



การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้า

โดย

นายกฤตพล นบ Nob
นายณัฐพงศ์ ศิริวัฒน์ไพบูลย์

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้า

โดย

นายกฤตพล นบ Nob
นายณัฐพงศ์ ศิริวัฒน์พุทธิ์

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

**ANALYSIS OF THE INDUCED VOLTAGE GENERATED
BY TRASMISSION LINE**

By

Mr. Krittaphon Nobnorb

Mr. Natthaphong Siriwattanapaitoon

A PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2021
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

โครงการ

ของ

นายกฤตพล นบ Nob

นายณัฐพงษ์ คิริวัฒน์เพทุรย์

เรื่อง

การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้า

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

เมื่อวันที่.....

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพงษ์ ตั้มพาณุช)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิศล แก้วประภา)

หัวข้อโครงการ	การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้า
ชื่อผู้เขียน	นายกฤตพล นบบnob
	นายณัฐพงศ์ ศิริวัฒน์พetr
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา/คณะ	วิศวกรรมไฟฟ้า
	คณะวิศวกรรมศาสตร์
	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ตันทนา
ปีการศึกษา	2564

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีการขยายตัวของที่อยู่อาศัยอย่างรวดเร็วจนรุกล้ำเข้ามาในแนวเขตปลดภัยของสายส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูง ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าบนตัวนำที่ไม่มีการต่อลงดินซึ่งเป็นอันตรายกับผู้สัมผัส เพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายที่อาจเกิดขึ้น การหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำจึงมีความสำคัญ ซึ่งการตรวจวัดค่าโดยตรงมีความยุ่งยากเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์และผู้ตรวจวัดที่มีความรู้ความชำนาญ เพื่อให้เกิดความสะอาดในการทำงาน ผู้จัดทำโครงการจึงนำเสนอโปรแกรมคำนวณทางแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่สามารถประมาณปกติที่เกิดจากเสาส่งกำลังไฟฟ้าระดับแรงดัน 115 KV จำนวน 6 รูปแบบที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคใช้อยู่ในปัจจุบัน และนำผลที่ได้ไปใช้ในการคำนวณพื้นที่อันตราย โดยใช้เกณฑ์แรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากระยะปลดภัยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และเกณฑ์ระยะไฟฟ้าให้ผ่านร่างกายมนุษย์ที่ทำให้เกิดอาการเกร็งกล้ามเนื้อ จากผลการดำเนินงานพบว่า เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-3 เนื่องจากเป็นเสาส่งกำลังไฟฟ้าแบบผสม ที่มีทั้งระบบสายส่ง (115 KV) และระบบสายจำหน่าย (22 KV) ส่งผลให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของทั้ง 2 ระบบหักล้างกัน อีกทั้งยังใช้ตัวนำเดี่ยวในแต่ละเฟสจึงมีระยะทางตัวนำไปยังจุดที่สนิจมากกว่าตัวนำควบ

คำสำคัญ : สนามไฟฟ้า , สนามแม่เหล็ก , แรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้า , พื้นที่อันตราย

Project Title	ANALYSIS OF THE INDUCED VOLTAGE GENERATED BY TRASMISSION LINE
Author	Mr. Krittaphon Nobnorb
	Mr. Natthaphong Siriwattanapaitoon
Degree	Bachelor of Engineering
Major	Electrical Engineering
	Faculty of Engineering
	Thammasat University
Advisor	Assistant Prof Dr. Nutthaphong Tanthanuch
Academic Year	2021

Abstract

At present, there is a rapid increase in electricity consumption has resulted in community areas encroaching on the safe distance of transmission lines. This area is an area with high electric and magnetic field intensity. This creates an induced voltage on ungrounded conductors, which is dangerous for people in contact with such conductors. To avoid potential hazards, it is important to determine the induced voltage. Direct induced voltage measurements are complex. This project presents a software for calculating the inductive voltage at normal operating conditions arising from six types of 115 kV power towers used in the Provincial Electricity Authority. The results of the calculations were applied to find the hazardous area using two criteria: one using induced voltage obtained from a safe distance from the Provincial Electricity Authority, and the second using an electric current that flows through the human body which causes loss of muscular control. From the results, it was found that the pole type SS-TG-3 has the least dangerous area because it is a mixed-circuit transmission tower with both transmission line (115 kV) and distribution lines (22 kV), resulting in the electric and magnetic fields of both systems being canceled. It also uses a single conductor for each phase, so the distance from the conductor to the point of interest is greater than the bundle conductor.

