

การเลือกพิกัดของกัณฑ์เสิร์จเพื่อป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 กิโลโวลต์ จากแรงดันเกิน
ฟ้าผ่า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SELECTION OF SURGE ARRESTER RATING FOR PROTECTION OF 115 kV GAS INSULATED
SUBSTATIONS AGAINST LIGHTNING OVERVOLTAGES



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเลือกพิกัดของกั๊บดักเสิร์จเพื่อป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบ ฉนวนแก๊ส 115 กิโลโวลต์ จากแรงดันเกินฟ้าผ่า
โดย	น.ส.อนุสรรา ชนม์ประกาย
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัักษ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สมชาย ทรงศิริ)	

CHULALONGKORN UNIVERSITY

อนุสรณ์ ประกาย : การเลือกพิคัดของกับดักเสิร์จเพื่อป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวน
แก๊ส 115 กิโลโวลต์ จากแรงดันเกินฟ้าผ่า . (SELECTION OF SURGE ARRESTER
RATING FOR PROTECTION OF 115 KV GAS INSULATED SUBSTATIONS
AGAINST LIGHTNING OVERVOLTAGES) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ดร.ชาญณรงค์ บาล
มงคล

ในปัจจุบันการสร้างสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้น เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนอากาศ จะใช้พื้นที่น้อยกว่า ต้องการการบำรุงรักษาน้อยกว่า และมีความเชื่อถือได้สูงกว่า แต่สถานีไฟฟ้าฉนวนแก๊สก็ยังมีโอกาสเผชิญกับแรงดันเกินเนื่องจากฟ้าผ่าที่เข้ามาทางสายส่งไฟฟ้าเช่นเดียวกับสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนอากาศ วิทยานิพนธ์เล่มนี้กล่าวถึงการใช้กับดักเสิร์จในการป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งกับดักเสิร์จพิคัดแรงดัน 96 kV สามารถลดอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าให้มีค่าน้อยกว่าพิคัดแรงดัน 108 kV ได้ อย่างไรก็ตามการติดตั้งกับดักเสิร์จที่จุดเชื่อมต่อระหว่างสายส่งเหนือศีรษะและสายเคเบิลใต้ดินเพียงตำแหน่งเดียวอาจไม่เพียงพอสำหรับการป้องกันสถานีไฟฟ้าจากแรงดันเกินฟ้าผ่าได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีศึกษาความยาวของสายเคเบิลใต้ดินที่เชื่อมต่อระหว่างสายส่งเหนือศีรษะและสถานีไฟฟ้าที่อาจจะต้องมีการติดตั้งกับดักเสิร์จในตำแหน่งหน้าสถานีไฟฟ้าเพิ่มเติม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5970355521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: surge arrester, gas insulated substation, lightning overvoltage, EMT
 Anusara Chonprakai : SELECTION OF SURGE ARRESTER RATING FOR
 PROTECTION OF 115 kV GAS INSULATED SUBSTATIONS AGAINST LIGHTNING
 OVERVOLTAGES . Advisor: Channarong Banmonkol

Nowadays there is increasing popularity of gas insulated substation (GIS) compared with air insulated substation (AIS). Because it needs less space and maintenance, and has more reliability. GIS may be attacked by lightning overvoltages similar to AIS but it shows different behavior. This thesis deals with using surge arresters for 115 kV GIS protection against lightning overvoltages. The simulation with EMT shows that 96 kV surge arresters can reduce lightning failure rate of GIS more than using 108 kV ones. However, installation of surge arresters at only the overhead-underground cable junction may not sufficiently protect GIS. Especially for the case of long underground cable connected between overhead line and GIS, it may be necessary to install surge arresters in front of GIS too.



Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร. ชาญณรงค์ บาลมงคล อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ได้สละเวลาและให้ความกรุณาช่วยเหลืออย่างดียิ่งในการให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์มาด้วยดีตลอด รวมทั้งกรุณาตรวจสอบแก้ไขจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ สมบูรณ์เสร็จเรียบร้อย นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบไปด้วย ผศ.ดร.อาจารย์คมสัน เพ็ชรรักษ์ และ ดร.สมชาย ทรงศิริ ที่ได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขและให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลงไปได้ด้วยดี ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยสนับสนุนผู้ทำวิจัยในทุกๆ ด้านด้วยดีเสมอมา ตลอดจน ขอบขอบคุณทุกๆ ท่านที่ไม่ได้เอ่ยนาม ที่อยู่เบื้องหลังในความสำเร็จครั้งนี้ด้วย

อนุสรฯ ชนม์ประกาย



สารบัญ

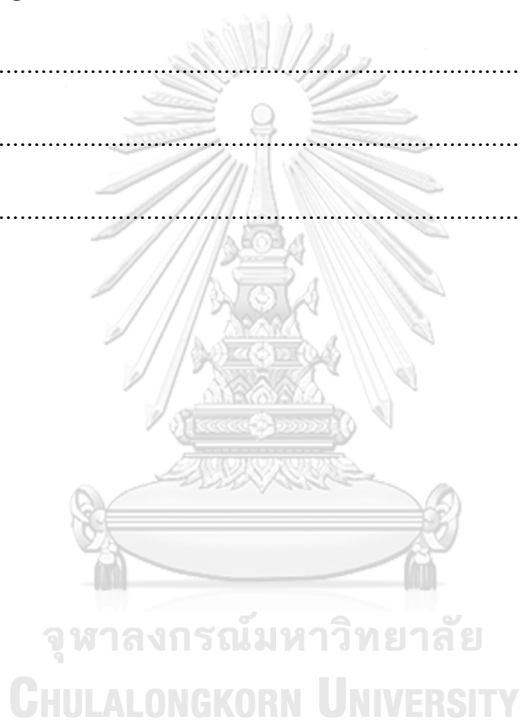
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์.....	3
1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2.....	6
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ไฟฟ้า.....	6
2.1.1 พารามิเตอร์ไฟฟ้า.....	7
2.1.2 ความหนาแน่นของการเกิดไฟฟ้า.....	10
2.2 แรงดันเกินในระบบสายส่ง.....	11

2.2.1 แรงดันเกินจากสาเหตุภายใน	11
2.2.2 แรงดันเกินจากสาเหตุภายนอก	12
2.3 การวาบไฟที่ผิวย้อนกลับ (Back flashover : BFO)	13
2.4 สถานีไฟฟ้า (Substation)	16
2.5 การป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่า	18
2.5.1 การป้องกันแรงดันเกินด้วยกั๊บดักเสิร์จ	18
2.5.1.1 กั๊บดักเสิร์จชนิด SiC	18
2.5.1.2 กั๊บดักเสิร์จชนิด MO (ZnO).....	19
2.5.2 คุณสมบัติของกั๊บดักเสิร์จ.....	19
2.5.2.1 ลักษณะเส้นแรงดัน-กระแส (U-I) ของกั๊บดักเสิร์จ.....	19
2.5.2.2 แรงดันใช้งานต่อเนื่อง.....	19
2.5.2.3 พิกัดกระแสตีสชาร์จ	20
2.5.2.4 พลังงาน	21
2.5.2.5 แรงดันคงเหลือ (residual voltage : U_{res})	21
2.5.2.6 พิกัดแรงดันของกั๊บดักเสิร์จ (rating of surge arrester : U_r).....	22
2.5.3 การประสานสัมพันธ์การฉนวน (insulation coordination).....	22
2.5.3.1 การเลือกระดับ MCOV หรือ ค่า U_c [4].....	23
2.5.3.2 การเลือกพิกัดแรงดันของกั๊บดักเสิร์จ	23
2.5.2.3 ระดับแรงดันป้องกัน U_p [4]	25
2.6 การบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง.....	25
2.6.1 หลักการปฏิบัติงานบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง.....	26
2.6.2 เศรษฐศาสตร์การบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง	27
บทที่ 3	28
การคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ และการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้า.....	28

3.1	แบบจำลองเสาสูง.....	29
3.2	แบบจำลองตัวต้านทานฐานเสา.....	30
3.3	แบบจำลองสายส่ง.....	31
3.4	แบบจำลองสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส.....	33
3.5	แบบจำลองกับดักเสิร์จ.....	33
3.6	แบบจำลองการวาบไฟที่พวงลูกถ้วย.....	35
3.6.1	แบบจำลองลิตเตอร์.....	36
3.6.2	แบบจำลองการวาบไฟที่พวงลูกถ้วยที่ใช้งานวิจัย.....	38
3.7	แบบจำลองฟ้าผ่า.....	39
3.7.1	แบบจำลองฟ้าผ่าที่ใช้ในการจำลองการเกิดการวาบไฟที่ฉนวนย้อนกลับ.....	39
3.7.2	แบบจำลองฟ้าผ่าที่ใช้ในการจำลองการหาความยาวสายเคเบิลวิกฤต.....	40
บทที่ 4	.....	43
ขั้นตอนการจำลองและการจำลอง	.....	43
4.1	ขั้นตอนการจำลอง.....	43
4.1.1	การเลือกขนาดแรงดันพิกัดของกับดักเสิร์จในโปรแกรม EMTP.....	43
4.1.1.1	การเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จโดยพิจารณาพารามิเตอร์ในระบบไฟฟ้า.....	43
4.1.1.2	การเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จโดยพิจารณาจากแรงดันเกินชั่วคราว.....	44
4.1.1.3	แบบจำลองกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV.....	47
4.1.1.4	แบบจำลองกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV.....	47
4.1.2	กำหนดจุดติดตั้งกับดักเสิร์จ.....	48
4.1.2.1	ติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าสายเคเบิลใต้ดิน.....	48
4.1.2.2	ติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า.....	49
4.1.2.3	ติดตั้งกับดักเสิร์จทั้งที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินและที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า.....	50
4.1.3	สร้างแบบจำลอง.....	50

4.1.4	กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง	52
4.1.5	กำหนดจุดวัดแรงดันเกินฟ้าผ่า	52
4.1.6	กำหนดพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จและตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จ	52
4.1.7	กำหนดขนาดค่าความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า	52
4.2	การจำลอง	53
4.2.1	จำลองการเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จเพื่อใช้สำหรับการป้องกันสถานีไฟฟ้า GIS 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า.....	53
4.2.2	คำนวณหาค่าอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า	53
4.2.3	จำลองผลของแรงดันเกินฟ้าผ่าจากการติดตั้งกับดักเสิร์จในกรณีต่างๆ	56
4.2.3.1	ติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ที่หน้าสายเคเบิลใต้ดิน.....	56
4.2.3.2	ติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า	56
4.2.3.3	ติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ทั้งที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินและที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า.....	56
4.2.4	จำลองผลกระทบจากความยาวสายเคเบิลใต้ดิน.....	56
บทที่ 5	.....	57
ผลการจำลองและวิเคราะห์ผล.....	.....	57
5.1	การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้กับดักเสิร์จแรงดันพิกัด 96 และ 108 kV	57
5.2	การศึกษาการหาอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า.....	60
5.2.1	เงื่อนไขที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า	60
5.2.2	คำนวณหาค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในประเทศไทย.....	62
5.2.3	คำนวณหาโอกาสของการเกิดฟ้าผ่าแต่ละความยาว	62
5.2.4	คำนวณค่าความน่าจะเป็นของการเกิดกระแสฟ้าผ่าที่มากกว่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต	63

5.2.5	คำนวณอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกิน	
	ฟ้าผ่า.....	63
5.3	การศึกษาตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จ.....	65
5.4	การศึกษาผลของความยาวสายเคเบิลใต้ดิน.....	67
บทที่ 6	.....	70
	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	70
6.1	สรุปผลการจำลอง.....	70
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	71
	บรรณานุกรม.....	72
	ประวัติผู้เขียน.....	75



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1	ค่าพารามิเตอร์สำหรับความน่าจะเป็นตามมาตรฐาน CIGRE	8
ตารางที่ 2.2	ตัวอย่างพารามิเตอร์ต่างๆ ของฟ้าผ่า [4].....	9
ตารางที่ 2.3	จำนวนวันของการเกิดฝนฟ้าคะนองในแต่ละภูมิภาค	11
ตารางที่ 2.4	ค่าอัตราส่วนของการป้องกัน (k_p) [4]	25
ตารางที่ 3.1	แรงดันคงเหลือของ A_0 และ A_1 ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ ของแบบจำลอง Pinceti.....	35
ตารางที่ 3.2	ความเร็วของลีดเดอร์ของโมเดลต่างๆ	36
ตารางที่ 3.3	ค่าพารามิเตอร์สำหรับโมเดล Shindo and Suzuki.....	36
ตารางที่ 3.4	ค่าพารามิเตอร์สำหรับโมเดล CIGRE	37
ตารางที่ 3.5	เงื่อนไขในการเกิดการวาบไฟในแต่ละโมเดล	38
ตารางที่ 3.6	ค่าแนะนำสำหรับค่าคงที่สำหรับการเกิดโคโรนา.....	41
ตารางที่ 4.1	ตารางค่าแนะนำสำหรับพิกัดแรงดันต่ำสุดของกัปดักเสิร์จ [14].....	43
ตารางที่ 4.2	ตัวอย่างค่าแฟกเตอร์แรงดันเกินชั่วคราว ตามเส้นเงื่อนไข Hot condition	44
ตารางที่ 4.3	แฟกเตอร์ความผิดพลาด [15].....	44
ตารางที่ 4.4	ข้อมูลพิกัดแรงดันของกัปดักเสิร์จจากผู้ผลิต [16].....	46
ตารางที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันคงเหลือของกัปดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ...	47
ตารางที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันคงเหลือของกัปดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV.	48
ตารางที่ 4.7	ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง	52
ตารางที่ 4.8	มาตรฐานค่าการฉนวน [17].....	53
ตารางที่ 5.1	ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง.....	57
ตารางที่ 5.2	ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง	60
ตารางที่ 5.3	ผลการจำลองแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนขนาดกระแสฟ้าผ่าและตำแหน่งฟ้าผ่าสำหรับการติดตั้งกัปดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV.....	61

ตารางที่ 5.4 ผลการจำลองแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนขนาดกระแสฟ้าผ่าและตำแหน่งฟ้าผ่าสำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV..... 61

ตารางที่ 5.5 ความน่าจะเป็นของการเกิดฟ้าผ่าแต่ละความยาวสายส่ง 62



สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2.1 การเกิดฟ้าผ่าขึ้น.....	7
รูปที่ 2.2 การเกิดฟ้าผ่าลง.....	7
รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	7
รูปที่ 2.4 ความล้มเหลวของสายดินชิงอากาศ.....	13
รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของคลื่นจรเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงยังเสาส่ง.....	14
รูปที่ 2.6 ภาพสเก็ตภาคตัดของ GIS 245 kV (BBC).....	17
รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของแท่งบล็อก MO.....	20
รูปที่ 2.8 การประสานสัมพันธ์การฉนวนของอุปกรณ์.....	23
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างความคงทน T ในเทอมของเวลา TOV.....	24
รูปที่ 2.10 หลักการบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง.....	26
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงต้นทุนการบำรุงรักษา [6].....	27
รูปที่ 3.1 โฟร์ซาร์ทการทำงานของโปรแกรมทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า.....	28
รูปที่ 3.2 ระบบส่ง 115 kV.....	29
รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของเสาส่ง.....	30
รูปที่ 3.4 ข้อมูลขนาดของเสาส่ง 115 kV.....	32
รูปที่ 3.5 แบบจำลองกับดักเสิร์จของ Pinceti.....	34
รูปที่ 3.6 รูปคลื่นฟ้าผ่าแบบเว้าของ CIGRE.....	40
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ที่หน้าสายเคเบิลใต้ดิน.....	49
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า.....	49
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จทั้งที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินและหน้าหม้อแปลงไฟฟ้า.....	50
รูปที่ 4.4 ระบบไฟฟ้าที่ศึกษา.....	51
รูปที่ 4.5 การกระจายแบบสะสมของค่ายอดกระแสไฟฟ้าในประเทศไทย ข้อมูลจากระบบ LLS ในปี พ.ศ. 2550.....	55

รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการเปลี่ยนค่าความยาวสายเคเบิลใต้ดิน.....	56
รูปที่ 5.1 การติดตั้งกับดักเสิร์จที่ตำแหน่งทางเข้าสถานีไฟฟ้า GIS.....	58
รูปที่ 5.2 ผลการจำลองแรงดันเกินที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้า.....	58
รูปที่ 5.3 ผลการจำลองแรงดันเกินที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้าเมื่อติดตั้งกับดักเสิร์จแรงดันพิกัด 96 และ 108 kV	59
รูปที่ 5.4 ความน่าจะเป็นของการเกิดความล้มเหลวที่สถานีไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าที่สายส่งระยะทางต่างๆ กรณีติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV.....	63
รูปที่ 5.5 ความน่าจะเป็นของการเกิดแรงดันเกินที่มีค่าสูงกว่าค่าวิกฤตสำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV.....	64
รูปที่ 5.6 ตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จ.....	65
รูปที่ 5.7 ผลการจำลองการติดตั้งกับดักเสิร์จที่ตำแหน่งต่างๆ	66
รูปที่ 5.8 การป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สด้วยกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียว.....	68
รูปที่ 5.9 ผลการจำลองการเปลี่ยนความยาวสายเคเบิลใต้ดินสำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียวและการติดตั้งกับดักเสิร์จสองตำแหน่งพร้อมกัน.....	69
รูปที่ 5.10 การป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สด้วยการติดตั้งกับดักเสิร์จ 2 ตำแหน่ง	69

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์บทนี้ประกอบด้วยที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจาก วิทยานิพนธ์ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันความต้องการการใช้พลังงานไฟฟ้าในเขตตัวเมืองได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงเป็นสาเหตุให้มีการสร้างสถานีไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการในการใช้ไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทได้แก่ สถานีไฟฟ้าแบบฉนวนอากาศ (AIS) และ สถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส (GIS) ส่วนใหญ่นิยมสร้างสถานีไฟฟ้าแบบ AIS เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างถูกกว่า ออกแบบระบบได้หลากหลาย และการบำรุงรักษาทำได้ง่าย แต่ปัญหาที่สำคัญในการสร้างสถานีไฟฟ้าแบบ AIS ในเขตตัวเมืองคือที่ดินมีราคาสูงและขนาดพื้นที่ไม่เพียงพอต่อการสร้างสถานีไฟฟ้า ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงมีการแก้ปัญหาโดยการใช้สถานีไฟฟ้า GIS ซึ่งมีอุปกรณ์อยู่ภายในท่อโลหะ โดยมีแก๊สซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6) เป็นฉนวนทำให้สถานีไฟฟ้ามีขนาดเล็กลงสามารถติดตั้งกลางแจ้งหรือภายในอาคาร ต้องการการบำรุงรักษาน้อย นอกจากนี้ระบบยังมีความน่าเชื่อถือสูง แต่อย่างไรก็ตามสถานีไฟฟ้า GIS มีโอกาสได้รับความเสียหายจากแรงดันเกินฟ้าผ่าเช่นเดียวกับสถานีไฟฟ้าแบบ AIS แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นสำหรับสถานีไฟฟ้า GIS มีความรุนแรงมากกว่า เมื่อเทียบกับสถานีไฟฟ้าแบบ AIS ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อเกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ไหลเข้ามาภายในสถานีไฟฟ้า GIS ส่งผลทำให้อุปกรณ์ภายในเกิดการชำรุดและเสียหายได้ และยังเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดปกติภายในระบบได้เช่นกัน การซ่อมแซมและการบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้า GIS นั้นมีความยุ่งยากและซับซ้อนเนื่องจากการหาตำแหน่งของการเกิดความผิดปกติในระบบที่ทำได้ยากแล้ว การซ่อมแซมอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าที่ได้รับความเสียหายจากแรงดันเกินฟ้าผ่าซึ่งต้องใช้ระยะเวลาที่นานพอสมควร ทำให้ประสบปัญหาเกี่ยวกับการงดจ่ายไฟเป็นเวลานาน ส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าได้ ดังนั้นสถานีไฟฟ้า GIS ต้องมีระบบป้องกันอันตราย ที่อาจจะเกิดขึ้นจากแรงดันเกินฟ้าผ่า โดยต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่า อย่างเช่นกับดักเสิร์จเพื่อจำกัดขนาดของแรงดันเกินให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย เป็นต้น

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ศึกษาการใช้งานของกับดักเสิร์จสำหรับการป้องกันสถานีไฟฟ้า GIS ระดับแรงดัน 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่าซึ่งเกิดจากการวาวไฟที่ฉิวย้อนกลับ (Back Flashover) เป็น

สาเหตุหลัก และพื้นที่ที่ศึกษาคือบริเวณเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลเพราะมีแนวโน้มที่จะมีการใช้สถานีไฟฟ้า GIS เพิ่มมากขึ้น เรื่องที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วย การเลือกพิกัดแรงดันและตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่า ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อขนาดของแรงดันเกิน และการหาอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า GIS สำหรับแรงดัน 115 kV การศึกษาเหล่านี้จำลองผลทางคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม EMTP (Electromagnetic Transients Program) โดยมีส่วนประกอบของแบบจำลองระบบไฟฟ้าต่างๆ เสาส่ง สายเคเบิลใต้ดิน สถานีไฟฟ้า GIS และกับดักเสิร์จ เป็นต้น จากการศึกษาและจำลองระบบเพื่อวิเคราะห์ผลและนำผลลัพธ์ที่ได้มาใช้เป็นแนวทางสำหรับการสร้างสถานีไฟฟ้า GIS ที่แรงดันระบบ 115 kV ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล เพื่อวางแผนการป้องกันสถานีไฟฟ้าจากแรงดันเกินได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาการเลือกใช้พิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จที่ส่งผลต่อขนาดแรงดันเกินฟ้าผ่า
- 2) ศึกษาตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จที่ส่งผลต่อขนาดแรงดันเกินฟ้าผ่า
- 3) ศึกษาความยาวสายเคเบิลที่ส่งผลต่อขนาดแรงดันเกินฟ้าผ่า

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาระบบส่งไฟฟ้าแรงดัน 115 kV โดยไม่คำนึงถึงโหลด
- 2) ศึกษาผลกระทบแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดจากการรบกวนไฟที่ฉวยย้อนกลับที่ส่งผลต่อสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV
- 3) ศึกษาผลกระทบที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม EMTP

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

- 1) ศึกษาความรู้เกี่ยวกับกับดักเสิร์จ
- 2) ศึกษาความรู้เกี่ยวกับลักษณะเฉพาะของฟ้าผ่า การเกิดฟ้าผ่า ผลกระทบของฟ้าผ่า
- 3) ศึกษาความรู้พื้นฐานของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส
- 4) ศึกษาการใช้โปรแกรม EMTP เพื่อสร้างแบบจำลองระบบไฟฟ้า
- 5) วิเคราะห์และระบุปัญหาที่จะศึกษา
- 6) กำหนดขอบเขตของงานวิจัย
- 7) สร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม EMTP
- 8) จำลองการติดตั้งกับดักเสิร์จแรงดันพิกัดต่างๆ
- 9) จำลองการติดตั้งกับดักเสิร์จที่ตำแหน่งต่างๆ

10) พิจารณาผลจากการเลือกใช้แรงดันพิกัดและตำแหน่งการติดตั้งที่เหมาะสมของกักเก็บ
เสิร์จ

- 11) จำลองการติดตั้งกักเก็บเสิร์จโดยการเปลี่ยนความยาวสายเคเบิล
- 12) วิเคราะห์ผลกระทบต่างๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อตัวสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV
- 13) หาค่าอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส
- 14) เรียบเรียงผลการวิจัยและจัดทำเป็นรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์

1) มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องพิกัดและตำแหน่งของกักเก็บเสิร์จในการป้องกันสถานีไฟฟ้า
แบบฉนวนแก๊ส 115 kV

2) สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่า

3) สามารถหาค่าอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าในระบบ 115 kV

1.6 งานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ สามารถแบ่งได้เป็น 3 หัวข้อหลักๆ
คือ 1) แบบจำลองของระบบไฟฟ้า 2) การเลือกการประสานสัมพันธ์การฉนวน 3) การออกแบบ
โมเดลกักเก็บเสิร์จสำหรับแรงดันเกินฟ้าผ่า โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) แบบจำลองของระบบไฟฟ้า

ในบทความวิจัยเรื่อง “Modeling of Guidelines for Fast Front Transients” [1] ให้
ข้อเสนอแนะในการสร้างแบบจำลองสำหรับแรงดันเกินทรานเซียนต์ (ความถี่อยู่ในช่วง 10kHz – 1MHz)
ได้แก่ สายส่งเหนือศีรษะ สายเคเบิลใต้ดิน อุปกรณ์ฉนวน ลูกถ้วย สถานีไฟฟ้า กักเก็บเสิร์จ และ ฟ้าผ่า
ซึ่งแบบจำลองเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายงาน เช่น การเลือกตำแหน่งการติดตั้ง
กักเก็บเสิร์จและขนาดพิกัดกักเก็บเสิร์จสำหรับการป้องกันสายส่งและสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนอากาศและ
ฉนวนก๊าซ การจำลองการตรวจสอบการกำจัดความผิดปกติภายในสถานีไฟฟ้าและเสาส่ง การ
คำนวณอัตราการเกิดการวาบไฟตามฉนวน เป็นต้น แนวคิดที่ได้รับจากงานวิจัยนี้คือแนวทางในการ
สร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าในโปรแกรม EMTP ที่ใช้ในการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

2) การเลือกการประสานสัมพันธ์การฉนวน

ในบทความวิจัยเรื่อง “Points to consider regarding the insulation coordination of
GIS substations with cable connections to overhead lines” [2] นำเสนอเรื่องเกี่ยวกับสถานี
ไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สที่มีการเชื่อมต่อกับสายเคเบิลใต้ดินที่ต่อกับสายส่งเหนืออากาศ การทำการ
ประสานสัมพันธ์การฉนวนเป็นเรื่องยุ่งยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อต้องประสบปัญหาเกี่ยวกับแรงดันเกิน
ทรานเซียนต์ ผลกระทบจากแรงดันเกินส่งผลกระทบต่อสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สมากกว่าสถานีไฟฟ้า
แบบฉนวนอากาศ เนื่องจากการวาบไฟตามฉนวนที่เป็นของแข็งหรือภายในสถานีไฟฟ้าแบบฉนวน

แก๊สจะทำให้เกิดความผิดปกติพองภายในแบบถาวร ส่งผลทำให้เกิดไฟดับเป็นเวลานาน ซึ่งระยะเวลาในการซ่อมแซมหรือหาจุดผิดปกติพองจำเป็นต้องใช้ระยะเวลาแก้ไขนานพอสมควร และสำหรับการศึกษาการประสานสัมพันธ์การฉนวนเพื่อควบคุมแรงดันเกินจากฟ้าผ่าหรือการสับวิตช์ภายในสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สและหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นเรื่องที่ซับซ้อน และการใช้สายเคเบิลร่วมกับสายส่งเหนือศีรษะเพื่อเชื่อมต่อไปยังโหนดก็มีความซับซ้อนด้วยเช่นกัน การทำประสานสัมพันธ์การฉนวน สำหรับสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส โดยมีการจำลองระบบส่งไฟฟ้าขนาด 400 kV ด้วยสายส่งเหนือศีรษะที่ร่วมกับสายเคเบิลระยะสั้น จากนั้นต่อเข้ากับสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส พร้อมทั้งจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม EMTP เพื่อสร้างการจำลองของระบบไฟฟ้าที่ศึกษาทั้งหมด จากนั้นจำลองสถานการณ์ให้มีแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เคลื่อนที่ไปยังภายในสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส และศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น บทความนี้ได้เสนอวิธีการควบคุมแรงดันเกินอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อช่วยลดขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น แนวคิดที่ได้รับจากงานวิจัยนี้คือแนวทางในการเลือกใช้ฉนวน อย่างเช่นกับดักเสิร์จที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เพื่อป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สและหม้อแปลงไฟฟ้า และตำแหน่งที่เลือกใช้ในการติดตั้งกับดักเสิร์จ ส่งผลทำให้สามารถลดแรงดันเกินที่มาจากฟ้าผ่าได้ โดยเป็นแนวทางเพื่อนำไปปรับใช้งานในวิทยานิพนธ์ต่อไป

