฟผิวย้อนกลับ |

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าถือว่าเป็นพลังงานที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่งต่อชีวิตประจำวัน ทุกวันนี้มนุษย์ไม่สามารถอยู่อย่างขาดแคลนไฟฟ้าได้ ไฟฟ้าจะช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของแสงสว่าง การเดินทางหรือการติดต่อสื่อสาร เป็นต้น เรื่องเหล่านี้เป็นปัจจัยในการใช้ชีวิตที่สำคัญในโลกทุกวันนี้ แต่พลังงานไฟฟ้าที่นำมาใช้ขณะนี้ยังคงมีเพียงพลังงานไฟฟ้าที่มนุษย์เป็นผู้ผลิตขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นมานั้นจะผลิตในโรงไฟฟ้า จากนั้นจะทำการส่งจ่ายไปยังผู้ใช้ หรือผู้บริโภค เพราะฉะนั้นจึงควรให้ความสำคัญแก่การป้องกันสถานีไฟฟ้า และสายที่ใช้ในการส่งจ่าย เนื่องจากหากมีความเสียหายเกิดขึ้นจะทำให้เกิดความเดือดร้อนแก่ผู้บริโภค หรือบุคคลทั่วไปนั่นเอง

ปัญหาส่วนใหญ่ที่ก่อให้เกิดอันตรายอย่างร้ายแรงแก่สถานีไฟฟ้าและสายส่งจ่าย คือ การเกิดแรงดันเกินขึ้นในระบบ โดยแรงดันเกินที่เกิดขึ้นในระบบนั้นสามารถแบ่งออกได้จากสาเหตุการเกิดได้แก่ แรงดันเกินที่เกิดภายนอกระบบจากฟ้าผ่า (lightning overvoltage) และแรงดันเกินภายในระบบหรือเรียกว่าแรงดันเกินสวิตชิง (switching overvoltage) ในงานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาเกี่ยวกับแรงดันเกินจากฟ้าผ่า เพราะการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าของประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้การส่งผ่านทางสายซึ่งลอยอยู่บนอากาศ ทำให้มีความเสี่ยงจากการเกิดฟ้าผ่าได้ โดยทั่วไปการป้องกันฟ้าผ่าสายส่งไฟฟ้ามักใช้สายดินป้องกัน (overhead ground wire) หากยังมีฟ้าผ่าลงที่สายส่งไฟฟ้า เราจะเรียกว่าการป้องกันล้มเหลว (shielding failure) และหากฟ้าผ่าลงบนสายดินป้องกัน แรงดันเกินที่เสาอาจทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (back flashover) ได้ การป้องกันนั้นมีได้หลายวิธีควบคู่กันไป โดยการจะใช้วิธีป้องกันวิธีไหน หรือค่าใช้จ่ายประมาณเท่าไรจะต้องดูว่าความปลอดภัยที่ต้องการนั้นต้องการความปลอดภัยระดับไหน

ความปลอดภัยของอุปกรณ์ไฟฟ้าจากฟ้าผ่าผ่านนั้นจะไม่มีค่าที่ตายตัว หรือเฉพาะเจาะจงโดยจะขึ้นอยู่กับว่าระบบ หรือสถานีไฟฟ้านั้น ๆ ยอมรับได้หรือไม่ ค่าของความปลอดภัยนั้นจะอยู่ในความสัมพันธ์กับอัตราการเกิดแรงดันเกินต่อปี (surge/year) เช่น ค่า MTBF เท่ากับ 400 จะหมายความว่ามีโอกาสเกิดแรงดันเกิน 1 ครั้งในรอบ 400 ปี โดยวิธีการคำนวณอัตราการเกิดแรงดันเกินโดยทั่วไปนั้นจะทำการเลือกอุปกรณ์และค่าที่ใช้ป้องกันก่อนแล้วจึงทำการคำนวณว่าค่าโอกาสเกิดแรงดันเกินนั้นมีค่าเป็นเท่าใด แต่พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณนั้นไม่ตายตัวจึงมีนักวิจัยหลาย

ท่านทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เป็นปัจจัยสำคัญ เช่น ค่าระยะเผชิญ (striking distance), การหาค่ามุมป้องกัน (shielding angle) หรือ รูปแบบของเสาไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น

1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 พัฒนาการคำนวณหาโอกาสการเกิดความล้มเหลวจากการเกิดวาปไฟตามผิวย้อนกลับ และการป้องกันล้มเหลว ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบระบบป้องกันสายส่งที่เหมาะสม

1.2.2 พัฒนาการคำนวณหาเวลาเฉลี่ยในการเกิดแรงดันเกิน ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้า และจะนำไปสู่การเลือกกระดบการฉนวนของอุปกรณ์ที่เหมาะสม

1.3. ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การพัฒนาการคำนวณจะใช้การจำลองในคอมพิวเตอร์เท่านั้น

1.3.2 ใช้ซอฟต์แวร์ Visual Studio ในการพัฒนาโปรแกรมจำลอง 2008

1.4. ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

โปรแกรมจำลองที่สามารถช่วยในการออกแบบระบบป้องกันได้สะดวกสบายยิ่งขึ้น และสามารถช่วยให้ผู้ที่ใช้โปรแกรมสามารถเลือกกระดบการฉนวนของอุปกรณ์ที่เหมาะสมได้

1.5. ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ศึกษาข้อมูลการเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าและวิธีการคำนวณ

1.5.2 ศึกษาวิธีการเขียนโปรแกรมซอฟต์แวร์ Visual Studio 2008

1.5.3 ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมจำลอง

1.5.4 ทดสอบการใช้โปรแกรม และปรับปรุงความผิดพลาดของโปรแกรม

1.5.5 จัดทำรายงานเพื่อนำเสนอและสรุปผล

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการคำนวณเสาแบบเรียงสายส่งแนวนอน

ในการออกแบบและพัฒนาโปรแกรมคำนวณของเสาแบบเรียงสายส่งแนวนอนนั้นจะใช้ทฤษฎีและตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณจากเป็นหลัก โดยภาพของเสาแบบเรียงสายส่งแนวนอนแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นในบทนี้จะอธิบายถึงทฤษฎีและตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณซึ่งจะมีดังต่อไปนี้

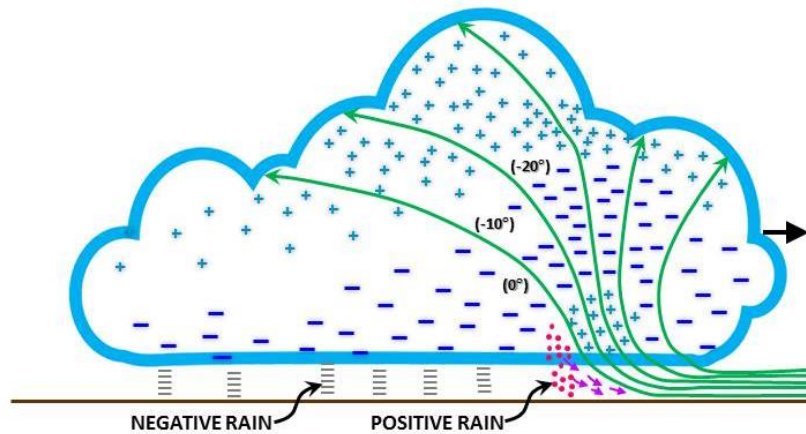


รูปที่ 2.1 เสาแบบเรียงสายส่งแนวนอน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

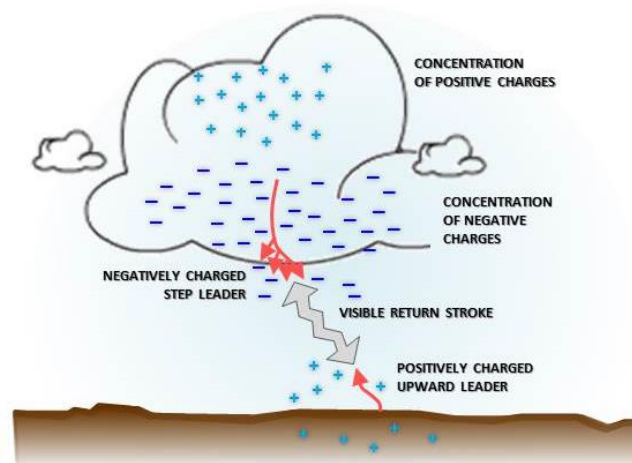
2.1. ระยะเผชิญ (Striking distance)

ในการเกิดฟ้าผ่าผ่านนั้นจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อเกิดสภาพอากาศแปรปรวน โดยในกลุ่มก้อนเมฆจะมีประจุไฟฟ้าอยู่ การแบ่งชั้นของประจุในก้อนเมฆจะแบ่งเป็นคร่าว ๆ ได้ 2 ชั้น ในชั้นแรกคือ ชั้นล่างของก้อนเมฆจะมีประจุลบเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากละอองน้ำสามารถรับประจุลบได้มากและชั้นที่สองคือ ชั้นบนของก้อนเมฆซึ่งจะมีประจุบวกเป็นส่วนใหญ่เนื่องจากละอองเกลือดีน้ำแข็งสามารถรับประจุบวกได้มาก โดยการแบ่งชั้นของก้อนเมฆจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ประจุภายในก้อนเมฆ

ในช่วงที่เกิดสภาพอากาศแปรปรวนนั้น เมื่อถึงจุดที่เรียกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤตจะ ทำให้เกิดการไอออไนเซชันของอากาศเกิดเป็นหัวนำร่อง (leader) ซึ่งมีทิศลงสู่พื้นในลักษณะจังหวะก้าว (step leader) โดยในขณะที่หัวนำร่องเข้าใกล้พื้นโลกนั้นจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดประจุที่พื้นโลกเกิดขึ้นเป็นสตีมเมอร์ (streamer) จากนั้นเมื่อหัวนำร่องและสตีมเมอร์บรรจบกันที่ระยะห่างที่เรียกว่า “ระยะเฉื่อย” จะส่งผลให้เกิดการเสียสภาพฉนวนของอากาศ ทำให้อากาศกลายเป็นพลาสมา จากนั้นประจุภายในก้อนเมฆจะทำการถ่ายเทประจุเพื่อเป็นการลดความเครียดของสนามไฟฟ้าซึ่งจะ เกิดเป็นปรากฏการณ์ฟ้าผ่าขึ้นดังรูปที่ 2.3 ปลายทางของการถ่ายเทอาจจะเป็นยอดเสา ต้นไม้ หรือพื้นดินขึ้นอยู่กับความสูงของสตีมเมอร์ของพื้นที่ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดฟ้าผ่า

ในการหาค่าระยะเผชชญนั้นได้มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการค้นคว้า ดังนั้นจึงมีหลายสมการในการหาค่าของระยะเผชชญนี้ แต่ทว่ารูปแบบของสมการระยะเผชชญนั้นจะมีรูปแบบคล้ายคลึงกันโดยจะมีเพียงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่างกันเท่านั้น โดยรูปแบบของสมการจะแสดงให้เห็นในสมการที่ 2.1

$$r = AI^b \quad (2.1)$$

โดยค่า I ในสมการที่ 2.1 นั้นจะมีค่าเป็นได้ทั้งค่ากระแสของการเกิดฟ้าผ่า หรือค่ากระแสวิกฤต(I_c) ที่เกิดขึ้นก็ได้ ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จะเลือกสมการของระยะเผชชญมาทั้งหมด 3 สมการจากที่มีความแตกต่างกันมากที่สุดได้แก่ Brown – Whitehead[1], Love[2] และ IEEE-1992[3]ซึ่งจะแสดงค่าตัวแปรในการคำนวณให้เห็นดังตารางที่ 2.1 โดย r_g และ r_c คือ ค่าระยะเผชชญจากก้อนเมฆถึงพื้นดิน และจากก้อนเมฆถึงสายป้องกันหรือสายเฟสตามลำดับ

| source | r_g to earth ground | | r_c to phase conductor and ground wires | |
|-----------------|-----------------------|------|-------------------------------------------|------|
| | A | b | A | B |
| Brown-Whitehead | 6.4 | 0.75 | 7.1 | 0.75 |
| Love | 10 | 0.65 | 10 | 0.65 |
| IEEE 1992 | βr_c | 0.65 | 10 | 0.65 |

**ค่า $\beta = 0.36 + 0.17\ln(43 - h)$ โดย h คือค่าความสูงของ OHG, หาก h มีค่า > 40 m ให้ h มีค่าเท่ากับ 40 m

ตารางที่ 2.1 ค่าระยะเผชชญของทฤษฎีต่าง ๆ

2.2. ค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า (N_g ; ground flash density)

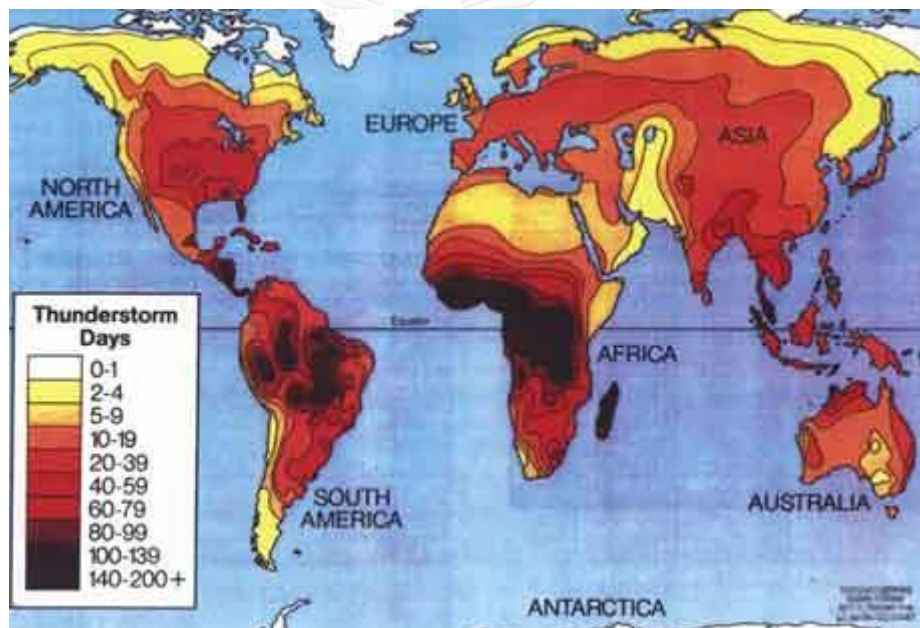
ในการหาค่าเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่านั้นจะพิจารณาจำนวนการเกิดฟ้าผ่าต่อปีที่ผ่าลงบนเสา สายส่ง หรือสถานีไฟฟ้า โดยการหาค่าเหตุการณ์เหล่านี้สามารถทำได้โดยใช้รูปแบบทางเรขาคณิตของขั้นสุดท้ายในการเกิดฟ้าผ่า ตัวแปรพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณหาค่าเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่า นั้นคือ ค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า (N_g) โดยมีหน่วยวัดคือ จำนวนฟ้าผ่าต่อตารางกิโลเมตรต่อปี โดยจะมีสมการที่ใช้ในการประมาณค่าของ N_g ได้ดังนี้

$$N_g = kT_d^a \quad (2.2)$$

โดย T_d คือ จำนวนของวันที่เกิดฟ้าผ่าซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ที่สนใจ
(days / year)

k และ a คือ ค่าคงที่ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ที่สนใจ

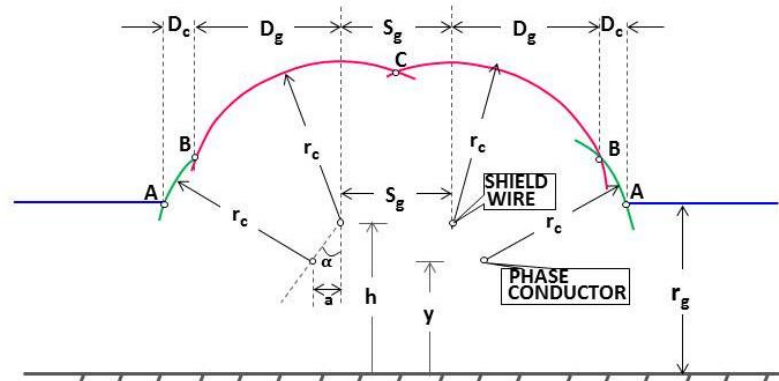
หากพื้นที่ที่สนใจเป็นประเทศไทย ค่าของ T_d จะมีค่าประมาณ 60 – 200 วันต่อปี โดยจะเฉลี่ยไปตามแต่ภูมิภาค แต่หากสนใจพื้นที่ในประเทศอื่นสามารถดูค่าของ T_d ตามรูปที่ 2.4 ส่วนค่าของ k และ a นั้นหากพื้นที่ที่สนใจเป็นประเทศไทยตามที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) กำหนดค่าของ k และ a นั้นจะมีค่าเป็น 6.5×10^{-5} และ 2.277 ตามลำดับ[4]



รูปที่ 2.4 จำนวนของวันที่จะเกิดฟ้าผ่า (T_d ; Thunder storm days)

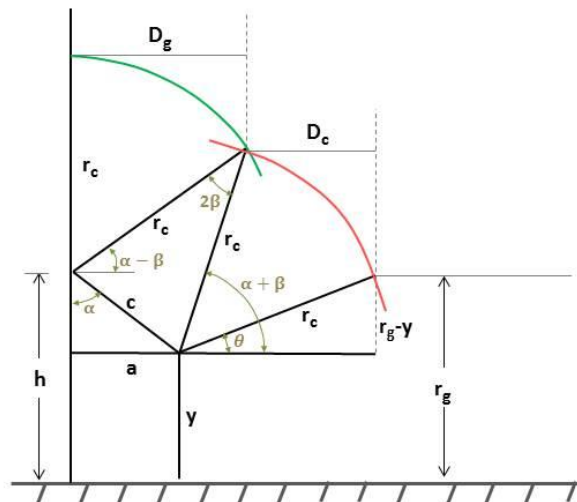
2.3. การป้องกันลัมเหลวทำให้เกิดวาทตามฉิว (Shielding failure flashover)