3) แบบจำลองกับดักเสิร์จสำหรับแรงดันเกินฟ้าผ่า

ในบทความวิจัยเรื่อง “A simplified model for zinc oxide surge arresters” [3] นำเสนอแบบจำลองสำหรับกับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ซึ่งได้พัฒนามาจาก IEEE W.G. 3.4.11 แนวคิดหลักที่นำมาใช้โดยเน้นความง่ายของหลักเกณฑ์คือ การระบุค่าพารามิเตอร์ของโมเดลต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองกับดักเสิร์จ ซึ่งหลักเกณฑ์ดังกล่าวช่วยให้สามารถคำนวณและหาค่าพารามิเตอร์ของโมเดลต่างๆ ได้โดยตรง แบบจำลองกับดักเสิร์จมีทั้งหมด 3 แบบจำลอง ได้แก่ 1) The IEEE model แบบจำลองชนิดนี้ได้รับการพัฒนามาจาก IEEE W.G. 3.4.11 ซึ่งเป็นแบบจำลองมาตรฐานโดยมีลักษณะเฉพาะคือความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวต้านทาน 2) The PINCETI model เป็นแบบจำลองที่แตกต่างจากแบบจำลองมาตรฐานเล็กน้อย และมีหลักการทำงานเหมือนกับแบบจำลองมาตรฐานคือ เมื่อไม่มีแรงดันเกินเข้ามาในระบบ หรือระบบอยู่ในช่วงแรงดันปกติแบบจำลองชนิดนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงมาก แต่เมื่อไรที่เกิดแรงดันเกินไหลเข้าสู่กับดักเสิร์จ แบบจำลองชนิดนี้จะลดค่าอิมพีแดนซ์ลงอย่างรวดเร็ว สำหรับแบบจำลองชนิดสุดท้าย 3) The PROPOSED model แบบจำลองชนิดนี้ได้รับการพัฒนามาจาก IEEE W.G.3.4.11 และ Pinceti ซึ่งแบบจำลองชนิดนี้จะไม่ซับซ้อนเท่าแบบจำลองแบบอื่นๆ แบบจำลองเหล่านี้ใช้ในการสร้างแบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ ถูกนำเสนอโดย IEEE W.G 3.4.11 และมีการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานทั้งสำหรับแรงดันปานกลางและแรงดันสูงจากหลายๆ ผู้ผลิต แนวคิดที่ได้รับจากงานวิจัยนี้คือ ความแตกต่างระหว่างแบบจำลองกับดักเสิร์จแต่ละชนิด ความยากง่ายในการสร้างแบบจำลองกับดักเสิร์จในแต่ละแบบจำลอง เพื่อนำ

ข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการตัดสินใจ เพื่อสร้างแบบจำลองกับดักเสิร์จในโปรแกรม EMTP ที่ใช้ในการศึกษา
ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

1.7 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

โครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งออกเป็น 7 บท โดยแบ่งเป็นเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของ
วิทยานิพนธ์ ขั้นตอนการศึกษาวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากวิทยานิพนธ์ และ
เนื้อหาของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 การคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ และการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้า

บทที่ 4 ขั้นตอนการจำลองและการจำลอง

บทที่ 5 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผล

บทที่ 6 สรุปผล

บทที่ 7 รายการอ้างอิง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

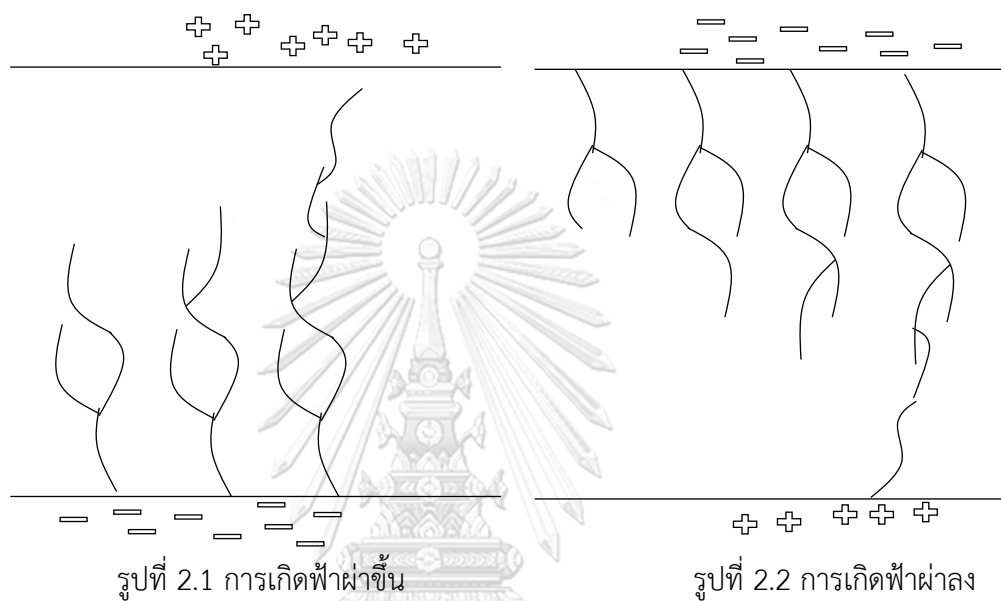
ในหัวข้อทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้อธิบายเนื้อหา ความรู้ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วย 7 หัวข้อหลักๆ ได้แก่ ไฟผ่า [4] แรงดันเกินในระบบสายส่ง [4] การวาบไฟที่ผิวย้อนกลับ (Back flashover : BFO) [5] สถานีไฟฟ้า (substation) [4] การป้องกันแรงดันเกินไฟผ่า [4] และ การบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง [6] รายละเอียดในแต่ละหัวข้ออธิบายได้ดังต่อไปนี้

2.1 ไฟผ่า

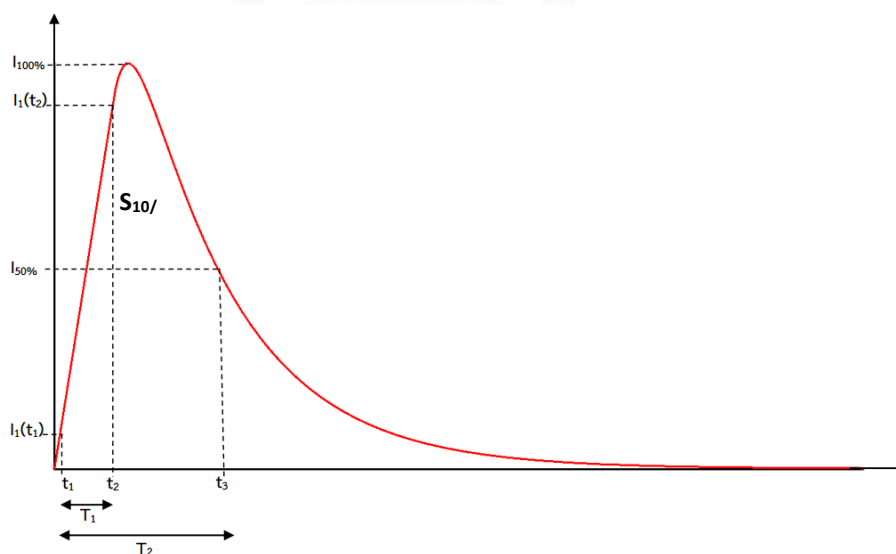
ไฟผ่า คือปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่ง ที่ส่งผลเสียต่อคน สัตว์ และ สิ่งปลูกสร้าง การเกิดไฟผ่าถูกค้นพบโดย Benjamin Franklin และลูกชายของเขาชื่อ Thomas Folger ซึ่งพวกเขาได้พิสูจน์ให้เห็นเมื่อ ปี ค.ศ.1752 ที่เมืองฟิลาเดเฟีย ประเทศสหรัฐอเมริกาว่า ไฟผ่าคือ “สปาร์กไฟฟ้า” อันเป็นผลของการเกิดการดีสชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ นับเป็นการเริ่มต้นของการศึกษาเชิงวิทยาศาสตร์ เพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับไฟผ่าส่งผลให้การค้นพบครั้งนี้ทำให้ เบนจามินได้พัฒนาหลักการป้องกันไฟผ่าด้วยเสาล่อฟ้า เรียกว่า Franklin rod มาจนถึงทุกวันนี้ หลักการของการเกิดไฟผ่าจะเริ่มต้นจากการที่ก้อนเมฆลอยตัวใกล้พื้นดินซึ่งภายในก้อนเมฆจะมีประจุกระจายอยู่โดยรอบ โดยที่ฐานของก้อนเมฆส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มประจุลบ เมื่อกลุ่มประจุลบกระจายตัวอยู่อย่างหนาแน่นจนทำให้เกิด ความเครียดของสนามไฟฟ้าส่งผลทำให้เกิดการไอออไนเซชันของอากาศกลายเป็นหัวนำร่อง (Leader) ซึ่งมีทิศทางพุ่งลงสู่พื้นดินในลักษณะจั้งหะก้าว (Stepped Leader) โดยมีช่วงจั้งหะก้าวเฉลี่ย 50 เมตรต่อการก้าว และเมื่อหัวนำร่องเข้าใกล้พื้นดินจะเหนี่ยวนำประจุของสิ่งล่อแหลม หรือ อาคารสูง ส่งผลทำให้เกิดการไอออไนเซชันกลายเป็นสตีมเมอร์ (Steamer) ซึ่งมีความยาวเฉลี่ย 20 เมตร จากนั้นเมื่อหัวนำร่องมาเจอกับสตีมเมอร์จะเกิดลำไฟผ่าซึ่งมีแสงสว่างจ้าเกิดขึ้น

ลักษณะของการเกิดไฟผ่าแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ 1) การเกิดไฟผ่าขึ้น และ 2) การเกิดไฟผ่าลง โดยการเกิดไฟผ่าขึ้นเกิดจากการที่กลุ่มประจุบวกที่กระจายอยู่อย่างหนาแน่นเมื่อเกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าที่จุดวิกฤตจนกลายเป็นหัวนำร่องเคลื่อนที่ลงมาเจอกับสตีมเมอร์ที่เกิดจากการไอออไนเซชันของกลุ่มประจุลบจากพื้นดินเราจะเรียกกระบวนการนี้ว่าไฟผ่าแบบบวก แสดงดังรูปที่ 2.1 ซึ่งโอกาสในการเกิดไฟผ่าแบบบวกมีน้อยมากเมื่อเทียบกับการเกิดไฟผ่าแบบลบ สำหรับการเกิดไฟผ่าลงหรือการเกิดไฟผ่าแบบลบจะมีกระบวนการเกิดเหมือนกับไฟผ่าแบบบวกแต่สิ่งที่แตกต่างกันคือฐานของก้อนเมฆส่วนใหญ่จะเป็นกลุ่มประจุลบ เมื่อกลุ่มประจุลบกระจายตัวอยู่อย่างหนาแน่นจนทำให้เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าส่งผลทำให้เกิดการไอออไนเซชันของอากาศ

กลายเป็นหัวนําร่อง และเมื่อหัวนําร่องนี้เคลื่อนที่เข้าใกล้พื้นดินจะเหนี่ยวนำประจุของสิ่งล่อแหลมหรืออาคารสูง ส่งผลให้เกิดการไอออนไนเซชันกลายเป็นสติมเมอร์ส่งผลทำให้เกิดฟ้าผ่าแบบลบนั่นเอง แสดงดังรูปที่ 2.2 โอกาสในการเกิดฟ้าผ่าแบบลบนี้ออกาสสูงถึงร้อยละ 95 พารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของฟ้าผ่าล้วนมีความสำคัญต่องานวิจัยชิ้นนี้ สามารถศึกษาได้จากหัวข้อถัดไป



2.1.1 พารามิเตอร์ฟ้าผ่า



รูปที่ 2.3 ลักษณะรูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่า

รูปคลื่นอิมพัลส์ฟ้าผ่าประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสค่ายอด (Crest Current) เวลาหน้าคลื่น (Front Time) เวลาหางคลื่น (Tail Time) และความชันหน้าคลื่น (Steepness) แสดงในรูปที่ 2.3

1) กระแสค่ายอด (Crest Current) หรือจากในรูปที่ 2.3 คือค่า $I_{100\%}$ คือกระแสสูงสุดหรือกระแสค่ายอดของการเกิดฟ้าผ่าขึ้นอยู่กับจำนวนของประจุที่ดิสชาร์จหรือชนิดของการเกิดฟ้าผ่าเป็นได้ทั้งชั่ววอกหรือชั่วลบ

ความน่าจะเป็นของการเกิดกระแสค่ายอดตามมาตรฐานต่างๆ

- มาตรฐาน IEC ได้เสนอสมการความน่าจะเป็นดังนี้

$$P(i > I) = 1 - \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad \text{เมื่อ} \quad z = \frac{\log(I/u)}{\sigma} \quad (2.1)$$

- มาตรฐาน CIGRE ได้เสนอสมการความน่าจะเป็นดังนี้

$$P(i > I) = 1 - \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad \text{เมื่อ} \quad z = \frac{\ln(I/u)}{\beta} \quad (2.2)$$

โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์สำหรับความน่าจะเป็นตามมาตรฐาน CIGRE

Negative	Median, σ	33.30
	Log std deviaton, β	0.605
Positive	Median, σ	40.00
	Log std deviaton, β	0.98

- มาตรฐาน IEEE สำหรับฟ้าผ่าชั่วลบ ได้เสนอสมการความน่าจะเป็นดังนี้

$$P(i > I) = \frac{1}{1 + (I/31)^{2.6}} \quad (2.3)$$

2. เวลาหน้าคลื่น (Front Time) คือค่า T1 แสดงดังรูปที่ 2.3 คือระยะเวลาที่กระแสฟ้าผ่าเริ่มต้นจากเวลาเป็นศูนย์จนถึงระยะเวลาที่ค่ายอดมีหน่วยเป็นไมโครวินาที (μs)

3. เวลาหางคลื่น (Tail Time) คือค่า T2 แสดงดังรูปที่ 2.3 คือระยะเวลาเริ่มต้นไปจนถึงเวลาที่กระแสฟ้าผ่ามีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดมีหน่วยเป็นไมโครวินาที (μs)

4. ความชันหน้าคลื่น (Steepness) หรือช่วงหน้าคลื่นคืออัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส (di/dt) มีหน่วยเป็นกิโลแอมป์ต่อไมโครวินาที ($\text{kA}/\mu\text{s}$)

พารามิเตอร์ต่างๆ ของฟ้าผ่าที่มีความน่าจะเป็นของการเกิดฟ้าผ่าร้อยละ 95 50 และ 5 ซึ่งเป็นผลงานการบันทึกของ Berger แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างพารามิเตอร์ต่างๆ ของฟ้าผ่า [4]

จำนวนฟ้าผ่า	พารามิเตอร์	ความน่าจะเป็นร้อยละ		
		95	50	5
	ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า			
99	กระแสฟ้าผ่าลบลำแรก (kA)	≥ 14	≥ 30	≥ 80
137	กระแสฟ้าผ่าลบลำฟ้าตาม (kA)	≥ 4.6	≥ 12	≥ 30
28	กระแสฟ้าผ่าบวกลบลำแรก (kA)	≥ 4.6	≥ 35	≥ 250
	เวลาช่วงหน้าคลื่น			
87	ฟ้าผ่าลบลำแรก (μs)	1.8	5.5	18
120	ฟ้าผ่าลบลำฟ้าตาม (μs)	0.22	1.1	4.5
19	ฟ้าผ่าบวกลบลำแรก (μs)	3.5	22	200
	เวลาช่วงหางคลื่น			
78	ฟ้าผ่าลบลำแรก (μs)	30	75	200
104	ฟ้าผ่าลบลำฟ้าตาม (μs)	6.5	32	140
16	ฟ้าผ่าบวกลบลำแรก (μs)	25	230	2000
	ความชัน (di/dt)			
90	ฟ้าผ่าลบลำแรก ($\text{kA}/\mu\text{s}$)	5.5	12	32
124	ฟ้าผ่าลบลำฟ้าตาม ($\text{kA}/\mu\text{s}$)	12	40	120
21	ฟ้าผ่าบวกลบลำแรก ($\text{kA}/\mu\text{s}$)	0.2	2.4	32

2.1.2 ความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า

ในการเกิดฟ้าผ่าในแต่ละครั้งเราไม่สามารถคาดเดาได้เลยว่า ฟ้าผ่าจะเกิดขึ้นที่บริเวณใดหรือตำแหน่งไหน มีเพียงแต่การจดบันทึกเหตุการณ์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นตามยอดเสาส่ง สายไฟ และสถานีไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งถ้าต้องการที่จะทราบถึงความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่าเราจะพิจารณาถึงการเกิดฟ้าผ่าที่บริเวณใดบริเวณหนึ่งต่อปี ซึ่งเป็นจุดที่เราสนใจ ตัวแปรที่ใช้เกี่ยวกับความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า (Ground Flash Density : N_g) โดยมีหน่วยวัดคือ จำนวนฟ้าผ่าต่อตารางกิโลเมตรต่อปี สมการที่ใช้ในประมาณค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่าเป็นไปตามสมการที่ (2.4)

$$N_g = kT_d^a \quad (2.4)$$

เมื่อ T_d คือ จำนวนวันที่เกิดฝนฟ้าคะนองใน 1 ปี ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามแต่ละพื้นที่ (days/year)
 k และ a คือค่าคงที่ของแต่ละพื้นที่

ในงานวิจัยนี้พื้นที่ที่สนใจศึกษาคือประเทศไทย ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัย [7] โดยค่าของ T_d จะมีค่าประมาณ 60-200 วันต่อปี โดยจะเฉลี่ยไปตามแต่ละภูมิภาค ส่วนค่า k และ a หากเป็นพื้นที่ของประเทศไทยตามการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) ได้กำหนดค่าของ k และ a มีค่าเท่ากับ 6.5×10^{-5} และ 2.277 ตามลำดับ

จากข้อมูลสถิติจำนวนวันของการเกิดฝนฟ้าคะนองย้อนหลังเป็นเวลา 5 ปี ตั้งแต่ พ.ศ. 2551 – 2555 ตาม (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2560) ของทั่วทุกภูมิภาคในประเทศไทยเป็นไปตามตารางที่ 2.3 สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าของตัวแปร T_d ของพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑลจากตารางที่ 2.3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 49.44 สำหรับเพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่าในสมการบทที่ 4 ต่อไป

ตารางที่ 2.3 จำนวนวันของการเกิดฝนฟ้าคะนองในแต่ละภูมิภาค

ภูมิภาค	ปี	2551	2552	2553	2554	2555	เฉลี่ย (วัน)
	เหนือ		126.7	119.5	128.3	136.1		129	127.92
ตะวันออกเฉียงเหนือ		165.1	158.7	149.5	131.2	174.3	155.76
กลาง		58.2	52.5	54.6	54.1	51.5	54.18
กรุงเทพและปริมณฑล		53.5	52.9	55.5	44.2	41.1	49.44
ตะวันออก		89.8	92.7	93.6	87.6	93.2	91.38
ใต้ฝั่งตะวันออก		116.3	115.9	118	106.7	101.9	111.76
ใต้ฝั่งตะวันตก		40.4	42.4	38.6	35.9	49.8	41.42

2.2 แรงดันเกินในระบบสายส่ง

แรงดันทรานเซียนต์หรือแรงดันเสิร์จเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงดันเกินในระบบสายส่ง ซึ่งแบ่งเป็น 2 ประเภทหลักๆ คือการเกิดแรงดันเกินจากสาเหตุภายใน แบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ แรงดันเกินสวิตชิงและแรงดันเกินชั่วคราว และการเกิดแรงดันเกินอีกประเภทหนึ่งคือแรงดันเกินจากสาเหตุภายนอก ระยะเวลาและขนาดของการเกิดแรงดันเกินในแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน การเปรียบเทียบขนาดของแรงดันเกินในแต่ละชนิดต้องมีการเปลี่ยนหน่วยให้อยู่ในหน่วยของเปอร์เซ็นต์ เพื่อที่จะได้เปรียบเทียบกันอย่างชัดเจนได้ว่าแรงดันเกินแต่ละชนิดมีขนาดมากน้อยเพียงใด จึงเทียบขนาดแรงดันเกินที่เกิดขึ้นเป็นกิโลโวลต์ของแรงดันเฟสค่ายอด

$$\hat{U}_{ph} = U_m \sqrt{2} / \sqrt{3} = 1 \text{ p.u.}$$

2.2.1 แรงดันเกินจากสาเหตุภายใน

แรงดันเกินจากสาเหตุภายในสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. แรงดันเกินสวิตชิง (switching surge) มีสาเหตุหลักมาจากการเปิด - ปิดสวิตช์ภายในระบบ เช่นเมื่อการเกิดความผิดปกติภายในระบบ การทำงานของเบรกเกอร์ส่งผลทำให้เกิดแรงดันเกินสวิตชิง หรืออีกสาเหตุหนึ่งคือการจ่ายไฟให้กับระบบไฟฟ้าส่งผลทำให้เกิดแรงดันเกินได้เช่นกัน

ขนาดของแรงดันเกินชนิดนี้จะมีขนาดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแรงดันเกินจากสาเหตุภายนอก มีช่วงเวลาหน้าคลื่นอยู่ในช่วง 100 ถึง 300 ไมโครวินาที และเวลาหางคลื่นอยู่ในช่วง 2,000 ถึง 3,000 ไมโครวินาที

2. แรงดันเกินชั่วคราว (temporary surge) เป็นแรงดันเกินที่มีระยะเวลาในการเกิดอยู่นานที่สุดเมื่อเทียบกับแรงดันเกินชนิดอื่นๆ ซึ่งเกิดได้จากหลายสาเหตุเช่น การเกิดเรโซแนนซ์เฟอโรเรโซแนนซ์ การเกิดความผิดปกติของแบบลงดิน และการปลดโหลดแบบตัวเหนี่ยวนำออกไปกะทันหัน เป็นต้น ในงานวิจัยเล่มนี้ศึกษาการเลือกพิกัดของกัปดักเสิร์จ ซึ่งแรงดันเกินชั่วคราวมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเลือกพิกัดการป้องกันของกัปดักเสิร์จ ซึ่งการเลือกพิกัดของกัปดักเสิร์จจะต้องคำนึงถึงแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้นภายในระบบที่ศึกษา โดยกัปดักเสิร์จต้องไม่ทำงานที่แรงดันเกินชั่วคราว เนื่องจากแรงดันเกินชั่วคราวมีระยะเวลาในการเกิดที่นาน ส่งผลทำให้กัปดักเสิร์จต้องทนอยู่กับความร้อนที่เกิดขึ้นจากแรงดันเกินชั่วคราวไม่ได้ อาจเป็นสาเหตุให้กับกัปดักเสิร์จเกิดความเสียหาย หรือระเบิดขึ้นได้ ดังนั้นการเลือกพิกัดของกัปดักเสิร์จต้องขึ้นอยู่กับแรงดันเกินชั่วคราวในระบบ

2.2.2 แรงดันเกินจากสาเหตุภายนอก

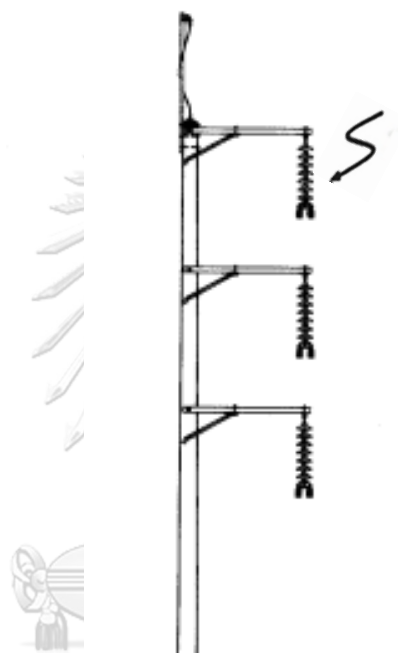
แรงดันเกินจากสาเหตุภายนอกเกิดจากสาเหตุหลักคือ ปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างฟ้าผ่าหรือเรียกอีกอย่างหนึ่ง “แรงดันเกินฟ้าผ่า” ซึ่งแรงดันมีขนาดสูงถึง 1,000 กิโลโวลต์ เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนอุปกรณ์ไฟฟ้าเช่น เสาส่ง สายส่ง สถานีไฟฟ้า เป็นต้น ตัวอย่างเช่น เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงมายังเสาส่ง ส่งผลทำให้เกิดแรงดันเกิน ซึ่งเป็นคลื่นจรเคลื่อนไปยังจุดต่างๆ บนเสาส่ง โดยมีทิศทางเคลื่อนที่ออกไปตามแนวสายส่งทั้งสองด้านและเคลื่อนที่ลงมายังพื้นดินด้วยความเร็วแสงหรือมีค่าประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที ทำให้ศักย์ไฟฟ้าของเสาไฟฟ้ามียุคสูงขึ้น ถ้าหากแรงดันที่ตกคร่อมลูกถ้วยมีค่าสูงกว่าค่าความคงทนของลูกถ้วยจะทำให้ลูกถ้วยเกิดการวาบไฟ ส่งผลทำให้คลื่นจรเคลื่อนที่ไปยังส่วนอื่นๆ ของระบบไฟฟ้าได้ และถ้าในระบบไม่มีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าจะทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายดินที่ซึ่งอยู่เหนือสายส่งกำลังไฟฟ้า หรือผ่าลงมายังยอดเสาส่งไฟฟ้า จะทำให้สายดินหรือเสาไฟฟ้ามียุคศักย์ไฟฟ้า สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.5)

$$\Delta U = IR_c + L di/dt \quad (2.5)$$

เมื่อ	I	คือ กระแสฟ้าผ่า
	R_c	คือ ความต้านทานรากฐานเสา
	L	คือ ค่าความเหนี่ยวนำของเสาไฟฟ้า
	di/dt	คือ ความชันของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า หรืออัตราการเพิ่มของกระแส

สาเหตุของการเกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าไม่ได้เกิดจากสาเหตุที่ฟ้าผ่าลงมาที่เสาส่งเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีอีกสาเหตุหนึ่งซึ่งส่งผลทำให้เกิดแรงดันเกินในระบบสายส่งได้เช่นกัน ซึ่งเกิดจากฟ้าผ่าลงมายังสายเฟสโดยตรง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการป้องกันด้วยสายดินซึ่งอากาศล้มเหลว (shielding failure) แสดงดังรูปที่ 2.4 ส่งผลให้มีแรงดันเกินฟ้าผ่าเข้ามาภายในของระบบไฟฟ้าได้ ซึ่งแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากสาเหตุนี้จะมีขนาดสูงกว่าแรงดันเกินที่เกิดจากสาเหตุอื่นๆ เนื่องจากการที่ฟ้าผ่าลงมาที่สายตัวนำโดยตรงส่งผลทำให้แรงดันเกินมีค่าสูง การเกิดในลักษณะนี้เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดแรงดันเกินในระบบสายส่ง



รูปที่ 2.4 สาเหตุการเกิดความล้มเหลวของสายดินซึ่งอากาศ

งานวิจัยเล่มนี้สนใจสาเหตุของการเกิดแรงดันเกินบนสายส่งที่เกิดจากการรวบไฟที่ฉนวนย้อนกลับเป็นสาเหตุหลัก ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเกิดฟ้าผ่าลงมายังสายดินซึ่งอากาศ หรือ ฟ้าผ่าลงมายังเสาส่ง ดังนั้นเพื่อเพิ่มความเข้าใจของการเกิดการรวบไฟที่ฉนวนย้อนกลับ สามารถศึกษาได้จากหัวข้อต่อไปนี้

2.3 การรวบไฟที่ฉนวนย้อนกลับ (Back flashover : BFO)

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงมายังสายดินซึ่งอากาศ หรือ ฟ้าผ่าลงมายังเสาส่งโดยตรง เสิร์จะเคลื่อนที่ไปตามสายดินซึ่งอากาศทั้งสองฝั่งและเคลื่อนที่ลงมาตามเสาไฟลงดิน ดังรูปที่ 2.5 จากงานวิจัย [5] แรงดัน V_{TA} คือแรงดันที่อยู่บนยอดเสาซึ่งมีตำแหน่งตรงข้ามกับสายเฟส A เป็นไปตามสมการที่ (2.6)

$$V_{TA} = K_{SP} K_{TA} I \quad (2.6)$$

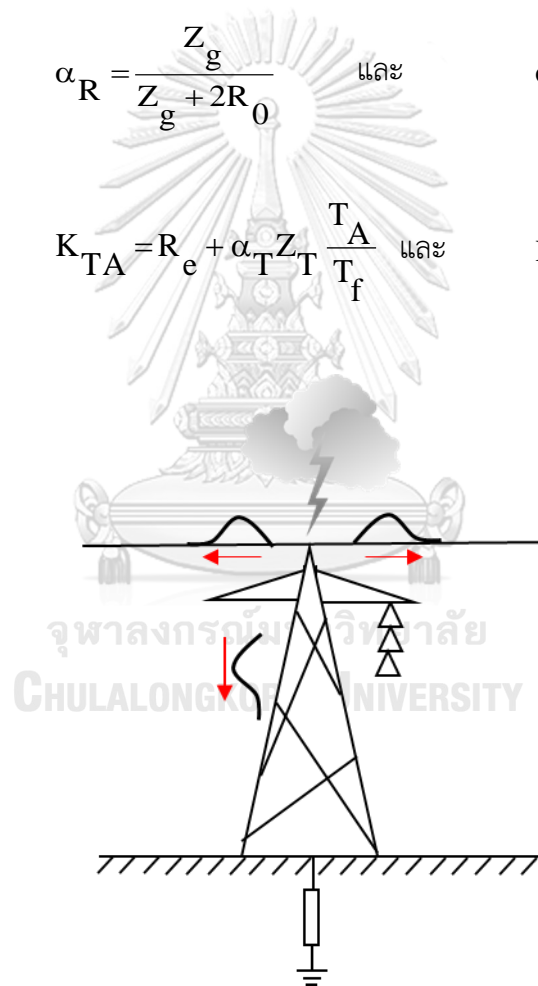
พารามิเตอร์ KSP, KTA หาได้จาก สมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$K_{SP} = 1 - \alpha_R (1 - \alpha_T) \left[\left(1 - \frac{2TS}{t_f} \right) + \alpha_R \alpha_T \left(1 - \frac{4TS}{t_f} \right) + (\alpha_R \alpha_T)^2 \left(1 - \frac{6TS}{t_f} \right) + \dots \right] \quad (2.7)$$

สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการ 2.7 เป็นดังนี้

$$\alpha_R = \frac{Z_g}{Z_g + 2R_0} \quad \text{และ} \quad \alpha_T = \frac{Z_g - 2R_i}{Z_g + 2R_i} \quad (2.8)$$

$$K_{TA} = R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_A}{T_f} \quad \text{และ} \quad R_e = \frac{Z_g R_i}{Z_g + 2R_i}$$



รูปที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของคลื่นจรเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงยังเสาส่ง

สำหรับแรงดันที่ตกคร่อมพวงลู่ถ้วย (V_f) เมื่อพิจารณาตามสายเฟสแต่ละเฟสในแรงดันของระบบสายส่ง โดยมีแพกเตอร์ควบคุมระหว่างของเฟส A B และ C เป็น CA CB และ CC ตามลำดับเป็นไปตามสมการที่ (2.9-2.11)

$$V_{IA} = (K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} (\sin \omega t) \quad (2.9)$$

$$V_{IB} = (K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} (\sin \omega t - 120^\circ) \quad (2.10)$$

$$V_{IC} = (K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP} I + V_{LN} (\sin \omega t - 120^\circ) \quad (2.11)$$

$$\text{ให้ } K_{TT} = R_e + \alpha_T Z_T \frac{T_T}{T_f}$$

กระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้ลู่ถ้วยเกิดการรวบไฟที่ฉนวนย้อนกลับหาได้จากสมการที่ (2.12 - 2.14)

$$I_{CA} = \frac{CFO_{NS} - V_{LN} \sin \omega t}{(K_{TA} - C_A K_{TT}) K_{SP}} \quad (2.12)$$

$$I_{CB} = \frac{CFO_{NS} - V_{LN} (\sin \omega t - 120^\circ)}{(K_{TB} - C_B K_{TT}) K_{SP}} \quad (2.13)$$

$$I_{CC} = \frac{CFO_{NS} - V_{LN} (\sin \omega t + 120^\circ)}{(K_{TC} - C_C K_{TT}) K_{SP}} \quad (2.14)$$

เมื่อ

t_f = เวลาที่กระแสฟ้าผ่ามีค่าสูงสุด [μs]

C = ตัวแปรการควบคุม

Z_T = ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา [Ω]

Z_g = ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดินซึ่งอากาศ [Ω]

T_T = เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ในเสาส่ง [μs]

T_A = เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ในเสาส่ง ณ ตำแหน่ง A ใดๆ [μs]

T_S = เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ในระยะห่างจากเสาต้นหนึ่งไปยังเสาอีกต้นหนึ่ง [μs]

I = กระแสฟ้าผ่า [kA]

I_R = กระแสฟ้าผ่าที่ไหลผ่านตัวฐานเสา [kA]

R_0 = ค่าความต้านฐานเสาเมื่อกระแสฟ้าผ่ามีค่าต่ำๆ [Ω]

R_i = ค่าความต้านฐานเสาเมื่อกระแสฟ้าผ่ามีค่าสูงๆ [Ω]

CFO= ค่าแรงดันการวาบไฟอิมพัลส์วิกฤต [kV]

การพิจารณากระแสฟ้าผ่าทั้งหมดที่มีค่าสูงกว่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤตและความน่าจะเป็นของการเกิดการวาบไฟที่ผิวย้อนกลับหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อัตราการเกิดการวาบไฟที่ผิวย้อนกลับ (Back flashover Rate : BFR) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.15)

$$BFR = 0.6N_L \times P(I_C) \quad (2.15)$$

เมื่อ

N_L คือ อัตราการเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่ง [ครั้ง/100 km/ปี]

$P(I_C)$ คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดกระแสฟ้าผ่าที่มีค่ามากกว่าค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต

การวาบไฟที่ผิวย้อนกลับเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดแรงดันเกินในระบบสายส่ง ซึ่งส่งผลเสียต่อสถานีไฟฟ้า ในงานวิจัยเล่มนี้ศึกษาผลกระทบเกี่ยวกับสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส ซึ่งส่วนประกอบต่างๆ และรายละเอียดของ GIS จะขอกกล่าวถึงในหัวข้ออื่นต่อไป

2.4 สถานีไฟฟ้า (Substation)

สถานีไฟฟ้ามีหน้าที่หลักในการปรับระดับแรงดันและควบคุมแรงดัน ขึ้นอยู่กับระยะทาง และปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ต้องการส่ง ในสถานีไฟฟ้าประกอบด้วยอุปกรณ์มากมาย เช่น หม้อแปลงวัดแรงดันและกระแส เซอร์คิตเบรกเกอร์ สวิตช์ตัดตอน และอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเช่น กัปดักเสิร์จ อุปกรณ์เหล่านี้จะติดตั้งรวมอยู่ภายในสถานีไฟฟ้า ซึ่งสถานีไฟฟ้าแบ่งออกเป็นสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนอากาศและสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส

1) สถานีไฟฟ้าแบบฉนวนอากาศ (Air Insulated Substation : AIS)

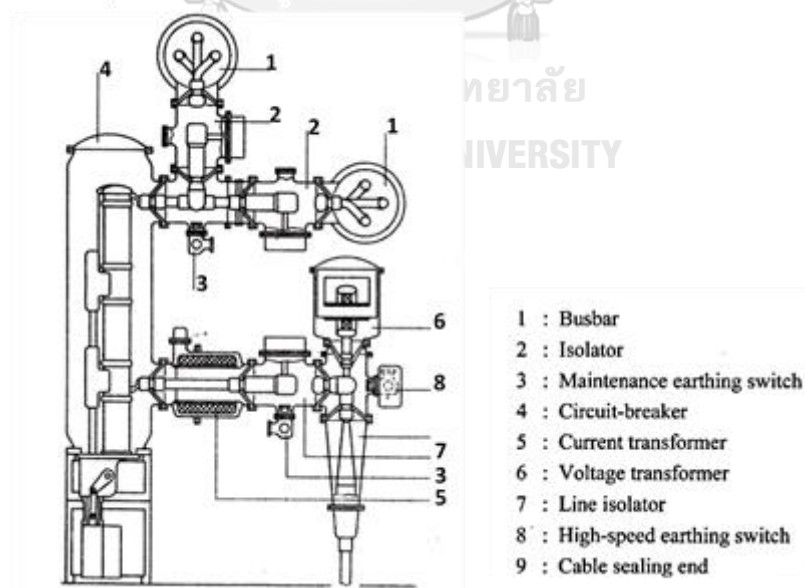
ในกรณีที่มีพื้นที่ว่างมากพอ ราคาที่ดินไม่สูง สภาพแวดล้อมเหมาะสม การจัดสร้างสถานีไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเลือกเป็นแบบชนิดฉนวนอากาศกลางแจ้ง มีอากาศเป็นฉนวนภายนอก ซึ่งการฉนวนขึ้นกับสภาวะบรรยากาศ คือ ความดัน อุณหภูมิ ความชื้น ความเปราะเปื้อน ฝุ่นละออง สิ่งเหล่านี้มีผลอย่างมากต่อการกำหนดความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของอากาศ ระยะห่างมากพอที่ปลอดภัยจากการเกิดการวาบไฟ การเบรกตาวนระหว่างเฟส และอุปกรณ์ต่างๆ มีโอกาสที่จะได้รับอันตรายจากฟ้าผ่าได้

เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์ไว้บริเวณที่โล่งและกลางแจ้ง เป็นสาเหตุที่ต้องมีการป้องกันฟ้าผ่าโดยตรง โดยมีสายดินซึ่งอากาศ และกับดักเสิร์จเป็นอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าเป็นหลัก

2) สถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส (Gas Insulated Substation : GIS)

สถานีจ่ายไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส หมายถึงสถานีจ่ายไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์ต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ได้แก่ บัสบาร์ สวิตช์ตัดวงจร สวิตช์ต่อลงดิน เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงวัดแรงดันและหม้อแปลงวัดกระแส (VT,CT) ลูกถ้วยฉนวนยึดตัวนำไฟฟ้า และรวมถึงกับดักเสิร์จ ติดตั้งอยู่ในถังหรือท่อโลหะ (โดยทั่วไปทำด้วยอะลูมิเนียมแอลลอยด์) ปิดผนึกโดยมีแก๊สอัดความดันซึ่งโดยทั่วไปเป็นก๊าซ SF₆ เป็นฉนวนภายใน ดังในรูปที่ 2.6

สถานีไฟฟ้า GIS อาจจะสร้างหรือติดตั้งอยู่กลางแจ้ง หรือภายในอาคาร อยู่ใต้พื้นดิน หรืออุโมงค์ก็ได้ การเลือกใช้สถานีไฟฟ้า GIS โดยทั่วไปจะออกแบบเพื่อให้ได้ตามวัตถุประสงค์ในเรื่องความเชื่อมั่นได้สูง มีที่ว่างจำกัด จำเป็นต้องลดขนาดหรือปริมาตรมาก มีการบำรุงรักษาน้อย ซึ่งปัจจุบันได้นำสถานีไฟฟ้า GIS มาใช้แทนสถานีไฟฟ้าแบบกลางแจ้งกันมากขึ้น เพราะสถานีไฟฟ้า GIS มีความเชื่อมั่นได้สูง อุปกรณ์ทั้งหมดจะไม่มีผลกระทบจากสภาวะบรรยากาศภายนอก ซึ่งได้แก่ ฟ้าผ่าโดยตรง ความเปราะเปื้อน ฝุ่นละออง ฝน ความชื้น จึงไม่มีผลที่จะทำให้เกิดความเสื่อมของอายุการใช้งาน ขนาดกะทัดรัดสามารถลดปริมาตรลงเหลือเพียง 1 ใน 50 ของแบบนิยมใช้ ประหยัดในการประกอบการติดตั้งเพราะทำได้สะดวกรวดเร็วและประหยัด ระดับแรงดันที่ใช้ GIS มีตั้งแต่ 72.5 kV ถึง 765 kV สำหรับประเทศไทยมีระบบ GIS ใช้ตั้งแต่ 69 kV ถึง 500 kV



รูปที่ 2.6 ภาพสเก็ทภาคตัดของ GIS 245 kV (BBC)

อย่างไรก็ตามแม้ว่าระบบของสถานีไฟฟ้า GIS จะมีความเชื่อมั่นได้สูง แต่ก็มีโอกาสที่จะได้รับผลกระทบจากแรงดันเกินฟ้าผ่าที่มาจากสายส่งได้ เมื่อแรงดันเกินเข้ามาภายในสถานีไฟฟ้าแล้ว การซ่อมแซมหรือการหาตำแหน่งการเกิดความผิดพลาดนั้นจะมีความยุ่งยาก และต้องใช้ระยะเวลาที่นาน เนื่องจากอุปกรณ์ภายในนั้นเป็นระบบปิด และยังต้องทำการงดจ่ายไฟเป็นเวลานานในระหว่างการซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้าที่เกิดความเสียหาย ดังนั้นสิ่งที่สำคัญที่สุดคือการติดตั้งระบบป้องกันแรงดันเกิน หรือการทำการประสานสัมพันธ์การฉนวนที่ดี เพื่อเป็นการป้องกันอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าที่มีความสำคัญและมีราคาสูง รายละเอียดของการป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าศึกษาได้จากหัวข้อต่อไป

2.5 การป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่า

ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง การฉนวนของอุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้ามีโอกาสได้รับแรงดันเกินฟ้าผ่า แรงดันเกินสวิตชิง และแรงดันเกินชั่วคราว ซึ่งอาจทำให้เกิดความล้มเหลว และเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นระบบจึงต้องได้รับการป้องกัน วิธีป้องกันฟ้าผ่ามีหลายวิธี ขั้นแรกคือการป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าโดยใช้สายดินชิงอากาศ ต่อมาเมื่อการป้องกันสายดินชิงอากาศล้มเหลว จึงต้องเพิ่มวิธีป้องกันโดยใช้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน ได้แก่ แยกแท่ง (rod gap) และกับดักเสิร์จ (surge arrester) โดยติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการทำการป้องกัน การป้องกันด้วยแยกแท่งจะอาศัยหลักการเส้นกราฟ V-t ของอุปกรณ์ และกราฟ V-t ของแยกแท่ง โดยจะต้องเลือกระยะแยกให้พอดีกับชนิดของแรงดันเสิร์จ สำหรับงานวิจัยเล่มนี้อุปกรณ์ที่เลือกใช้สำหรับการป้องกันสถานีไฟฟ้าคือกับดักเสิร์จ

2.5.1 การป้องกันแรงดันเกินด้วยกับดักเสิร์จ

กับดักเสิร์จ (Surge arrester) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่า และแรงดันเกินสวิตชิง ใช้ป้องกันอุปกรณ์ที่มีความสำคัญและมีราคาแพง ได้แก่ หม้อแปลงไฟฟ้า เครื่องจักรกลไฟฟ้า รีแอกเตอร์ หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าในสถานีไฟฟ้า กับดักเสิร์จจะต่อคร่อมอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการป้องกัน คือต่ออยู่ระหว่าง เฟสกับดิน กับดักเสิร์จจะประกอบไปด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น R_{non} (nonlinear resistors) มี 2 ชนิด คือ SiC (ประมาณปี 1950) และ ZnO (ประมาณปี 1970) มีลักษณะเป็นแผ่นกลมทรงกระบอก ประกอบอยู่ในกระบอกฉนวน เช่น พอร์ซเลน หรือยางซิลิโคน

2.5.1.1 กับดักเสิร์จชนิด SiC

กับดักเสิร์จชนิด SiC จะมีสปาร์กแกนต์่อนุกรมกับความต้านทาน R_{non} สปาร์กแกปเป็นตัวกำหนดขนาดพิคตแรงดันของกับดักเสิร์จ ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันไม่ให้กระแสไหลผ่านลงดิน ในขณะที่ใช้งานที่แรงดันปกติซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่ต้องการของอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ

เมื่อกับดักเสิร์จได้รับแรงดันเกินสปาร์แกปจะเกิดเบรกดาวน์โดยเร็วที่สุด แรงดันที่ตกคร่อมกับดักเสิร์จจะลดลง จะเป็นแรงดันที่เหลือคร่อมความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นของกับดักเสิร์จ เรียกว่า แรงดันคงเหลือ (residual voltage) ซึ่งค่านี้จะมีค่าต่ำกว่าค่าความคงทนของการฉนวนของอุปกรณ์หรือระบบ

2.5.1.2 กับดักเสิร์จชนิด MO (ZnO)

กับดักเสิร์จชนิดออกไซด์โลหะ (metal oxide = MO) จะใช้ความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น R_{non} ทำด้วย ZnO มีลักษณะเป็นแท่งกลมทรงกระบอกวางซ้อนกัน บรรจุในกระบอกฉนวน มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่ง ZnO เป็นตัวกำหนดขนาดกระแสหรือพลังงานเสิร์จที่ยอมให้ผ่าน ส่วนความสูง (h) เป็นตัวกำหนดขนาดแรงดัน

2.5.2 คุณสมบัติของกับดักเสิร์จ

กับดักเสิร์จประกอบด้วยความต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น เมื่อมีกระแสไหลผ่านมากขึ้น ความต้านทานกลับลดลง ดังนั้นแรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จจะไม่เป็นเชิงเส้นกับกระแส โดยคุณสมบัติของกับดักเสิร์จประกอบดังต่อไปนี้

2.5.2.1 ลักษณะเส้นแรงดัน-กระแส (U-I) ของกับดักเสิร์จ

ความไม่เป็นเชิงเส้นของความต้านทานของ ZnO ทำให้กระแสไหลผ่าน I และแรงดันตกคร่อม มีลักษณะเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.16)

$$I = kU^\alpha \quad (2.16)$$

โดยที่ α คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดวัสดุ สำหรับ ZnO มีค่าระหว่าง 20-50

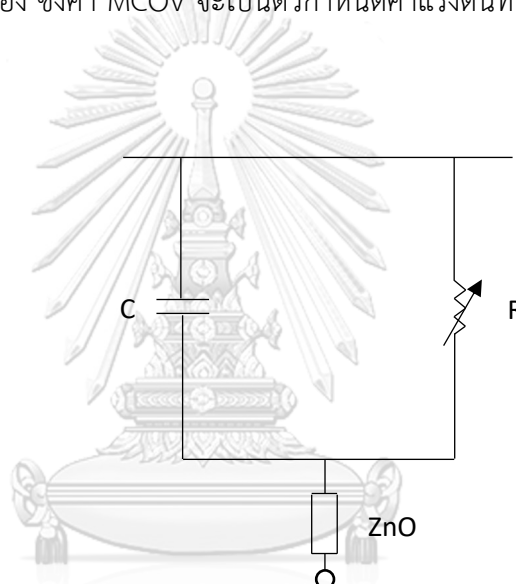
k คือ ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับวัสดุและขนาดของเกรน ถ้าเกรนยิ่งเล็ก ความคงทนต่อแรงดันยิ่งสูงขึ้น

ที่แรงดันใช้งานกระแสรั่วไหลผ่านกับดักเสิร์จชนิด ZnO มีค่าต่ำ คือมีค่าน้อยกว่า 1 mA จึงไม่จำเป็นต้องมีแกปอนุกรมกับ R_{non} เรียกว่า กับดักไร้แกป (gapless arrester)

2.5.2.2 แรงดันใช้งานต่อเนื่อง

แรงดันใช้งานต่อเนื่อง (continuous operating voltage) ตาม ANSI เรียกว่า MCOV (maximum continuous operating voltage) ตาม IEC เรียกว่า U_c เป็นค่าแรงดันความถี่พลังงาน ค่า rms สูงสุดที่ยอมให้กับดักเสิร์จต่อที่ขั้วต่อได้อย่างต่อเนื่อง กระแสที่ไหลผ่านกับดักเสิร์จที่

U_c ส่วนใหญ่เป็นกระแสชนิดเก็บประจุที่น้อยกว่า 1 mA กับดักเสิร์จชนิด MO สาร ZnO มีความต้านทานจำเพาะน้อย แต่สารเคลือบรอบนอกของ ZnO มีความต้านทานจำเพาะสูงถึง $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ และมี $\epsilon_r = 500 - 1000$ จึงมีคุณสมบัติตัวเก็บประจุ C ฉะนั้น แท่ง MO จึงเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 2.7 กับดักเสิร์จไร้แก๊ปที่รับแรงดันใช้งาน (ที่ต่อระหว่างเฟสกับสายดิน) ตลอดเวลา นั้นหมายความว่า จะมีการแสร์วไหลผ่านแปลงเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้น และยังทำให้มีการแสร์ไหลผ่านเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อมีการแสร์ไหลผ่านมากขึ้นส่งผลทำให้มีความร้อนเพิ่มขึ้นสูงตามด้วย และหากอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นไปเรื่อยๆ อาจเกิดสภาวะความร้อนเกินไม่หยุดยั้ง (thermal runaway) นำไปสู่การระเบิดได้ ซึ่งการเกิดในลักษณะเช่นนี้มักเกิดขึ้นสำหรับกับดักเสิร์จชนิด MO ที่ทำงานที่แรงดันสูงเกินไปอย่างต่อเนื่อง ซึ่งค่า MCOV จะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันทำงานต่อเนื่องสูงสุดของกับดักเสิร์จ



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของแท่งบล็อก MO

2.5.2.3 พิกัดกระแสดีสชาร์จ

พิกัดกระแสดีสชาร์จเป็นค่ากระแสฟ้าผ่าสูงสุดที่คาดการณ์จากการประสานการฉนวน ด้วยกับดักเสิร์จ โดยคำนวณจากค่าแรงดันการรวบไฟของลูกถ้วย ระดับแรงดันป้องกันของกับดักเสิร์จและเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสาย โดยพิกัดกระแสดีสชาร์จที่มีให้เลือกใช้เป็นอย่างนี้

ระบบจำหน่าย (distribution) : 5 kA

สถานี (station) < 500 kV : 10 kA

2.5.2.4 พลังงาน

ในกรณีแรงดันเสิร์จสวิตชิง เกิดจากการทำงานของเซอร์กิตเบรกเกอร์บนสายส่งจ่ายระยะยาว ที่ปลายทางไม่มีโหลดหรือมีแต่หม้อแปลง ซึ่งจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงเมื่อนวงจรปลายเปิด จะทำให้เกิดคลื่นสะท้อนที่จุดปลายส่งผลทำให้คลื่นสะท้อนกลับหมดทำให้แรงดันเสิร์จมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า แต่ขนาดแรงดันเกินยังสูงไม่พอที่กักดับเสิร์จจะทำงานส่งผลทำให้แรงดันเกินเคลื่อนที่ไปยังจุดกำเนิดซึ่งก็คือตำแหน่งของเซอร์กิตเบรกเกอร์นั่นเอง ดังนั้นเวลาที่คลื่นจรเคลื่อนที่มีค่าเป็น 2τ โดยที่ $\tau=l/v$, v คือความเร็วคลื่นจรบนสายซึ่งอากาศมีค่า $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ ดังนั้นพลังงานที่กักดับเสิร์จจะต้องได้รับ เป็นไปตามสมการที่ (2.17) ในหน่วยของ kJ/kV

$$W = 2U_0 I \tau / U_r \quad (2.17)$$

เมื่อ	U_0	คือ ขนาดของแรงดันเกินเสิร์จ
	I	คือ กระแสที่ไหลผ่านกับดับเสิร์จ
	τ	คือ เวลาของคลื่นจรที่เคลื่อนที่ในสายส่ง
	U_r	คือ พิกัดแรงดันของกับดับเสิร์จ

ถ้ากับดับเสิร์จที่ปลายทางทำงาน แรงดันที่เหลือจะเป็นพลังงานที่กับดับเสิร์จได้รับจากการดิสชาร์จของสายส่ง คำนวณได้จากสมการที่ (2.18)

$$W = 2\tau U_{res} (U_0 - U_{res}) / Z_w U_r \quad (2.18)$$

เมื่อ Z_w คือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายส่งจ่าย

2.5.2.5 แรงดันคงเหลือ (residual voltage : U_{res})

แรงดันคงเหลือคือแรงดันค่ายอดที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วของกับดับเสิร์จ ขณะที่เกิดกระแสเสิร์จดิสชาร์จไหลผ่าน ขึ้นอยู่กับขนาดและลักษณะคลื่นกระแส ค่าแรงดันคงเหลือจะเป็นตัวกำหนดค่าระดับแรงดันป้องกัน (protection level : U_p) ของกับดับเสิร์จให้กับอุปกรณ์อื่นๆ

2.5.2.6 พิกัดแรงดันของกัปดักเสิร์จ (rating of surge arrester : U_r)

ตาม IEC พิกัดแรงดันของกัปดักเสิร์จหมายถึง แรงดัน AC ที่กัปดักเสิร์จจะต้องทนได้อย่างน้อย 10 วินาที หลังจากผ่านการอบที่ 60°C และรับพลังงานตามที่มาตรฐานกำหนด หรือเรียกว่า TOV capability อย่างน้อยเท่ากับค่า U_c สำหรับเวลา 10 วินาที โดยปกติจะให้ $U_r > U_c \approx 15 - 30\%$

2.5.3 การประสานสัมพันธ์การฉนวน (insulation coordination)

การประสานสัมพันธ์การฉนวนคือ การเลือกระดับความคงทนฉนวนของอุปกรณ์ให้สัมพันธ์กับแรงดันเกินที่คาดว่าจะเกิดขึ้น และให้สัมพันธ์กับคุณลักษณะของกัปดักเสิร์จ มีพิกัดแรงดันที่เหมาะสมและอาจจะต้องคำนึงถึงสภาพสิ่งแวดล้อมด้วย การประสานสัมพันธ์การฉนวนเป็นมาตรการที่ทำให้ฉนวนของอุปกรณ์หรือระบบไม่ให้เกิดความเสียหายจากแรงดันเกินชนิดต่างๆ การออกแบบจะให้อนวนทนแรงดันเกินได้ในระดับหนึ่ง ส่วนขนาดของแรงดันเกินที่เกินไปมากกว่านั้นจะอาศัยอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินเป็นตัวทำให้ระดับแรงดันเกินเสิร์จมีขนาดลดลงต่ำพอ เพื่อที่จะไม่ให้เป็นอันตรายและสร้างความเสียหายแก่ฉนวนได้

สำหรับในงานวิจัยเล่มนี้ อุปกรณ์ป้องกันกัปดักเสิร์จที่เลือกใช้งานคือกัปดักเสิร์จชนิด MO เนื่องจากลักษณะสมบัติของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO ตามมาตรฐาน IEC 99-4,1994 คือ ไม่มีแก๊ปกระแสไหลผ่านเป็นไปตามลักษณะ U-I รับพลังงานเพิ่มได้โดยต่อกัปดักเสิร์จขนาดกัน ความเปราะเปื้อนไม่มีผลต่อการทำงานของกัปดักเสิร์จชนิด ZnO และ ไม่มีกระแสไหลตามเมื่อแรงดันเสิร์จผ่านตัวกัปดักเสิร์จ โดยวิธีการเลือกพิกัดของกัปดักเสิร์จเป็นไปดังนี้

การเลือกพิกัดแรงดันของกัปดักเสิร์จ (U_r) จะต้องทราบค่าต่างๆ ดังนี้

- MCOV หรือ U_c ให้สอดคล้องกับค่า TOV โดยปกติ $U_r > U_c$
- พิกัดแรงดันของกัปดักเสิร์จ (U_r) ให้สอดคล้องกับแรงดันเกินชั่วครู่
- แรงดันระดับป้องกัน U_p

ความสัมพันธ์ของค่า BIL ระดับป้องกัน ระดับการฉนวน และระดับแรงดันของระบบ ดังในรูปที่ 2.8 กรณีของแรงดันระบบ $U_m < 300 \text{ kV}$ ระดับการฉนวนต้องทนต่อแรงดันอิมพัลส์ได้กำหนดด้วยค่า BIL ซึ่งจะกำหนดได้จากระดับแรงดันของระบบตามตารางมาตรฐานกำหนด เมื่อ U_m คือแรงดันสูงสุดของระบบ



รูปที่ 2.8 การประสานสัมพันธ์การฉนวนของอุปกรณ์

2.5.3.1 การเลือกระดับ MCOV หรือ ค่า U_c [4]

การเลือกระดับ U_c และการเลือกขนาดกักเก็บต้องมีการพิจารณาการต่อลงดิน

ของระบบ

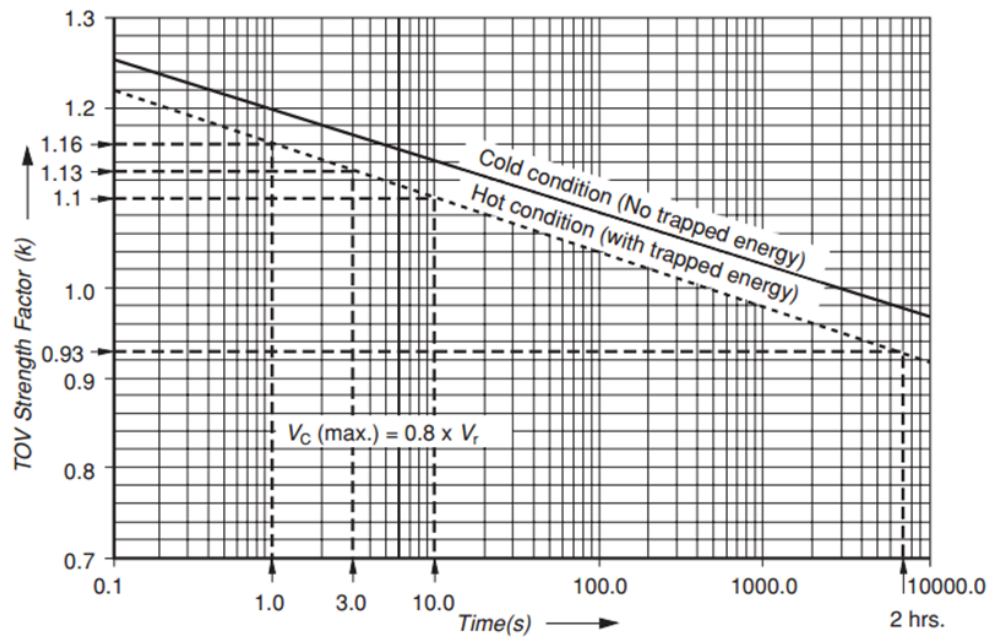
- นิวทรัลระบบไม่ต่อลงดิน (insulated network)
นิวทรัลระบบไม่ต่อลงดิน U_c จะมีค่าสูงสุด : $U_c \geq U_m$
- นิวทรัลต่อลงดินยังผล (effectively grounding system) โดยค่า U_c หาได้จาก