การเกิดการป้องกันลัมเหลวนั้นสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ การเกิดการป้องกันลัมเหลวธรรมดาและการเกิดการป้องกันลัมเหลวทำให้เกิดวาทตามฉิว โดยการเกิดการป้องกันลัมเหลวนั้นจะเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้า โดยจะมีโอกาสในการผ่าในสายส่งแบ่งเป็น 3 ระยะคือ ระยะฟ้าผ่าลงบนสายดินป้องกัน (D_g) , ระยะฟ้าผ่าลงบนสายเฟส (D_c) และระยะฟ้าผ่าลงบนพื้นดิน(r_g) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ภาพเรขาคณิตแสดงระยะที่สามารถเกิดฟ้าผ่าในสายส่งไฟฟ้า

โดยการป้องกันลัมเหลวจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนระยะฟ้าผ่าลงบน D_c โดยระยะฟ้าผ่าลงบนสายเฟสนี้จะมีค่าแปรผันตรงกับกระแสวงกฤติที่เกิดขึ้น ค่าระยะ D_c และ D_g นั้นจะสามารถคำนวณได้หากทราบมุมต่าง ๆ ภายในสายส่งไฟฟ้า โดยมุมต่าง ๆ จะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงมุมภายในสายส่งไฟฟ้า

สมการที่ใช้ในการคำนวณค่ามุมต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

$$\beta = \sin^{-1} \frac{c}{2r_c} \quad (2.3)$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{r_g - y}{r_c} \quad (2.4)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{a}{h - y} \quad (2.5)$$

โดย h คือ ความสูงของสายดินป้องกัน (เมตร)

y คือ ความสูงของสายเฟส (เมตร)

a คือ ความยาวของแขนของสายส่งไฟฟ้า (เมตร)

c คือ ค่าระยะห่างในแนวทแยงระหว่างส่วนต่างของความสูงของสายป้องกัน กับสายเฟส และความยาวของแขนของสายส่งไฟฟ้า (เมตร)

r_g คือ ระยะเผื่อจากกอนเมตรจนถึงพื้นดินสามารถดูค่าได้ตามตารางที่ 1 (เมตร)

r_c คือ ระยะเผื่อจากกอนเมตรจนถึงสายเฟส หรือสายป้องกันสามารถดูค่าได้ตาม ตารางที่ 2.1 (เมตร)

สมการที่ใช้ในการหาค่าระยะ D_c และ D_g มีดังต่อไปนี้

$$D_c = r_c [\cos\theta - \cos(\alpha + \beta)] \quad (2.6)$$

$$D_g = r_c \cos(\alpha - \beta) \quad (2.7)$$

จากข้อมูลของ CIGRE การประมาณค่าอัตราการเกิดการป้องกันล้มเหลวธรรมดาและอัตรา การป้องกันล้มเหลวจนเกิดวาปไฟตามผิวจะใช้สมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 ดังต่อไปนี้

$$SFR = 2N_g L \int_3^{I_m} D_c f(I) dI \quad (2.8)$$

$$SFFOR = 2N_g L \int_{I_c}^{I_m} D_c f(I) dI \quad (2.9)$$

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{z^2}{4}\right)} \quad (2.10)$$

$$z = [\log\left(\frac{I}{M}\right)]/B$$

โดย N_g คือ ค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า (flash/km²-year)

L คือ ค่าความยาวของสายส่ง (km)

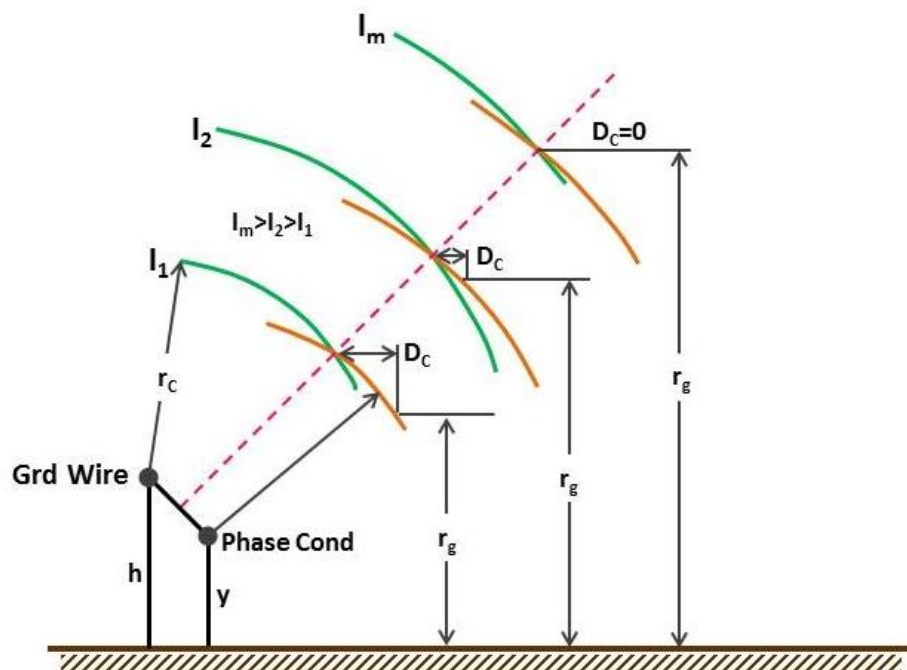
I_m คือ ค่ากระแสสูงสุดที่ไม่ทำให้เกิดการป้องกันลัมเหลว (A)

I_c คือ ค่ากระแสวิกฤตที่เมื่อเกิดการป้องกันลัมเหลวแล้วจะไม่ทำให้เกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วย (A)

$f(z)$ คือ ค่าฟังก์ชันของค่ากระแส

M คือ ค่าคงที่ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 61.1 เมื่อกระแสมีค่าระหว่าง 3-20 kA และจะมีค่าเท่ากับ 33.3 เมื่อกระแสมีค่ามากกว่า 20 kA

B คือ ค่าคงที่ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1.33 เมื่อกระแสมีค่าระหว่าง 3-20 kA และจะมีค่าเท่ากับ 0.605 เมื่อกระแสมีค่ามากกว่า 20 kA



รูปที่ 2.7 แสดงค่าของกระแส I_m

ในการหาค่าอัตราการป้องกันลัมเหลวธรรมดา นั้น จากสมการที่ 2.8 จะเริ่มอินทิเกรตตั้งแต่ 3 kA จนถึงค่ากระแส I_m โดยค่ากระแส I_m หมายถึงกระแสฟ้าที่สูงที่สุดซึ่งหากกระแสที่มีค่ามากกว่านี้จะไม่ทำให้เกิดระยะ D_c ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดการป้องกันลัมเหลวเกิดขึ้นโดยจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.7 ส่วนค่ากระแส 3 kA คือค่ากระแสที่ต่ำที่สุดจากฐานข้อมูลของ CIGRE เนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าในครั้ง

แรงนั้นกระแสไม่สามารถมีค่าเท่ากับศูนย์ได้ จาก[5]ช่วงค่ากระแสที่ทำให้เกิดการป้องกันล้มเหลวมากที่สุดจะอยู่ในช่วง 3-20 kA แต่จากฐานข้อมูลของที่อื่น ๆ จะสามารถใช้กระแส 1 หรือ 2 kA แทนก็ได้

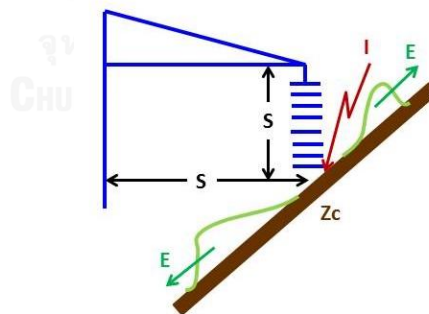
สมการการหาค่ากระแสของ I_m มีดังต่อไปนี้

$$I_m = \left[\frac{r_{gm}}{A} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (2.11)$$

$$r_{gm} = \frac{(h + y)/2}{1 - \gamma \sin \alpha} \quad (2.12)$$

$$\gamma = \frac{r_c}{r_g} \quad (2.13)$$

ในการหาค่าอัตราการป้องกันล้มเหลวแบบธรรมดา นั้นจะคิดจากเหตุการณ์ที่ฟ้าผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้า อย่างไรก็ตามจากการเกิดการป้องกันล้มเหลวนั้นไม่ได้หมายความว่าทุกครั้งจะเกิดการวาวไฟตามผิวเกิดขึ้น โดยการเกิดวาวไฟตามผิวจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อแรงดันที่เกิดจากฟ้าผ่าลงบนสายเฟสนั้นมีค่าสูงกว่าค่า CFO (critical flashover) หรือเรียกอีกอย่างว่า “ ค่าวาวไฟผิววิกฤต ” ดังนั้นในการจะประมาณค่าอัตราการเกิดการวาวไฟตามผิวจะทำได้จากการหาค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างสายส่งไฟฟ้าและการฉนวนตามสมการที่ 2.14 ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 หากค่าแรงดันสูงกว่าค่า CFO จะเกิดการวาวไฟตามผิว

$$E = I \frac{Z_c}{2} \quad (2.14)$$

โดย E คือ ค่าแรงดันที่ตกคร่อมในสายเฟส (kV)

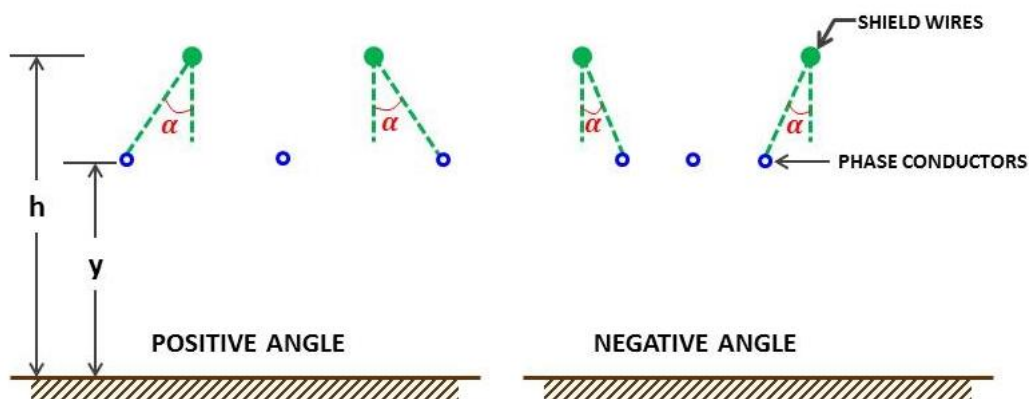
Z_c คือ ค่าความต้านทานเสิร์จในสายเฟส (Ω)

จากนั้นกำหนดให้ค่าแรงดันตกคร่อม E มีค่าเท่ากับค่าเท่ากับค่าวาบไฟตามผิววิกฤต จะทำให้สามารถหาค่าของกระแสวิกฤตซึ่งใช้เป็นขอบเขตในการหาค่าอัตราการป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิวได้โดยค่ากระแสวิกฤตจะมีค่าดังนี้

$$I_c = \frac{2CFO}{Z_c} \quad (2.15)$$

2.4. มุมป้องกันในอุดมคติ (Perfect shielding angle)

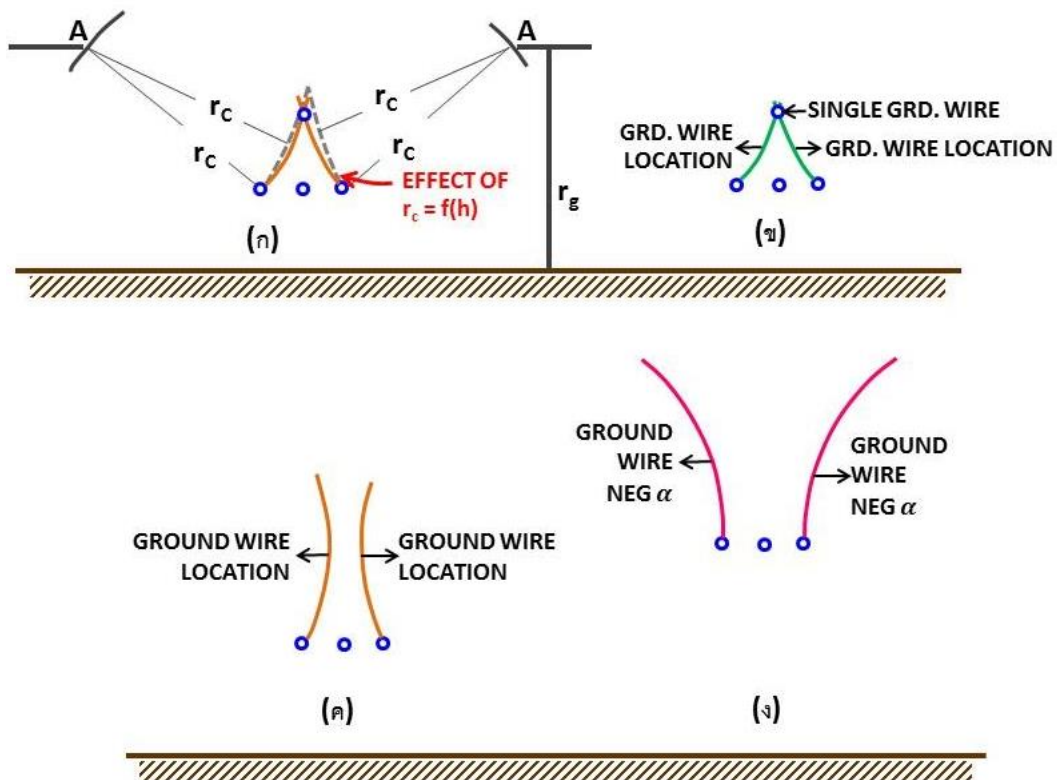
จากหัวข้อที่ 2.3 ในการป้องกันการเกิดการป้องกันลัมเหลวและการป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิวนั้นสามารถทำได้โดยการใช้มุมป้องกัน ในการหาค่ามุมป้องกันนั้นสามารถทำได้ตามสมการที่ 2.5 โดย α หมายถึงขนาดของมุมป้องกัน มุมป้องกันนั้นจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ มุมป้องกันบวกและมุมป้องกันติดลบดังรูปที่ 2.9 โดยมุมป้องกันจะติดลบได้มีอยู่ 2 กรณี กรณีแรกคือเมื่อค่าระยะเผชิจูจากกอนเมฆถึงพื้นดินมีค่าน้อยกว่าค่าครึ่งหนึ่งของส่วนต่างระหว่างความสูงของสายดินป้องกันและสายเฟส ($r_s < (h-y)/2$) ส่วนกรณีที่สองคือ เมื่อค่าความสูงของสายเฟสเท่ากับหรือมากกว่าค่าระยะเผชิจูจากกอนเมฆถึงพื้นดิน



รูปที่ 2.9 ประเภทของมุมป้องกัน

จากรูปที่ 2.8 แสดงการหาตำแหน่งการจัดวางสายป้องกันโดยจะเริ่มจากคำนวณหาค่าระยะเผชิจูจากกอนเมฆถึงพื้นดิน จากนั้นทำการวาดเส้นโค้งระยะเผชิจูจากกอนเมฆถึงสายเฟสหรือสายดินป้องกันโดยที่จุดศูนย์กลางอยู่ตรงสายเฟส ต่อมาหาจุดตัดระหว่างระยะเผชิจูและแทนจุดตัดนั้นด้วย A ดังรูปที่ 2.10k โดยเส้นโค้งทั้งสองเส้นจะเป็นตำแหน่งของสายดินป้องกัน ซึ่งสายดินป้องกันจะอยู่ที่ไหนก็ได้ภายนอกเส้นโค้งเหล่านี้และที่จุดตัดกันของเส้นโค้งจะเป็นตำแหน่งของสายดินป้องกันแบบ

เดี่ยวตั้งรูปที่ 2.10ข ต่อมาในรูปที่ 2.10ค และ 2.10ง จะแสดงให้เห็นถึงผลเมื่อความสูงของสายเฟสเพิ่มขึ้นแต่ระยะเผชียจากกอนเมฆถึงสายเฟสคงเดิม โดยรูปที่ 2.10ค จะแสดงให้เห็นในกรณีที่มีความสูงของสายเฟสน้อยกว่าค่าระยะเผชียจากกอนเมฆถึงพื้นดิน ($y < r_g$) แต่ความสูงของสายดินป้องกันมากกว่าค่าระยะเผชียจากกอนเมฆถึงพื้นดิน ($h > r_g$) แต่เมื่อค่าความสูงของสายเฟสจนมากกว่าหรือเท่ากับค่าระยะเผชียจากกอนเมฆถึงพื้นดินจะทำให้เกิดมุมป้องกันแบบติดลบดังรูปที่ 2.10ด