สมการที่ (2.19)

$$U_c = 1.1 U_m / \sqrt{3} \quad (2.19)$$

2.5.3.2 การเลือกพิกัดแรงดันของกักเก็บ

โดยพิจารณาจากค่าความคงทน TOV (T) ในฟังก์ชันเวลา (TOV strength) ความสัมพันธ์ระหว่างความคงทน T ต่อแรงดันเกินชั่วครู่ (TOV) ของกักเก็บในเทอมของเวลา t แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างความคงทน T ในเทอมของเวลา TOV [4]

เมื่อ Cold condition คือเส้นที่ไม่ได้ป้อนพลังงานให้กับดักเสิร์จก่อนรับแรงดันเกิน

Hot condition คือเส้นที่ป้อนพลังงานให้กับดักเสิร์จก่อนรับแรงดันเกิน

เพื่อความปลอดภัยในการเลือกใช้งานกับดักเสิร์จ เราจะต้องเลือกใช้กับดักเสิร์จภายใต้เงื่อนไข Hot condition เราคำนวณหาค่า U_r เป็นดังนี้

$$U_r \geq \left(\frac{k_e}{T} \right) \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (2.20)$$

เมื่อ k_e คือ แฟกเตอร์ผิดพ่วงลงดิน

= 1.4 สำหรับต่อลงดินโดยตรงคือ U ของเฟสที่ไม่ผิดพ่วง $\approx 0.8 U_{line} = 0.8 U_{ph} \sqrt{3}$

= 1.73 สำหรับนิวทรัลไม่ต่อลงดิน

T คือ แฟกเตอร์ในเทอมเวลาของ TOV

U_m คือ แรงดันสูงสุดของระบบ [kV]

ถ้าค่าแฟกเตอร์ผิดพ่วงลงดินมีค่าเท่ากับ 1.4 และถ้าหาก TOV เกิดนาน 3 วินาที จากเส้นกราฟในเงื่อนไข Hot condition ในรูปที่ 2.9 จะได้ค่า $T = 1.13$

ดังนั้น

$$U_r \geq \left(\frac{1.4}{1.13} \right) \frac{U_m}{\sqrt{3}} \geq 1.24 \frac{U_m}{\sqrt{3}}$$

2.5.2.3 ระดับแรงดันป้องกัน Up [4]

ระดับแรงดันป้องกันหรือค่า Up ก็คือค่าแรงดันคงเหลือ (Ur) ของกัปดักเสิร์จนั่นเอง ถ้าหากเลือกใช้งานกัปดักเสิร์จที่มีค่า Up ต่ำๆ ก็จะเป็นผลดีต่ออุปกรณ์ที่ทำการป้องกันเนื่องจากจะมีช่วงเผื่อ (margin) ระหว่างค่า Up กับค่า BIL มากขึ้น แต่ก็ต้องคำนึงถึงการเสี่ยงต่อแรงดันเกินชั่วคราวด้วย เมื่อนำค่า Up ไปเทียบกับค่ายอด \hat{U}_p หรือค่า MCOV เราจะเรียกค่านี้ว่า อัตราส่วนป้องกัน (protection ratio : k_p) แสดงดังตารางที่ 2.4

$$k_p = \frac{\hat{U}_p}{\hat{U}_c} \quad (2.21)$$

เมื่อ

\hat{U}_p คือ ระดับแรงดันป้องกัน [kV]

\hat{U}_c คือ แรงดันไฟฟ้าใช้งานต่อเนื่องของกัปดักเสิร์จ [kV]

ตารางที่ 2.4 ค่าอัตราส่วนของการป้องกัน (k_p) [4]

กระแสมัลส์	ค่ากระแสพิกัด I_n	อัตราส่วนป้องกัน
กระแสมัลส์ฟ้าผ่าปกติ 8/20 μ s	2.5 – 30 kA	1.7 – 2.2
กระแสมัลส์สูง 4/10 μ s	65 – 100 kA	2.5 – 2.9
กระแสมัลส์สวิตซ์ 30/60 μ s	125 – 3000 kA	1.5 – 1.8

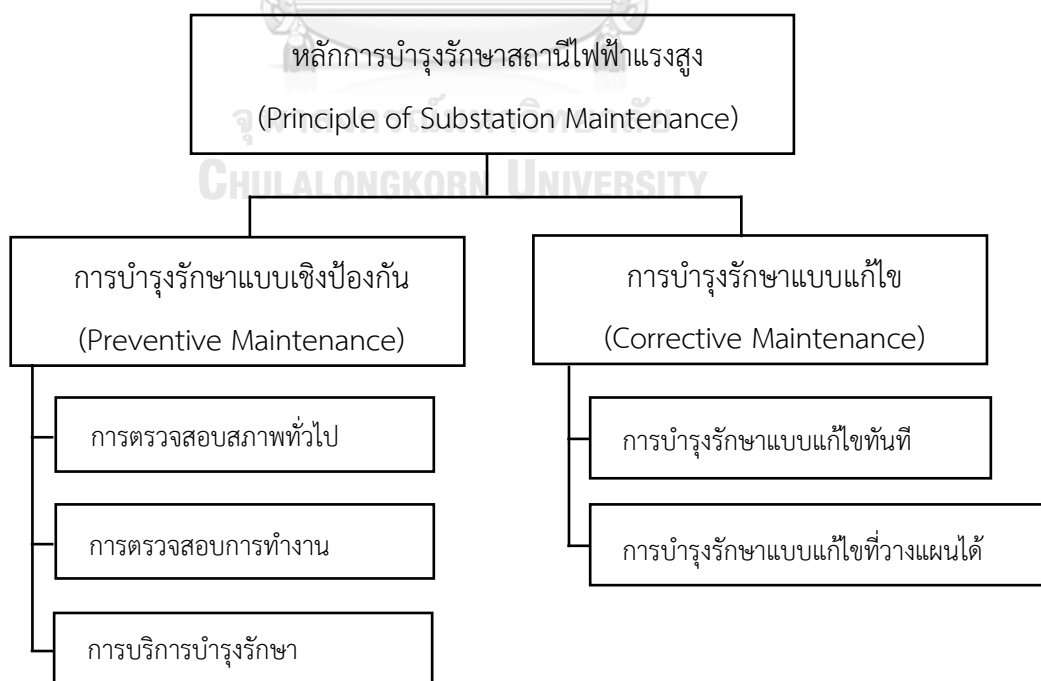
2.6 การบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง

การซ่อมบำรุงรักษาตัวสถานีไฟฟ้าแรงสูง ในสมัยก่อนจะรอให้เกิดการขัดข้องขึ้นก่อน จึงจะดำเนินการแก้ไข เราเรียกการบำรุงนี้ว่า การบำรุงรักษาเมื่อเครื่องจักรเสีย (Breakdown Maintenance) ต่อมาการบำรุงรักษาดังกล่าวส่งผลทำให้เกิดปัญหาหลายอย่างตามมา เช่น การเสียโอกาสในการจ่ายไฟเนื่องจากต้องงดจ่ายไฟเป็นเวลานานจนกว่าจะทำการซ่อมบำรุงรักษาเสร็จสิ้น สิ่งนี้ส่งผลกระทบโดยตรงต่อผู้ใช้ไฟและกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ และเกิดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่สูงเนื่องจากเกิดการขัดข้องของอุปกรณ์ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงบ่อยครั้ง ทำให้เกิดความเสียหายอย่าง

มาก ด้วยสาเหตุนี้จึงมีการพัฒนาวิธีการบำรุงรักษาเป็นแบบเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) คือ การซ่อมบำรุงรักษาอุปกรณ์โดยตรวจสอบตามข้อมูลอายุการใช้งานที่แนะนำจากผู้ผลิตเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาดของอุปกรณ์ โดยส่วนใหญ่เป็นการจัดแผนงานการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง จนทำให้ปัญหาไฟดับลดลงได้ในระดับหนึ่ง การบำรุงรักษาที่ดีจะต้องเป็นการบำรุงรักษาที่ถูกวิธีตามข้อกำหนดและมาตรฐานของอุปกรณ์แต่ละชนิด อีกทั้งต้องถูกวิธีในจังหวะเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการที่ต่ำ และสิ่งสำคัญคือต้องคำนึงถึงความปลอดภัย อาชีวอนามัยของผู้ปฏิบัติงาน และสิ่งแวดล้อมตามมาตรฐานสากล

2.6.1 หลักการปฏิบัติงานบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง

การบำรุงรักษา หมายถึงการทำให้ระบบมีความสามารถในการผลิตที่คงที่สม่ำเสมอ และมีการควบคุมต้นทุนในขณะเดียวกัน การบำรุงรักษา รวมถึงกิจกรรมทุกอย่างที่รักษาให้อุปกรณ์ต่างๆ ในระบบทำงานได้อย่างเป็นระเบียบ ขณะที่ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ไฟฟ้าคือ ความน่าจะเป็นที่ส่วนต่างๆ ของระบบจะทำงานได้อย่างเหมาะสมในเวลาที่กำหนดภายในเงื่อนไขที่ระบุ โดยมีวัตถุประสงค์ของการซ่อมบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูงคือ การปรับปรุงส่วนประกอบย่อยของอุปกรณ์ให้ทำงานได้ดีตลอดเวลาและมีความน่าเชื่อถือได้ และการแก้ไขอุปกรณ์ที่ทำงานผิดพลาดหรือเกิดการขัดข้องขึ้นมาให้กลับคืนสู่สภาพปกติที่สามารถทำงานได้ตามที่ต้องการ หลักในการบำรุงรักษาสถานีบำรุงรักษา สถานีไฟฟ้าแรงสูงแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 หลักการบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง

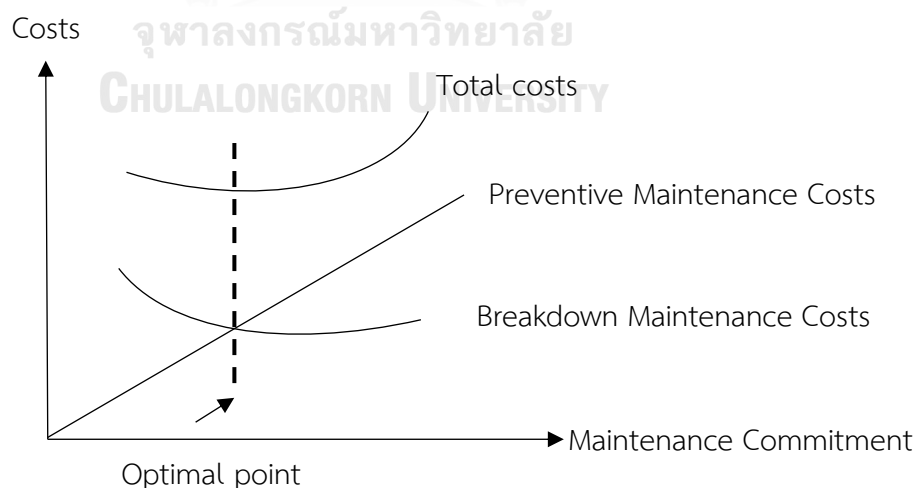
2.6.2 เศรษฐศาสตร์การบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูง

การบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญและเป็นเรื่องจำเป็น แต่การบำรุงรักษาก็มีค่าใช้จ่าย การบำรุงรักษาเชิงป้องกันอาจต้องเปลี่ยนอุปกรณ์บางรายการก่อนที่จะชำรุด เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า (Reliability) หรือเป็นความน่าจะเป็นที่ส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าจะทำงานได้เหมาะสมในระยะเวลาหนึ่ง โดยเราใช้ค่าเหล่านี้วัดความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้า มีดังนี้ 1. Failure Rate และ 2. Mean Time Between Failure (MTBF) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.22 และ 2.23

$$\text{Failure Rate \%} = \frac{\text{number of failure} \times 100\%}{\text{number of units tested}} \quad (2.22)$$

$$\text{MTBF} = \frac{1}{\text{Failure Rate \%}} \quad (2.23)$$

แต่สำหรับการเปลี่ยนอุปกรณ์บางอย่างก่อนที่อุปกรณ์เหล่านั้นจะชำรุดเสียหาย ซึ่งในความเป็นจริงอุปกรณ์นั้นยังสามารถใช้งานได้อยู่ แต่เพื่อความเชื่อถือของระบบไฟฟ้าที่ต้องการความเชื่อมั่นสูงจึงจำเป็นต้องเปลี่ยนอุปกรณ์บางอย่างที่มีความสำคัญอย่างมากต่อระบบไฟฟ้า และขึ้นอยู่กับความพึงพอใจและยอมรับได้ของเจ้าของระบบ จึงเป็นค่าใช้จ่ายส่วนเกินที่เจ้าของระบบจะต้องแบกรับภาระนี้ไว้ ในกรณีนี้ ทางด้านเศรษฐศาสตร์กับการบำรุงรักษาจึงมีความสำคัญ การพิจารณาเรื่องความจำเป็นในการบำรุงรักษาเพื่อหาจุดคุ้มทุน หรือจุดที่ค่าใช้จ่ายต่ำสุด เป็นไปตามที่แสดงในรูปที่ 2.11

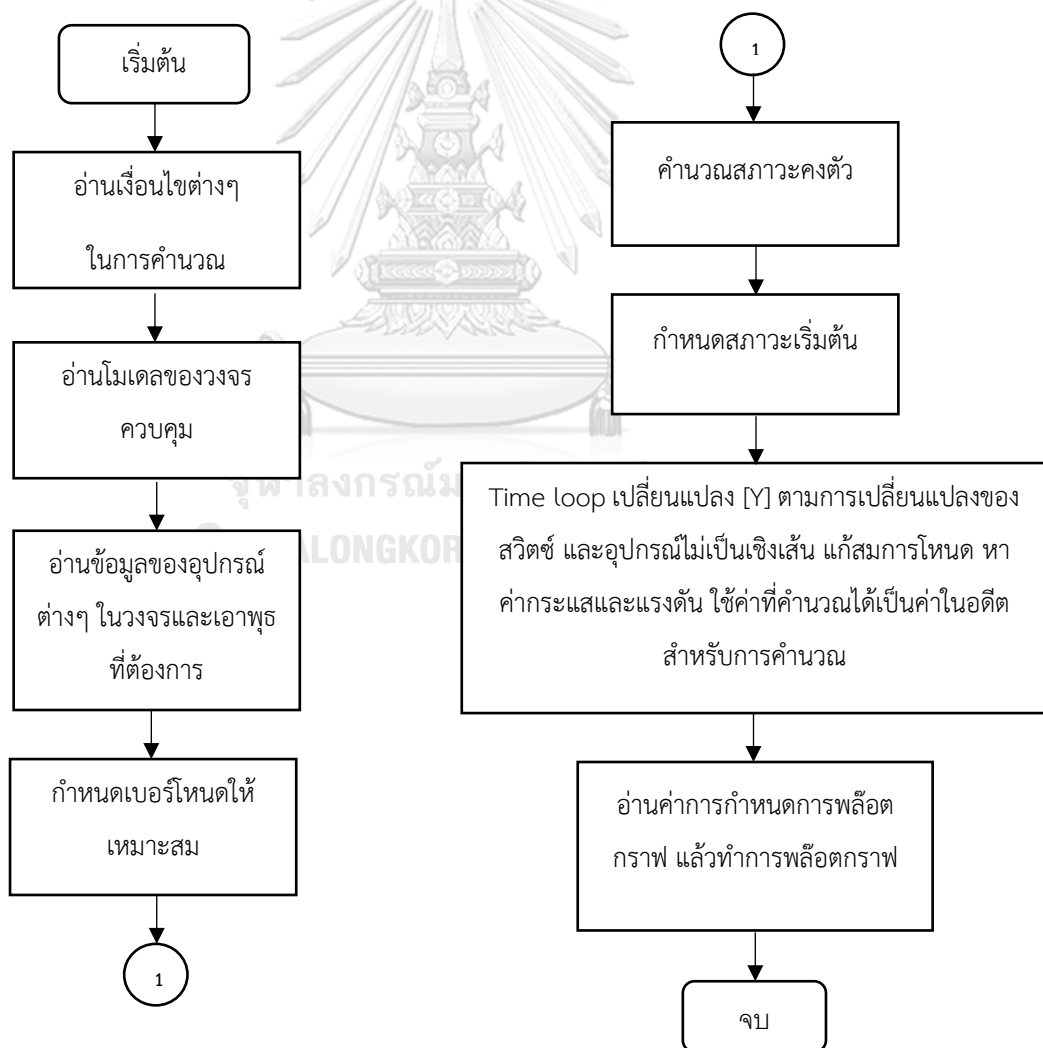


รูปที่ 2.11 กราฟแสดงต้นทุนการบำรุงรักษา [6]

บทที่ 3

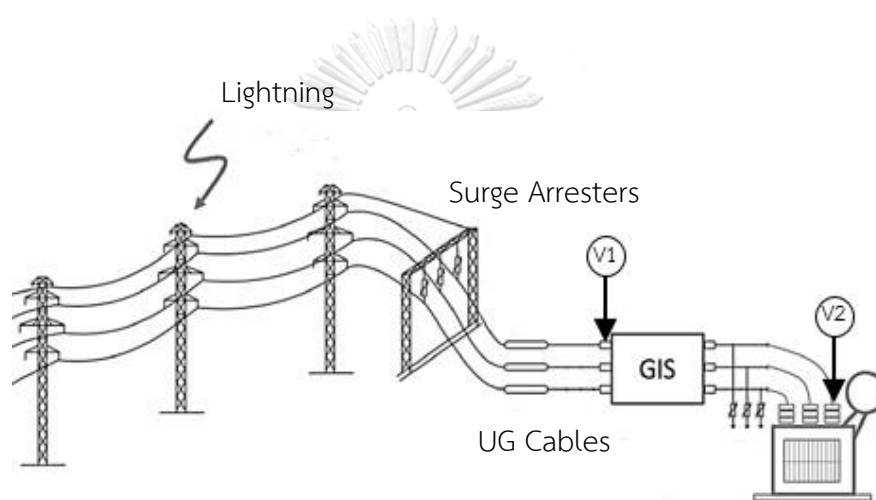
การคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ และการสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้า

โปรแกรมที่นิยมใช้วิเคราะห์แรงดันเกินทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้าคือโปรแกรม ATPDraw/EMTP โปรแกรม EMTP ได้มีการพัฒนาและวิจัยมาเป็นระยะเวลาเกือบ 30 ปี ในช่วงต้น พ.ศ.2503 ได้มีการนำดิจิทัลคอมพิวเตอร์มาใช้งานอย่างกว้างขวางทั่วโลก การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจึงเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากระบบแอนะล็อกมาใช้ดิจิทัลคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ Dr.Dommel แห่งมหาวิทยาลัย Munich ประเทศเยอรมันได้เริ่มพัฒนาโปรแกรมสำหรับการคำนวณทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้าแบบดิจิทัลขึ้น การทำงานของโปรแกรม ATPDraw สามารถเขียนเป็นผังไพอ์ชาร์ท [9] แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ไพอ์ชาร์ทการทำงานของโปรแกรมทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำโปรแกรม EMTP มาใช้วิเคราะห์แรงดันเกินฟ้าผ่า โดยระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาคือ ระบบส่งไฟฟ้าด้วยสายส่งเหนือศีรษะที่ต่อร่วมกับสายเคเบิลใต้ดินก่อนที่จะเชื่อมต่อกับสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากนั้นต่อเข้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าที่จุดปลาย แสดงดังรูปที่ 3.2 แบบจำลองระบบส่ง 115 kV ที่วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม EMTP เพื่อดูผลกระทบที่เกิดจากแรงดันเกินฟ้าผ่า ประกอบด้วยสายส่งเหนือศีรษะ สายเคเบิลใต้ดิน สถานีไฟฟ้า GIS และหม้อแปลงไฟฟ้า โดยพิจารณาจุดติดตั้งกับดักเสิร์จ 2 จุดคือ 1) บริเวณใกล้กับจุดเชื่อมต่อระหว่างสายส่งเหนือศีรษะและสายเคเบิลใต้ดิน และ 2) ที่หม้อแปลงไฟฟ้า โดยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองต่างๆ และส่วนประกอบต่างๆ ในระบบไฟฟ้า จำลองโดยใช้แบบจำลองดังนี้



รูปที่ 3.2 ระบบส่ง 115 kV

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

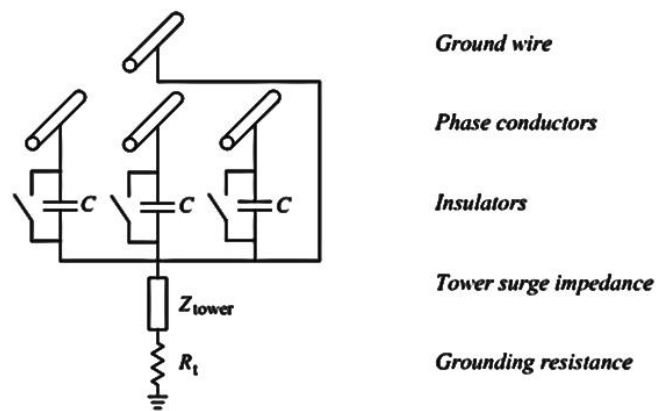
3.1 แบบจำลองเสาส่ง CHULALONGKORN UNIVERSITY

เสาส่งไฟฟ้ามีหน้าที่หลักคือเป็นตัวกลางในการส่งจ่ายไฟฟ้าจากแหล่งหนึ่งไปยังอีกแหล่งหนึ่ง เพื่อนำไปสู่การจำหน่ายไปยังผู้ใช้ไฟ เสาส่งไฟฟ้าที่ใช้งานในปัจจุบันมีอยู่ 3 ชนิด คือ เสาคอนกรีต เสาโครงเหล็ก และเสาชนิด Monopole ซึ่งการเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับแรงดันที่ใช้งาน ความเหมาะสมพื้นที่ติดตั้ง และสภาพแวดล้อมในการติดตั้ง เป็นต้น ในงานวิจัยเล่มนี้เลือกใช้เสาส่งแบบโครงเหล็ก 115 kV ตามการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค สำหรับการสร้างแบบจำลองเสาส่ง 115 kV ที่เป็นเสาโครงเหล็ก จากงานวิจัย [10] ได้กล่าวว่า แบบจำลองของเสาส่งแบ่งออกได้ 3 แบบใหญ่ๆ 1) single vertical lossless line models เช่น โมเดล Jordan 2) multiconductor models เช่น โมเดล Ametani et al. และ 3) multistory models เช่น Yamada et al. แบบจำลองเสาส่งโครงเหล็ก 115 kV ที่เลือกใช้ในงานวิจัยจัดอยู่ในแบบที่ 1 ซึ่งเป็นแบบจำลองเสาส่งรูปทรงเรขาคณิตอย่างง่าย เช่น ทรงกระบอก หรือโคน จำลองด้วยพารามิเตอร์แบบกระจาย (distributed parameter) โดยมีค่า

เสิร์จอิมพีแดนซ์ที่ขึ้นอยู่กับชนิดของเสาส่ง วงจรสมมูลของเสาส่ง แสดงดังรูปที่ 3.3 จำลองโดยใช้สายส่งที่ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์มีค่าอยู่ระหว่าง 100 – 300 โอห์ม และความเร็วของเสิร์จมีค่าเท่ากับ 0.85 เท่าของความเร็วของแสง และต่อด้วยตัวต้านทานฐานเสาที่ปลายของวงจร แรงดันเกินที่เกิดขึ้นในเสาส่งมีสาเหตุหลักมาจากตัวต้านทานฐานเสาที่ส่งผลทำให้เกิดการสะท้อนของคลื่นที่เคลื่อนที่ลงมาจากบทยอดเสาทำให้เกิดแรงดันเกินที่ยอดเสามีขนาดสูงขึ้น อิทธิพลของตัวต้านทานเสาที่มีผลต่อแรงดันเกินบนยอดเสาขึ้นอยู่กับเวลาในการตอบสนองและกระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น ณ เวลานั้น ค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาส่ง 115 kV หาได้จากสมการที่ (3.1)

$$Z_T = 60 \ln \left(\frac{h}{r} \right) - 60 \quad (3.1)$$

เมื่อ h คือ ความสูงของเสาส่ง [m]
 r คือ รัศมีของเสาส่ง



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของเสาส่ง

3.2 แบบจำลองตัวต้านทานฐานเสา

แบบจำลองตัวต้านทานฐานเสา เป็นอีกพารามิเตอร์หนึ่งที่ต้องมีการสร้างแบบจำลองให้ใกล้เคียงกับสถานการณ์จริง เนื่องจากเป็นพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลทำให้เกิดแรงดันเกินบนยอดเสาส่งเพิ่มขึ้นสูงได้ แบบจำลองตัวต้านทานฐานเสาอย่างง่าย สามารถแทนด้วยตัวต้านทานค่าคงที่เทียบกับค่าความต้านทานดินที่มีกระแสและความถี่ต่ำ (R_0) แต่สำหรับการสร้างแบบจำลองตัวต้านทานฐานเสาที่ซับซ้อนมากขึ้น เราจะใช้แบบจำลองชนิดที่ขึ้นกับกระแส โดยส่วนใหญ่แบบจำลองที่เลือกใช้งาน นั้น

คือการสร้างแบบจำลองที่แทนด้วยค่าความต้านทานฐานเสาที่ขึ้นอยู่กับกระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น (R_T) เมื่อเกิดกระแสฟ้าผ่าที่มีขนาดมากพอทำให้เกิดการไอออนไนซ์ในดินส่งผลทำให้กระแสที่ไหลภายในดิน และค่าความต้านทานดินเปลี่ยนแปลง ดังนั้นแบบจำลองค่าความต้านทานฐานเสาตาม CIGRE สามารถหาได้จากสมการที่ (3.2) โดยค่าความต้านทานที่กระแสฟ้าผ่าและความถี่ต่างๆ และค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 10Ω และ $100 \Omega.m$ ตามลำดับ

$$R_T = \frac{R_o}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}}, \quad I_G = \frac{E_o \rho}{2\pi R_o^2} \quad (3.2)$$

เมื่อ

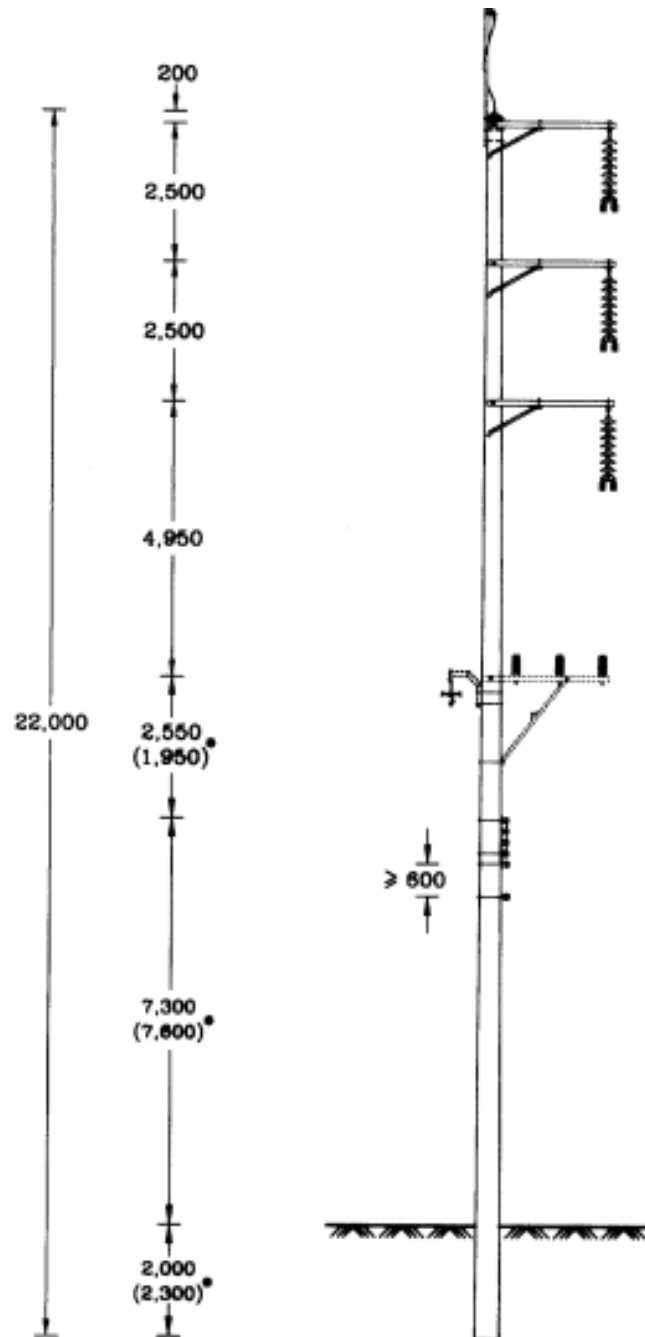
R_T	คือ ความต้านทานฐานเสา
R_o	คือ ความต้านทานที่กระแสฟ้าผ่าต่ำและความถี่ต่ำ
I	คือ กระแสเสิร์จที่ไหลลงดิน
I_g	คือ กระแสที่ทำให้ดินเริ่มเกิดการแตกตัวเป็นไอออน
E_o	คือ สนามไฟฟ้าของการแตกตัวเป็นไอออนของดิน (400 kV/m)
ρ	คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน