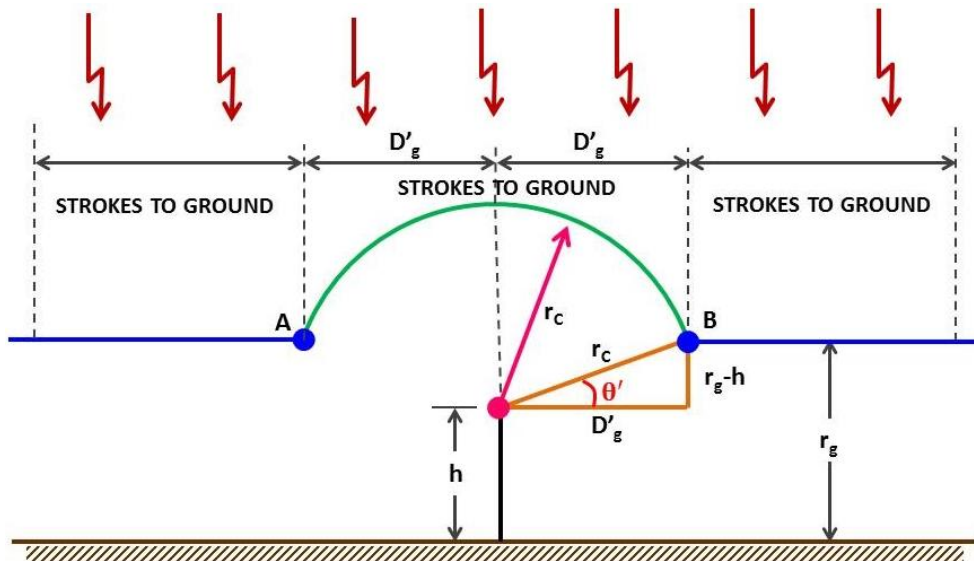
รูปที่ 2.10 การหาตำแหน่งการจัดวางสายดินป้องกัน

จากสมการในการหาค่ามุมป้องกันจะพบว่าขนาดของมุมป้องกันนั้นจะขึ้นอยู่กับความสูงของสายดินป้องกัน ความสูงของสายเฟส และความยาวของแขนของสายเฟส ดังนั้นมุมป้องกันจึงมีหลายค่าไม่ตายตัว เพราะฉะนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งเน้นไปที่การหาค่ามุมป้องกันในอุดมคติ โดยมุมป้องกันในอุดมคติ คือมุมป้องกันที่ทำให้โอกาสทั้งในการเกิดการป้องกันล้มเหลว และการป้องกันล้มเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิวมีค่าเป็นศูนย์ โดยสมการในการหาค่ามุมป้องกันในอุดมคติจะทำการประยุกต์จากค่ามุมป้องกันในสมการที่ 2.5 โดยจะสามารถหาได้ดังนี้

$$\alpha_p = \frac{1}{2} \left[\sin^{-1} \frac{r_g - h}{r_c} + \sin^{-1} \frac{r_g - y}{r_c} \right] \quad (2.16)$$

โดย α_p คือ ขนาดมุมป้องกันในอุดมคติ (degree)

2.5. จำนวนฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในสายดินป้องกัน (The numbers of stroke that terminate on the ground wire)



รูปที่ 2.11 รูปแบบทางเรขาคณิตของการเกิดฟ้าผ่าในสายดินป้องกันชนิดสายเดี่ยว

จากรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นบริเวณจากจุด A ถึงจุด B นั้นจะเกิดขึ้นที่สายดินป้องกัน ส่วนหากเกิดฟ้าผ่านอกเหนือจากบริเวณเหล่านี้จะเกิดขึ้นที่พื้นดินดังนั้นจะสามารถหาจำนวนฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในสายป้องกันจากกระแสยอดจำเพาะได้ดังสมการที่ 2.17

$$N(G)|I = 2N_gLD'_g \quad (2.17)$$

โดย L คือความยาวของสายส่งไฟฟ้า ซึ่งหมายความว่าพื้นที่ที่เกิดฟ้าผ่าขึ้นจะมีค่าเท่ากับ $2D'_g$ คูณกับค่าความยาวของสายส่งไฟฟ้า จากนั้นนำผลที่ได้มาคูณด้วยค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า จะได้จำนวนฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในบริเวณที่สนใจ โดยกำหนดความน่าจะเป็นของกระแสที่จะเกิดขึ้นเท่ากับ $f(I)dI$ ดังนั้นจำนวนฟ้าผ่าที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากกระแสฟ้าผ่าคือ

$$dN(G) = 2N_gLD'_gf(I)dI \quad (2.18)$$

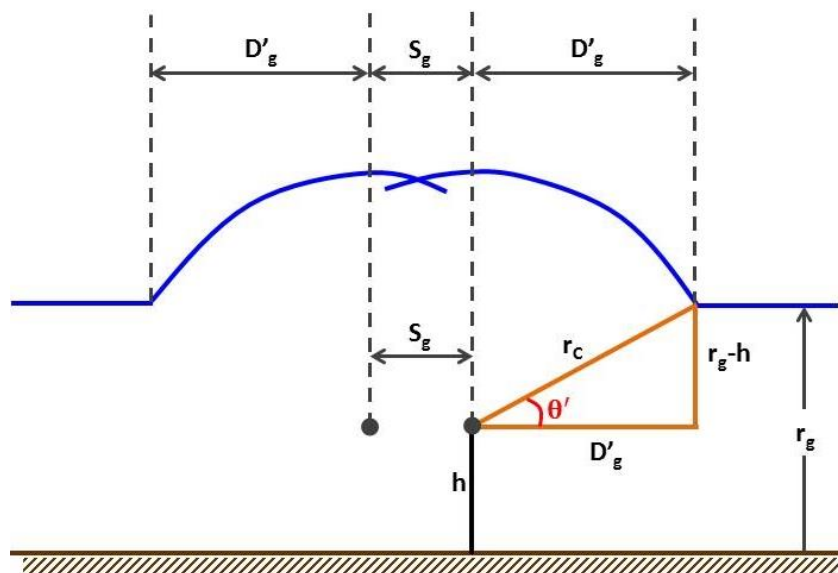
ดังนั้นจำนวนฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในสายป้องกันชนิดสายเดี่ยวจะมีค่าเท่ากับ

$$N(G) = 2N_g L \int_3^\infty D'_g f(I) dI \quad (2.19)$$

จากรูปที่ 2.11 จะได้ค่าระยะทาง D'_g เท่ากับ

$$D'_g = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} \quad (2.20)$$

สำหรับสายดินป้องกันชนิดสายคู่ นั้นจะแตกต่างจากสายดินป้องกันชนิดสายเดี่ยวตรงที่มีช่องว่างระหว่างสายดินป้องกัน (S_g) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปแบบทางเรขาคณิตของการเกิดฟ้าผ่าในสายดินป้องกันชนิดสายคู่

โดยสมการที่ใช้คำนวณจำนวนฟ้าผ่าลงบนที่เกิดขึ้นในสายดินป้องกันชนิดสายคู่ นั้นจะมีความคล้ายคลึงกับชนิดสายเดี่ยว เพียงแต่จะเพิ่มตัวแปร S_g เท่านั้นเองตามสมการที่ 2.21

$$N(G) = 2N_g L \int_3^\infty D'_g f(I) dI + N_g L S_g \quad (2.21)$$

2.6 ทฤษฎีการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ (The Back flashover)

จากหัวข้อที่ 2.4 ได้ทำการนำเสนอถึงมุมป้องกันและการวางตำแหน่งของสายดินป้องกันซึ่งจะส่งผลให้การเกิดฟ้าผ่าลงบนสายเฟสมีค่าน้อยลง ดังนั้นจึงมุ่งเน้นถึงโอกาสเกิดฟ้าผ่าลงบนสายดินป้องกันหรือตัวเสา ในการเกิดเหตุการณ์ฟ้าผ่าลงบริเวณเสาหรือสายดินป้องกันหากมีพื้นดินรอบ ๆ บริเวณเสาดังนั้น ๆ มีค่าความต้านทานดินสูงเกินไปจะทำให้ประจุไฟฟ้าไม่สามารถถ่ายเทผ่านลงไปในพื้นดินได้ เป็นเหตุให้ศักย์ไฟฟ้าเก็บสะสมในตัวเสา เมื่อเก็บสะสมจนมีค่ามากกว่าค่าความคงทนของลูกถ้วยฉนวนหรือมีค่าเกินค่าวาบไฟผิวย้อนกลับจะทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวย้อนกลับดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างการเกิดการวาบไฟผิวย้อนกลับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

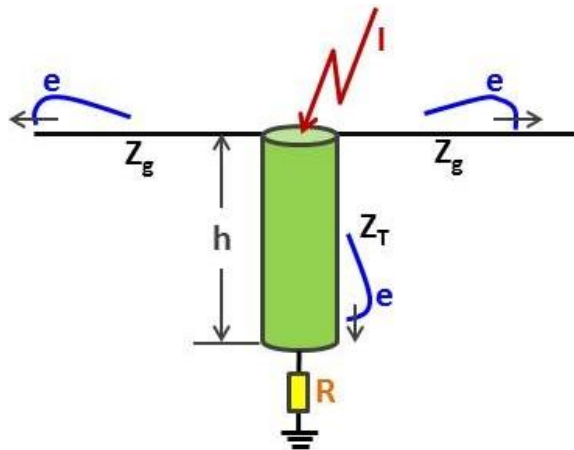
สมมติให้เกิดฟ้าผ่าลงบนเสานั้นเป็นไปตามรูปที่ 2.14 จะเกิดแรงดัน e ขึ้นที่หัวเสาทำให้เกิดคลื่นวิ่งไปในทิศทางลงพื้นดินและวิ่งไปตามสายดินป้องกันทั้งสองด้านโดยแรงดัน e จะสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$e = \frac{Z_T(Z_g/2)}{Z_T + (Z_g/2)} I \quad (2.22)$$

โดย I คือ ค่ากระแสฟ้าผ่า (kA)

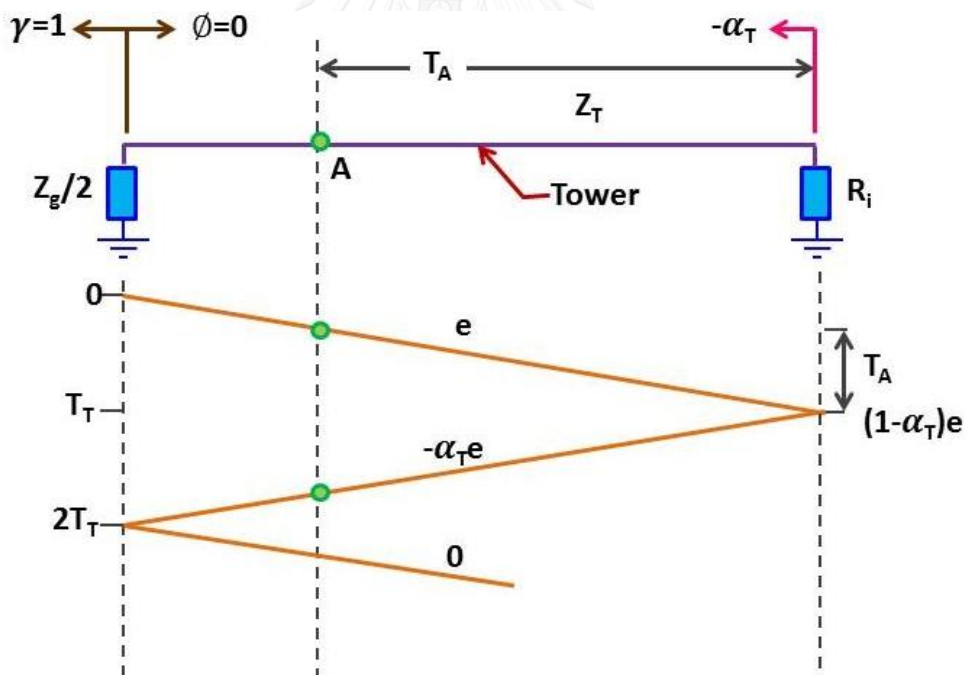
Z_g คือ ค่าความต้านทานเสิร์จของสายดินป้องกัน (ohm)

Z_T คือ ค่าความต้านทานเสิร์จของเสาสายส่ง (ohm)



รูปที่ 2.14 การเกิดฟ้าผ่าลงบนเสาสายส่ง

กำหนดให้เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ภายในเสาเป็น T_T และกำหนดให้แรงดัน e มีค่าหัวคลื่นเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงและมีค่าหางคลื่นคงที่ กำหนดให้ t_f เป็นเวลาที่คลื่นใช้จนถึงจุดสูงสุด โดยในการหาค่าแรงดันที่หัวเสาหรือที่จุดต่าง ๆ ของเสาจะใช้ Lattice diagram ในการหาดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 Lattice diagram ของการเกิดฟ้าผ่าในเสาสายส่ง

โดยค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและการเคลื่อนที่ที่จะเท่ากับ

$$\alpha_T = \frac{Z_T - R_i}{Z_T + R_i} \quad \gamma = \frac{2Z_g}{Z_g + 2Z_T} \quad \phi = \frac{Z_g - 2Z_T}{Z_g + 2Z_T} \quad (2.23)$$

จากรูปที่ 2.14 จะมีค่าแรงดันที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณ 3 ค่า ได้แก่ ค่าแรงดันยอด (V_{TT}), ค่าแรงดันที่ยอดเสาก่อนจะได้รับผลจากการสะท้อนของคลื่นจากความต้านทานพื้นดิน (V_T) และ ค่าแรงดันสุดท้าย (V_F) โดยหา V_T ได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_T = \frac{2T_T}{t_f} e = Z_T \frac{T_T}{t_f} I = L_T \frac{I}{t_f} \quad (2.24)$$

โดย L_T คือ ค่าการเหนี่ยวนำรวมทั้งหมดของเสาสายส่ง, ตัวแปร $\frac{I}{t_f}$ คือ ค่าอัตราการเพิ่มขึ้นหรือความชันของหน้าคลื่น โดยหา V_{TT} ได้จากสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} V_{TT} &= e - \alpha_T e \frac{t_f - 2T_T}{t_f} = (1 - \alpha_T)e + \alpha_T e \frac{2T_T}{t_f} \\ &= \left[\frac{Z_g R_i}{Z_g + 2T_i} + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_f} \right] I = \left[R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_f} \right] I \\ &= K_{TT} I \end{aligned} \quad (2.25)$$

โดย

$$R_e = \frac{Z_g R_i}{Z_g + 2R_i} \quad (2.26)$$

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

ส่วนแรงดันสุดท้าย (V_F) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_F = (1 - \alpha_T)e = R_e I \quad (2.27)$$

แรงดันที่ความต้านทานดิน (V_R) และค่ากระแสที่ไหลผ่านความต้านทานดิน (I_R) หาได้จากสมการต่อไปนี้

$$V_R = \frac{Z_T R_i}{Z_T + R_i} \quad I_R = \frac{R_e}{R_i} I \quad (2.28)$$

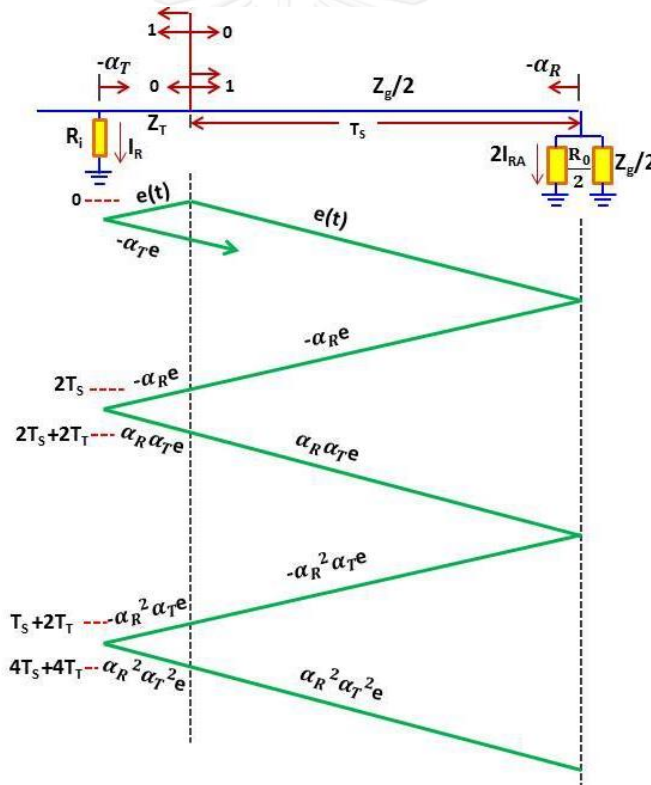
จากรูปที่ 2.14 และ 2.15 ค่าแรงดันที่จุด A จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{TA} = \left[R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_f} \right] I = K_{TA} I \tag{2.29}$$

โดย

$$K_{TA} = R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_A}{t_f} \tag{2.30}$$

กำหนดให้ T_T และ T_S คือ เวลาที่คลื่นเดินทางภายในเสาสายส่ง และเวลาที่คลื่นเดินทางระหว่างเสา ตามลำดับหากคิดผลจากการสะท้อนของเสาดังรูปที่ 2.16 จะได้แรงดันที่ยอดเสา e_{TT} ดังสมการที่ 2.31



รูปที่ 2.16 Lattice diagram ผลจากการสะท้อนของเสาข้างเคียง

$$e_{TT} = [1 - \alpha_T(t - 2T_T)] e \{ [1 - \alpha_R(t - 2T_S) + 1 - \alpha_R \alpha_T(t - (2T_S + 2T_T))] - \alpha_R^2 \alpha_T [t - (4T_S + 4T_T)] + (\alpha_R \alpha_T)^2 [1 - (4T_S + 4T_T)] - \alpha_R^2 \alpha_T [t - (6T_S + 6T_T)] + (\alpha_R \alpha_T)^3 [1 - (6T_S + 6T_T) - \dots] \} \tag{2.31}$$

หากไม่คำนึงถึงเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ภายในเสาที่เกิดฟ้าผ่าจะได้สมการใหม่ คือ

$$e_{TT} = [1 - \alpha_T(t - 2T_T)]e\{1 - \alpha_R(1 - \alpha_T[(t - 2T_S) + \alpha_R\alpha_T(t - 4T_S)]) + (\alpha_R\alpha_T)^2(t - 6T_S) - \dots\} \quad (2.32)$$