3.3 แบบจำลองสายส่ง

สายส่งที่ใช้ในการจำลองมีทั้งสายส่งเหนือศีรษะ และสายส่งเคเบิลใต้ดิน ซึ่งการสร้างแบบจำลองนี้ต้องให้มีความถูกต้องและแม่นยำ เพื่อให้สอดคล้องกับการวิเคราะห์แรงดันเกินในระบบไฟฟ้า และจากงานวิจัย [1] สายส่งเหนือศีรษะแทนด้วยแบบจำลองที่ขึ้นอยู่กับความถี่หลายเฟส (multi-phase models) โดยพิจารณาจากลักษณะของพารามิเตอร์สายส่งในช่วงความถี่ที่เกี่ยวข้อง พารามิเตอร์ของสายส่งสามารถกำหนดได้จากค่าโครงสร้างของเสาส่ง โดยทั่วไปพารามิเตอร์เหล่านี้จะคำนวณที่ความถี่ 500 kHz สำหรับการศึกษาฟ้าผ่าโดยพิจารณาผลกระทบที่ผิว (skin effect) ร่วมด้วย ส่วนใหญ่ค่าของเสิร์จอิมพีแดนซ์สำหรับโมเดลสายส่งมีค่าอยู่ระหว่าง 250 – 500 โอห์ม

ในงานวิจัยนี้ใช้เสาส่ง 115 kV ตามการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยมีสายส่งเหนือศีรษะประกอบด้วยกัน 3 เฟส และมีสายล่อฟ้าอยู่บนสายเฟสอีก 1 สาย การสร้างแบบจำลองสายส่งเลือกใช้แบบจำลองพารามิเตอร์ที่ขึ้นอยู่กับความถี่ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่ของค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ แบบจำลองความถี่ที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ

แบบจำลอง J-Marti ตามคำแนะนำการสร้างแบบจำลองสำหรับการศึกษาแรงดันเกินทรานเซียนต์
ของพารามิเตอร์สายส่ง



รูปที่ 3.4 ข้อมูลขนาดของเสาส่ง 115 kV

3.4 แบบจำลองสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส

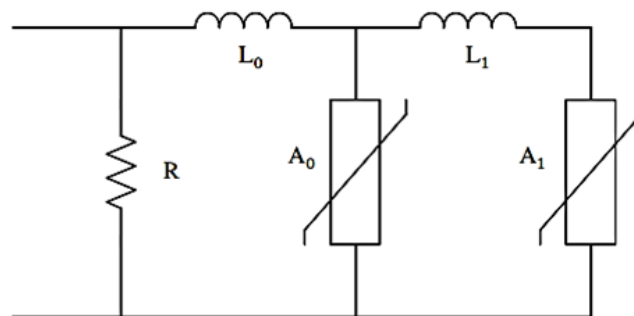
จากงานวิจัย [1] ได้เสนอการสร้างแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้า GIS ไว้ดังนี้ เซอร์กิตเบรกเกอร์ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดัน และหม้อแปลงกระแส อุปกรณ์เหล่านี้แทนด้วยตัวเก็บประจุแบบสเตรย์ (stray capacitances) ต่อลงดิน ถ้าหากสวิตช์ตัดตอน หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์มีมากกว่าหนึ่งอัน ควรจะมีการเพิ่มตัวเก็บประจุลงไปในแบบจำลองเพื่อให้ได้ค่าความจุที่เหมาะสม นอกจากนี้ถ้าบางส่วนของอุปกรณ์ภายในสถานีที่อยู่ใกล้กัน เช่น ระยะห่างของอุปกรณ์ที่ใกล้กันกว่า 3 เมตร ถึง 5 เมตร การสร้างแบบจำลองตัวเก็บประจุแบบสเตรย์สามารถจัดกลุ่มเข้าด้วยกันเพื่อความง่ายต่อการจำลอง การเปิด-ปิดของเซอร์กิตเบรกเกอร์หรือสวิตช์ตัดตอนสามารถสร้างแบบจำลองด้วยสวิตช์อุดมคติ (ideal switches) ส่วนบัสบาร์และตัวนำระหว่างจุดต่างๆ ที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายในสถานีแทนด้วยสายตัวนำ ซึ่งสายตัวนำเหล่านี้จำลองด้วยแบบจำลองพารามิเตอร์แบบ untransposed distributed โดยทั่วไปแล้วแบบจำลองสายตัวนำแทนด้วยเส้นรัจิมพีแดนซ์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 60 โอห์ม สายเคเบิลแทนด้วยแบบจำลองพารามิเตอร์แบบกระจาย โดยมีค่าเส้นรัจิมพีแดนซ์อยู่ระหว่าง 30 – 60 โอห์ม และความเร็วของเส้นรัจิมค่าเท่ากับ 0.33 หรือ 0.5 เท่าของความเร็วแสง

3.5 แบบจำลองกับดักเสิร์จ

กับดักเสิร์จหรือกับดักฟ้าผ่ามีหน้าที่ป้องกันอันตรายจากแรงดันเกินฟ้าผ่า หรือแรงดันเกินสวิตช์ โดยกับดักเสิร์จจะต่อคร่อมกับอุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน หรือต่อไว้ข้างหน้าอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อที่ช่วยลดขนาดของแรงดันเกินที่ไหลเข้ามาภายในระบบไฟฟ้า แต่เงื่อนไขที่สำคัญสำหรับการใช้งานของกับดักเสิร์จคือ กับดักเสิร์จต้องไม่ทำงานที่แรงดันเกินชั่วคราว เนื่องจากพลังงานจากแรงดันเกินชั่วคราวจะส่งผลทำให้กับดักเสิร์จเกิดการระเบิด จึงไม่สามารถทนต่อพลังงานของแรงดันเกินได้ และอาจส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ที่ต้องการป้องกัน กับดักเสิร์จที่เลือกใช้คือกับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ ซึ่งแบบจำลองของกับดักเสิร์จชนิดนี้สร้างตามลักษณะกระแสและแรงดันของกับดักเสิร์จชนิดโลหะออกไซด์ ซึ่งเป็นการทำงานของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น ในการสร้างแบบจำลองกับดักเสิร์จนั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือความชันหน้าคลื่นของเสิร์จ สำหรับในงานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบจากแรงดันเกินฟ้าผ่าซึ่งแรงดันเกินฟ้าผ่ามีค่าความชันที่สูง ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลต่อแรงดันคงเหลือของกับดักเสิร์จทำให้การเลือกระดับการป้องกันมีค่าสูงขึ้นตาม แบบจำลองกับดักเสิร์จที่นิยมใช้งาน ได้แก่ แบบจำลองกับดักเสิร์จของ IEEE แบบจำลองกับดักเสิร์จของ Pinceti และแบบจำลองกับดักเสิร์จของ Fernandez โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองของ Pinceti [3] ดังนั้นจึงขออธิบายรายละเอียดเกี่ยวกับแบบจำลองกับดักเสิร์จเพียงอย่างเดียว

แบบจำลองกับดักเสิร์จของ Pinceti

จาก [3] นำเสนอแบบจำลองกับดักเสิร์จของ Pinceti เป็นแบบจำลองที่มีการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการสร้างแบบจำลองโดยอาศัยข้อมูลเพียงเล็กน้อยจากการทดสอบกับดักเสิร์จจากผู้ผลิต วงจรสมมูลของแบบจำลองชนิดนี้ปรับปรุงมาจากแบบจำลองกับดักเสิร์จของ IEEE ซึ่งเป็นแบบจำลองกับดักเสิร์จตามมาตรฐานที่ยอมรับกัน โดยนำตัวเก็บประจุออกจากแบบจำลองเดิม แสดงดังรูปที่ 3.5 เนื่องจากตัวเก็บประจุไม่มีผลต่อแบบจำลองกับดักเสิร์จชนิดนี้ และนำตัวต้านทานมาต่อขนานกับขั้วของกับดักเสิร์จแทน



รูปที่ 3.5 แบบจำลองกับดักเสิร์จของ Pinceti

ค่าพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลองกับดักเสิร์จของ Pinceti

U_r คือ แรงดันพิคคของกับดักเสิร์จ

U_c คือ แรงดันไฟฟ้าใช้งานต่อเนื่องของกับดักเสิร์จ

$U_{res8/20}$ คือ แรงดันคงเหลือจากการรับอิมพัลส์กระแสฟ้าผ่าที่ 10 kA สำหรับรูปคลื่น 8/20 μ s

$U_{res1/T2}$ คือ แรงดันคงเหลือจากการรับอิมพัลส์กระแสฟ้าผ่าที่ 10 kA สำหรับรูปคลื่นที่มีหน้าคลื่นเป็น 1 μ s

จากรูปที่ 3.5 เนื่องจากกับดักเสิร์จในแบบจำลองของ Pinceti ได้มีการกำหนดค่า R ซึ่งมีค่าเท่ากับ $R = 1 \text{ M}\Omega$ และค่า A_0, A_1 คือค่าแรงดันคงเหลือที่กระแสต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 และค่าความเหนี่ยวนำ L_0, L_1 สามารถคำนวณได้จากสมการ (3.3) และ (3.4)

$$L_0 = \frac{1}{12} \left(\frac{U_{res1/T2} - U_{res8/20}}{U_{res8/20}} \right) U_r \quad (3.3)$$

$$L_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{U_{res1/T2} - U_{res8/20}}{U_{res8/20}} \right) U_r \quad (3.4)$$

ตารางที่ 3.1 แรงดันคงเหลือของ A_0 และ A_1 ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ ของแบบจำลอง Pinceti

กระแส (A)	แรงดันคงเหลือ (p.u.) สำหรับอิมพัลส์ 10 kA รูปคลื่น 8/20	
	A_0	A_1
0.002	0.810	0.623
10	0.932	0.749
100	0.974	0.788
1000	1.052	0.866
3000	1.108	0.922
10000	1.195	1.009
20000	1.277	1.091

การเลือกพิกัดของกัปดักเสิร์จให้เหมาะสมกับระบบไฟฟ้าจึงมีความสำคัญ โดยพิกัดของกัปดักเสิร์จที่เราเลือกใช้งานจะต้องไม่ทำงานที่แรงดันชั่วคราว (temporary voltage) เนื่องจากกัปดักเสิร์จจะทนพลังงานที่เกิดจากแรงดันเกินชั่วคราวไม่ได้ แล้วเกิดการระเบิดส่งผลเสียต่อระบบไฟฟ้า

ในระบบไฟฟ้าที่ศึกษามีแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 115 kV โดยมีระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ไม่เกิน 123 kV การคำนวณพิกัดของกัปดักเสิร์จโดยพิจารณาจากแรงดันเกินชั่วคราว สามารถศึกษาต่อได้ในบทต่อไป

3.6 แบบจำลองการวาบไฟที่พวงลูกถ้วย

เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงมาที่เสาส่งจะส่งผลทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่ตัวฉนวน ซึ่งก็คือพวงลูกถ้วย (insulator string) เมื่อแรงดันเกินที่เข้ามามีค่าสูงกว่าค่าความคงทนของอากาศ ($V_{50\%}$ ของช่องว่างอากาศ) อากาศบริเวณรอบๆ จะเกิดการเบรกดาวน์ก่อนที่จะเกิดการวาบไฟที่พวงลูกถ้วยต่อมา พวงลูกถ้วยจะสูญเสียความเป็นฉนวนชั่วคราว เมื่อแรงดันเกินเคลื่อนที่ผ่านไปฉนวนก็จะกลับเข้าสู่สภาวะปกติ โดยปรากฏการณ์เหล่านี้ต้องมีการจำลองโดยการสร้างแบบจำลองสวิตช์ควบคุมการเกิดการวาบไฟที่พวงลูกถ้วยย้อนกลับ โดยแบบจำลองการวาบไฟที่ผิวย้อนกลับมีหลายแบบจำลองได้แก่ 1) แบบจำลองแรงดันและเวลา (volt-time model) 2) แบบจำลองอินทิเกรตชัน (integration model) และ 3) แบบจำลองลีดเดอร์ (leader model) [11] โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองลีดเดอร์ และจะขอกล่าวรายละเอียดแต่แบบจำลองที่ได้เลือกใช้งานเท่านั้น

3.6.1 แบบจำลองลีดเดอร์

จากงานวิจัย [11] ได้นำเสนอแบบจำลองลีดเดอร์มีพื้นฐานมาจากการเกิดการกระบวนกรเบรกดาวนในช่องว่างอากาศ โดยมีกระบวนการเกิดดังนี้

1. ค่าลีดเดอร์ที่เริ่มเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าค่าวิกฤต
2. เมื่อลีดเดอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ความเร็วในการเพิ่มขึ้นของลีดเดอร์ก่อนจะเกิดการเบรกดาวนขึ้นอยู่กับโมเดลชนิดต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ความเร็วของลีดเดอร์ของโมเดลต่างๆ

โมเดล	ความเร็วของลีดเดอร์
Shindo and Suzuki	$\frac{dL}{dt} = \frac{k_1 U^2}{D - 2L} + \frac{k_2 C_1 U^2 VL}{D(D - 2L)} \quad (3.5)$
CIGRE	$\frac{dL}{dt} = k_3 U \left(\frac{U}{(D - L) - E_0} \right) \quad (3.6)$
Pigini et al.	$\frac{dL}{dt} = 170D \left(\frac{U}{(D - L) - E_0} \right) \quad (3.7)$
Motoyama as modified by Mozumi et al.	$\frac{dL}{dt} = K_{10} \frac{U}{(D - 2L) - E_0}, \left(0 \leq 2L \leq \frac{D}{2} \right) \quad (3.8)$
	$\frac{dL}{dt} = K_{11} \left[\frac{U}{(D - 2L) - E'} \right] + u' \quad (3.9)$

เมื่อ

L คือ ความยาวของลีดเดอร์

$k_1, k_2, k_3, K_{10}, K_{11}$, และ E_0 คือค่าคงที่ แสดงดังตารางที่ 3.3 และ 3.4

ตารางที่ 3.3 ค่าพารามิเตอร์สำหรับโมเดล Shindo and Suzuki

รูปร่างอิเล็กโทรด	ค่าพารามิเตอร์	
	k_1	k_2
แท่ง - แผ่น (+)	2×10^{-7}	3×10^{-3}
แท่ง - แท่ง (+)	1×10^{-7}	2.5×10^{-3}
แท่ง - แท่ง (-)	0.5×10^{-7}	5×10^{-3}

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์สำหรับโมเดล CIGRE

รูปร่าง	ขั้วไฟฟ้า	ค่าพารามิเตอร์	
		k_3	E_0
แกบอากาศ และแท่งฉนวนแบบยาว	+	0.8	600
	-	1	670
cap และ pin ของฉนวน	+	1.2	520
	-	1.3	600

เมื่อ

U คือ แรงดันที่ตกคร่อมพวงลูกถ้วย ณ เวลานั้น

D คือ ความยาวของพวงลูกถ้วยหรือช่องว่างอากาศ

C_1 คือ ค่าความจุต่อความยาวของลีดเดอร์ที่ถึงพื้นดิน

V คือ ความเร็วของลีดเดอร์

E_0 คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต

E' คือ ค่าของ $\frac{V}{D-2L}$, $L = \frac{D}{4}$

u' คือ ค่าของ $\frac{dL}{dt}$, $L = \frac{D}{4}$

จากนั้นเมื่อคำนวณหาความเร็วของลีดเดอร์ตามโมเดลต่างๆ แล้ว สามารถคำนวณหาความยาวของลีดเดอร์ได้จาก

$$L(t+\Delta t) = L(t) + V\Delta t \quad (3.10)$$

เมื่อ

v คือ ความเร็วของลีดเดอร์ ณ เวลาใดๆ

$L(t+\Delta t)$ คือ ความยาวของลีดเดอร์ที่เวลาต่อมา

3. การพิจารณาเงื่อนไขในการเกิดการวาบไฟที่ผิว สามารถพิจารณาได้ 2 กรณี

กรณีแรก : เกิดการวาบไฟที่ผิว โดยในแต่ละโมเดลเงื่อนไขในการเกิดการวาบไฟที่ผิวต่างกัน

โดยที่เงื่อนไขในแต่ละโมเดลเป็นไปตามตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 เงื่อนไขในการเกิดการวาบไฟในแต่ละโมเดล

โมเดล	เงื่อนไขในการเกิดการวาบไฟ
Shindo and Suzuki	$2L \geq D$
CIGRE	$L \geq D$
Pigini et al.	$L \geq D$
Motoyama as modified by Mozumi et al.	$2L \geq D$

กรณีสอง : ไม่เกิดการวาบไฟที่ผิว กล่าวคือแรงดันที่ตกคร่อมพวงลู่ล้วยมีค่าน้อยกว่า U_{min} ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.11) และส่งผลทำให้ค่าสนามไฟฟ้าไม่ถึงค่าวิกฤตหรือมีค่าไม่สูงพอที่จะทำให้เกิดสตีมเมอร์หัวนาร่องของลีดเดอร์ จึงทำให้ลีดเดอร์ไม่สามารถจะดำเนินต่อไปได้ ลีดเดอร์ก็จะหยุดลงส่งผลทำให้ไม่เกิดการวาบไฟที่ผิวของลู่ล้วย

$$U_{min} = E_0(D - 2L) \quad (3.11)$$

3.6.2 แบบจำลองการวาบไฟที่พวงลู่ล้วยที่ใช้งานวิจัย

ในการสร้างแบบจำลองการวาบไฟที่พวงลู่ล้วยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองลีดเดอร์ โดยโมเดลที่ใช้วิเคราะห์แรงดันต่อคร่อมลู่ล้วยคือ CIGRE เนื่องจากเป็นโมเดลที่ใช้กันกันอย่างแพร่หลายสำหรับการทำแบบจำลองการเกิดการวาบไฟที่ผิวลู่ล้วยที่ใช้ในการศึกษาแรงดันเกินทรานเซียนต์ และมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ง่ายต่อการคำนวณ โดยความเร็วของลีดเดอร์ในโมเดลชนิดนี้หาได้จากสมการที่ (3.12)

$$V(t) = k_3 U(t) \left[\frac{U(t)}{D} - E_0 \right] \quad (3.12)$$

เมื่อ

K_3 คือ ค่าคงที่สำหรับโมเดล CIGRE แสดงดังตารางที่ 3.4

$U(t)$ คือ แรงดันที่ตกคร่อมพวงลู่ล้วย ณ เวลาใดๆ

D คือ ความยาวของพวงลู่ล้วยหรือช่องว่างอากาศ

E_0 คือ ค่าสนามไฟฟ้าวิกฤตมีค่าเท่ากับ 600 [V/m]

ในการจำลองโมเดลในโปรแกรม EMTP มีการใช้ภาษาโมเดลในการสร้างแบบจำลอง เนื่องจากง่ายและสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายอย่าง การสร้างแบบจำลองของลู่ล้วยตอนเกิดการวาบไฟที่ผิวย้อนกลับด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ในการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมแรงดันเกินจะถูกจัด

ให้อยู่ภายในโมเดลจากนั้นนำมาต่อกับสวิตช์ TACS ชนิด 13 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ตัวสวิตช์จะปิดลงเพื่อทำให้เกิดการลัดวงจร

3.7 แบบจำลองฟ้าผ่า

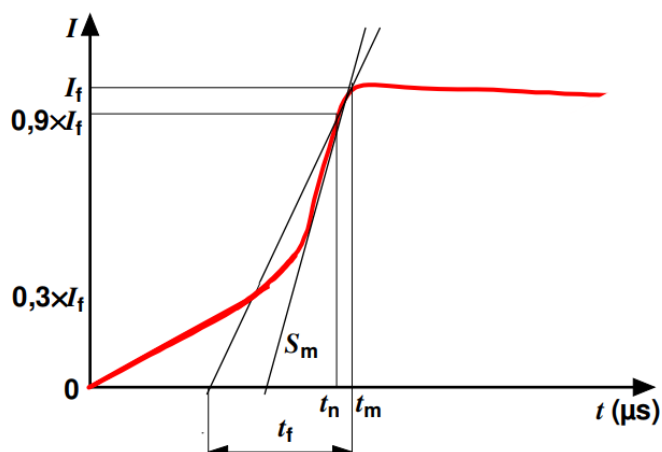
พารามิเตอร์จริงของการเกิดฟ้าผ่านั้น เราไม่สามารถทำนายค่าพารามิเตอร์ของการเกิดฟ้าผ่าในแต่ละครั้งได้ เนื่องจากขนาดของกระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น ช่วงเวลาหน้าคลื่น หรือระยะเวลาของการเกิดของฟ้าผ่าในแต่ละครั้งนั้นไม่มีความแน่นอน ดังนั้นการสร้างแบบจำลองฟ้าผ่าต้องอาศัยแบบจำลองฟ้าผ่าจากงานวิจัยก่อนๆ ที่ได้เคยศึกษาผลกระทบของแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ส่งผลกระทบต่อสถานีไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นพารามิเตอร์ต้นแบบในการสร้างแบบจำลองฟ้าผ่าที่ใช้ในงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้

แบบจำลองฟ้าผ่าที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 กรณีด้วยกัน ได้แก่ 1. แบบจำลองฟ้าผ่าที่ใช้ในการจำลองการเกิดการวาบไฟที่ฉนวนยกกลับ และ 2. แบบจำลองฟ้าผ่าที่ใช้ในการจำลองการหาความยาวสายเคเบิลวิกฤต โดยรายละเอียดการสร้างแบบจำลองฟ้าผ่าแบ่งออกเป็นดังนี้

3.7.1 แบบจำลองฟ้าผ่าที่ใช้ในการจำลองการเกิดการวาบไฟที่ฉนวนยกกลับ

แบบจำลองฟ้าผ่าที่ใช้ในการจำลองเรื่องการเกิดการวาบไฟที่ฉนวนยกกลับเพื่อเปรียบเทียบว่าพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จระหว่างพิกัด 96 และ 108 kV พิกัดไหนที่สามารถป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าได้ดีกว่ากัน และใช้แบบจำลองฟ้าผ่านี้เพื่อหาอัตราความล้มเหลวในสถานีไฟฟ้า GIS เช่นกัน โดยจะเลือกใช้แบบจำลองฟ้าผ่าของ International Council On Large Electric Systems หรือ CIGRE ตามงานวิจัย [12] แสดงดังรูปที่ 3.5 เนื่องจากในงานวิจัยหลายๆ งาน ส่วนใหญ่จะเลือกใช้แบบจำลองฟ้าผ่าของ CIGRE โดยมีข้อมูลพารามิเตอร์ดังนี้

– กระแสฟ้าผ่าค่ายอด (crest amplitude : I_m)	= 150 kA
– เวลาหน้าคลื่น (front time : tf)	= 1.8 μ s
– เวลาหางคลื่น (time to half value: th)	= 30 μ s
– ความชัน (max steepness : Sm)	= 5.5 kA/ μ s



รูปที่ 3.6 รูปคลื่นฟ้าผ่าแบบเว้าของ CIGRE

3.7.2 แบบจำลองฟ้าผ่าที่ใช้ในการจำลองการหาความยาวสายเคเบิลวิกฤต

แบบจำลองฟ้าผ่าแบบที่สองใช้ในการจำลองการเกิดการวาบไฟที่ผิวย้อนกลับเช่นเดียวกับแบบจำลองฟ้าผ่าชนิดแรก แต่ใช้จำลองเพื่อหาค่าความยาวของสายเคเบิลใต้ดินวิกฤตที่ส่งผลต่อจำนวนของการติดตั้งกับดักเสิร์จ โดยวิธีการคำนวณพารามิเตอร์ฟ้าผ่าเป็นไปตาม [13] การเกิดแรงดันเกินที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้า GIS มีสาเหตุมาจากการเกิดการวาบไฟที่ผิวหรือการเกิดการชิลด์ลัมเหลวในสายส่ง โดยขนาดและรูปคลื่นของเสิร์จเป็นไปตามระยะและตำแหน่งของการเกิดฟ้าผ่า และค่า MTBF ของประเภทสถานีไฟฟ้า โดยทั่วไปค่า MTBF ของสถานีไฟฟ้า AIS มีค่าอยู่ระหว่าง 50 - 200 ปี และสำหรับค่า MTBF ของสถานีไฟฟ้า GIS มีค่าอยู่ระหว่าง 200 - 800 ปี การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ฟ้าผ่ามีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณหาค่าตำแหน่งของการเกิดฟ้าผ่าด้วยสมการ (3.13)

$$d = \frac{1}{(\text{MTBF})(\text{BFR})} \quad (3.13)$$

เมื่อ

d คือ ตำแหน่งของการเกิดฟ้าผ่า [km]

MTBF คือ ค่า Mean Time Between Failure [ปี]

BFR คือ อัตราการเกิดการวาบไฟที่ผิว [ครั้ง/100 km/ปี]

2. คำนวณหาค่าความชันของเส้นรุ้งด้วยสมการ (3.14)

$$S = \frac{K_s}{d} \quad (3.14)$$

เมื่อ

K_s คือ ค่าคงที่สำหรับการเกิดโคโรน่า เป็นไปตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ค่าแนะนำสำหรับค่าคงที่สำหรับการเกิดโคโรน่า

Conductor	$K_s, (kV\text{-km})/\mu s$
single conductor	700
two conductor bundle	1000
3 or 4 conductor bundle	1700
6 or 8 conductor bundle	2500

3. คำนวณหาเวลาทางคลื่นของเส้นรุ้ง (τ) มีหน่วยเป็น μs หาได้จากสมการที่ 3.15

$$\tau = \frac{Z_g}{R_i} T_s \quad (3.15)$$

เมื่อ

Z_g คือ ค่าเส้นรุ้งอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์ซึ่งอากาศ [Ω]

R_i คือ ความต้านทานที่กระแสฟ้าผ่าสูงๆ [Ω]

T_s คือ เวลาที่คลื่นจรเคลื่อนที่ในสายส่ง [μs]

4. คำนวณหาขนาดค่ายอดของเส้นรุ้ง จาก [12] กล่าวว่า การหาค่ายอดของเส้นรุ้งสามารถคำนวณได้จากค่าเฉพาะจากค่า MTBF ได้ สำหรับการเกิดการวาบไฟที่ผิวค่ากระแสยอดจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.85 – 1.2 เท่าของค่า CFO อิมพัลส์ฟ้าผ่าชั่วคราว ค่าที่นิยมนำมาใช้งานคือ $1.2 \times CFO$

จาก [12] เราสามารถหาค่าพารามิเตอร์ฟ้าผ่าต่างๆ ได้จากขั้นตอนการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ฟ้าผ่าได้ดังนี้

1. ตำแหน่งการเกิดฟ้าผ่า

พารามิเตอร์ที่ใช้: MTBF = 200 ปี, BFR = 2 ครั้ง/100 km/ปี

$$d = \frac{1}{(200)(2/100)} = 0.2456428 \text{ km}$$

2. ความชันของเสิร์จ

$$S = \frac{700}{0.2456} = 2849.67 \text{ kV}/\mu\text{s}$$

3. เวลาทางคลื่นของเสิร์จ

พารามิเตอร์ที่ใช้: $Z_g = 524.47 \ \Omega$, $R_i = 4.91 \ \Omega$, $T_s = 0.27 \ \mu\text{s}$

$$\tau = \frac{524.47}{4.914} (0.27) = 28.46 \ \mu\text{s}$$

4. ค่ายอดของเสิร์จ

$$\text{crest magnitude} = 1.2(560) = 672 \text{ kV}$$

ดังนั้น แบบจำลองฟ้าผ่าที่ใช้ในแบบจำลองฟ้าผ่าที่ใช้ในการจำลองเรื่องการหาค่าความยาวของสายเคเบิลใต้ดินวิกฤตที่ส่งผลต่อจำนวนการติดตั้งกับดักเสิร์จ มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

- กระแสฟ้าผ่าค่ายอด = 672 kV
- เวลาค้นหาคลื่น = 0.25 μs
- เวลาทางคลื่น = 28.46 μs
- ความชัน = 2849.67 kV/ μs

บทที่ 4

ขั้นตอนการจำลองและการจำลอง

งานวิจัยเล่มนี้เสนอขั้นตอนในการจำลองการป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่าด้วยกับดักเสิร์จด้วยการจำลองทางโปรแกรม EMTP โดยมีขั้นตอนในการจำลองมีดังนี้

4.1 ขั้นตอนการจำลอง

4.1.1 การเลือกขนาดแรงดันพิกัดของกับดักเสิร์จในโปรแกรม EMTP

ในการจำลองการป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกคือ การทำการประสานสัมพันธ์การฉนวน โดยการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าอย่างกับดักเสิร์จ และการเลือกพิกัดของกับดักเสิร์จเป็นสิ่งสำคัญต่อการป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่า การคำนวณหาพิกัดของกับดักเสิร์จจะพิจารณาจาก [14] และ [15] โดยมีวิธีการคำนวณพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จที่แตกต่างกันออกไป และเปรียบเทียบพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จที่คำนวณได้จากแหล่งอ้างอิงต่างกัน