โดยขนาดของคลื่นคือ $[1 - \alpha_T(t - 2T_T)]e$ หากเมื่อไม่คำนึงถึงผลของการสะท้อนของเสาข้างเคียง ขนาดของคลื่นจะสามารถแทนได้ด้วย K_{TT}

ในการประมาณค่าอย่างคร่าว ๆ จะกำหนดให้แรงดัน V_{TT} มีการเพิ่มขึ้นของหน้าคลื่นเป็นลักษณะเส้นตรงเพราะฉะนั้นแรงดันยอดจะมีค่าเท่ากับ

$$V_{TT} = (K_{sp}K_{TT})I \quad (2.33)$$

โดย

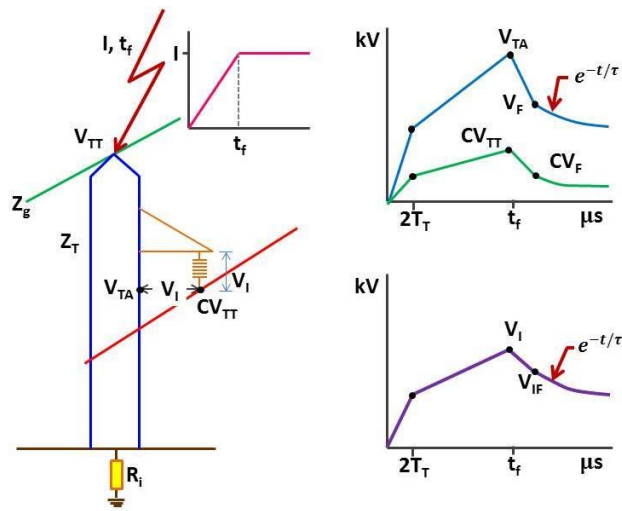
$$K_{sp} = 1 - \alpha_R(1 - \alpha_T) \left[\left(1 - 2\frac{T_S}{t_f}\right) + \alpha_R\alpha_T \left(1 - 4\frac{T_S}{t_f}\right) + (\alpha_R\alpha_T)^2 \left(1 - 4\frac{T_S}{t_f}\right) + \dots \right] \quad (2.34)$$

ในทางปฏิบัติค่าการสะท้อนระหว่างเสาที่อยู่ข้างเคียงจะมีผลทำให้แรงดันที่ยอกเสาตกลงไปน้อยกว่า 1 % ดังนั้นการประมาณค่าแรงดันของเสาที่ถูกฟ้าผ่าจะคำนึงถึงผลการสะท้อนของเสาข้างเคียงต้นแรกต้นเดียวเท่านั้น เมื่อปรับค่า K_{sp} เข้ากับ V_{TA} และ V_F จะได้

$$V_{TA} = (K_{sp}K_{TA})I \quad (2.35)$$

$$V_F = K_{sp}R_e I \quad (2.36)$$

การประมาณค่าอัตราการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ ตามรูปที่ 2.17 ค่าแรงดันเสิร์จของสายป้องกันสร้างแรงดันเท่ากับค่าแฟกเตอร์การคู่ควบ (C ; coupling factor) คูณกับค่าแรงดันในสายป้องกัน ซึ่งหากค่าแรงดัน V_{TA} อยู่ตรงกันข้ามกับสายไฟฟ้านั้นแรงดันยอดที่ตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน (V_I) จะมีค่าเท่ากับ



รูปที่ 2.17 ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากฟ้าผ่าลงบนเสาสายส่ง

$$V_I = I[K_{TA} - CK_{TT}]K_{SP} \tag{2.37}$$

และแรงดันยอดตกร่วมลูกถ้วยฉนวนเนื่องจากความต้านทานดิน (V_{IF}) จะมีค่าเท่ากับ

$$V_{IF} = (1 - C)R_e I \tag{2.38}$$

โดยค่าแรงดันนี้ยังเป็นค่าแรงดันเมื่อไม่คิดค่าแรงดันต่าง ๆ ในเสาไฟฟ้าอีกด้วย จากทฤษฎีสนาม(Field theory) ค่าแรงดันตกร่วมช่องอากาศจะมีค่าเท่ากับแรงกันตกร่วมลูกถ้วยฉนวน

สำหรับการเกิดการวาบไฟแรงดัน V_I จะต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าวาบไฟผิววิกฤตของการฉนวนจึงจะเกิดได้ ซึ่งค่าวาบไฟผิววิกฤตจะมีค่าแตกต่างจากค่าวาบไฟผิววิกฤตของรูปคลื่นอิมพัลส์ 1.2/50- μ s เพราะว่ารูปคลื่นไม่มีค่าตายตัว ดังนั้นจึงเรียกค่าวาบไฟผิววิกฤตใหม่ว่าค่าวาบไฟผิวแบบไม่มาตรฐาน(CFO_{NS}) โดยค่าวาบไฟผิวแบบไม่มาตรฐานจะกล่าวต่อไปในหัวข้อย่อย เมื่อแทนค่าแรงดัน V_I ด้วยค่าวาบไฟผิวแบบไม่มาตรฐานจะได้ค่ากระแสสวิกฤต(I_c) ที่มากกว่าหรือเท่ากับการเกิดวาบไฟผิว

$$I_c = \frac{CFO_{NS}}{[K_{TA} - CK_{TT}]K_{SP}} \tag{2.39}$$

และในหลาย ๆ กรณีค่า K_{TT} จะมีค่าใกล้เคียงกับค่า K_{TA} ดังนั้นจะได้สมการใหม่ดังนี้

$$I_c = \frac{CFO_{NS}}{[1 - C]K_{TT}K_{sp}} \quad (2.40)$$

ความน่าจะเป็นของการเกิดการวาบไฟ คือ ความน่าจะเป็นที่ค่ากระแสฟ้าผ่านนั้นมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่ากระแสวิกฤตดังนี้

$$\text{Prob}(I \geq I_c) = P(I_c) = \int_{I_c}^{\infty} f(I)dI \quad (2.41)$$

ค่าการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ คือ การนำค่าความน่าจะเป็นของการเกิดการวาบไฟคูณกับค่าจำนวนการเกิดฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในสายดินป้องกัน (N_L) จากหัวข้อ 2.5 หรือก็คือ

$$BFR = N_L P(I_c) \quad (2.42)$$

โดย **BFR** คือ อัตราการเกิดวาบไฟตามผิวย้อนกลับ (flashover/100km-year)

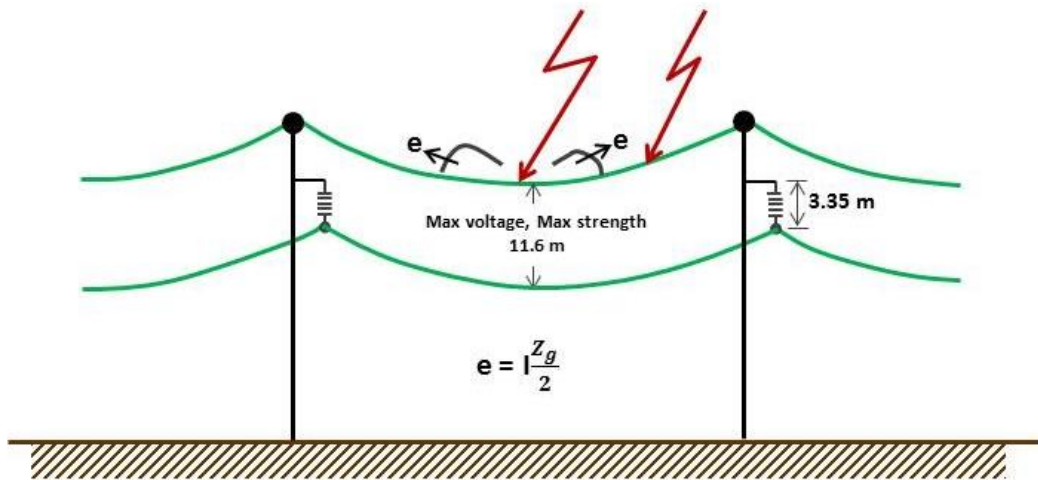
N_L คือ จำนวนอัตราการเกิดฟ้าผ่าลงในสายป้องกันในรอบ 1 ปี (flash/100km-year)

$P(I_c)$ คือ ความน่าจะเป็นที่ค่ากระแสนั้นจะสูงกว่าค่ากระแสวิกฤต

ในสมการข้างต้นเป็นการประมาณค่าของอัตราการเกิดการวาบไฟผิวย้อนกลับโดยคร่าว ๆ ดังนั้นจึงยังไม่ได้คำนึงถึงผลอื่น ๆ โดยจะสามารถแจกแจงได้ดังนี้

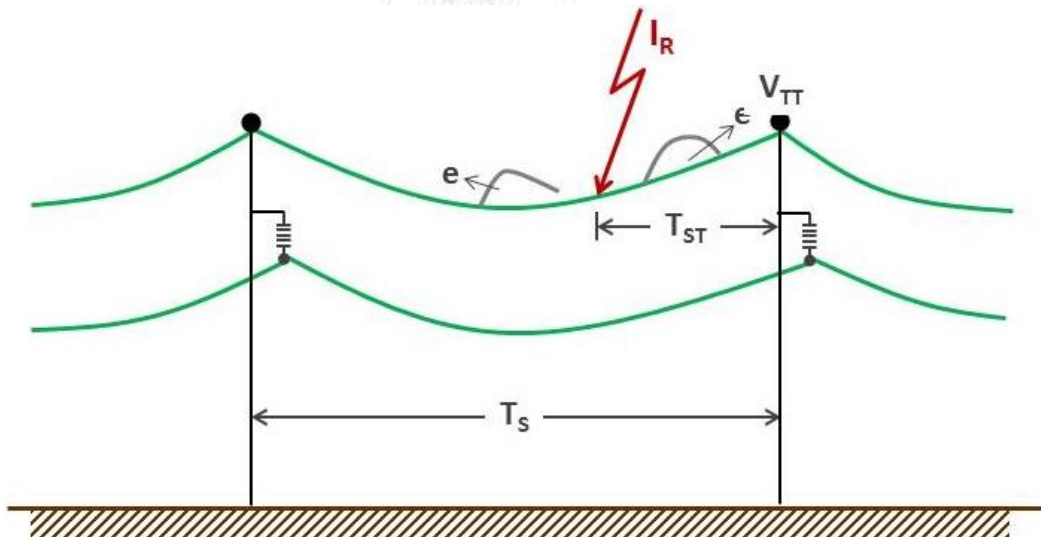
2.6.1 การเกิดฟ้าผ่าในสายดินป้องกัน

จากสมการที่ 2.42 ได้พัฒนามาจากแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดฟ้าผ่าลงเสาไฟฟ้า โดยปกติแล้วฟ้าผ่าสามารถเกิดได้ทุกที่ในสายป้องกันดังนั้นผลของการเกิดฟ้าผ่าในสายป้องกันควรนำมาคำนึงถึงด้วย โดยการเกิดฟ้าผ่าในสายป้องกันนั้นจะสร้างแรงดันตกคร่อมฉนวนในอากาศระหว่างสายป้องกัน , สายส่งไฟฟ้า และยังตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนในเสาไฟฟ้าด้วย แม้ว่าแรงดันตกคร่อมสายฉนวนมีค่ามากกว่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนของเสาไฟฟ้า แต่ความแข็งแรงของสายฉนวนมีค่ามากกว่าลูกถ้วยฉนวนของเสาไฟฟ้า ดังนั้นหมายความว่าเกิดการวาบไฟจะสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งที่สายฉนวนและลูกถ้วยฉนวนโดยจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์แรงดันที่เกิดขึ้นกับความแข็งแรงของการฉนวน



รูปที่ 2.18 การเกิดฟ้าผ่าในสายป้องกัน

จากรูปที่ 2.18 และ 2.19 แรงดัน ณ จุดที่เกิดฟ้าผ่าจะนั้นจะมีค่าสูงจนขึ้นจนเทียบเท่าแรงดันยอด ($Z_g I/2$) อย่างไรก็ตามผลจากการสะท้อนของคลื่นจากเสาที่อยู่ใกล้กันจะลดค่าแรงดันลง [6, 7] หากค่าเวลาที่จะเกิดแรงดันยอด (t_f) มากกว่าค่าผลต่างของเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ระหว่างเสากับจุดที่เกิดฟ้าผ่าในสายป้องกัน ($T_s - T_{ST}$)



รูปที่ 2.19 ตัวแปรต่าง ๆ ณ จุดที่เกิดฟ้าผ่าในสายป้องกัน

จากรูปที่ 2.19 คลื่นที่เกิดจากการเกิดฟ้าผ่าบนสายป้องกันค่าแรงดันยอดที่เกิดขึ้นที่เสาไฟฟ้าในรูปของตัวแปร K_{TT} คือ

หาก $2T_T \leq t_f \leq 2(T_T - T_{ST})$ ดังนั้น

$$V_{TT} = IK_{TT} \quad (2.43)$$

หาก $2(T_T - T_{ST}) \leq t_f \leq 2T_S$ ดังนั้นค่าแรงดันยอดจะเกิดขึ้นที่ทั้ง t_f และ $2(T_T - T_{ST})$ โดยจะขึ้นอยู่กับค่าของความต้านทานดินซึ่งหากแรงดันยอดเกิดขึ้นที่ t_f ดังนั้น

$$K_{TT} = R_e \frac{2(T_S - T_{ST})}{t_f} + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{t_f} \quad (2.44)$$

หรือหากแรงดันยอดเกิดขึ้นที่ $2(T_T - T_{ST})$ ดังนั้น

$$K_{TT} = \frac{R_e}{Z_g + 2R_i} \left[2R_i + Z_g + \frac{2(T_T - T_{ST})}{t_f} + \frac{4\alpha_T R_i}{R_e} Z_T \frac{T_T}{t_f} \right] \quad (2.45)$$

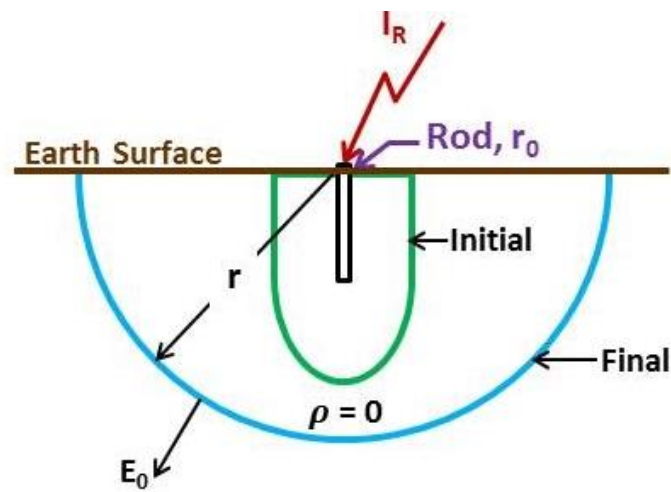
จากการเปรียบเทียบสมการข้างต้นกับสมการที่ 2.26 พบว่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าลงบนสายป้องกันจะมีค่าเทียบเท่ากับแรงดันที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าลงบนเสาโดยตรงเมื่อ $t_f \leq 2(T_S - T_{ST})$ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าลงบนสายป้องกันนั้นมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับแรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อฟ้าผ่าลงบนเสา จึงสามารถเปลี่ยนแปลงสมการในการคำนวณหาอัตราการเกิดวาตไฟผิวย้อนกลับได้โดยยึดการเกิดฟ้าผ่าลงบนเสาเป็นหลักจากสมการที่ 2.42 จะเปลี่ยนเป็น

$$BFR = 0.6N_L P(I_c) \quad (2.46)$$

2.6.2 ความต้านทานดินกระแสสูงหรือความต้านทานดินอิมพัลส์

จากที่ได้กล่าวไว้ความต้านทานดินที่นำมาใช้ในการคำนวณของเสาที่โดนฟ้าผ่า คือ ความต้านทานดินอิมพัลส์ไม่ใช่ความต้านทานดินกระแสต่ำ ซึ่งหมายความว่ากระแสไฟฟ้าแรงสูงจะไหลผ่านดินซึ่งทำให้เกิดการเบรกดาวน์ขึ้นในพื้นดินทำให้ต้องเพิ่มขนาดของหลักดิน (ground rod) เพื่อลดความต้านทานของพื้นดินลง ดังนั้นจึงต้องมีทฤษฎีและสมการเพื่อใช้ในการประมาณค่าของความต้านทานดินอิมพัลส์นี้

งานวิจัยของเวค(Weck)[6] ได้ทำการประมาณค่าความต้านทานดินอิมพัลส์โดยใช้วิธีการประมาณค่าอย่างคร่าว ๆ โดยการใช้กระแสสูงแทนการเกิดฟ้าผ่า เมื่อค่าเกรเดียนท์มากกว่าค่าเกรเดียนท์วิกฤต(E_0) จะเกิดเบรกดาวน์ในพื้นดิน นั่นคือเมื่อค่ากระแสสูงขึ้นสตรีมเมอร์จะทำให้ความชื้นในพื้นดินระเหยซึ่งจะทำให้เกิดประกายไฟฟ้าหรืออาร์คขึ้น