4.1.1.1 การเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จโดยพิจารณาพารามิเตอร์ในระบบไฟฟ้า

จาก [14] การคำนวณพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จจะพิจารณาจากตารางที่ 4.1 โดยแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (U_s) ของระบบไฟฟ้า 115 kV คือ 123 kV การต่อลงดินของระบบที่ใช้เป็นแบบระบบต่อลงดินยังผล (Effective) และ ระยะของการเกิดฟอลต์ในระบบมีค่าเท่ากับ 1 วินาที ดังนั้นจากตารางที่ 4.1 พิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จมีค่าเท่ากับ $U_r \geq 0.74 \times U_s \geq 0.74 \times 123 \geq 91.02 \text{ kV}$

ตารางที่ 4.1 ตารางค่าแนะนำสำหรับพิกัดแรงดันต่ำสุดของกับดักเสิร์จ [14]

ระบบต่อลงดิน	ระยะเวลาฟอลต์	แรงดันระบบ	พิกัดแรงดันต่ำสุดของกับดักเสิร์จ (U_r)
ระบบต่อลงดินยังผล	$\leq 10 \text{ s}$	≤ 100	$\geq 0.79 \times U_s$
ระบบต่อลงดินยังผล	$\leq 1 \text{ s}$	≥ 123	$\geq 0.74 \times U_s$
ระบบไม่ต่อลงดิน	$\leq 10 \text{ s}$	≤ 170	$\geq 0.97 \times U_s$
ระบบไม่ต่อลงดิน	$\leq 1 \text{ h}$	≤ 170	$\geq 1.24 \times U_s$

4.1.1.2 การเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จโดยพิจารณาจากแรงดันเกินชั่วคราว

จาก [15] การเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จโดยพิจารณาจากแรงดันเกินชั่วคราวที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าเป็นการคำนวณหาพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ แฟกเตอร์แรงดันเกินชั่วคราว (T) และแฟกเตอร์ของความผิดพลาด (k) มาคำนวณหาพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จ ซึ่งจะช่วยให้กับดักเสิร์จสามารถทนต่อแรงดันเกินชั่วคราวได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. คำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าใช้งานต่อเนื่องของกับดักเสิร์จ U_c ด้วยสมการที่ (4.1)

$$U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}} \quad (4.1)$$

2. หาค่าแฟกเตอร์แรงดันเกินชั่วคราว (T) จากกราฟตามเส้นเงื่อนไข Hot condition ในรูปที่ 2.9 ในบทที่ 2 หรือตามตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นข้อมูลจากผู้ผลิต

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างค่าแฟกเตอร์แรงดันเกินชั่วคราว ตามเส้นเงื่อนไข Hot condition

ระยะเวลาการเกิดฟอลต์ (s)	ค่าแฟกเตอร์แรงดันเกินชั่วคราว (T)
1	1.16
3	1.13
5	1.127
7	1.118
10	1.10

3. หาค่าแฟกเตอร์ความผิดพลาด (k) จากตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แฟกเตอร์ความผิดพลาด [15]

สาเหตุการเกิดแรงดันเกินชั่วคราว		แฟกเตอร์ความผิดพลาด	เวลาทริป
ความผิดพลาดลงดิน (Ground Fault)	ระบบต่อลงดิน	≤ 1.4	1 หรือ 3 s
	ระบบไม่ต่อลงดิน	1.73	10 s ถึง 2-3 hr
การปลดโหลด (Load rejection)		1.1	1 s

4. คำนวณหาค่าแรงดันพิกัดของกับดักเสิร์จ U_r ด้วยสมการที่ (4.2)

$$U_r \geq \frac{k \times U_c}{T} \quad (4.2)$$

เมื่อ

k คือ แฟกเตอร์ความผิดพลาด

U_c คือ แรงดันของระบบไฟฟ้า

T คือ แฟกเตอร์แรงดันเกินชั่วคราว เป็นไปตามตารางที่ 4.2

5. จากนั้นนำค่าพิกัดกับดักเสิร์จที่คำนวณได้มาใช้เลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จที่มีตามผู้ผลิต โดยจะต้องเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จอย่างน้อยเท่ากับค่าพิกัดที่คำนวณได้

การเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จโดยพิจารณาจากแรงดันเกินชั่วคราว

$$1. \quad U_c \geq \frac{123}{\sqrt{3}} \geq 71 \text{ kV}$$

2. จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าแฟกเตอร์แรงดันเกินชั่วคราว (T) จากกราฟตามเส้นเงื่อนไข Hot condition ในรูปที่ 2.9 ในบทที่ 2 ค่าแฟกเตอร์แรงดันเกินชั่วคราวในระบบไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ $T = 1.16$ เนื่องจากในระบบไฟฟ้าที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ มีระยะเวลาของการเกิดความผิดพลาดไม่เกิน 1 s

3. แฟกเตอร์ความผิดพลาด (k) เราไม่สามารถทราบได้เลยว่าในระบบไฟฟ้าที่ทำการศึกษาก่อเกิดความผิดพลาดในรูปแบบไหน ดังนั้นค่าแฟกเตอร์ความผิดพลาดจะคิดในทุกๆ กรณี สำหรับในกรณีการเกิดความผิดพลาดต่างๆ จะเลือกที่ใช้ค่าแฟกเตอร์ที่มีค่าสูงที่สุด เนื่องจากค่าแฟกเตอร์สูงสุดเกิดจากแรงดันเกินชั่วคราวที่มีค่ามากที่สุด ส่งผลทำให้มีความสำคัญในการเลือกพิกัดของกับดักเสิร์จ ค่าแฟกเตอร์ความผิดพลาดที่เลือกใช้คือ ค่าแฟกเตอร์ความผิดพลาดของความผิดพลาดลงดินในระบบต่อลงดินมีค่าเท่ากับ 1.4 และค่าแฟกเตอร์ความผิดพลาดของการปลดโหลดมีค่าเท่ากับ 1.1 ดังนั้นผลรวมของแฟกเตอร์ความผิดพลาดทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบมีค่าเท่ากับ $1.4 \times 1.1 = 1.54$

4. คำนวณหาค่าแรงดันพิกัดของกับดักเสิร์จ U_r ตามสมการที่ (4.2) ที่ระยะเวลาของการเกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าที่ศึกษา 1 s

$$U_r \geq \frac{1.54 \times 71}{1.16} \geq 94.26 \text{ kV}$$

5. การเลือกพิกัดของกักดับเพลิงจะต้องเลือกพิกัดแรงดันที่มีค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณไว้ซึ่งมีค่าเท่ากับ $U_r \geq 94 \text{ kV}$

จากค่าพิกัดแรงดันของกักดับเพลิงที่หาได้จากหัวข้อที่ 4.1.1.1 มีค่าเท่ากับ 91.02 kV และจากหัวข้อที่ 4.1.1.2 มีค่าเท่ากับ 94.76 kV เมื่อเปรียบเทียบค่าพิกัดแรงดันของกักดับเพลิงที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีแล้ว เราจะเลือกค่าที่ได้จากการคำนวณโดยการพิจารณาแรงดันเกินชั่วคราวเนื่องจากกักดับเพลิงจะมีความปลอดภัยจากแรงดันเกินชั่วคราว นั่นคือ $U_r \geq 94 \text{ kV}$ ดังนั้นพิกัดแรงดันของกักดับเพลิงที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้คือ พิกัดแรงดันขนาด 96 kV

จากตารางที่ 4.4 แสดงถึงข้อมูลพิกัดแรงดันของกักดับเพลิงจากบริษัทแห่งหนึ่ง [16] พิกัดของกักดับเพลิงที่เลือก นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ พิกัดแรงดัน 96 kV ค่าพิกัดแรงดันที่เลือกใช้งานขึ้นอยู่กับระยะเวลาของการเกิดความผิดพลาดในระบบไฟฟ้าที่ต้องการศึกษา ดังนั้นหากระยะเวลาของการเกิดความผิดพลาดของระบบมีค่ามากกว่าค่าที่แสดง ก็สามารถคำนวณหาพิกัดแรงดันกักดับเพลิงใหม่ได้

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลพิกัดแรงดันของกักดับเพลิงจากผู้ผลิต [16]

Rated Voltage	MCOV	Steep Impulse RV at 10 kA (1/2 μ s)	Lightning Impulse RV (8/20 μ s) at		
			5 kA	10 kA	20 kA
90	70	253	219	230	258
96	76	270	233	245	274
108	84	307	265	279	312
120	98	341	295	310	347

ส่วนใหญ่พิกัดแรงดันของกักดับเพลิงที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV คือ พิกัดแรงดัน 108 kV และจากการคำนวณหาพิกัดแรงดันของกักดับเพลิงจากแรงดันชั่วคราวในระบบ กำหนดให้มีระยะเวลาในการเกิดความผิดพลาดเท่ากับ 1 s พิกัดแรงดันของกักดับเพลิงที่เลือกใช้คือ 96 kV เมื่อเราทราบพิกัดแรงดันของกักดับเพลิงที่เหมาะสมสำหรับระบบไฟฟ้าแล้ว ต่อจากนั้นเราจะมาสร้างแบบจำลองกักดับเพลิง โดยแบบจำลองกักดับเพลิงที่เลือกใช้งานเป็นแบบจำลองของ Pinceti เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ง่ายต่อการคำนวณ และเป็นที่ยอมรับในการใช้งานเพื่อศึกษาแรงดันเกินทรานเซียนต์ สำหรับการศึกษาระบบไฟฟ้าในงานวิจัยเล่มนี้ต้องการที่จะศึกษาและเปรียบเทียบผลของการป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าด้วยกักดับเพลิง ทั้ง 2 พิกัด ระหว่างพิกัดแรงดัน 96 และ 108 kV ดังนั้นจึงต้องสร้างแบบจำลองกักดับเพลิงทั้ง 2 พิกัดเพื่อใช้ในการจำลองผล

4.1.1.3 แบบจำลองกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV

แบบจำลองกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV สร้างตามแบบจำลองกับดักเสิร์จของ Pinceti โดยมีลักษณะสมบัติตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 4.6 จากนั้นจำลองโดยการต่อขนานเข้ากับสายเฟสและสายดินเพื่อเป็นการต่อคร่อมไว้สำหรับป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าจากแรงดันเกินฟ้าผ่า จากรูปที่ 3.5 ได้มีการกำหนดค่าความต้านทานเท่ากับ $R = 1 \text{ M}\Omega$ ค่าแรงดันคงเหลือ A_0 และ A_1 เป็นไปตามตารางที่ 4.5 และค่าความเหนี่ยวนำ L_0 และ L_1 คำนวณได้จากสมการ 3.3 และ 3.4 จะได้

$$L_0 = \frac{1}{12} \left(\frac{270 - 245}{245} \right) 96 = 0.82 \text{ }\mu\text{H}, \quad L_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{270 - 245}{245} \right) 96 = 2.45 \text{ }\mu\text{H}$$

จากนั้นนำค่า L_0 และ L_1 และค่าจากตารางที่ 4.5 มาสร้างเป็นแบบจำลองกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ต่อไป

ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันคงเหลือของกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV

กระแส (A)	A_0		A_1	
	แรงดัน (p.u.)	แรงดัน (kV)	แรงดัน (p.u.)	แรงดัน (kV)
0.002	0.810	198.450	0.623	154.840
10	0.932	228.340	0.749	183.505
100	0.974	238.630	0.788	193.060
1000	1.052	257.740	0.866	212.170
10000	1.195	292.775	1.009	247.205
20000	1.277	312.865	1.091	267.295

4.1.1.4 แบบจำลองกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV

แบบจำลองกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV สร้างตามแบบจำลองกับดักเสิร์จของ Pinceti โดยมีลักษณะสมบัติตามที่ระบุไว้ในตารางที่ 4.6 จากนั้นจำลองโดยการต่อขนานเข้ากับสายเฟสและสายดินเพื่อเป็นการต่อคร่อมไว้สำหรับป้องกันอุปกรณ์ไฟฟ้าจากแรงดันเกินฟ้าผ่า จากรูปที่

3.5 ได้มีการกำหนดค่าความต้านทานเท่ากับ $R = 1 \text{ M}\Omega$ ค่าแรงดันคงเหลือ A_0 และ A_1 เป็นไปตามตารางที่ 4.6 และค่าความเหนี่ยวนำ L_0 และ L_1 คำนวณได้จากสมการ 3.3 และ 3.4 จะได้

$$L_0 = \frac{1}{12} \left(\frac{307 - 279}{279} \right) 108 = 0.90 \text{ }\mu\text{H}, \quad L_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{307 - 279}{279} \right) 108 = 2.71 \text{ }\mu\text{H}$$

จากนั้นนำค่า L_0 และ L_1 และค่าจากตารางที่ 4.6 มาสร้างเป็นแบบจำลองกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV ต่อไป

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันคงเหลือของกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV

กระแส (A)	A_0		A_1	
	แรงดัน (p.u.)	แรงดัน (kV)	แรงดัน (p.u.)	แรงดัน (kV)
0.002	0.810	225.990	0.623	176.328
10	0.932	260.028	0.749	208.971
100	0.974	271.746	0.788	219.852
1000	1.052	293.508	0.866	241.614
3000	1.108	309.132	0.922	257.238
10000	1.195	333.405	1.009	281.511
20000	1.277	356.283	1.091	304.389

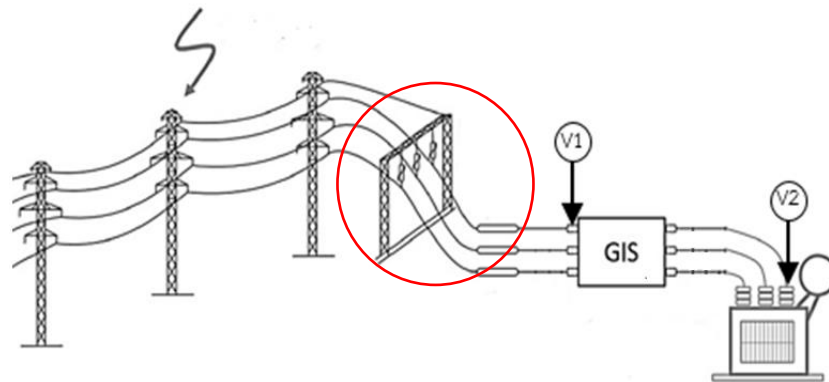
4.1.2 กำหนดจุดติดตั้งกับดักเสิร์จ

ในงานวิจัยเล่มนี้ศึกษาผลกระทบแรงดันเกินจากฟ้าผ่าที่มีผลต่อสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV ตำแหน่งในการติดตั้งกับดักเสิร์จก็เป็นสิ่งสำคัญสิ่งหนึ่งที่ต้องตระหนักถึง ดังนั้นการพิจารณาเลือกตำแหน่งในการติดตั้งกับดักเสิร์จสามารถพิจารณาการติดตั้งออกเป็น 3 ตำแหน่งด้วยกัน แบ่งได้เป็นดังนี้

4.1.2.1 ติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าสายเคเบิลใต้ดิน

การเลือกติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ที่ตำแหน่งหน้าสายเคเบิลใต้ดินดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากว่าที่ตำแหน่งนี้เป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างสายส่งเหนือศีรษะและสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งที่ตำแหน่งนี้เองเป็นจุดที่

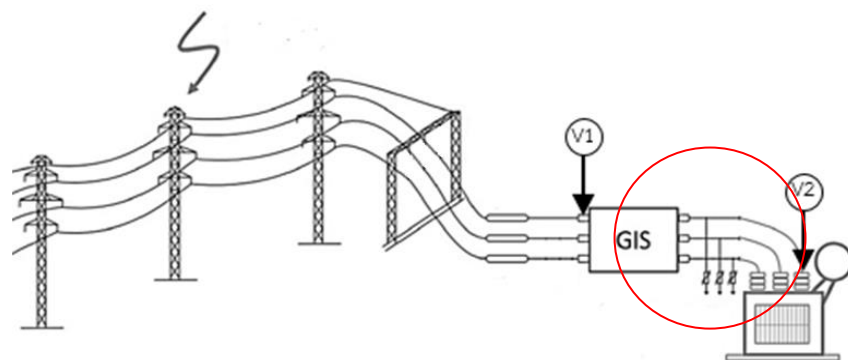
มีการเปลี่ยนค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งเหนือศีรษะมาเป็นค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเคเบิลใต้ดิน เมื่อแรงดันเกินเคลื่อนที่มาถึงบริเวณนี้จะทำให้เกิดการสะท้อนและส่งผ่านส่งผลทำให้เสิร์จจะมีค่าลดลง ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเลือกติดตั้งกับดักเสิร์จที่บริเวณดังนี้



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ที่หน้าสายเคเบิลใต้ดิน

4.1.2.2 ติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า

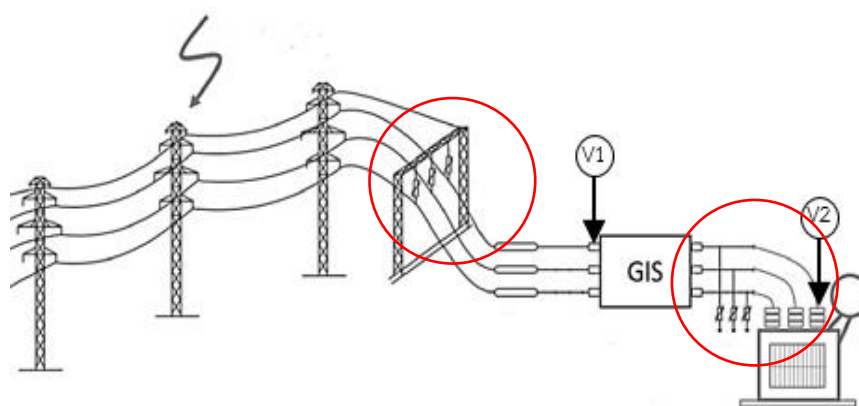
การติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 4.2 เนื่องจากที่ตำแหน่งนี้เป็นจุดปลายของวงจร ซึ่งจะมีค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ที่สูงมาก ทำให้เมื่อเกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าเคลื่อนที่มาถึงตำแหน่งนี้จะส่งผลทำให้เกิดการสะท้อนกลับและยังเป็นผลทำให้ขนาดของแรงดันเกินมีค่าสูงขึ้น แรงดันเกินที่มีขนาดเพิ่มขึ้นอาจเป็นอันตรายต่อตัวสถานีไฟฟ้าได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงเลือกติดตั้งกับดักเสิร์จที่บริเวณนี้



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า

4.1.2.3 ติดตั้งกับดักเสิร์จทั้งที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินและที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า

การเลือกติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ทั้งที่หน้าสายเคเบิลใต้ดิน และที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.3 เนื่องจากการติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียวอาจป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าได้ไม่เพียงพอ เพื่อเป็นการป้องกันอุปกรณ์ต่างๆ ภายใน GIS ซึ่งมีความสำคัญและราคาแพง ดังนั้นจึงเลือกติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ทั้ง 2 ตำแหน่งพร้อมกันเพื่อผลจากการควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่า

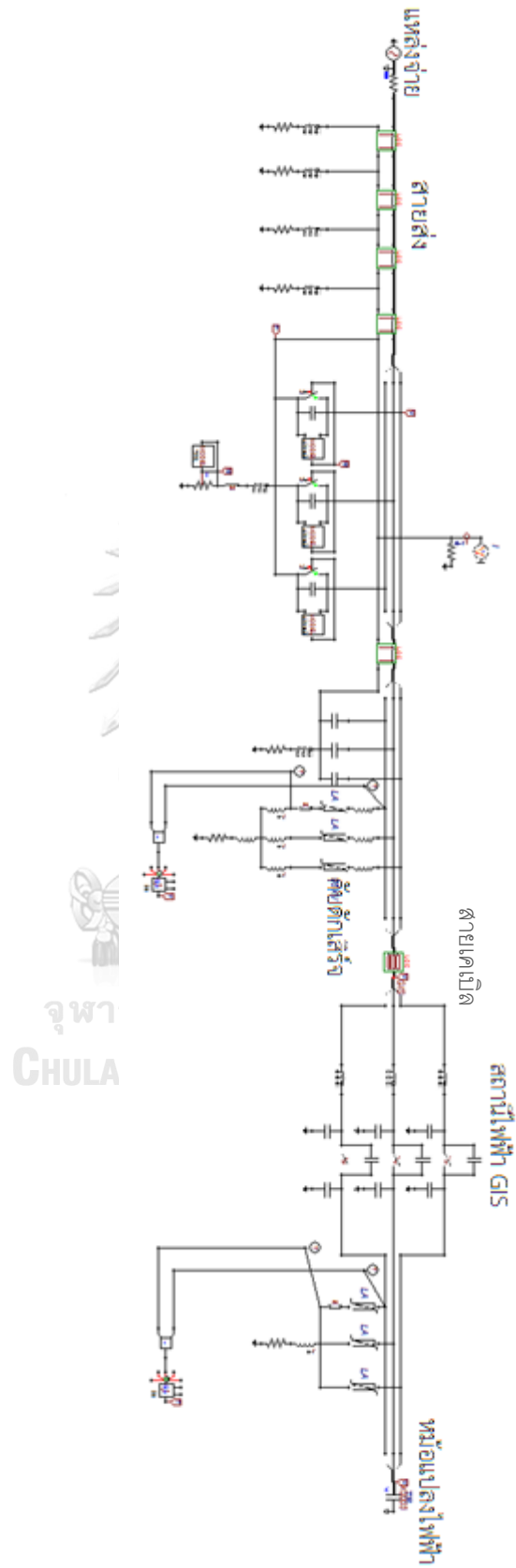


รูปที่ 4.3 ตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จทั้งที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินและหน้าหม้อแปลงไฟฟ้า

ดังนั้น การพิจารณาหาตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จที่สามารถป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่าจะสามารถจำลองได้จากงานวิจัยนี้เพื่อหาตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จที่สามารถควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่าให้มีขนาดต่ำกว่าค่าวิกฤต เพื่อให้สถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สมีความปลอดภัยจากแรงดันเกินฟ้าผ่า

4.1.3 สร้างแบบจำลอง

จากบทที่ 3 ในหัวข้อการสร้างแบบจำลองไฟฟ้า ได้แก่ แบบจำลองฟ้าผ่า แบบจำลองเสาส่งแบบจำลองสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส และแบบจำลองกับดักเสิร์จ เป็นต้น มาสร้างแบบจำลอง ด้วยโปรแกรม EMTP เมื่อสร้างแบบจำลองต่างๆ จนครบ นำแบบจำลองต่างๆ มาต่อให้กลายเป็นระบบไฟฟ้าที่ต้องการทำการศึกษา แสดงดังรูปที่ 4.4



จุฬา
CHULA

รูปที่ 4.4 ระบบไฟฟ้าที่ศึกษา

4.1.4 กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง

ในการจำลองการเกิดการวบไฟที่ผิวของลูกถ้วยเพื่อทำให้เกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ส่งผลกระทบต่อ การป้องกันแรงดันเกินด้วยกัปดักเสิร์จ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองประกอบไปด้วย

ตารางที่ 4.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์		ข้อมูล
ฟ้าผ่า	ค่ายอด	150 kA
	ความชัน	5.5 kA/ μ s
	เวลารูปคลื่น	1.8/30 μ s
Insulator string	ความยาว	1 m
ความยาวของสายเคเบิล		20 m
ค่าความต้านทานฐานเสา		10 Ω

4.1.5 กำหนดจุดวัดแรงดันเกินฟ้าผ่า

จุดวัดแรงดันเกินฟ้าที่กำหนดใช้ในงานวิจัยนี้คือ ตำแหน่งที่ 1 คือวัดที่หน้า GIS และ ตำแหน่งที่ 2 คือวัดที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า

4.1.6 กำหนดพิกัดแรงดันของกัปดักเสิร์จและตำแหน่งการติดตั้งกัปดักเสิร์จ

การเลือกใช้และกำหนดพิกัดแรงดันของกัปดักเสิร์จ และตำแหน่งการติดตั้งกัปดักเสิร์จมาใช้ในการจำลองหาพารามิเตอร์อื่นๆ ที่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของขนาดแรงดันเกินฟ้าผ่า

4.1.7 กำหนดขนาดค่าความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า

เราสามารถกำหนดค่าความคงทนของฉนวนต่อแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า (BIL) ได้ เพื่อใช้เป็นเกณฑ์การตัดสินใจว่าขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เข้ามาจะส่งผลกระทบต่อสถานีไฟฟ้า GIS 115 kV มากน้อยเพียงใด ดังนั้นค่า BIL ของอุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ 115 kV ตามมาตรฐาน IEC 60071-1 [17] เป็นไปตามตารางที่ 4.8 โดยแรงดันระบบสูงสุด 123 kV จะมีค่าความคงทนสูงสุดของฉนวนเท่ากับ 550 kV แต่ระดับค่าแรงดันเกินฟ้าผ่าที่สามารถส่งผลให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ จะพิจารณาการเสื่อมสภาพจากการใช้งานร่วมด้วย จึงกำหนดให้มีค่าเท่ากับร้อยละ 85 ของค่า BIL หรือเท่ากับ 467.5 kV ดังนั้นค่า BIL ที่เลือกใช้เป็นเกณฑ์การตัดสินใจในการพิจารณาขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เข้ามาสู่ภายในสถานีไฟฟ้าแล้วส่งผลกระทบต่อสถานีไฟฟ้ามียุคเท่ากับ 467.5 kV

ตารางที่ 4.8 มาตรฐานค่าการฉนวน [17]

Highest voltage for equipment (U_m) [kV] (r.m.s value)	Standard rated short duration power-frequency withstand voltage [kV] (r.m.s. value)	Standard rated lightning impulse withstand voltage [kV] (r.m.s value)
100	150	380
	185	450
123	185	450
	230	550
145	185	450
	230	550
	275	650

4.2 การจำลอง

4.2.1 จำลองการเลือกพิกัดแรงดันของกัปกเสิร์จเพื่อใช้สำหรับการป้องกันสถานีไฟฟ้า GIS 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า

การเลือกพิกัดแรงดันของกัปกเสิร์จเพื่อใช้สำหรับการป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นจากแรงดันเกินฟ้าผ่า โดยจะพิจารณาจากการคำนวณหาพิกัดแรงดันของกัปกเสิร์จที่ใช้ป้องกันสถานีไฟฟ้า GIS 115 kV และจากการคำนวณในหัวข้อที่ 4.1.1 กัปกเสิร์จที่สามารถใช้ป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบนี้ได้ คือพิกัดแรงดัน 96 และ 108 kV ในขั้นตอนนี้จำลองผลจากการติดตั้งกัปกเสิร์จทั้งพิกัดแรงดัน 96 kV และ 108 kV โดยติดตั้งกัปกเสิร์จทั้งสองพิกัดไว้หน้าสถานีไฟฟ้าเพียงตำแหน่งเดียว

4.2.2 คำนวณหาค่าอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า

ในขั้นตอนนี้เราจะคำนวณหาค่าอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากการติดตั้งกัปกเสิร์จทั้งพิกัดแรงดัน 96 และ 108 kV เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัด และชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างจากการป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าด้วยกัปกเสิร์จทั้ง 2 พิกัด ว่าพิกัดแรงดันไหนที่สามารถป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าได้ดีมาน้อยเพียงใด พารามิเตอร์ฟ้าผ่าที่เลือกใช้เป็นพารามิเตอร์ฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริงในประเทศไทยโดยมีขั้นตอนดังนี้

- กำหนดพารามิเตอร์ฟ้าผ่าที่ใช้คำนวณหาอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในสถานีไฟฟ้า

$$\text{ค่ากระแสยอด} = 50 - 200 \text{ kA}$$

$$\text{เวลารูปคลื่น} = 1.8 / 30 \text{ kA}/\mu\text{s}$$

- จำลองผลโดยการเปลี่ยนค่ากระแสฟ้าผ่าจาก 50 – 200 kA และตำแหน่งฟ้าผ่าจาก 80 – 720 m ทั้งจากการติดตั้งกับดักเสิร์จทั้ง 2 พิกัดแรงดัน ต่อจากนั้นวัดค่าแรงดันเกินที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้าเพียงตำแหน่งเดียว

- เลือกเงื่อนไขที่ส่งผลทำให้มีแรงดันเกินที่ตำแหน่งทางเข้าสถานีไฟฟ้าที่มีขนาดมากกว่าค่าวิกฤตทั้งจากการติดตั้งกับดักเสิร์จทั้ง 2 พิกัดแรงดัน

- นำเงื่อนไขที่ได้มาคำนวณหาอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในสถานีไฟฟ้าจากการติดตั้งกับดักเสิร์จทั้งพิกัดแรงดัน 96 และ 108 kV โดยเริ่มคำนวณจากค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในประเทศไทยโดยมีหน่วยวัดคือจำนวนฟ้าผ่าต่อตารางกิโลเมตรต่อปี โดยใช้สมการในหัวข้อที่ 2.1.2