รูปที่ 2.20 เมื่อค่ากระแสสูงขึ้นพื้นที่ของหลักดินจะเริ่มเปลี่ยนเป็นทรงกลม

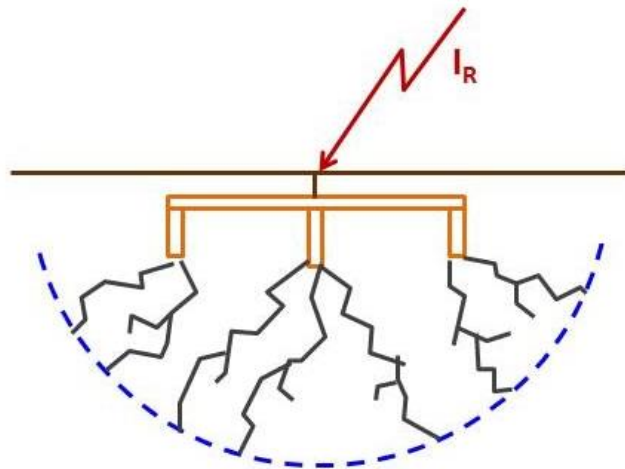
ภายในพื้นที่ของสตริมเมอร์และอาร์คค่าของความต้านทานจะลดลงจากค่าปกติจนเกือบมีค่าเป็นศูนย์จะทำให้พื้นดินมีลักษณะเป็นตัวนำ การเกิดเบรกดาวนในพื้นดินสังเกตได้ว่าจะมีค่าเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวของหลักดินจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อกระบวนการแตกตัวของไอออนเพิ่มขึ้น รูปร่างก็จะเป็นทรงกลมมากขึ้นดังรูปที่ 2.20 และรูปที่ 2.21 แสดงเงื่อนไขเดียวกันกับหลักดินที่มากกว่าหนึ่งหลัก (multiple rods)

กำหนดให้รัศมีของอิเล็กโทรดรูปทรงครึ่งวงกลมเป็น r_0 ตามรูปที่ 2.21 เมื่อค่าเกรเดียนท์ที่ผิวของรูปทรงครึ่งวงกลมเกินค่าเกรเดียนท์วิกฤตจะเกิดการเบรกดาวนขึ้น โดยค่ากระแสในการเกิดเบรกดาวนนี้นี้จะมีค่าดังนี้

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho E_0}{R_0^2} \quad (2.47)$$

โดย E_0 คือ ค่าเกรเดียนท์วิกฤตซึ่งมีค่าเท่ากับ 400 (kV/m)

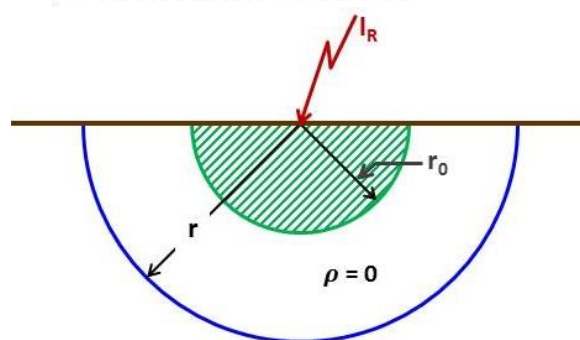
ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (soil resistivity) (ohm-m)



รูปที่ 2.21 เมื่อค่ากระแสสูงขึ้นไปพื้นที่ของหลักดินมากกว่าหนึ่งหลักจะเริ่มเปลี่ยนเป็นทรงกลม

สำหรับกระแสที่มีค่ามากกว่า I_g จะทำให้เกิดการเบรกดาว์นขยายขอบเขตและเกิดต่อเนื่อง จนถึงจุดรัศมี r ซึ่งภายในพื้นที่ของรัศมีดังกล่าวนี้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นดินจะกลายเป็นตัวนำโดยสมบูรณ์แบบซึ่งหมายความว่าความต้านทานดินภายใต้กระแสสูงนั้นจะคือค่าความต้านทานดินของรูปครึ่งวงกลมรัศมี r นั่นเอง เพราะฉะนั้นความต้านทานดินอิมพัลส์จะมีค่าเท่ากับ

$$I_g = \frac{R_0}{\sqrt{I_R/I_g}} \quad (2.48)$$

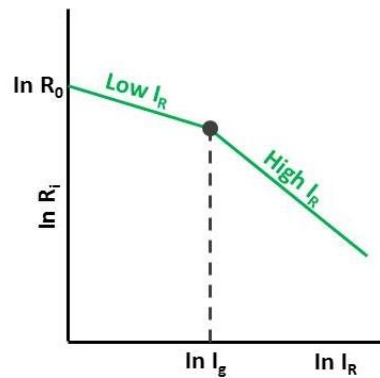


รูปที่ 2.22 อิเล็กโทรดรูปครึ่งวงกลม

เนื่องจากขนาดของหลักดินทำให้เกิดค่าเกรเดียนท์วิกฤตอย่างทันทีทันใดทำให้ค่าความต้านทานลดลงอย่างทันทีทันใดเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามการลดลงของความต้านทานจะยังไม่ลดลงเร็วมากจนกระทั่งขนาดของพื้นที่สตริมเมอร์และอาร์คเกือบจะกลายเป็นรูปทรงครึ่งวงกลม

โดยรูปที่ 2.23 จะแสดงค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไปเนื่องจากขนาดของหลักดินมีค่าเพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดอิเล็กทรอนิกส์วงกลมที่กระแส I_g โดยลักษณะของค่าความต้านทานสามารถคำนวณได้ตามสมการดังนี้

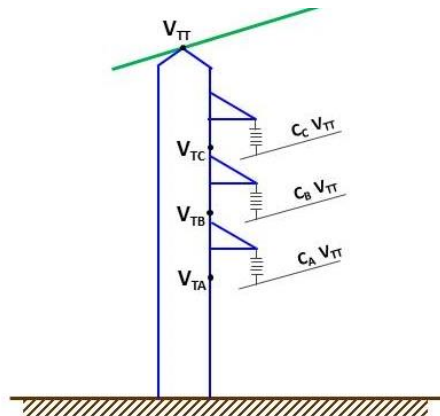
$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + (I_R/I_g)}} \quad (2.49)$$



รูปที่ 2.23 ค่าความต้านทานอิมพีลส์ในพื้นดิน

2.6.3 ผลของแรงดันความถี่กำลัง (Effect of power frequency voltage)

ในส่วนของทฤษฎีผลแรงดันความถี่กำลังจะครอบคลุมถึงบทที่ 3 ด้วย โดยในตอนเริ่มต้นนั้นค่าแฟกเตอร์การคู่ควบนั้นจะพิจารณาเฉพาะในเสาแบบเฟสเดียว ดังนั้นตอนนี้จึงจะพิจารณาค่าแฟกเตอร์การคู่ควบในเสาชนิดด้วยโดยในเสาแบบนั้นแต่ละเฟสจะมีค่าแฟกเตอร์การคู่ควบแตกต่างกัน ได้แก่ C_A , C_B และ C_C ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 เสาซึ่งมีค่าแรงดันและค่าแฟกเตอร์การคู่ควบแตกต่างกัน

ซึ่งค่าแรงดันในเสาไฟฟ้าก็จะแตกต่างกันไปในแต่ละเฟสด้วยนั่นคือจะมีค่าแรงดันอยู่สามค่าได้แก่ V_{TA} , V_{TB} และ V_{TC} ดังนั้นแรงดันตกคร่อมสายฉนวนสำหรับเฟส A, B และ C จะมีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned}V_{IA} &= (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{sp} I \\V_{IB} &= (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{sp} I \\V_{IC} &= (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{sp} I\end{aligned}\quad (2.50)$$

ต่อมาจะทำการพิจารณาแรงดันความถี่กำลัง โดยหากแรงดันยอดความถี่กำลังแบบ line-neutral มีค่าเท่ากับ V_{LN} ดังนั้น

$$\begin{aligned}V_{IA} &= (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{sp} I + V_{LN} \sin \omega t \\V_{IB} &= (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{sp} I + V_{LN} \sin(\omega t - 120) \\V_{IC} &= (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{sp} I + V_{LN} \sin(\omega t + 120)\end{aligned}\quad (2.51)$$

โดยสมมติให้ค่าวoltage ไฟฟ้าวิกฤตสำหรับทุกเฟสนั้นมีค่าเท่ากัน และจากค่าแรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนซึ่งค่าวoltage ไฟฟ้าวิกฤตของลูกถ้วยจะเป็นแบบไม่มาตรฐาน จะทำให้ได้ค่ากระแสวิกฤตออกมาดังนี้

$$\begin{aligned}I_{CA} &= \frac{CFO_{NS} - V_{LN} \sin \omega t}{(K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{sp}} \\I_{CB} &= \frac{CFO_{NS} - V_{LN} \sin(\omega t - 120)}{(K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{sp}} \\I_{CC} &= \frac{CFO_{NS} - V_{LN} \sin(\omega t + 120)}{(K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{sp}}\end{aligned}\quad (2.52)$$

จากสมการที่ 2.52 ค่ากระแสวิกฤตที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับมุมเฟสของแรงดันความถี่กำลังขณะที่เกิดฟ้าผ่าขึ้น อย่างไรก็ตามในเหตุการณ์การเกิดฟ้าผ่าขึ้นเร็วมากจนไม่อาจคำนึงถึงมุมเฟสได้ ดังนั้นในการคำนวณจึงจะต้องหาค่ากระแสวิกฤตทุก ๆ มุมเฟสโดยอาจจะเริ่มจาก 0 องศาและเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ ทีละ 30 องศาเป็นต้น ซึ่งจะได้ค่ากระแสวิกฤตและอัตราการเกิดการวoltage ไฟฟ้าย้อนกลับมากถึง 12 ค่า ดังนั้นจาก[2] ได้ทำการเสนอสมการในการประมาณค่าคร่าว ๆ ของกระแสวิกฤตที่เกิดขึ้นดังนี้

$$I_C = \frac{CFO_{NS} - K_{PF}V_{LN}}{(K_{TA} - C_A K_{TT})K_{SP}} = \frac{CFO_{NS} - V_{PF}}{(K_{TA} - C_A K_{TT})K_{SP}} \quad (2.53)$$

$$V_{LN} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{L-L} \quad (2.54)$$

โดย K_{PF} คือ ค่าแฟกเตอร์แรงดัน 50 Hz ขณะที่เกิดฟ้าผ่า

- สำหรับเสาแบบเรียงสายส่งแนวนอนมีค่าเท่ากับ 0.7
- สำหรับเสาแบบเรียงสายส่งแนวตั้งมีค่าเท่ากับ 0.4

C_A คือ ค่าแฟกเตอร์คู่ควบที่มีค่าน้อยที่สุด

2.6.4 ค่าวาบไฟผิวิกฤตแบบไม่มาตรฐาน (Non-standard CFO)

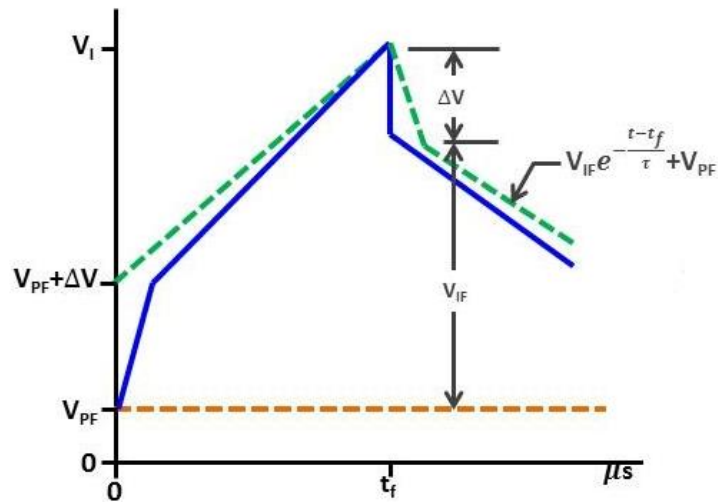
รูปคลื่นของแรงดันที่ตกคร่อมลูกถ้วยฉนวนซึ่งจะแสดงให้เห็นในเส้นหนาของรูปที่ 2.25 นั้นจะประกอบด้วยค่าแรงดันความถี่กำลัง (V_{PF}), ค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากความต้านทานดิน (V_{IF}) และค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากเสาไฟฟ้า (ΔV) โดย

$$\Delta V = V_I - (1 - C)V_F \quad (2.55)$$

$$V_{IF} = (1 - C)V_F \quad (2.56)$$

โดยอัตราการลดลงของค่าแรงดันเสิร์จในช่วงหางคลื่นจะสามารถอธิบายได้โดยค่าคงที่ของเวลา (τ) ซึ่งจะแสดงในเส้นประของรูปที่ 2.25 ซึ่งจากรูปคลื่นดังกล่าวนี้จะพบว่าจะมีความแตกต่างจากรูปคลื่นมาตรฐานมาก การคำนวณส่วนมากจะสมมติให้ฟ้าผ่ามีรูปคลื่นตามมาตรฐานคือ $1.2/50 \mu s$ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ข้อมูลรูปคลื่นมาตรฐานนี้ในการหาค่าวาบไฟผิวิกฤต ดังนั้นหากจะคำนึงถึงฟ้าผ่าในรูปคลื่นอื่น ๆ นั้นจำเป็นจะต้องหาค่าวาบไฟผิวิขึ้นใหม่หรือเรียกว่า “ค่าวาบไฟผิวิกฤตแบบไม่มาตรฐาน”

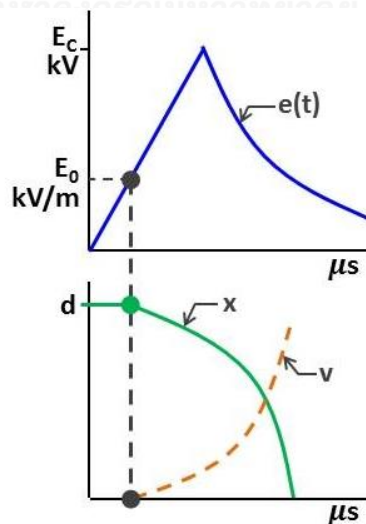
ในการจะประมาณค่าของค่าวาบไฟผิวิกฤตแบบไม่มาตรฐานนั้นจะใช้วิธีที่เรียกว่า LPM (leader progression model) โดยวิธีการนี้จะเป็นรูปแบบของการเกิดเบรกดาวน ดังนั้นในขั้นตอนแรกจะเป็นการพิจารณาการเกิดเบรกดาวน



รูปที่ 2.25 แรงดันตกคร่อมลูกถ้วยฉนวน

รูปที่ 2.26 พิจารณาค่าระยะห่างของช่องว่าง d เมื่อทำการป้อนค่าแรงดันอิมพัลส์เข้าไป จะเกิดหัวนำร่องขึ้นมาเมื่อค่าแรงดันตกคร่อมช่องว่างมีค่ามากกว่าค่าเกรเดียนท์วิกฤตจนทำให้เกิดสตรีมเมอร์ระหว่างช่องว่างขึ้น ในขณะที่หัวนำร่องจะถึงพื้นดินค่าแรงดันตกคร่อมช่องว่างจะเพิ่มขึ้นทำให้ความเร็วของหัวนำร่องเพิ่มขึ้นด้วย โดยตามงานวิจัย[2]ได้เสนอสมการความเร็วไว้ดังนี้

$$v(t) = k_L e(t) \left[\frac{e(t)}{x} - E_0 \right] \quad (2.57)$$



รูปที่ 2.26 การเกิดเบรกดาวน

โดยที่ $e(t)$ คือค่าแรงดันของคลื่นในรูปที่ 2.25, E_0 คือค่าเกรเดียนท์วิกฤต, x คือระยะห่างระหว่างหัวนำร่องกับพื้นดิน และ k_L คือค่าคงที่ ค่าของเกรเดียนท์วิกฤตจะขึ้นอยู่กับรูปร่างหรือระยะห่างของช่องว่าง ต่อมานำค่าวาบไฟผิววิกฤตและช่วงเวลาคลื่นตัด (chopped wave) ของแรงดันเบรกดาว์นของรูปคลื่นมาตรฐานมาใช้ในการหาสมการ โดยสมมติให้รูปคลื่นมาตรฐานมีลักษณะเป็น Double exponential ดังนี้

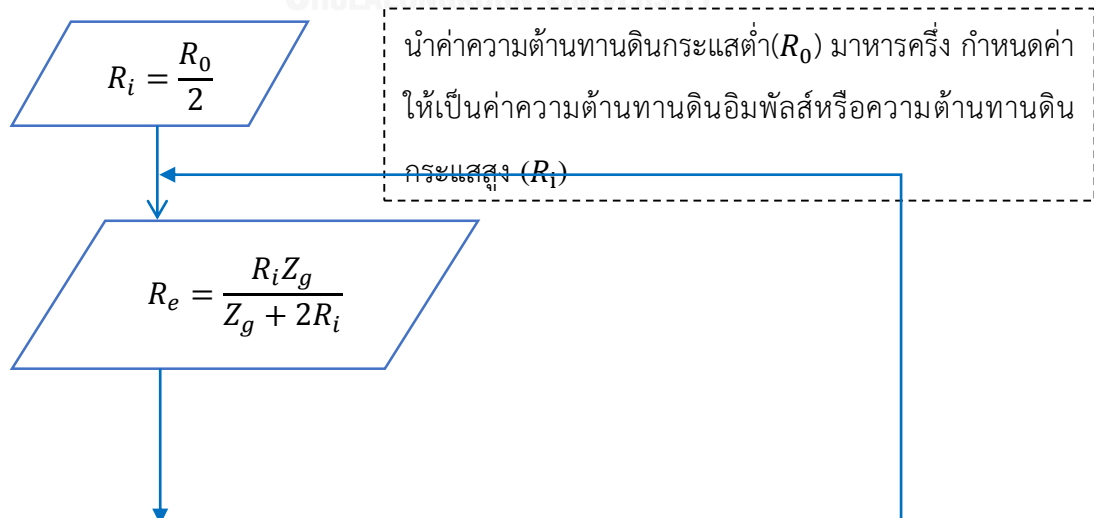
$$e(t) = AV_C(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.58)$$

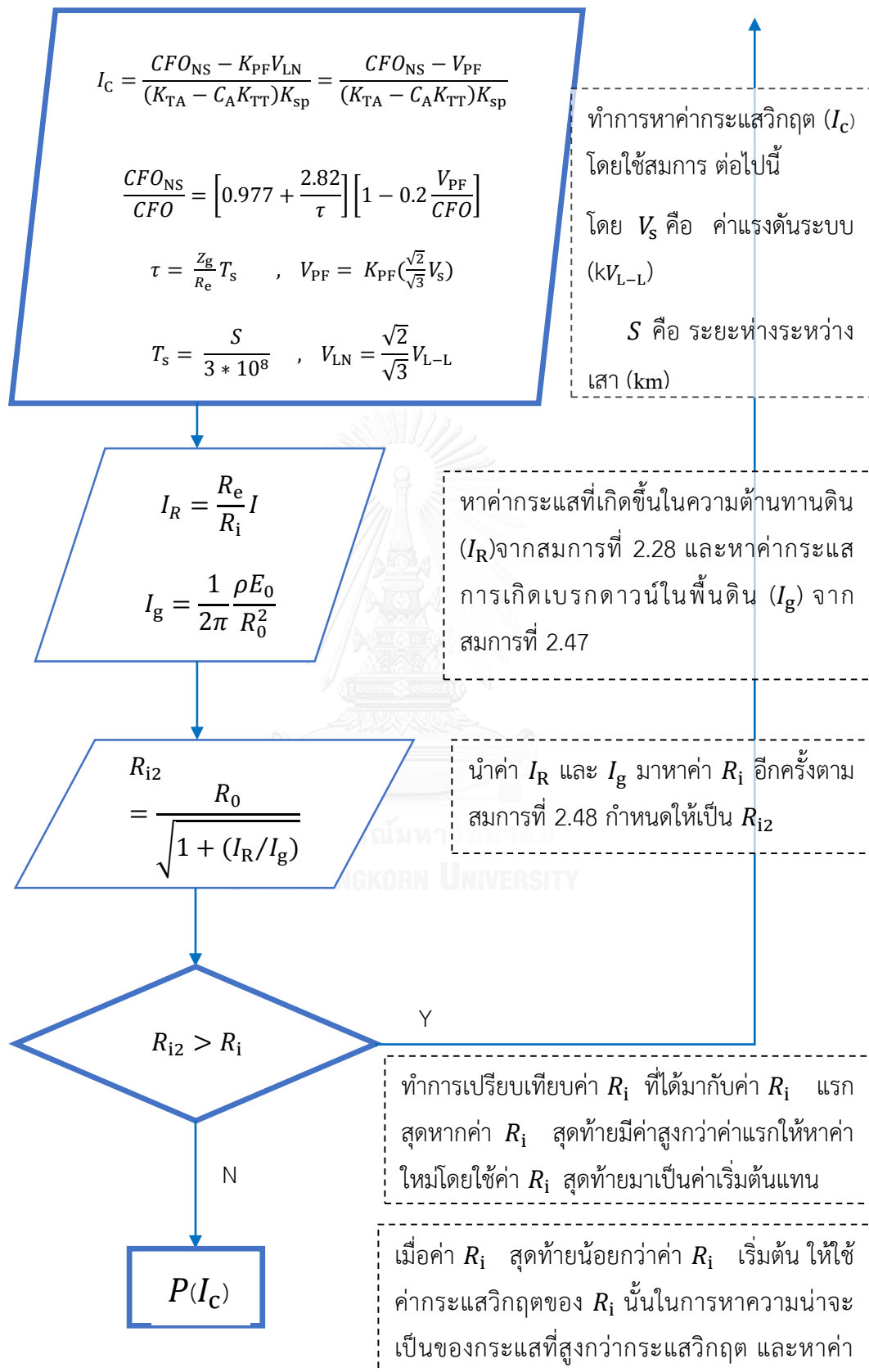
จากนั้นใช้สมการที่ 2.56 และ 2.57 ในการหาค่าวาบไฟผิววิกฤตแบบไม่มาตรฐานโดยกำหนดค่าตัวแปร α, β, A, E_0 และ K_L มีค่า 0.0146591, 2.46893, 1.03725, 535 kV/m และ 7.875×10^{-7} โดยจะไม่คำนึงถึงผลจากเสาไฟฟ้าจะได้สมการออกมาดังนี้

$$\frac{CFO_{NS}}{CFO} = \left[0.977 + \frac{2.82}{\tau} \right] \left[1 - 0.2 \frac{V_{PF}}{CFO} \right] \quad (2.59)$$

2.6.5 ขั้นตอนการคำนวณหาอัตราการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ

จากหัวข้อย่อยที่ผ่านมาจะนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าอัตราการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับตามสมการที่ 2.40 โดยจะมุ่งเน้นไปที่การหาความน่าจะเป็นที่กระแสนั้นจะสูงกว่าค่ากระแสวิกฤต โดยค่ากระแสวิกฤตจะหาโดยขั้นตอนดังต่อไปนี้[7]





2.7 เวลาเฉลี่ยที่จะเกิดความเสียหาย

การหาค่าของช่วงเวลาที่เกิดแรงดันเกินของการเกิดการวาบไฟผิวย้อนกลับจะมีวิธีการหาที่คล้ายคลึงกันกับการหาค่าของช่วงเวลาของการเกิดการป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการรวมค่าของทั้งการเกิดการวาบไฟผิวย้อนกลับ และการเกิดการป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิวเข้าด้วยกัน จากนั้นจึงหาค่าช่วงเวลาที่เกิดแรงดันเกินโดยใช้สมการที่ 2.60 ในหลายงานวิจัยพบว่าบริเวณที่ก่อให้เกิดอันตรายมากที่สุดคือบริเวณที่ติดกับสถานีไฟฟ้า ดังนั้นจึงสมมติให้ระยะอันตรายนั้นมีระยะห่างจากสถานี 3 ช่วงเสา

$$MTBF = \frac{100}{L(SFFOR + BFR)} \quad (2.60)$$

โดย MTBF คือ ช่วงเวลาการเกิดแรงดันเกิน (year)

L คือ ระยะอันตรายที่สุดหากเกิดฟ้าผ่าลงบริเวณนี้ กำหนดให้เป็นระยะห่างจากสถานี 3 ช่วงเสา (m)

SFFOR คือ อัตราการเกิดป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิว (flashover/100km-year)

BFR คือ อัตราการเกิดการวาบไฟผิวย้อนกลับ (flashover/100km-year)

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการคำนวณเสาแบบเรียงสายส่งแนวตั้ง

ทฤษฎีในการใช้คำนวณในโปรแกรมคำนวณเสาแบบเรียงสายส่งแนวตั้งดังรูปที่ 3.1 นั้นส่วนใหญ่จะคล้ายคลึงกับเสาแบบเรียงสายส่งแนวนอนในบทที่ 2 ซึ่งจะนำเอาพื้นฐานจากบทที่ 2 มาประยุกต์ใช้ในการหาค่าต่าง ๆ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้



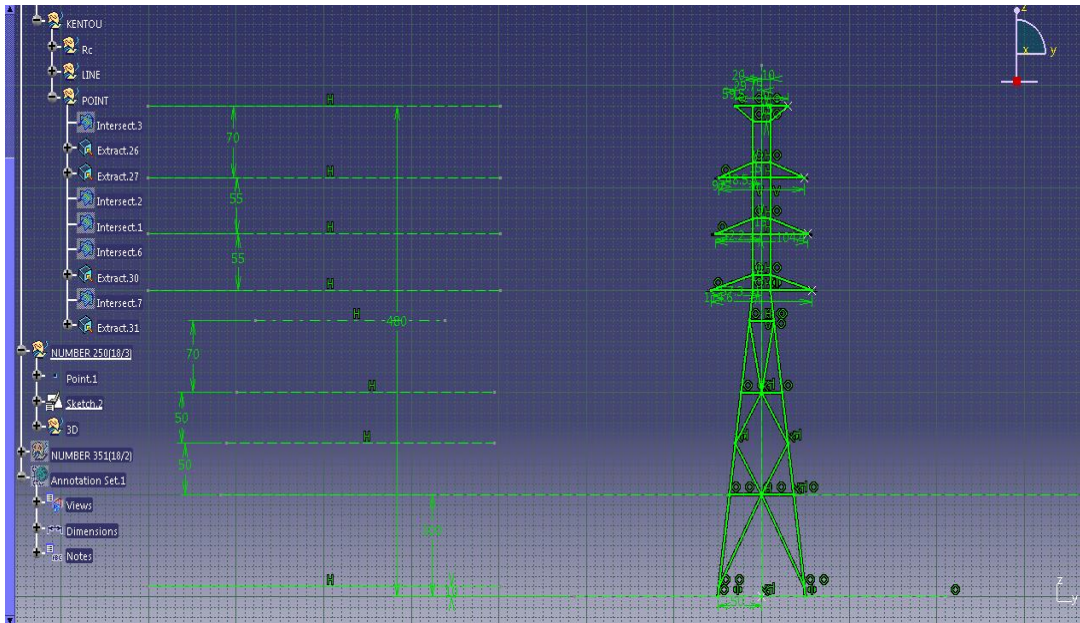
รูปที่ 3.1 เสาแบบเรียงสายส่งแนวตั้ง

3.1 การเกิดวาทไฟผิวย้อนกลับ

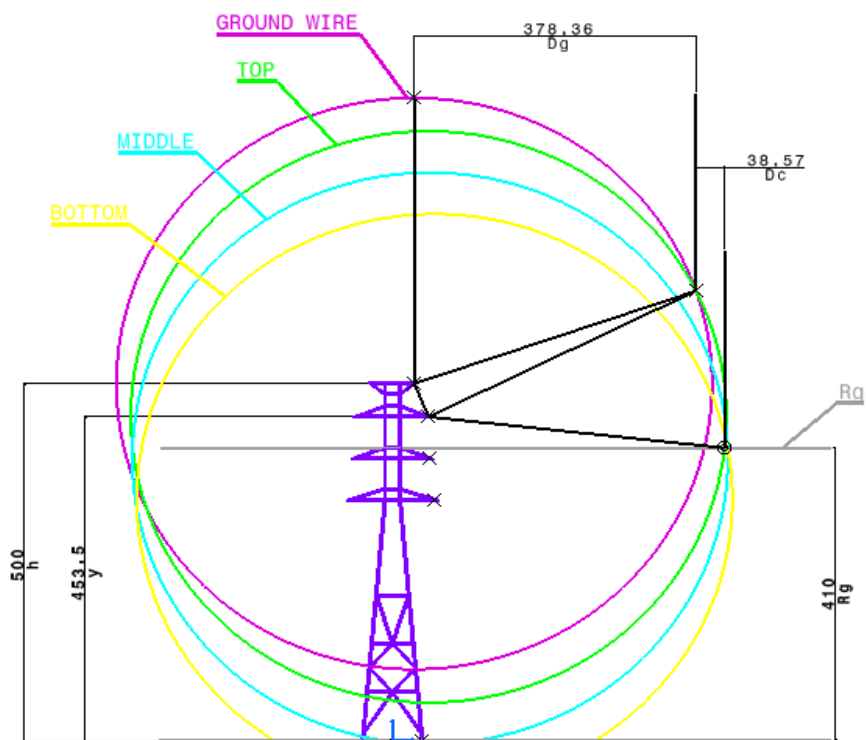
ในส่วนของการหาค่าอัตราการเกิดวาทไฟผิวย้อนกลับ นั้นก็ใช้ทฤษฎีเดียวกันกับเสาเรียงสายส่งแนวนอนเพียงแต่คำนวณเพิ่มออกเป็นเท่านั้นเอง เพราะฉะนั้นตัวแปรที่ทำให้ค่าอัตราการเกิดวาทไฟผิวย้อนกลับของแต่ละเฟรมมีค่าแตกต่างกันคือ coupling factor นั้นเอง

3.2 การเกิดการป้องกันลัมเหลว

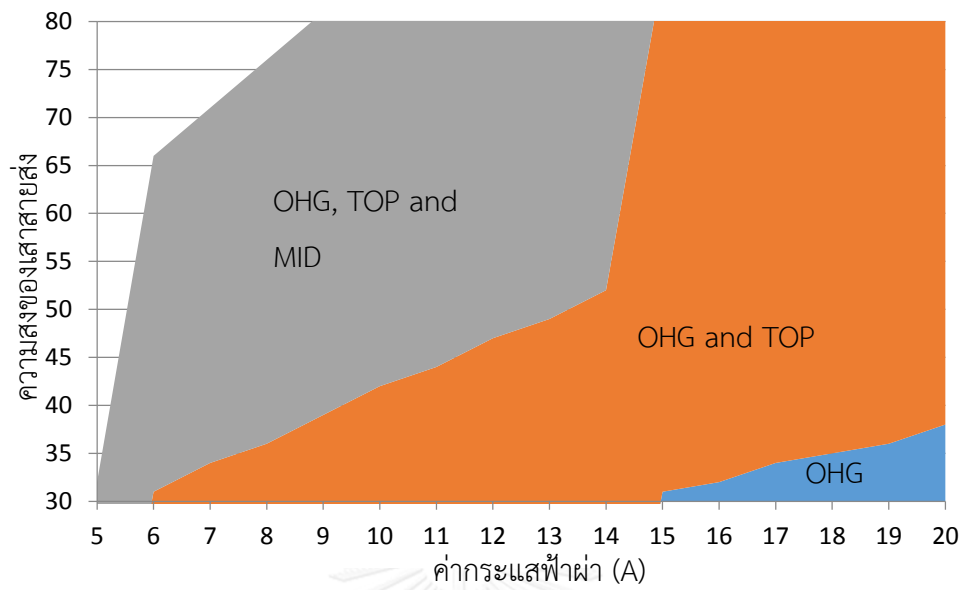
การหาอัตราการเกิดการป้องกันลัมเหลวนั้นจะทำตามทฤษฎีของบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.3 โดยจะอิงข้อมูลเสาเรียงสายส่งแนวตั้ง จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ) และนำมาวาดในโปรแกรม โดยจะออกมาดังรูปที่ 3.2 แล้วจะทำการหาระยะที่อาจก่อให้เกิดการสูญเสียภาพนวนของแต่ละเฟสออกมาดังรูปที่ 3.3 โดยจะทำออกมาเป็น 3 ทฤษฎีตามตารางที่ 2.1



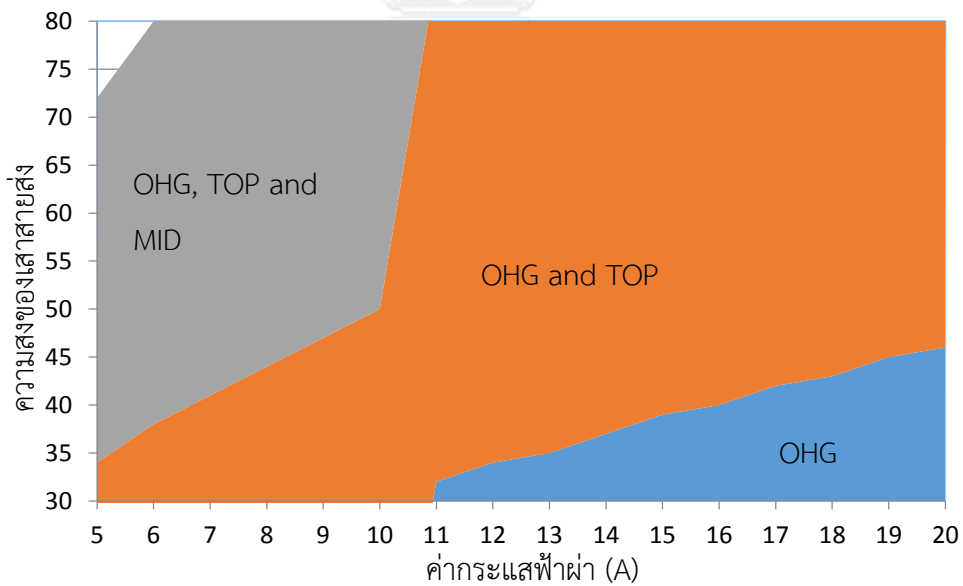
รูปที่ 3.2 ภาพเสาจำลองจากการไฟฟ้าผลิตแห่งประเทศไทย



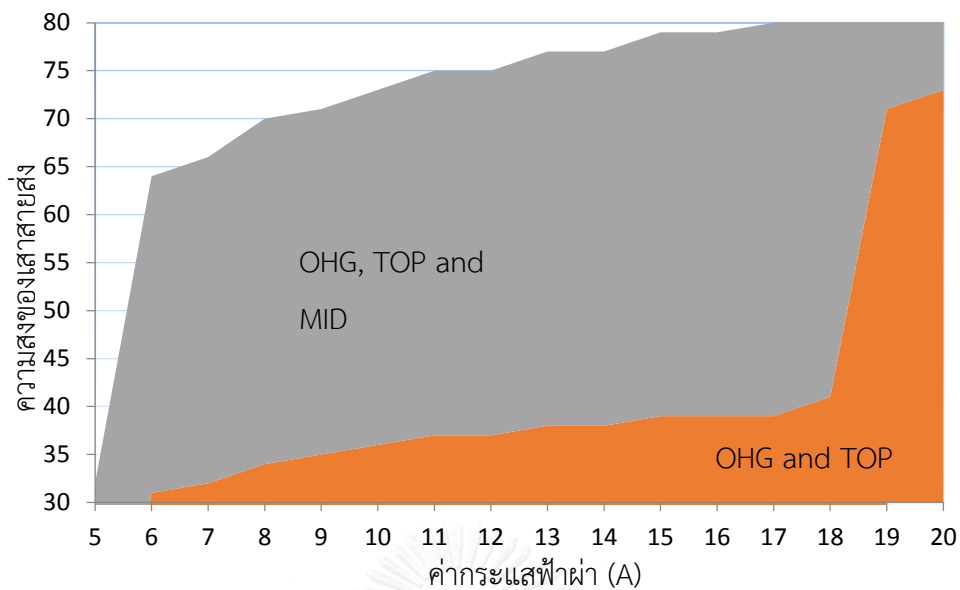
รูปที่ 3.3 แสดงระยะที่อาจก่อให้เกิดการเกิดการป้องกันลัมเหลว