- คำนวณหาความน่าจะเป็นของการเกิดฟ้าผ่าในแต่ละความยาวสายส่ง (Probability of lightning flash, N_m) ซึ่งความยาวสายส่งในงานวิจัยจะแทนด้วยตำแหน่งฟ้าผ่า ในแต่ละค่าที่ส่งผลทำให้เกิดค่าแรงดันเกินที่สูงค่าวิกฤต หาได้จากสมการที่ (4.3)

$$N_m = \left(\frac{N_L}{100} \right) l, \quad N_L = N_g \left(\frac{28H^{0.6} + b}{10} \right) \quad (4.3)$$

โดยที่

N_L คือ อัตราการเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่ง [ครั้ง/100 km/ปี]

l คือ ความยาวของสายส่ง [km]

N_g คือ ความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า [ครั้ง/กิโลเมตร²/ปี]

H คือ ความสูงของเสาส่ง [m]

b คือ ความกว้างของเสา [m]

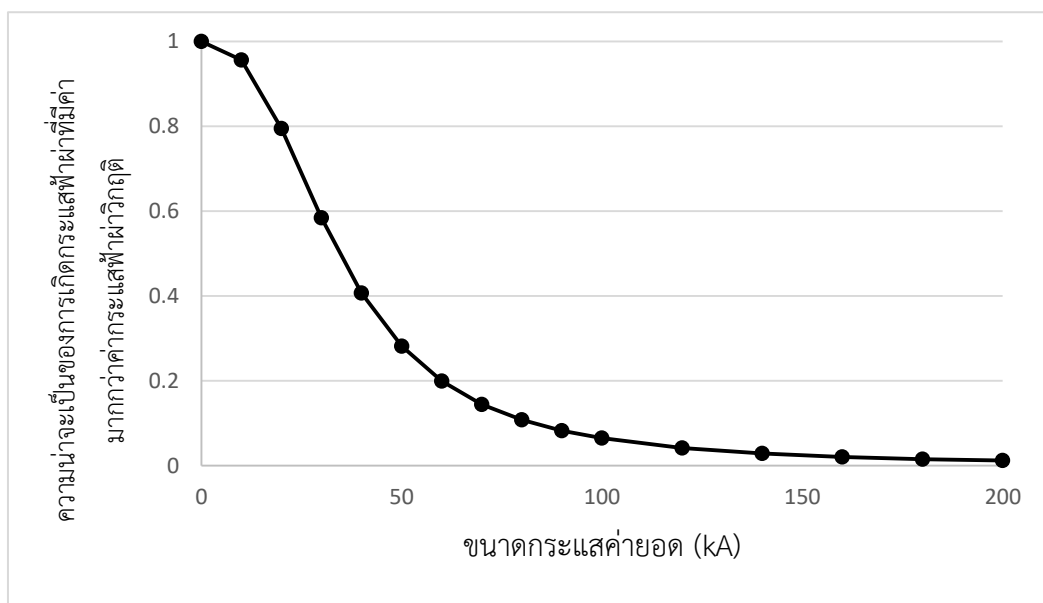
- คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของการเกิดกระแสฟ้าผ่าที่มีค่ามากกว่าค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต สามารถคำนวณหาได้จากกราฟที่ 4.5 หรือคำนวณได้จากสมการที่ (4.4)

$$P(I \geq I_C) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{I_{50}}\right)^{3.09}} \quad (4.4)$$

เมื่อ

I คือ ค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต [kA]

I_{50} คือ ค่ากระแสฟ้าผ่าเฉลี่ย [kA]



รูปที่ 4.5 การกระจายแบบสะสมของค้ายอดกระแสฟ้าผ่าในประเทศไทย ข้อมูลจากระบบ LLS ในปี พ.ศ. 2550

7) จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการคำนวณมาหาค่าความน่าจะเป็นของการเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้า โดยหาได้จากสมการที่ (4.5)

$$N_s = N_m \times S \quad (4.5)$$

เมื่อ

N_m คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดฟ้าผ่าในแต่ละความยาวสายส่ง

S คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดกระแสฟ้าผ่าค่านั้นๆ

8) เมื่อคำนวณหาความน่าจะเป็นของความล้มเหลวของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้า ในแต่ละความยาวของสายส่งได้แล้ว นำค่าความน่าจะเป็นมารวมกันก็จะได้อัตราโดยรวมของความล้มเหลวสำหรับสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส โดยเป็นไปตามสมการที่ (4.6)

$$N_{\text{Total}} = N_{s100\text{km}} + N_{s200\text{km}} + N_{s\text{nk}\text{m}} + \dots \quad (4.6)$$

4.2.3 จำลองผลของแรงดันเกินฟ้าผ่าจากการติดตั้งกับดักเสิร์จในกรณีต่างๆ

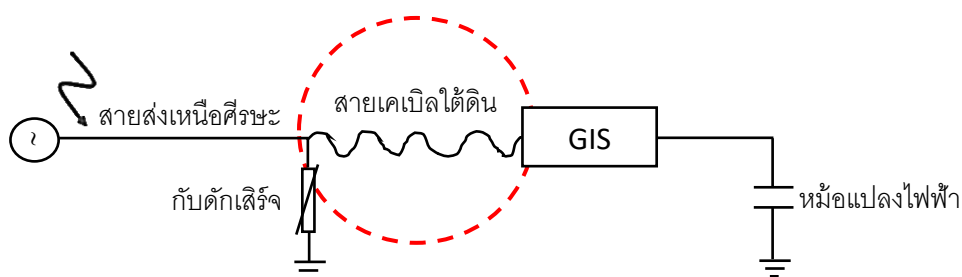
4.2.3.1 ติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ที่หน้าสายเคเบิลใต้ดิน

4.2.3.2 ติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า

4.2.3.3 ติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ทั้งที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินและที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า

4.2.4 จำลองผลกระทบจากความยาวสายเคเบิลใต้ดิน

ในขั้นตอนนี้จำลองเพื่อดูขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดจากความยาวสายเคเบิลใต้ดินที่มีผลต่อการติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียว คือตำแหน่งทางเข้าสถานีไฟฟ้า GIS โดยการจำลองความยาวสายเคเบิลที่ส่งผลทำให้การติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียวไม่เพียงพอต่อการป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ส่งผลเสียต่อสถานีไฟฟ้า ในขั้นตอนนี้จำลองผลโดยสาเหตุการเกิดการวาวไฟที่ผิวย้อนกลับ โดยศึกษาความยาวของสายเคเบิลที่ส่งผลต่อขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้า GIS เนื่องจากการติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียวว่าเพียงพอต่อการป้องกันแรงดันฟ้าผ่าหรือไม่ สำหรับพารามิเตอร์ฟ้าผ่าที่ใช้ในการจำลองในเรื่องนี้จะใช้ค่าพารามิเตอร์ของการเกิดฟ้าผ่าในแบบจำลองฟ้าผ่าในกรณีที่ 3.7.2 ซึ่งเป็นการจำลองการเกิดการวาวไฟที่ผิวย้อนกลับ แล้วค่าพารามิเตอร์อื่นๆ เป็นไปตามตารางที่ 4.7 สำหรับค่าความยาวสายเคเบิลที่จำลองมีค่าอยู่ในช่วง 10 – 500 m ตำแหน่งในการเปลี่ยนค่าความยาวของสายเคเบิล ซึ่งก็คือตำแหน่งทางเข้าสถานีไฟฟ้า GIS แสดงดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการเปลี่ยนค่าความยาวสายเคเบิลใต้ดิน

บทที่ 5

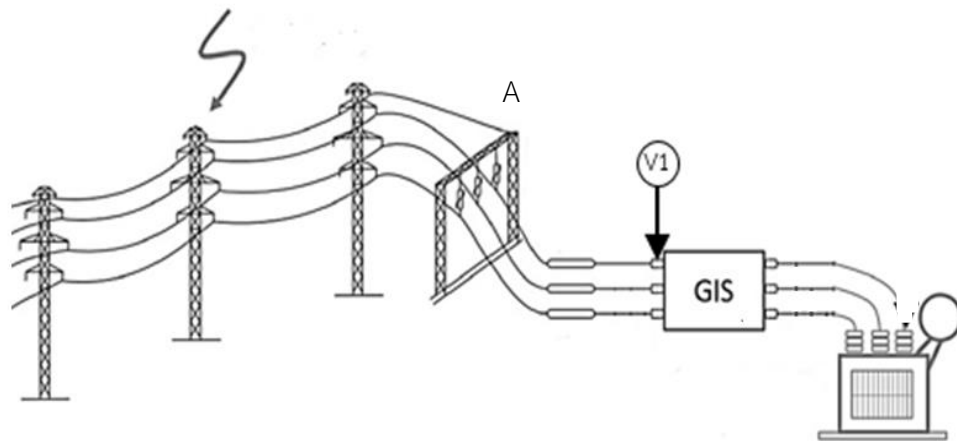
ผลการจำลองและวิเคราะห์ผล

5.1 การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้กับดักเสิร์จแรงดันพิกัด 96 และ 108 kV

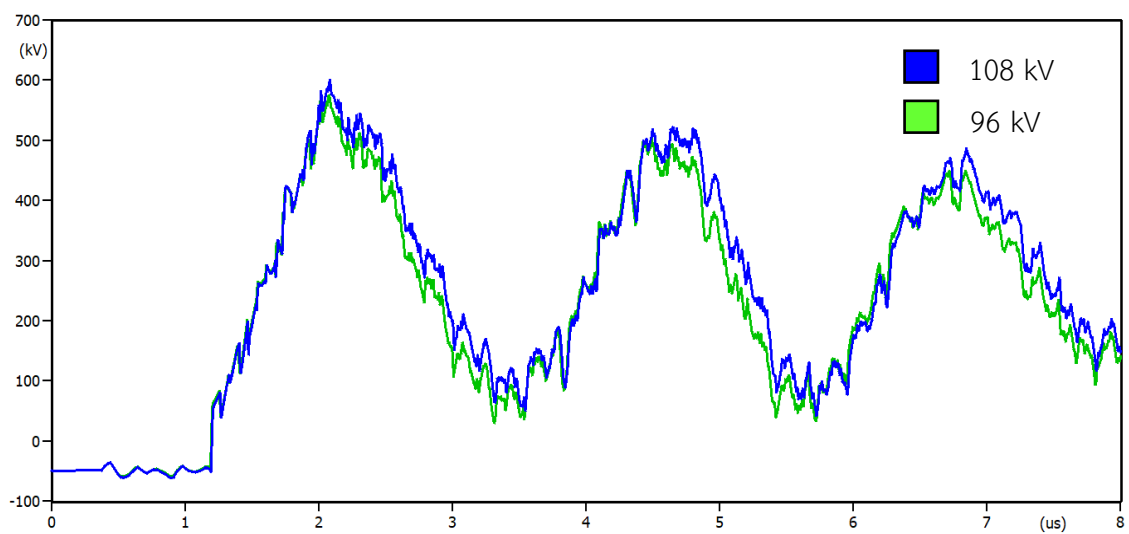
ในงานวิจัยเล่มนี้ศึกษาการเลือกพิกัดแรงดันของกับดักเสิร์จเพื่อใช้สำหรับการป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นจากแรงดันเกินฟ้าผ่า ซึ่งหากขนาดของแรงดันเกินที่เข้ามาภายในระบบไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าค่าการคำนวณของอุปกรณ์จะส่งผลทำให้อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นการทำการประสานสัมพันธ์การคำนวณของสถานีไฟฟ้าจึงมีความสำคัญอย่างมาก โดยในงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้เลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินอย่างกับดักเสิร์จ และจากระบบไฟฟ้า 115 kV ได้มีการคำนวณและกำหนดขนาดพิกัดของกับดักเสิร์จจากในหัวข้อที่ 4.1.1 กับดักเสิร์จที่สามารถใช้ป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าในระบบนี้ได้ คือพิกัดแรงดัน 96 และ 108 kV ในหัวข้อนี้ได้ศึกษาผลของการควบคุมแรงดันเกินของกับดักเสิร์จแรงดันพิกัด 96 และ 108 kV จากการติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าสถานีไฟฟ้าเพียงตำแหน่งเดียวในตำแหน่ง A ดังรูปที่ 5.1 เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองโดยวัดแรงดันเกินที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้า ในตำแหน่ง V1 ดังรูปที่ 5.1 และข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองเป็นไปตามตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง

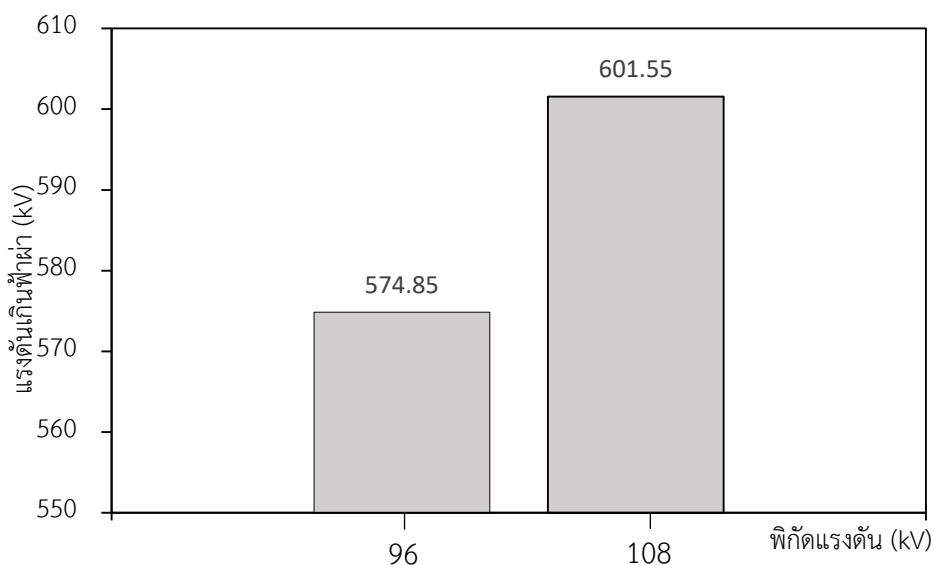
พารามิเตอร์		ข้อมูล
ฟ้าผ่า	ค่ายอด	150 kA
	เวลารูปคลื่น	1.8/30 μ s
ระยะห่างระหว่างเสา		80 m
ความยาวของสายเคเบิล		20 m
ความต้านทานฐานเสา		10 Ω



รูปที่ 5.1 การติดตั้งกับดักเสิร์จที่ตำแหน่งทางเข้าสถานีไฟฟ้า GIS



รูปที่ 5.2 ผลการจำลองแรงดันเกินที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้า



รูปที่ 5.3 ผลการจำลองแรงดันเกินที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้าเมื่อติดตั้งกับดักเสิร์จแรงดันพิกัด 96 และ 108 kV

จากการจำลองการติดตั้งกับดักเสิร์จแรงดันพิกัดระหว่าง 96 และ 108 kV เพื่อเปรียบเทียบการควบคุมแรงดันของกับดักเสิร์จเพื่อป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่า ผลการจำลองแรงดันเกินแสดงดังรูปที่ 5.2 เมื่อติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ที่หน้าสถานีไฟฟ้า (A) และวัดแรงดันเกินที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส แสดงดังรูปที่ 5.1 ผลการเปรียบเทียบกับกับดักเสิร์จทั้งสองพิกัดแสดงดังรูปที่ 5.3 พบว่ากับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV สามารถควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่าได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV เพราะว่ากับดักเสิร์จพิกัด 96 kV สามารถจำกัดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ไหลเข้าสู่สถานีไฟฟ้าให้มีค่าต่ำส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้าได้รับแรงดันเกินฟ้าผ่ามีค่าต่ำด้วย ช่วยยืดอายุการทำงานของอุปกรณ์ฉนวน การใช้กับดักเสิร์จแรงดันพิกัด 108 kV เพื่อป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่ภายในสถานีไฟฟ้าได้รับแรงดันเกินที่มีค่าสูงซึ่งเป็นผลทำให้ฉนวนเกิดการเสื่อมสภาพเร็วขึ้น

ดังนั้นกับดักเสิร์จพิกัด 96 kV สามารถควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่าได้ดีกว่ากับดักเสิร์จพิกัด 108 kV ซึ่งเป็นผลดีต่อการป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าของสถานีไฟฟ้า GIS 115 kV แต่ต้องคำนึงถึงแรงดันชั่วคราวที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าด้วย เพราะถ้าเกิดแรงดันเกินชั่วคราวที่มีค่าสูงกว่าที่กับดักเสิร์จพิกัด 96 kV จะทนได้จะส่งผลกระทบต่อกับดักเสิร์จเกิดการระเบิดเนื่องจากรับพลังงานไม่ไหว

5.2 การศึกษาการหาค่าอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า

จากผลการจำลองในหัวข้อที่ 5.1 การติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ไว้ที่หน้าสถานีไฟฟ้า สามารถควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่าให้มีค่าน้อยกว่าการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV แต่ยังไม่ทราบได้ว่าจะส่งผลต่ออัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่ามากน้อยเพียงใด ในหัวข้อนี้จะศึกษาหาอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV ซึ่งจะสามารถใช้ประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้กับดักเสิร์จได้ โดยมีผลการจำลองดังนี้

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง

พารามิเตอร์	ข้อมูล	พารามิเตอร์	ข้อมูล
เวลารูปคลื่นฟ้าผ่า	1.8/30 μ s	ค่าคงที่ a	2.277
ระยะห่างระหว่างเสา	80 m	ค่าคงที่ k	6.5×10^{-5}
ความยาวของสายเคเบิล	20 m	จำนวนวันที่เกิดฝนฟ้าคะนอง	49.44
ความต้านทานฐานเสา	10 Ω		
ความสูงของเสา	20 m		

5.2.1 เงื่อนไขที่ใช้สำหรับการคำนวณอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า

เราจำลองหาขนาดของกระแสฟ้าผ่าคายอดและตำแหน่งฟ้าผ่าที่ส่งผลทำให้เกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต (465.7 kV) เพื่อนำไปคำนวณหาอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้า โดยเปลี่ยนขนาดของกระแสฟ้าผ่าคายอดมีค่าดังนี้ 50 80 100 150 และ 200 kA ตามลำดับ และตำแหน่งฟ้าผ่ามีค่าเป็นดังนี้ 80 160 320 560 และ 720 m ตามลำดับ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลองเป็นไปตามตารางที่ 5.2 ผลการจำลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.3 และ 5.4

ตารางที่ 5.3 ผลการจำลองแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนขนาดกระแสฟ้าผ่าและตำแหน่งฟ้าผ่าสำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV

ตำแหน่งฟ้าผ่า (m) ขนาดกระแสฟ้าผ่า (kA)		แรงดันเกินฟ้าผ่าที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้า (kV)				
		80	160	320	560	720
50		129.39	123.36	107.10	102.90	100.25
80		153.03	135.65	300.21	288.27	286.82
100		398.74	391.50	351.72	328.43	326.62
150		*574.85	463.70	464.56	415.68	409.78
200		*716.11	*533.69	*519.73	*506.61	*495.19

* เงื่อนไขที่ส่งผลทำให้เกิดแรงดันเกินที่เป็นอันตรายต่อระบบไฟฟ้า

ตารางที่ 5.4 ผลการจำลองแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนขนาดกระแสฟ้าผ่าและตำแหน่งฟ้าผ่าสำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV

ตำแหน่งฟ้าผ่า (m) ขนาดกระแสฟ้าผ่า (kA)		แรงดันเกินฟ้าผ่าที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้า (kV)				
		80	160	320	560	720
50		129.44	123.39	107.06	102.90	100.80
80		153.03	135.65	330.33	322.13	312.24
100		434.16	420.79	372.19	358.54	357.00
150		*601.55	*501.13	*493.36	438.79	437.87
200		*756.44	*579.48	*550.38	*533.69	*521.86

* เงื่อนไขที่ส่งผลทำให้เกิดแรงดันเกินที่เป็นอันตรายต่อระบบไฟฟ้า

เราจะเลือกขนาดของกระแสฟ้าผ่าค่ายอดและตำแหน่งฟ้าผ่าที่ส่งผลทำให้เกิดแรงดันเกินที่ตำแหน่งทางเข้าสถานีไฟฟ้าที่มีขนาดมากกว่า 467.5 kV จากการจำลองวัดแรงดันเกินฟ้าผ่า ในตำแหน่ง V1 ดังรูปที่ 5.1 ที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้า GIS สำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV พบว่าที่ความยาว 80 m ที่กระแส 150 kA ขึ้นไป และที่ความยาวค่าอื่นๆ ที่กระแสค่ายอด 200 kA ขึ้นไป เกิดแรงดันเกินที่มีค่าสูงกว่าค่าวิกฤต สำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV พบว่าที่

ความยาว 80 160 และ 320 m ที่กระแสฟ้าผ่าค่ายอด 150 kA ขึ้นไป ส่วนความยาว 560 และ 720 m ที่กระแสฟ้าผ่าค่ายอด 200 kA ขึ้นไป เกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่มีค่ามากกว่าค่าวิกฤต อย่างไรก็ตามที่กระแสฟ้าผ่าค่ายอดค่าอื่นๆ ที่มีค่าต่ำกว่า 150 kA ไม่ส่งผลทำให้ไม่เกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เป็นอันตรายต่อระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการเลือกขนาดของกระแสฟ้าผ่าที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในสถานีไฟฟ้า

5.2.2 คำนวณหาค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในประเทศไทย

การคำนวณหาอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าจะต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ของการเกิดฟ้าผ่าที่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ซึ่งค่าอัตราความล้มเหลวที่จะคำนวณต่อไปนี้จะเกิดขึ้นเฉพาะเจาะจงในแต่ละพื้นที่ที่เราสนใจ โดยวิทยานิพนธ์เล่มนี้สนใจการเกิดฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในกรุงเทพฯ โดยค่าพารามิเตอร์นั้น เราเรียกว่า ค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่า (N_g) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.4 ในหัวข้อที่ 2.1.2 โดยที่ k และ a เป็นค่าคงที่ มีค่าเท่ากับ 6.5×10^{-5} และ 2.277 ตามลำดับ ดังนั้นค่าความหนาแน่นของการเกิดฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในกรุงเทพฯมีค่าเท่ากับ

$$N_g = 6.5 \times 10^{-5} (49.44^{2.277}) = 0.468 \text{ flash / km}^2 / \text{year}$$

5.2.3 คำนวณหาโอกาสของการเกิดฟ้าผ่าแต่ละความยาว

คำนวณหาโอกาสของการเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งแต่ละความยาวสาย (N_m) จากสมการที่ (4.5) โดยหาค่าอัตราการเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่ง (N_L) ก่อนมีค่าดังนี้

$$N_L = 0.468 \left(\frac{28(20)^{0.6}}{10} \right) = 7.91 \text{ flash / 100km / year}$$

เมื่อ หาค่า N_L ได้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.91 flashes/100km/year จากนั้นหาค่า N_m หรือโอกาสของการเกิดฟ้าผ่าแต่ละความยาว ในหน่วยครั้งต่อปี เป็นไปตามตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ความน่าจะเป็นของการเกิดฟ้าผ่าแต่ละความยาวสายส่ง

ความยาวสายส่ง (km)	โอกาสของการเกิดฟ้าผ่าแต่ละความยาวสาย (N_m) (ครั้ง/ปี)
0.08	0.006328
0.16	0.012656
0.32	0.025312
0.56	0.044296
0.72	0.056952

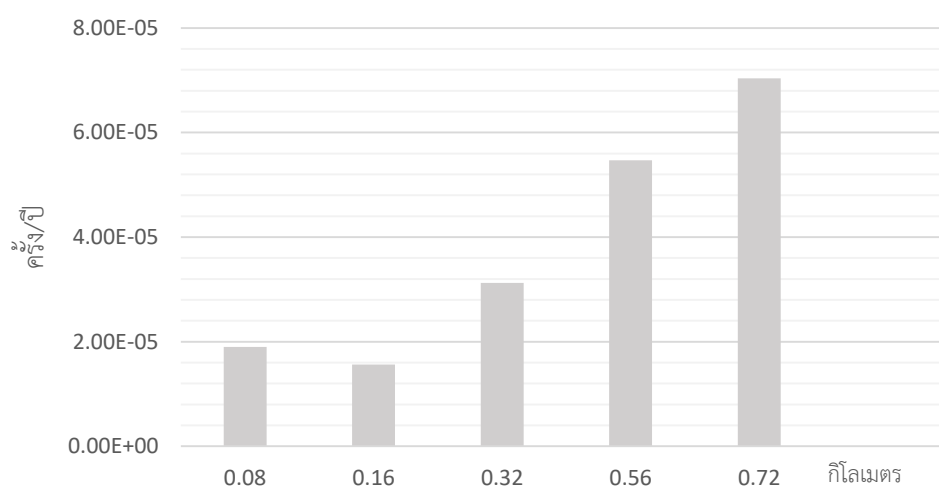
5.2.4 คำนวณค่าความน่าจะเป็นของการเกิดกระแสฟ้าผ่าที่มากกว่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต

คำนวณหาค่าความน่าจะเป็นของการเกิดกระแสฟ้าผ่าที่มากกว่าค่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต (S) ได้จากสมการที่ 4.4 หรือจากรูปกราฟที่ 4.5 ความน่าจะเป็นของการเกิดกระแสฟ้าผ่าที่มีค่ามากกว่า 150 kA เท่ากับ $S_{150} = 0.00197$ และ ความน่าจะเป็นของการเกิดกระแสฟ้าผ่าที่มีค่ามากกว่า 200 kA เท่ากับ $S_{200} = 0.00081$

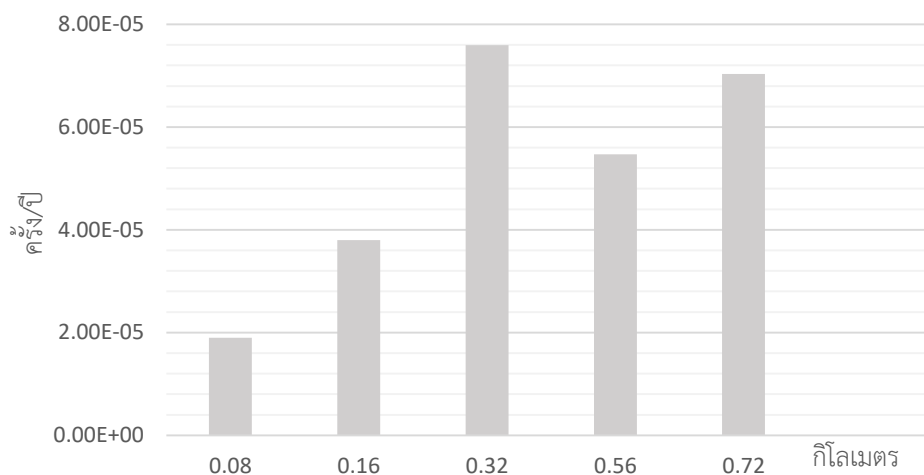
5.2.5 คำนวณอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า

คำนวณหาความน่าจะเป็นของการเกิดความล้มเหลวที่สถานีไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าที่สายส่งที่ระยะทางต่างๆ โดยนำค่าความน่าจะเป็นของการเกิดกระแสฟ้าผ่าที่มากกว่ากระแสฟ้าผ่าวิกฤต (S) คูณกับโอกาสของการเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งแต่ละความยาว (N_m) โดยความน่าจะเป็นของการเกิดความล้มเหลวที่สถานีไฟฟ้าสำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 และ 108 kV แสดงดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 ตามลำดับ

จากนั้นนำค่าความน่าจะเป็นของการเกิดความล้มเหลวที่สถานีไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าที่สายส่งระยะทางต่างๆ กรณีติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV มาหาผลรวมเพื่อคำนวณหาอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่าสำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV และสำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV คำนวณหาอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่าโดยใช้วิธีเดียวกับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV



รูปที่ 5.4 ความน่าจะเป็นของการเกิดความล้มเหลวที่สถานีไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าที่สายส่งระยะทางต่างๆ กรณีติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV



รูปที่ 5.5 ความน่าจะเป็นของการเกิดแรงดันเกินที่มีค่าสูงกว่าค่าวิกฤตสำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV

คำนวณหาค่าอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า โดยการหาผลรวมของความน่าจะเป็นของการเกิดความล้มเหลวที่สถานีไฟฟ้าเนื่องจากการเกิดฟ้าผ่าที่สายส่งระยะทางต่างๆ

— อัตราความล้มเหลวของของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า กรณีติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV มีค่า 1.26×10^{-4} /year

— อัตราความล้มเหลวของของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า กรณีติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV มีค่า 1.70×10^{-4} /year

การคำนวณหาอัตราความล้มเหลวของของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า สำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV พบว่ามีค่าน้อยกว่าการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV ประมาณ 1.35 เท่า เนื่องจากกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV มีแรงดันคงเหลือที่ต่ำกว่ากับดักเสิร์จพิกัด 108 kV จึงส่งผลทำให้ต้องใช้กระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ค่าสูงๆ ถึงจะทำให้เกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่มีค่าสูงกว่าค่าวิกฤต ซึ่งโอกาสในการเกิดกระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ค่าสูงๆ จะมีโอกาสในการเกิดขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับโอกาสในการเกิดกระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่กระแสยอดต่ำๆ ส่งผลทำให้อัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV สำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV มีค่าน้อยตาม ในทางกลับกันกรณีการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัด 108 kV มีค่าอัตรา