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบโอกาสในการเกิดฟ้าผ่าลงบนทั้ง 3 เฟส โดยใช้สมการของ Brown และ Whitehead



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบโอกาสในการเกิดฟ้าผ่าลงบนทั้ง 3 เฟส โดยใช้สมการของ Love



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบโอกาสในการเกิดฟ้าผ่าลงบนทั้ง 3 เฟส โดยใช้สมการของ IEEE-1992

สำหรับรูปที่ 3.4, 3.5 และ 3.6 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบโอกาสในการเกิดฟ้าผ่าลงบนสายป้องกัน (OHG), เฟสบน (TOP), เฟสบน และเฟสกลาง (MID) และฟ้าผ่าลงบนทุกเฟสของทั้ง 3 ทฤษฎีตามลำดับ กราฟทั้งสามรูปจะมีลักษณะเหมือนกัน คือ เมื่อกระแสฟ้าผ่ามีค่าสูงขึ้น โอกาสในการเกิดการป้องกันล้มเหลวก็จะลดน้อยลง หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งได้ว่าหากกระแสฟ้าผ่ามีค่าต่ำ ๆ ฟ้าผ่าอาจจะมีโอกาสผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้าได้

จากนั้นนำข้อมูล และกราฟแสดงผลเหล่านี้มาเป็นการอ้างอิงของการทำโปรแกรมจำลอง สำหรับเรียงสายส่งแนวตั้ง

บทที่ 4

โปรแกรมการคำนวณ

โปรแกรมการคำนวณนั้นจะแบ่งเป็น 2 โปรแกรมได้แก่ โปรแกรมการคำนวณของเสาสายส่งเสาแบบเรียงสายส่งแนวนอนและโปรแกรมการคำนวณเสาแบบเรียงสายส่งแนวตั้ง

4.1 โปรแกรมการคำนวณของเสาสายส่งเสาแบบเรียงสายส่งแนวนอน

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของการหาค่าช่วงเวลาที่เกิดแรงดันเกินในเสาเรียงสายส่งแนวนอนนั้นจะใช้ทฤษฎีตามหัวข้อในบทที่ 2 ในการหาเป็นหลักโดยรูปแบบของโปรแกรมคำนวณจะออกมาดังรูปที่ 4.1

The screenshot shows a software interface for calculating lightning protection for horizontal towers. It is divided into several sections:

- General information:** Includes input fields for Substation voltage (kV), Lightning current (kA), Single/Double ground wire, Spacing between ground wire (m), Measure footing resistance (ohm), Surge impedance of ground wire (ohm), Surge impedance of conductor (ohm), Soil resistivity (ohm), Length of the line (km), Ground wire height (m), Phase conductor height (m), Ground flash density (flash/sq.km - years), and Span length (km).
- Back flashover:** Includes input fields for CFO (Critical flashover) (kV) and Coupling factor, with a Calculate button.
- Shielding failure rate:** Includes an input field for Shielding angle (degree) and a Calculate button.
- Theory:** Includes checkboxes for Brown and Whitehead, IEEE-1992, and Love.
- horizontal tower results:** Displays calculated values for Number of flashes to ground wire, Back flashover rate, Shielding failure rate, Shielding failure flashover rate, Mean time between failure, and The perfect shielding angle.

รูปที่ 4.1 ลักษณะของโปรแกรมคำนวณสำหรับเสาเรียงสายส่งแนวนอน

โดยในโปรแกรมจำลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ส่วนข้อมูลทั่วไป จะอยู่ในกรอบที่ชื่อว่า “general information” (กรอบสีแดง) ใช้สำหรับป้อนค่าต่าง ๆ ที่เป็นข้อมูลของเสาไฟฟ้าแรงสูงใช้สำหรับการหาค่าช่วงเวลาที่เกิดแรงดันเกิน โดยค่าทั่วไปต่าง ๆ จะมีดังต่อไปนี้

- ค่าแรงดันของสายส่ง (substation voltage)
 - ค่ากระแสของฟ้าผ่า
 - ชนิดของสายป้องกัน(ชนิดคู่ หรือชนิดเดี่ยว)
 - ค่าความต้านทานดิน
 - ค่าแรงดันเสิร์จของสายส่งไฟฟ้า และสายป้องกัน
 - ค่าความสูงของสายไฟฟ้า และสายป้องกัน
 - ค่าตัวแปรคู่ควบ (coupling factor)
 - ค่ามุมป้องกัน
 - ค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า
 - ค่าระยะห่างระหว่างเสาสายส่ง
 - ค่า soil resistivity
 - ค่าวาบไฟผิววิกฤต
 - ค่าความยาวของสายส่ง
2. ส่วนทฤษฎีจะอยู่ในกรอบที่ชื่อว่า “Theory” (กรอบสี่เหลี่ยม) ข้อมูลในส่วนของกรอบสามารถเลือกทฤษฎีของนักวิจัยท่านอื่นได้เพื่อที่จะสามารถประมาณค่าที่ออกมาได้หลากหลาย
3. ส่วนแสดงผลจะอยู่ในกรอบที่ชื่อว่า “Horizontal tower” (กรอบสี่ฟ้า) ส่วนของค่าที่คำนวณออกมาแล้วจะแสดงผลในช่องสี่เหลี่ยมมุมขวาล่างของโปรแกรมจำลองโดยค่าที่แสดงมีดังนี้ตามลำดับบนลงล่าง
- 1) **Number of flash to the line** แสดงค่าประมาณคร่าว ๆ ของการเกิดฟ้าผ่าลงในสายส่งที่เกิดขึ้นโดยใช้ค่าความเข้มข้นของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นมาคำนวณมีหน่วยเป็น (flash/100km-year)
 - 2) **Back flashover rate** แสดงค่าอัตราการเกิดการวาบไฟผิวย้อนกลับ จากค่าที่ทำการป้อนค่าเข้าไปมีหน่วยเป็น (flashover/100km-year)
 - 3) **Shielding failure rate** แสดงค่าอัตราการเกิดการป้องกันล้มเหลว จากค่าที่ป้อนเข้าไปมีหน่วยเป็น (flash/100km-year)

- 4) **Shielding failure flashover rate** แสดงค่าอัตราการเกิดการป้องกันล้มเหลวจนเกิดวาทไฟตามผิว จากค่าที่ป้อนเข้าไปมีหน่วยเป็น (flashover/100km-year)
- 5) **MTBF ; Mean Time Between Failure** แสดงเวลาเฉลี่ยที่จะเกิดความเสียหายมีหน่วยเป็น (years)
- 6) **Perfect shielding angle** แสดงค่ามุมป้องกันที่สมบูรณ์แบบ ที่สามารถทำให้ค่าการเกิด Shielding failure rate และ Shielding failure flashover rate มีค่าเท่ากับศูนย์ ในการคำนวณมีหน่วยเป็น (degree)

4.2 โปรแกรมการคำนวณของเสาสายส่งแบบเรียงสายส่งแนวตั้ง

The screenshot shows a software interface for calculating lightning performance for vertical towers. It is divided into three main sections:

- Vertical tower information:** Contains input fields for Substation voltage (kV), Lightning current (kA), Ground flash density (flash/sq km - years), Ground wire height (m), Spacing between ground wire (m), Top phase conductor height (m), Middle phase conductor height (m), Bottom phase conductor height (m), cross arm length of top/middle/bottom phase (m), Soil resistivity (ohm), Coupling factor of top/middle/bottom phase, Surge impedance of conductor/ground wire (ohm), Measure footing resistance (ohm), CFO (Critical flashover) (kV), Span length (km), and Length of the line (km).
- Theory:** Contains checkboxes for different calculation models: Brown and Whitehead, IEEE-1992, and Love. A 'Calculate' button is located below these options.
- Vertical tower:** Displays the calculated results, including:
 - Number of flashes to ground wire (flash/100km - years)
 - Back flashover rate (top, mid, bot) (flashover/100km - years)
 - Total back flashover rate (flashover/100km - years)
 - Shielding failure rate (top, mid, bot) (flash/100km - years)
 - Shielding failure flashover rate (top, mid, bot) (flashover/100km - years)
 - Total shielding failure flashover rate (flashover/100km - years)
 - Mean time between failure (years)

รูปที่ 4.2 ลักษณะของโปรแกรมคำนวณสำหรับเสาเรียงสายส่งแนวตั้ง

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโปรแกรมคำนวณสำหรับเสาเรียงสายส่งแนวตั้งนั้นจะมีค่าคล้ายคลึงกันกับโปรแกรมคำนวณสำหรับเสาเรียงสายส่งแนวนอนส่วนที่แตกต่างกันได้แก่

- มีค่าตัวแปรคู่ควบให้ป้อนค่าด้วยกันอยู่สามค่า
- สามารถกำหนดขนาดความสูงของแต่ละเฟสได้

- ในส่วนของการแสดงผลนั้นก็จะมีการแสดงผลของการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับทั้งสามเฟส และการเกิดการป้องกันลัมเหลวทั้งแบบธรรมดาและเกิดวาบไฟตามผิวทั้งสามเฟส



บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการใช้โปรแกรม

5.1 ผลการใช้โปรแกรม

ในการทดลองและวิเคราะห์ผลการใช้โปรแกรมคำนวณนั้นจะทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้

5.1.1 เสาแบบเรียงสายส่งแนวนอน

- ค่าความสูงของสายดินป้องกันเท่ากับ 30 m และความสูงของสายส่งไฟฟ้าที่ 24 m
- หากเลือกสายดินป้องกันเป็นแบบสายคู่ให้มีระยะห่างระหว่างสายเท่ากับ 5 m
- ค่าแรงดันที่สถานีไฟฟ้าเท่ากับ 230 kV
- ค่า CFO เท่ากับ 960 kV
- ค่าความต้านทานเสิร์จของสายดินป้องกันเท่ากับ 400 ohm
- ค่าความต้านทานเสิร์จของสายส่งไฟฟ้าเท่ากับ 250 ohm
- ค่าความต้านทานดินกระแสต่ำเท่ากับ 20 ohm
- ค่า coupling factor เท่ากับ 0.3
- ค่า soil resistivity เท่ากับ 1000 ohm
- ระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 300 m
- เสาสายส่งยาว 100 km
- ค่ากระแสฟ้าผ่าเท่ากับ 10 A
- ค่ามุมป้องกันเท่ากับ 25 degree
- ค่า ground flash density เท่ากับ 4 flash/sq.km-years

จากนั้นจะทำการคำนวณค่าต่าง ๆ ซึ่งจะให้ผลออกมา คือ ค่าจำนวนฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในสายป้องกันทั้งหมด, ค่า BFR, ค่า SFR, ค่า SFFOR, ค่า MTBF และค่า perfect shielding angle จะมีค่าเท่ากับ

15.14 flash/100km-year, 1.11 flashover/100km-year, 0.23 flash/100km-year, 0.15 flashover/100km-year, 87.49 years และ 13.05 degree ดังรูปที่ 5.1

รูปที่ 5.1 ผลการคำนวณของโปรแกรมสำหรับเสาแบบเรียงสายส่งแนวนอน

และเมื่อลองทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จะทำให้ค่าของ MTBF เปลี่ยนไป ซึ่งตามหัวข้อที่ 2.7 สมการที่ 2.64 จะเห็นว่าค่าของ MTBF จะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการเกิดการวาบไฟผิวย้อนกลับ และการเกิดการป้องกันลัมเหลวจนเกิดการวาบไฟผิวดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างที่เกี่ยวข้องจะมีดังนี้ สำหรับการเกิดการวาบไฟผิวย้อนกลับ

- ค่าความต้านทานดิน, ค่า coupling factor, ค่าความต้านทานเสิร์จของสายดินป้องกัน และ ระยะห่างระหว่างเสา จะแปรผันตรงกับค่าวาบไฟตามผิวย้อนกลับ
- ค่า CFO และค่าระยะห่างระหว่างสายดินป้องกันจะแปรผกผันกับค่าวาบไฟตามผิวย้อนกลับ
- ค่าระยะเผชชัญจะมีผลให้มีตัวเลขแตกต่างกันไปตามแต่ละทฤษฎี

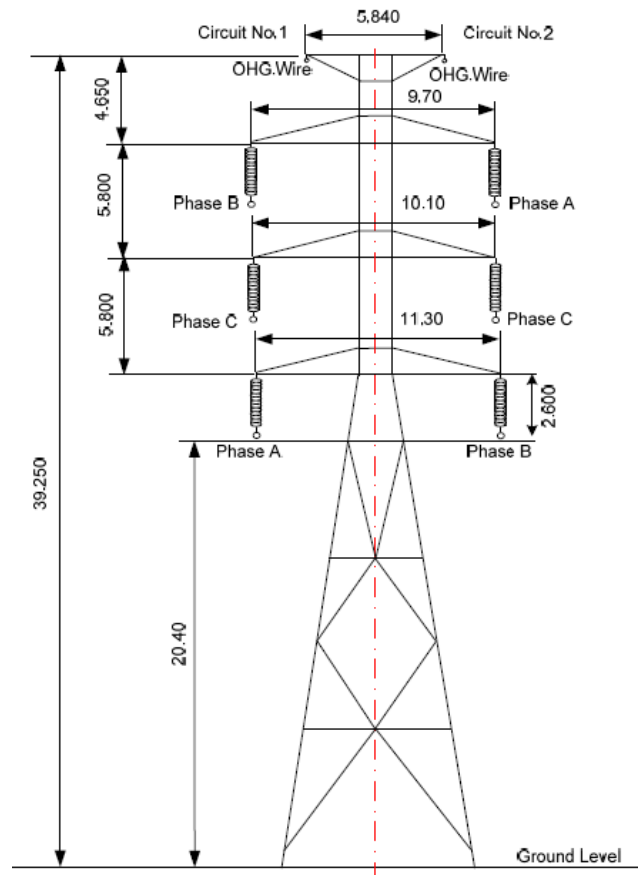
สำหรับการเกิดการป้องกันลัมเหลวและการป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิว

ความต้านทานเสิร์จของสายส่งไฟฟ้า, ระยะห่างระหว่างเสา และค่าระยะห่างระหว่างสายดินป้องกันจะแปรผันตรงกับการเกิดการป้องกันลัมเหลว

- ค่า CFO และค่ามุมป้องกันจะแปรผกผันกับการเกิดการป้องกันลัมเหลว
- ค่าระยะเผชชัญจะมีผลให้มีตัวเลขแตกต่างกันไปตามแต่ละทฤษฎี

5.1.2 เสาแบบเรียงสายส่งแนวตั้ง

- ค่าความสูง และความยาวของแขน (crossarm length) ของเสาแบบเรียงสายส่งแนวตั้งจะใช้ตามแบบแปลนของโรงไฟฟ้าแม่เมาะของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยตามรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างของเสาไฟฟ้าแรงสูงที่ใช้ในการคำนวณ

- มีระยะห่างระหว่างสายป้องกันเท่ากับ 7 m
- ค่าแรงดันที่สถานีไฟฟ้าเท่ากับ 230 kV
- ค่า CFO เท่ากับ 1200 kV
- ค่าความต้านทานเสิร์จของสายดินป้องกันเท่ากับ 400 ohm
- ค่าความต้านทานเสิร์จของสายส่งไฟฟ้าเท่ากับ 250 ohm
- ค่าความต้านทานดินกระแสต่ำเท่ากับ 20 ohm
- ค่า coupling factor ที่เฟสบน, กลาง และล่าง เท่ากับ 0.3, 0.4 และ 0.5 ตามลำดับ

- ค่า soil resistivity เท่ากับ 1000 ohm
- ระยะห่างระหว่างเสาเท่ากับ 300 m
- เสาสายส่งยาว 100 km
- ค่ากระแสฟ้าผ่าเท่ากับ 10 A
- ค่า ground flash density เท่ากับ 4 flash/sq.km-years

ซึ่งจะได้ผลออกมาดังรูปที่ 5.3

| Vertical tower | | |
|----------------------------------------|-----------|-------------------------|
| Number of flashes to ground wire | 30.200450 | flash/100km - years |
| Back flashover rate (top) | 0.3026140 | flashover/100km - years |
| Back flashover rate (mid) | 0.1559937 | flashover/100km - years |
| Back flashover rate (bot) | 0.0660319 | flashover/100km - years |
| Total back flashover rate | 0.5246397 | flashover/100km - years |
| Shielding failure rate (top) | 0.0302670 | flash/100km - years |
| Shielding failure rate (mid) | 0 | flash/100km - years |
| Shielding failure rate (bot) | 0 | flash/100km - years |
| Shielding failure flashover rate (top) | 0.0151792 | flashover/100km - years |
| Shielding failure flashover rate (mid) | 0 | flashover/100km - years |
| Shielding failure flashover rate (bot) | 0 | flashover/100km - years |
| Total shielding failure flashover rate | 0.0151792 | flashover/100km - years |
| Mean time between failure | 205.83030 | years |

รูปที่ 5.3 ผลการคำนวณของโปรแกรมสำหรับเสาแบบเรียงสายส่งแนวตั้ง

เนื่องจากตัวแปรในการคำนวณต่าง ๆ ของโปรแกรมสำหรับเสาแบบเรียงสายส่งแนวตั้งนั้น เหมือนกับเสาแบบเรียงสายส่งแนวนอนดังนั้นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่า MTBF จึงเหมือนกัน ดังนั้นในการปรับเปลี่ยนค่าจึงได้ผลเหมือนกัน ในส่วนตัวแปรที่ต่างกันได้แก่ จากการป้อนค่ามุมป้องกันจะเปลี่ยนเป็นป้อนค่าความสูงและความยาวของแขนเสาสายส่ง (crossarm length) เพื่อความยืดหยุ่นในการกำหนดรูปแบบเสา เพราะฉะนั้นจึงได้ผลแบบเดียวกันนั่นคือเมื่อความยาวของแขนยาวขึ้นจะทำให้

ให้มุมที่จะใช้ป้องกันเพิ่มมากขึ้นจนอาจเลยระยะมุมที่ใช้ป้องกันจึงทำให้มีโอกาสเกิดการป้องกัน
ล้มเหลวเพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งการคำนวณ และค่าที่แสดงออกมาเป็นไปตามทฤษฎี



บทที่ 6

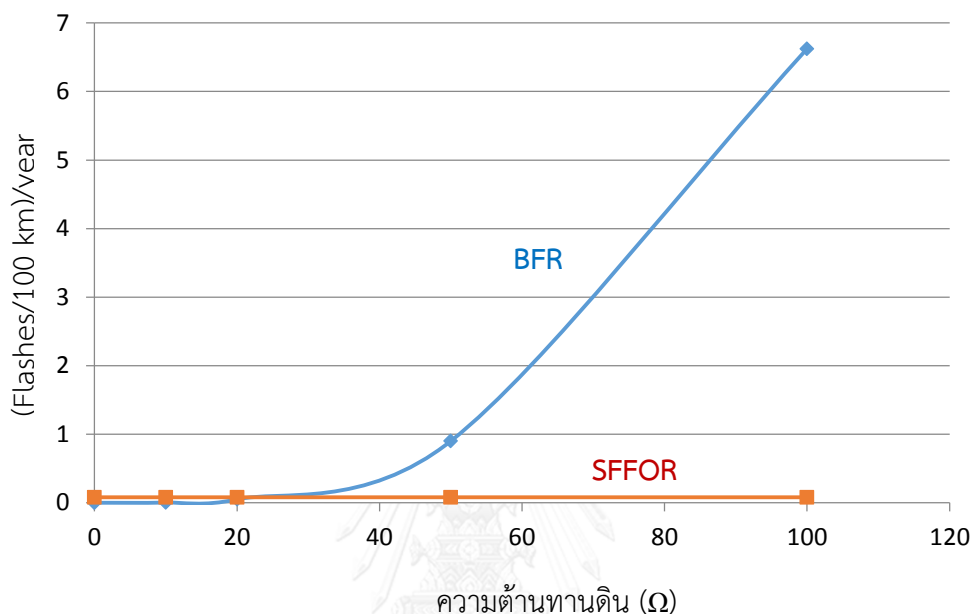
บทสรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 บทสรุป

งานวิจัยฉบับนี้จะมุ่งเน้นไปที่การสร้างโปรแกรมการคำนวณสำหรับเสาไฟฟ้าแรงสูงออกมา เพื่อเป็นการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแรงดันเกินจนทำให้เกิดความเสียหายในหลาย ๆ รูปแบบได้แก่ การเกิดวาทไฟผิวย้อนกลับและการเกิดการป้องกันลัมเพลว ความเสียหายที่เกิดขึ้นนั้น เป็นความเสียหายที่มีโอกาสเกิดขึ้นบ่อยครั้งเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงในเสาไฟฟ้าแรงสูงหรือสายส่งไฟฟ้า เมื่อลองทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามบทที่ 5 หัวข้อที่ 5.1.2 เป็นค่าหลักแล้วเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ทีละค่าโดยหากทำการศึกษาพารามิเตอร์ค่าไหนแล้วพารามิเตอร์อื่น ๆ จะมีค่าเท่ากับค่าหลัก ยกตัวอย่างเช่น หากศึกษาผลของค่าความต้านทานดินก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานดินเพียงอย่างเดียวโดยที่ค่าอื่น ๆ จะยังคงค่าหลักเดิม และเมื่อทำการศึกษาค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ ก็ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานดินกลับมาเป็นค่าหลักก่อนแล้วจึงทำการเปลี่ยนแปลงค่าอื่น ๆ ต่อไปเพื่อสังเกตผล โดยสามารถแจกแจงเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1) ความต้านทานดิน

ความต้านทานดินจะมีผลต่อการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับเพียงอย่างเดียวดังรูปที่ 6.1 หากมีค่าความต้านทานดินมากอัตราการเกิดก็จะสูงขึ้นเนื่องจากพลังงานจากการเกิดฟ้าผ่าไม่สามารถถ่ายเทลงสู่พื้นดินได้



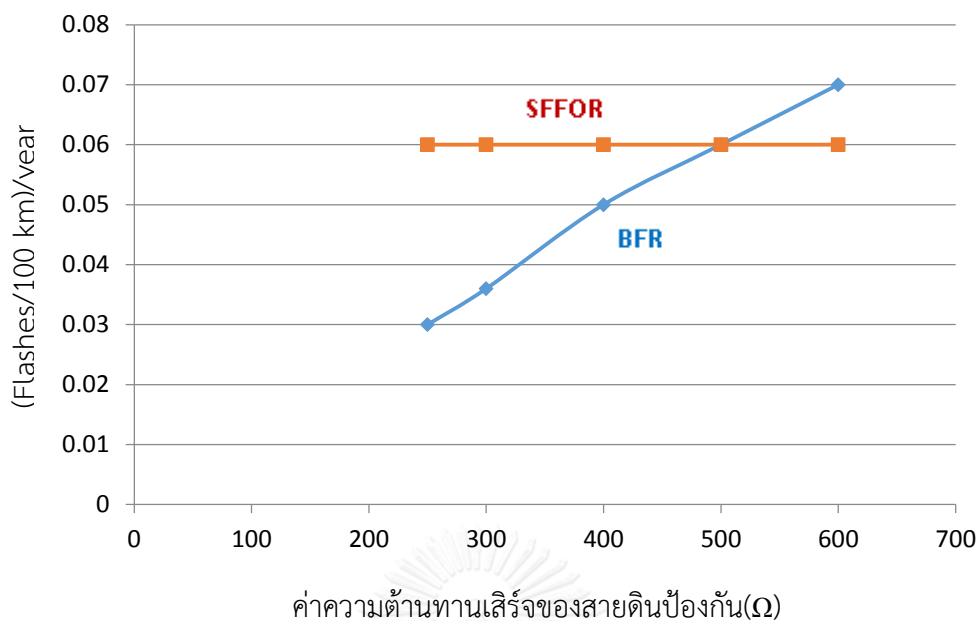
รูปที่ 6.1 กราฟแสดงค่าความต้านทานดินที่มีผลต่อการเกิด BFR และ SFFOR

2) Coupling factor

Coupling factor จะมีผลต่อการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ หากมีค่า Coupling factor มากอัตราการเกิดก็จะสูงขึ้น

3) ความต้านทานเสิร์จของสายดินป้องกัน

ความต้านทานเสิร์จของสายดินป้องกัน จะมีผลต่อการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ หากมีค่าสูงอัตราการเกิดก็จะสูงขึ้นดังรูปกราฟที่ 6.2 โดยจะสังเกตเห็นได้ว่าค่าของความต้านทานเสิร์จของสายดินป้องกันจะไม่มีผลกระทบมากนักเมื่อค่าค่าเปลี่ยนแปลงมาก ๆ



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงค่าความต้านทานเสิร์จของสายดินป้องกัน
ที่มีผลต่อการเกิด BFR และ SFFOR

4) ความยาวของแขนของเสาไฟฟ้าแรงสูง

ความยาวของแขนของเสาไฟฟ้าแรงสูง จะมีผลต่อการเกิดการป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิว หากเฟสไหนที่มีความยาวมากกว่าเฟสอื่นมาก ๆ จะทำให้มีโอกาสในการเกิดการป้องกันลัมเหลวในเฟสนั้น ๆ เพิ่มขึ้น

5) ระยะห่างระหว่างเสา

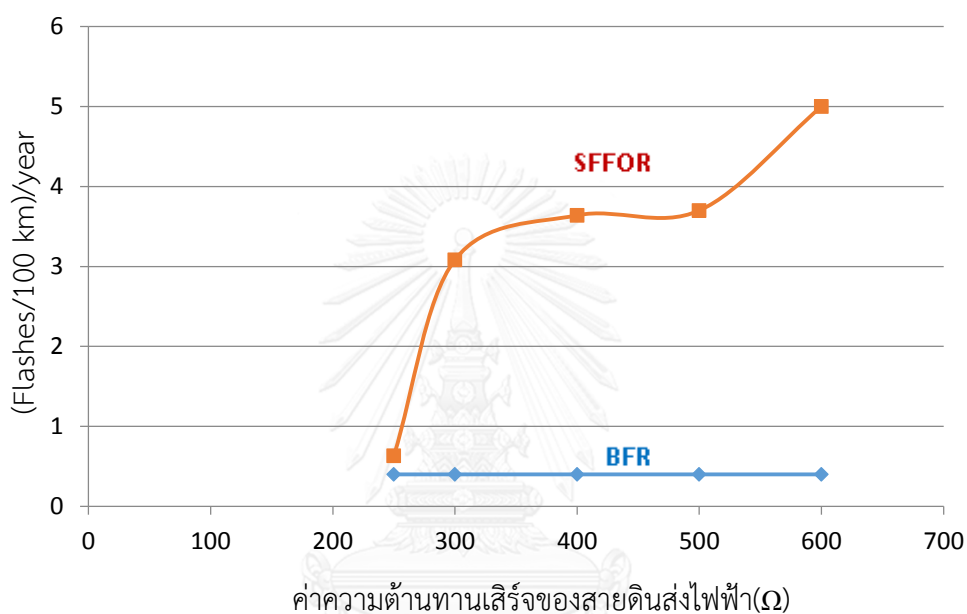
ระยะห่างระหว่างเสา จะมีผลต่อการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ และการเกิดการป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิวหากมีค่ามากอัตราการเกิดก็จะสูงขึ้น

6) ค่าระยะเผชิญ

ค่าระยะเผชิญ มีผลในส่วนของ การคำนวณต่อการเกิดการป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิว ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันไปตามแต่ละทฤษฎี

7) ความต้านทานเสิร์จของสายส่งไฟฟ้า

ความต้านทานเสิร์จของสายส่งไฟฟ้า จะมีผลต่อการเกิดการป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิวหากมีค่ามากค่าอัตราการเกิดการป้องกันลัมเหลวก็จะสูงตามดังรูปกราฟที่ 6.3 โดยตามรูปกราฟที่ 6.3 ที่ค่าความต้านทานเสิร์จของสายส่งไฟฟ้าประมาณ 400-500 โอห์ม กราฟจะเสถียรเนื่องจากจะมีโอกาสเกิดฟ้าผ่าที่เฟสบนเพียงเฟสเดียว แต่เมื่อค่าความต้านทานเสิร์จเพิ่มขึ้นจะมีโอกาสที่ฟ้าผ่าจะผ่าที่เฟสอื่น ๆ ด้วย



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงค่าความต้านทานเสิร์จของสายส่งไฟฟ้า
ที่มีผลต่อการเกิด BFR และ SFFOR

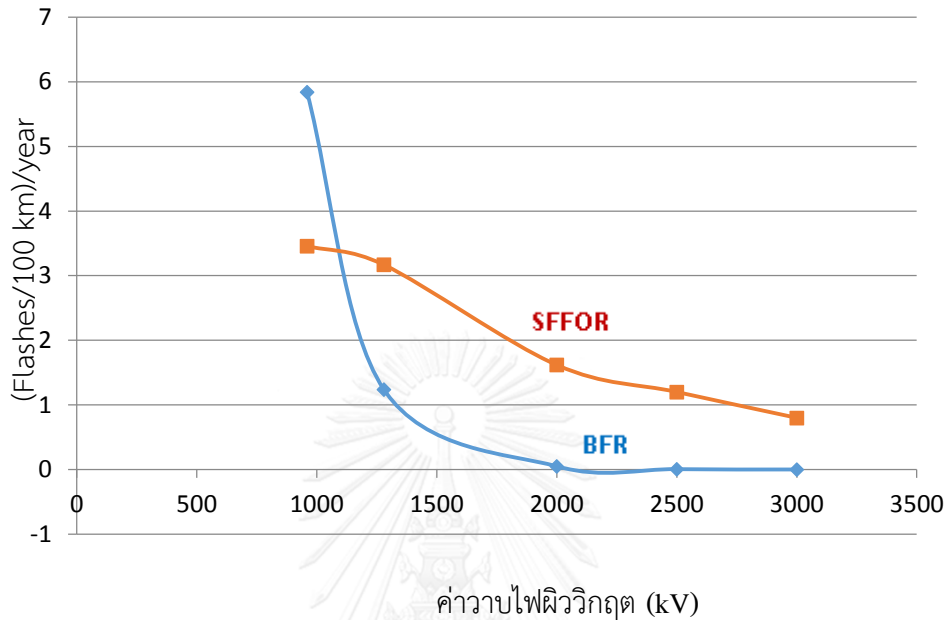
8) ค่า CFO

ค่า CFO จะมีผลต่อการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ และการเกิดการป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิวหากมีค่าน้อยอัตราการเกิดก็จะสูงขึ้นดังรูปที่ 6.4

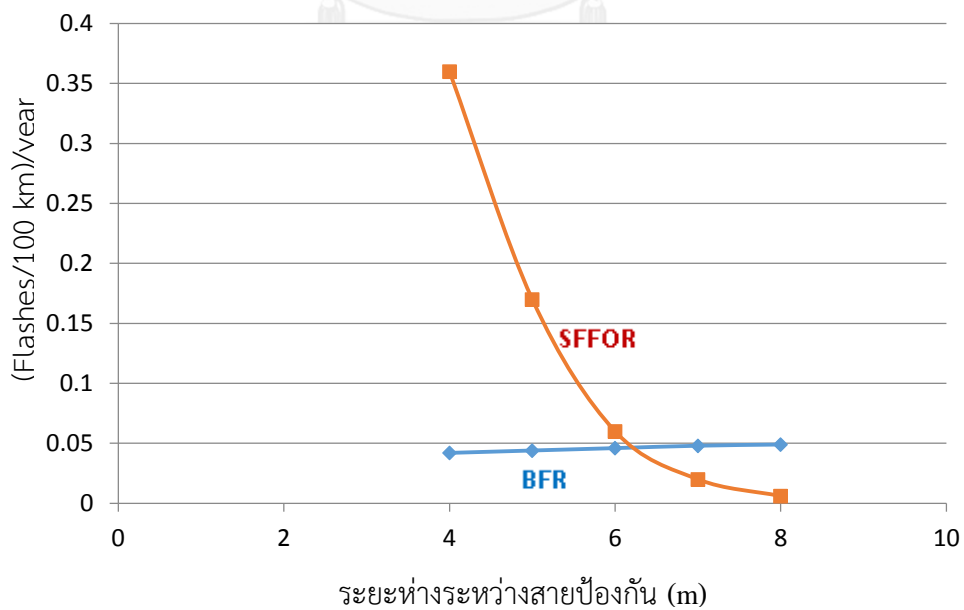
9) ระยะห่างระหว่างสายป้องกัน

ระยะห่างระหว่างสายป้องกัน จะมีผลต่อการเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับ และการเกิดการป้องกันลัมเหลวจนเกิดวาบไฟตามผิวโดยหากระยะห่างระหว่างสายป้องกันมีค่าน้อยจะทำให้เกิดการป้องกัน

ลัมเหลวสูงขึ้นเนื่องจากจะมีโอกาสที่ฟ้าจะผ่าลงบนสายส่งไฟฟ้ามากขึ้น แต่หากระยะห่างระหว่างสายป้องกันมีค่าสูงจะทำให้การเกิดวาบไฟผิวย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากโอกาสที่ฟ้าผ่าลงบนสายป้องกันมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงค่าวาบไฟผิวกฤตที่มีผลต่อการเกิด BFR และ SFFOR



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงค่าระยะห่างระหว่างสายป้องกันที่มีผลต่อการเกิด BFR และ SFFOR

6.2 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการปรับปรุง พัฒนาออกแบบ และการสร้างโปรแกรมการคำนวณ ตลอดจนการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไปในอนาคตมีดังนี้

1. ตามรูปภาพโปรแกรมคำนวณที่ 4.1 และ 4.2 จะพบว่ามีส่วนการของค่าระยะเฟสเชิง 3 สมการ ซึ่งค่าสมการนี้สามารถเพิ่มจำนวนได้เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น
2. โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบโปรแกรมการคำนวณจะใช้โปรแกรม Visual Studio 2008 ซึ่งด้วยข้อจำกัดทางด้านโปรแกรมทำให้ไม่สามารถเขียนสมการที่เป็นสมการอนันต์ หรือสมการไม่รู้จบได้ ดังนั้นหากได้มีการปรับปรุงโปรแกรมเกิดขึ้นจนสามารถเขียนสมการอนันต์ได้จะทำให้สามารถประมาณค่าได้แม่นยำยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] G. E. Brown, and E. R. Whitehead, “Field and Analysis Studies of Transmission Line Sielding-II,” in IEEE Trans. on PA&S, 1996, pp. 617-626.
- [2] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*: CEC press, 1999.
- [3] I. W. Group, “Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines II—updates to Analytical Models,” in IEEE Trans. on Power Delivery, pp. 1254-1267.
- [4] www.oppo.co.th/DocDataBase/PO_knowledge/BroadcastingProtection.pdf.
- [5] C. A. Nucci, “A Survey on CIGRE and IEEE Procedures for the Estimation of Lightning Performance of Overhead Transmission and Distribution Lines,” in Asia-Pacific International Symposium on Electro-magnetic Compatibility(APEMC), Beijing, 2010, pp. 1124-1133.
- [6] K. H. Weck, “The Current Dependence of Tower Footing Resisitance,” in CIGRE 33-88(WG01), 14 IWD, 1998, 33-89(WG01), 7 IWD, 1989.
- [7] C. W. G. 33.01, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines," *Technical Brochure 63*, 1991.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย วิภูวนันต์ ภัคดี เกิดวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ. 2533 จบการศึกษาระดับปริญญาตรี
จาก มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า