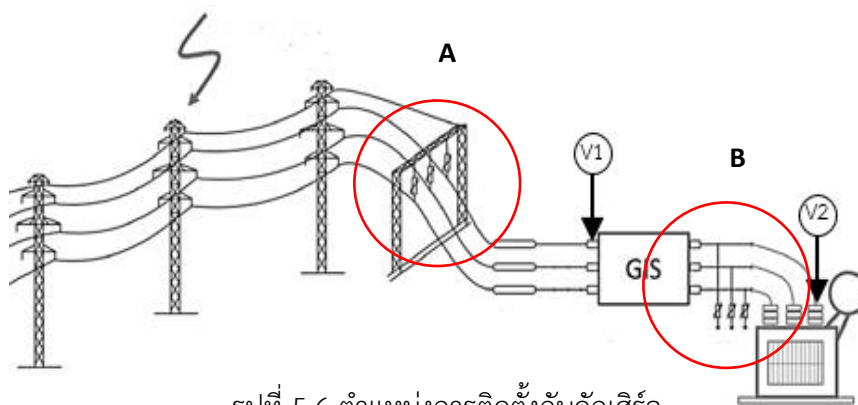
ความล้มเหลวสูงกว่าเพราะแรงดันคงเหลือภายในกับดักเสิร์จมีค่าสูง ส่งผลให้กระแสฟ้าผ่าวิกฤตที่ทำให้เกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ส่งผลเสียต่อระบบไฟฟ้าเลยมีค่าต่ำ ทำให้โอกาสในการเกิดกระแสฟ้าผ่าวิกฤตมีค่าสูงตาม ดังนั้นอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV กรณีติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัด 108 kV จึงมีค่าสูงกว่ากรณีติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัด 96 kV ที่เวลารูปคลื่น 1.8/30 μ s

5.3 การศึกษาตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จ

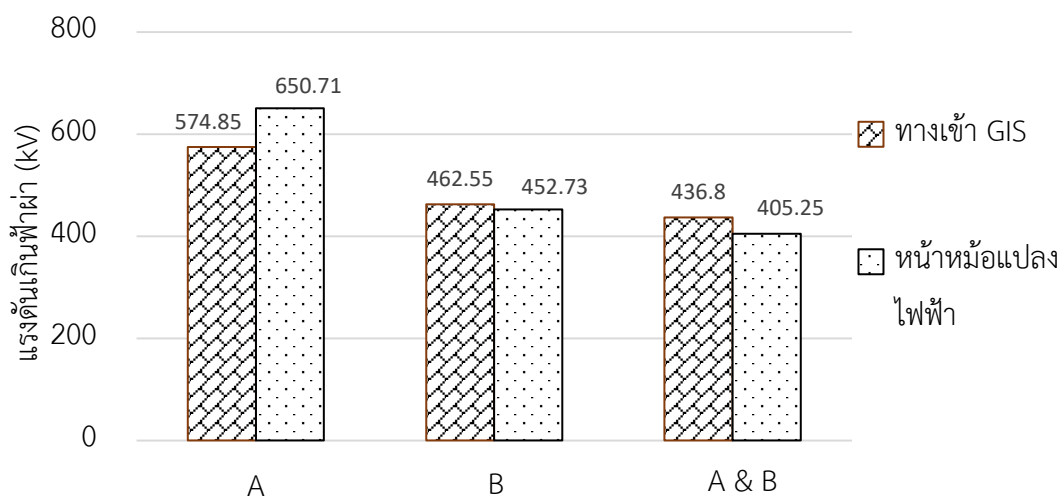
เมื่อติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ไว้ที่ทางเข้าสถานีไฟฟ้าเพียงตำแหน่งเดียว จากผลการจำลองในหัวข้อที่ 5.1 พบว่ากับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV สามารถควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่าได้ดีกว่ากับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV แต่อย่างไรก็ตามกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ก็ยังไม่สามารถควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นได้ และยังมีแรงดันเกินฟ้าผ่าที่มีค่าสูงเกินกว่าค่าวิกฤต ซึ่งเป็นอันตรายต่อสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส ดังนั้นจึงต้องศึกษาเพื่อหาตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัด 96 kV ที่ส่งผลทำให้กับดักเสิร์จสามารถป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่าได้ ในหัวข้อนี้ศึกษาตำแหน่งของการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV เพียงพิกัดเดียว

สำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จแบ่งการติดตั้งออกเป็น 3 กรณีด้วยกัน ได้แก่ กรณี 1) การติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินเพียงตำแหน่งเดียวแทนด้วยตำแหน่ง A ในรูปที่ 5.6 กรณี 2) การติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงตำแหน่งเดียวแทนด้วยตำแหน่ง B ในรูปที่ 5.6 และกรณี 3) การติดตั้งกับดักเสิร์จสองตำแหน่งพร้อมกันทั้งหน้าสายเคเบิลใต้ดินและหน้าหม้อแปลงไฟฟ้า โดยติดตั้งทั้งตำแหน่ง A และ B พร้อมกัน ดังรูปที่ 5.6

ในหัวข้อนี้เราจะวัดแรงดันเกินฟ้าผ่า 2 จุดด้วยกัน โดยจุดที่ 1 คือจุดวัดทางเข้า GIS ในรูปที่ 5.6 คือตำแหน่งวัดที่ V1 และจุดที่ 2 คือจุดวัดหน้าหม้อแปลงไฟฟ้า ในรูปที่ 5.6 คือตำแหน่งวัดที่ V2 โดยข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองในหัวข้อนี้เป็นไปตามตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.6 ตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จ



รูปที่ 5.7 ผลการจำลองการติดตั้งกับดักเสิร์จที่ตำแหน่งต่างๆ

จากผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.7 ในกรณีตำแหน่งการติดตั้งแบบที่ 1 คือติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินเพียงตำแหน่งเดียว พบว่าจะเกิดแรงดันเกินไฟฟ้าที่ทางเข้า GIS และที่หม้อแปลงไฟฟ้าสูงกว่าการติดตั้งกับดักเสิร์จในกรณีอื่นๆ เนื่องจากเมื่อเกิดแรงดันเกินไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้าสู่ระบบ ที่ตำแหน่ง A มีการติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียว ซึ่งจะช่วยควบคุมให้แรงดันเกินไฟฟ้าที่เข้ามามีขนาดลดลง จากนั้นด้วยผลของระยะทาง (Distance Effect) ส่งผลทำให้ขนาดของแรงดันเกินไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลการจำลองแรงดันเกินที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าสูงกว่าแรงดันเกินที่ทางเข้า GIS และเมื่อแรงดันเกินไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าซึ่งเป็นจุดที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูง ส่งผลให้แรงดันเกินเกิดการสะท้อนกลับ ทำให้ขนาดของแรงดันเกินมีค่าสูงขึ้น เมื่อเรวัตค่าแรงดันเกินทั้งสองตำแหน่งจะทำให้ขนาดที่เรวัตได้มีค่าสูงกว่ากรณีอื่น

เมื่อย้ายกับดักเสิร์จมาติดตั้งไว้ที่หม้อแปลงไฟฟ้าเพียงตำแหน่งเดียว คือการติดตั้งกับดักเสิร์จในกรณีที่ 2 เราพบว่าขนาดของแรงดันเกินไฟฟ้าที่ทางเข้า GIS และที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้ามีขนาดต่ำกว่าการติดตั้งกับดักเสิร์จในกรณีแรก ด้วยสาเหตุที่ว่าเมื่อเกิดแรงดันเกินไฟฟ้าเคลื่อนที่เข้ามาในระบบเมื่อเรวัตแรงดันที่ตำแหน่ง V1 ทำให้มีขนาดของแรงดันเกินค่าหนึ่ง ต่อมาแรงดันเกินเคลื่อนที่ไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าจึงเกิดการสะท้อนกลับ แต่มีการติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ที่ตำแหน่ง B ซึ่งจะคอยควบคุมขนาดของแรงดันเกินไม่ให้เกิดการสะท้อนกลับส่งผลทำให้ขนาดของแรงดันเกินที่ตำแหน่ง V1 มีค่าน้อยกว่าในกรณีแรก

เมื่อพิจารณาผลจากการติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ทั้งหน้าสายเคเบิลใต้ดินและที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้า นั่นคือการติดตั้งกับดักเสิร์จในกรณีที่ 3 จากผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.7 เราพบว่าขนาดของแรงดันเกินไฟฟ้าที่ทางเข้า GIS และที่หม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับการติดตั้งกับ

ดักเสิร์จในสองกรณีแรก ทั้งนี้เป็นเพราะกับดักเสิร์จทั้งสองตัว ช่วยในเรื่องการควบคุมแรงดันเกิน ฟาผ่าที่เคลื่อนที่เข้าสู่สถานีไฟฟ้า และที่สะท้อนกลับออกมาจากหม้อแปลงไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี โดยกับดักเสิร์จตัวแรกที่ติดตั้งไว้ที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินจะช่วยควบคุมแรงดันเกินฟาผ่าที่เคลื่อนที่มาจากสายส่งตัวนำ ทำให้แรงดันเกินมีขนาดลดลง ต่อมากับดักเสิร์จตัวที่สองที่ติดตั้งไว้ที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้าจะช่วยควบคุมแรงดันเกินที่เกิดสะท้อนกลับมาจากหม้อแปลงไฟฟ้า และการติดตั้งกับดักเสิร์จทั้งสองตำแหน่งพร้อมกันจะช่วยป้องกันในเรื่องผลของระยะทางที่กับดักเสิร์จและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ มีระยะห่างกัน ดังนั้นการติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ทั้งสองตำแหน่งพร้อมกันจะช่วยทำให้สถานีไฟฟ้ามีความปลอดภัยจากแรงดันเกินฟาผ่ามากยิ่งขึ้น

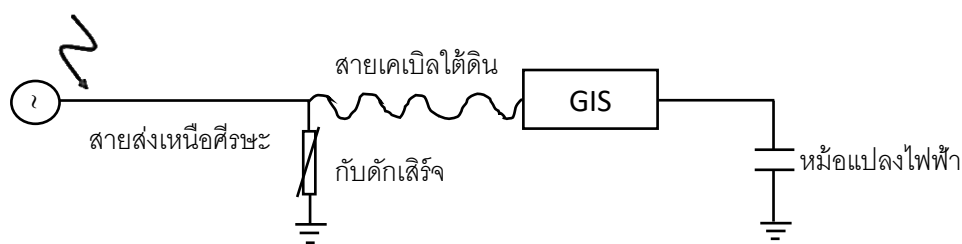
หากต้องการติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียว จากผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 5.7 พบว่า เมื่อย้ายกับดักเสิร์จมาติดตั้งที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงตำแหน่งเดียว ส่งผลทำให้แรงดันเกินที่วัดได้ทั้งสองตำแหน่งมีค่าลดลงกว่าการติดตั้งกับดักเสิร์จในกรณีแรก แสดงให้เห็นถึงการติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงตำแหน่งเดียวดีกว่าการติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินเพียงตำแหน่งเดียว

5.4 การศึกษาผลของความยาวสายเคเบิลใต้ดิน

จากการศึกษาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลทำให้ขนาดของแรงดันเกินฟาผ่าในระบบไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้ได้แก่ ความต้านทานฐานเสา และความชันหน้าคลื่นฟาผ่า เป็นต้น [18] ในงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้สนใจค่าพารามิเตอร์ความยาวสายเคเบิลใต้ดิน ซึ่งพารามิเตอร์นี้จะมอิทธิพลต่อการเพิ่มขึ้นของขนาดแรงดันเกินฟาผ่ามากขึ้นน้อยเพียงใด จึงทำให้มีการศึกษาผลของความยาวสายเคเบิลใต้ดินในหัวข้อนี้

แบบจำลองที่ใช้ในหัวข้อนี้คือแบบจำลองที่มีการติดตั้งกับดักเสิร์จพิคัดแรงดัน 96 kV โดยติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินเพียงตำแหน่งเดียว แสดงดังรูปที่ 5.8 เนื่องจากการติดตั้งกับดักเสิร์จที่ตำแหน่งนี้เพียงตำแหน่งเดียวส่งผลทำให้เกิดขนาดของแรงดันเกินฟาผ่าที่เป็นอันตรายต่อระบบมากที่สุด แสดงได้จากผลการจำลองดังรูปที่ 5.7

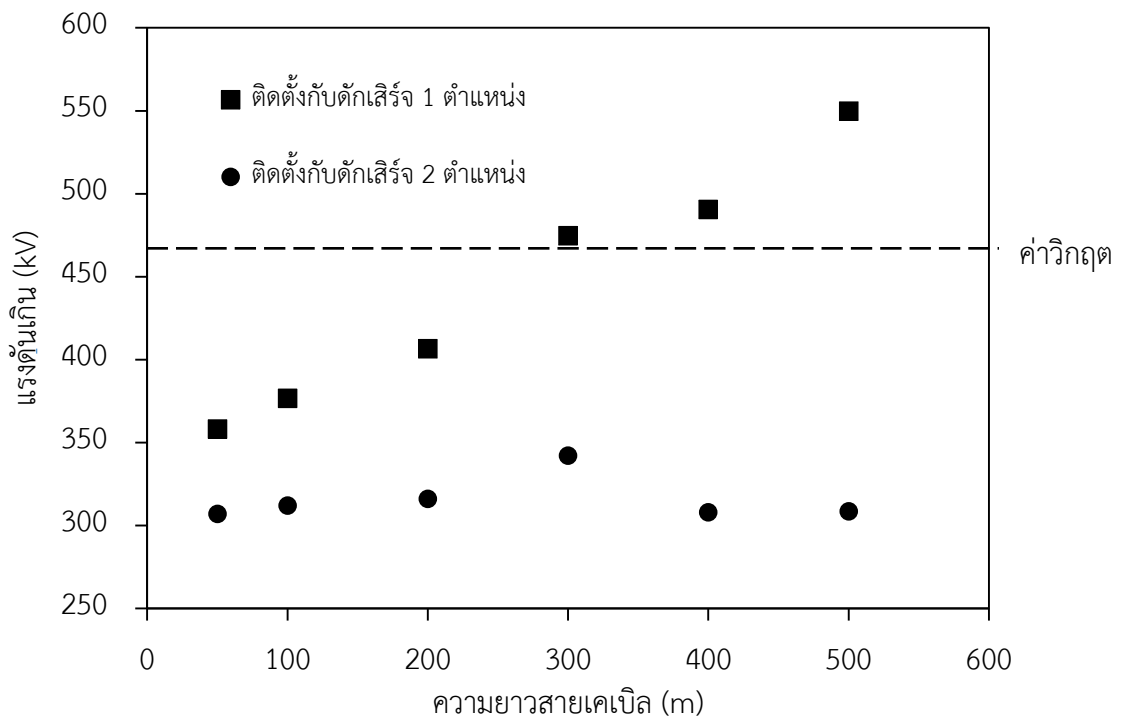
จากแบบจำลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น ในหัวข้อนี้จะเปลี่ยนค่าความยาวสายเคเบิลใต้ดินอยู่ในช่วง 10 – 500 m เพื่อดูขนาดของแรงดันเกินฟาผ่าที่เกิดขึ้นที่ทางเข้า GIS เมื่อติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียว โดยมีการจำลองเหตุการณ์ให้เกิดการรวบไฟที่ฉนวนย้อนกลับ โดยใช้แบบจำลองฟาผ่าในหัวข้อที่ 3.7.2 ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้งาน ได้จากการคำนวณการเกิดเสิร์จในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5.8 การป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สด้วยกักดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียว

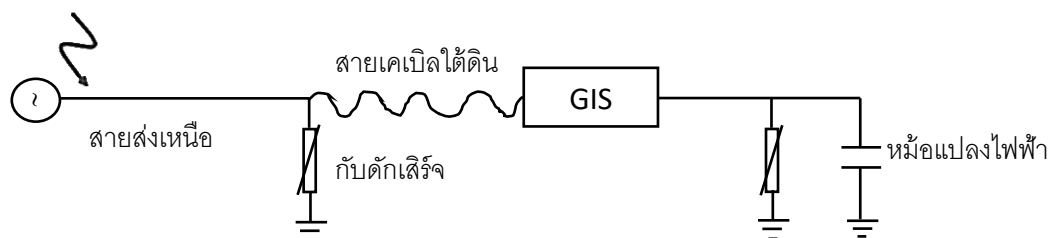
จากรูปที่ 5.9 แสดงผลการจำลองการเปลี่ยนค่าความยาวสายเคเบิลใต้ดินในช่วง 10 – 500 m เมื่อติดตั้งกักดักเสิร์จที่ตำแหน่งหน้าสายเคเบิลใต้ดินเพียงตำแหน่งเดียวพบว่า เมื่อเปลี่ยนความยาวของสายเคเบิลในช่วง 10 – 200 m ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าความยาวสายเคเบิลที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้แรงดันเกินที่วัด ณ ตำแหน่งทางเข้า GIS มีค่าเพิ่มขึ้นตาม แต่แรงดันเกินฟ้าผ่าที่วัดได้ยังมีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤต ซึ่งขนาดของแรงดันเกินที่วัดได้ยังไม่ส่งผลเสียต่อระบบไฟฟ้า ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากผลของระยะทางจากการติดตั้งกักดักเสิร์จ กล่าวคือยิ่งเราติดตั้งกักดักเสิร์จห่างจากตำแหน่งที่เราต้องการป้องกันมากแค่ไหน การป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าก็จะมีประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากว่ากักดักเสิร์จมีระยะขอบเขตของการป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่า ถ้าหากติดตั้งเกินกว่าที่กักดักเสิร์จจะป้องกันได้จะทำให้แรงดันเกินฟ้าผ่ามีค่าสูงขึ้น เช่นเดียวกับผลการจำลองในการปรับความยาวสายเคเบิลในช่วง 300 – 500 m ซึ่งเป็นความยาวที่อยู่นอกเขตการป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าของ กักดักเสิร์จ จึงส่งผลทำให้แรงดันเกินที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าวิกฤตซึ่งขนาดแรงดันเกินที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้า

การปรับความยาวของสายเคเบิลในช่วง 300 – 500 m ส่งผลทำให้เกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เป็นอันตรายต่ออุปกรณ์ภายในตัวสถานีไฟฟ้า GIS ด้วยเหตุนี้เองทำให้การติดตั้งกักดักเสิร์จที่ตำแหน่งหน้าสายเคเบิลใต้ดินเพียงตำแหน่งเดียวไม่เพียงพอต่อการป้องกันแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นถ้าต้องการใช้สายเคเบิลใต้ดินที่มีความยาวตั้งแต่ 300 m ขึ้นไปควรจะมีการติดตั้งกักดักเสิร์จที่ตำแหน่งหน้าหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มเติมเพื่อลดขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่าที่จะเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า



รูปที่ 5.9 ผลการจำลองการเปลี่ยนความยาวสายเคเบิลใต้ดินสำหรับการติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียวและการติดตั้งกับดักเสิร์จสองตำแหน่งพร้อมกัน

จากการติดตั้งกับดักเสิร์จเพิ่มเติม คือจากเดิมติดตั้งกับดักเสิร์จแค่เพียงที่หน้าสายเคเบิลใต้ดินเพียงตำแหน่งเดียว ได้เพิ่มการติดตั้งกับดักเสิร์จที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้าด้วย แสดงดังรูปที่ 5.10 ส่งผลทำให้มีการติดตั้งกับดักเสิร์จพร้อมกันทั้งสองตำแหน่ง และเมื่อวัดแรงดันเกินที่ทางเข้า GIS ส่งผลทำให้ไม่เพียงแต่ขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ความยาวสายเคเบิลใต้ดินในช่วง 300 - 500 m ลดลง แต่ในทุกๆ ความยาวของสายเคเบิลมีขนาดของแรงดันเกินฟ้าผ่าลดลงเช่นกัน แสดงผลการจำลองดังรูปที่ 5.9 เปรียบเทียบกับการติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียว



รูปที่ 5.10 การป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สด้วยการติดตั้งกับดักเสิร์จ 2 ตำแหน่ง

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการจำลอง

จากการศึกษาผลการจำลองต่างๆ ได้แก่ การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้กับดักเสิร์จแรงดันพิกัด 96 และ 108 kV การศึกษาการหาค่าอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า การศึกษาตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จ และการศึกษาผลของความยาวสายเคเบิลใต้ดิน สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

1) การศึกษาการเปรียบเทียบการใช้กับดักเสิร์จแรงดันพิกัด 96 และ 108 kV จากการจำลองผลทำให้สามารถสรุปได้ว่าการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV สามารถควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่าได้ต่ำกว่าการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV ประมาณ 10% เนื่องจากกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV มีแรงดันคงเหลือน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ กับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV ส่งผลทำให้อุปกรณ์ต่างๆ ภายในสถานีไฟฟ้ามีความปลอดภัยมากขึ้น

2) การศึกษาการหาค่าอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า จากผลการจำลองสรุปได้ว่า การป้องกันสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊สด้วยการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV ส่งผลทำให้ค่าอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้าแบบฉนวนแก๊ส 115 kV จากแรงดันเกินฟ้าผ่า สูงกว่าการติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV ประมาณ 1.35 เท่า แสดงให้เห็นว่าการเลือกติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 96 kV นั้นจะส่งผลทำให้อุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าได้รับแรงดันเกินฟ้าผ่าแล้วมีโอกาสเกิดความล้มเหลวน้อยกว่าการเลือกติดตั้งกับดักเสิร์จพิกัดแรงดัน 108 kV

3) การศึกษาตำแหน่งการติดตั้งกับดักเสิร์จ จากการจำลองตำแหน่งในการติดตั้งกับดักเสิร์จ โดยมีตำแหน่งติดตั้งดังต่อไปนี้ 1) ตำแหน่งหน้าสายเคเบิลใต้ดิน 2) ตำแหน่งหน้าหม้อแปลงไฟฟ้า และ 3) ติดตั้งทั้งหน้าสายเคเบิลใต้ดินและหน้าหม้อแปลงไฟฟ้าพร้อมกัน จากผลการจำลองทำให้ได้ข้อสรุปว่าการติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่าได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ที่หน้าสายเคเบิลใต้ดิน แต่อย่างไรก็ตามการติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียวก็ยังมีความเสี่ยงอยู่ ดังนั้นควรติดตั้งกับดักเสิร์จไว้ที่ทั้งหน้าสายเคเบิลใต้ดินและหน้าหม้อแปลงไฟฟ้า เนื่องจากการติดตั้งกับดักเสิร์จที่ตำแหน่งนี้สามารถควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่าให้มีค่าต่ำกว่าค่าวิกฤต

4) การศึกษาผลของความยาวสายเคเบิลใต้ดิน จากผลการจำลองสรุปได้ว่าความยาวสายเคเบิลใต้ดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้แรงดันเกินฟ้าผ่าที่ทางเข้า GIS มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นหากสายเคเบิลมีระยะทางเพิ่มสูงขึ้น ควรจะมีการศึกษาขนาดของแรงดันเกินเพิ่มเติม ในกรณีศึกษานี้การติดตั้งกับดักเสิร์จพิคกอัพแรงดัน 96 kV ที่ตำแหน่งหน้าสายเคเบิลใต้ดินเพียงตำแหน่งเดียว หากต้องการติดตั้งกับดักเสิร์จที่ตำแหน่งนี้และเลือกใช้สายเคเบิลที่มีความยาวมากกว่า 300 m ขึ้นไป ควรจะมีการติดตั้งกับดักเสิร์จเพิ่มเติมมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง โดยอาจติดตั้งกับดักเสิร์จเพิ่มไว้ที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้าเพิ่มเติม ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่มาจากแรงดันเกินฟ้าผ่าและยังเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบไฟฟ้าได้อีกด้วย

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเลือกพิคกอัพของกับดักเสิร์จควรเลือกให้เหมาะสม โดยต้องเลือกให้มีค่าแรงดันคงเหลือต่ำเพื่อประโยชน์ในการป้องกันแรงดันเกินเสิร์จ แต่ทั้งนี้ต้องระวังขนาดของแรงดันเกินชั่วครู่ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าด้วย ซึ่งควรต้องมีการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาแรงดันเกินชั่วครู่ และมีข้อมูลความคงทน TOV จากผู้ผลิต เพื่อให้สามารถเลือกพิคกอัพของกับดักเสิร์จได้อย่างเหมาะสม
2. ค่าความต้านทานฐานเสาที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าต่ำ เนื่องจากพื้นที่ที่ศึกษามีค่าความต้านทานดินที่ต่ำ ควรจะมีการศึกษาแรงดันเกินฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นในระบบเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการควบคุมแรงดันเกินฟ้าผ่าจากการติดตั้งกับดักเสิร์จระหว่างพิคกอัพ 96 และ 108 kV ในกรณีที่มีความต้านทานฐานเสาสูงขึ้น ควรจำลองเพื่อดูผลความแตกต่างในการจำกัดแรงดันเกินฟ้าผ่า และอัตราความล้มเหลวของสถานีไฟฟ้า
3. ในกรณีที่สายเคเบิลใต้ดินมีความยาวมาก ถึงแม้ว่าจะติดตั้งกับดักเสิร์จทั้งที่จุดต่อระหว่างสายส่งเหนือศีรษะและสายเคเบิล และที่หน้าหม้อแปลงแล้ว ก็อาจจะยังมีความเสี่ยงอยู่ในกรณีที่เซอร์กิตเบรกเกอร์ภายใน GIS เปิดวงจร ซึ่งส่งผลทำให้กับดักเสิร์จที่หน้าหม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีผลใดๆ จึงเสมือนติดตั้งกับดักเสิร์จเพียงตำแหน่งเดียว หากต้องการลดความเสี่ยงในกรณีนี้ ควรติดตั้งกับดักเสิร์จที่ท้ายสายเคเบิล (ที่หน้า GIS) ด้วย

บรรณานุกรม

- [1] A. F. Imece *et al.*, "Modeling guidelines for fast front transients," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 493-506, Jan 1996.
- [2] M. Osborne, A. Xemard, L. Prikler, and J. Martinez, "Points to consider regarding the insulation coordination of GIS substations with cable connections to overhead lines," in *Proc. International Conference on Power Systems Transients, Lyon, France, 2007*, pp. 4-7.
- [3] P. Pinceti and M. Giannettoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 393-398, 1999.
- [4] ด. ส. สังข์สะอาด, วิศวกรรมศาสตร์ไฟฟ้าแรงสูง, 3 ed. กรุงเทพมหานคร, 2549.
- [5] S. T. Mobarakei, T. Sami, and B. Porkar, "Back Flashover phenomenon analysis in power transmission substation for insulation coordination," in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2012 11th International Conference on*, 2012, pp. 170-174: IEEE.
- [6] ท. ส. พรชัย องค์วงศ์สกุล, "การวางแผนการบำรุงรักษาสถานีไฟฟ้าแรงสูงสำหรับอุตสาหกรรม," *ไฟฟ้าและอุตสาหกรรม*, pp. 101-105, 2549.
- [7] ว. ภัคดี, "การศึกษาเวลาเฉลี่ยที่จะเกิดความเสียหายในสถานีไฟฟ้าเนื่องจากฟ้าผ่าลงบนสายส่ง," *ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2557.
- [8] ก. ฝ. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, "คำแนะนำ แบบมาตรฐานงานก่อสร้าง สายส่ง 115 kV ของกฟภ," p. 313, 2550.
- [9] T. Chalardsakul, "Analysis of Grounding System Overvoltage in High Voltage Substation by ATP/EMTP," 2010.
- [10] P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis, Z. G. Datsios, and N. C. Mavrikakis, "Effects of simulation models of overhead transmission line basic components on backflashover surges impinging on GIS substations," in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*, 2010, pp. 1-6: IEEE.
- [11] Z. G. Datsios, P. N. Mikropoulos, and T. E. Tsovilis, "Insulator string flashover modeling with the aid of an ATPDraw object," in *Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Proceedings of 2011 46th International*, 2011, pp. 1-5: VDE.

- [12] V. Rakov, "Lightning parameters for engineering applications (keynote speech)," in *Electromagnetic Compatibility (APEMC), 2010 Asia-Pacific Symposium on*, 2010, pp. 1120-1123: IEEE.
- [13] "IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination," *IEEE Std 1313.2-1999*, p. i, 1999.
- [14] A. B. s. Guide, "High voltage surge arresters," *Edition*, vol. 5, pp. 2004-2007, 2004.
- [15] "<Surge arresters: applications and selection.pdf>."
- [16] C. G. Co., "Surge Arresters," ed. Ambad, Nashik, p. 11.
- [17] I. E. Commission, "IEC 60071-1 Insulation co-ordination–Part 1: Definitions, principles and rules," *IEC Central Office, Geneva, Switzerland Google Scholar*, 2006.
- [18] C. W. Group, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," *CIGRE SC33. 10*, 1991.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	อนุสรฯ ชนม์ประกาย
วัน เดือน ปี เกิด	09 มีนาคม 2536
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์อิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