Keywords: electric fields , magnetic fields , induced voltage , dangerous area

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ได้ เพราะได้รับความอนุเคราะห์จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ ตันทานุช อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของงานวิจัยฉบับนี้ ทางผู้จัดทำเห็นถึงความทุ่มเทของอาจารย์ในการให้คำปรึกษา จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักราช เดชวิเศษ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริศิ โอวาทชัยพงศ์ ที่เห็นความสำคัญของงานวิจัยฉบับนี้ และกรุณาร่วมเวลา มาเป็นกรรมการสอบ อีกทั้งยังให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยฉบับนี้

ขอขอบคุณแผนกวิจัยระบบไฟฟ้า กองวิจัย การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ให้ข้อมูลประกอบงานวิจัย นอกจากนี้ ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ทุกท่านที่ได้เป็นผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้มีความเชี่ยวชาญในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ จนสามารถเขียนงานวิจัยฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วง

นายกฤตพล นบນอบ

นายณัฐพงศ์ ศิริวัฒน์เพทุรย์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(9)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	2
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 ตารางการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 แรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induced Voltage)	4
2.2 การเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้า (Electric Field Induction) หรือสนามไฟฟ้า (Electric Field)	4
2.3 การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) หรือสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field)	5
2.4 ทฤษฎีการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าโดยวิธี-image charge method	5
2.4.1 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากตัวนำที่มีการจ่ายพลังงานหลายเฟส	7
2.4.2 การคำนวณหาค่าประจุต่อน่วย	9
2.5 ทฤษฎีการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กโดยวิธีซ้อนทับ (superposition theorem)	10
2.5.1 แรงดันไฟเหนี่ยวนำเนื่องจากการกระแสไฟคงที่	10
2.6 องค์ประกอบของระบบสายส่ง 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	12
2.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ	12
2.7.1 ชนิดลูกถ้วยที่ใช้ในระบบสายส่ง 115 kV	12
2.7.1.1 ลูกถ้วยแขวนเซรามิก (Suspension Type Porcelain Insulator)	12
2.7.1.2 ลูกถ้วยก้านตรง (Pin-Type insulator)	13

2.7.2 ข้อมูลระบบสายส่ง 115 kV	14
2.7.3 ข้อมูลระบบจำนวน 22 kV	14
2.8 มาตรฐานระยะปลอดภัยที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด	15
2.9 สายตัวนำควบ (bundling of conductor wire)	17
บทที่ 3 การดำเนินงาน/วิธีวิจัย	18
3.1 โครงสร้างของระบบสายส่ง 115 kV	18
3.1.1 ระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดียว	18
3.1.1.1 ระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดียวสำหรับทางตรงแบบ SS-TG-2	18
3.1.1.2 ระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดียวสำหรับทางตรงแบบ SS-TG-8	19
3.1.1.3 ระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดียว สายไฟฟ้าคู่ สำหรับทางตรงแบบ SD-TG-3	20
3.1.2 ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดียว กับ 22 วงจรเดียว	21
3.1.2.1 ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดียว กับ 22 วงจรเดียวสำหรับทางตรงแบบ SS-TG-3	21
3.1.2.2 ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดียว กับ 22 วงจรเดียวสายไฟฟ้าคู่สำหรับทางตรงแบบ SD-TG-9	22
3.1.3 ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรคู่ กับ 22 วงจรเดียว	23
3.1.3.1 ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรคู่ กับ 22 วงจรเดียวสำหรับทางตรงแบบ DS-TG-1	23
3.2 ตำแหน่งที่สนใน การหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำ	24
3.2.1 อาคารออยู่ในแนวระดับเดียวกับสายไฟฟ้า	24
3.2.2 วัตถุที่มีสภาพนำไฟฟ้า	24
3.3 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำระบบสายส่ง 115 kV	25
3.3.1 ขั้นตอนการคำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย	25
3.3.2 ขั้นตอนการคำนวณหาแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่มีผลต่อจุดที่สนใน	28
3.3.2.1 ผลของสนามไฟฟ้า	28
3.3.2.2 ผลของสนามแม่เหล็ก	29
3.4 การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดียวสำหรับทางตรงแบบ SS-TG-8	31
3.4.1 คำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย	31
3.4.2 ผลของสนามไฟฟ้า	33
3.4.3 ผลของสนามแม่เหล็ก	34
3.5 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดียวสายไฟฟ้าคู่ สำหรับทางตรงแบบ SD-TG-3	35
3.5.1 คำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย	35
3.5.2 ผลของสนามไฟฟ้า	37

3.5.3 คำนวณหาแรงดันสนามแม่เหล็ก	38
3.6 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดี่ยวกับ 22 วงจรเดี่ยวสำหรับทางตรงแบบ SS-TG-3	40
3.6.1 คำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย	40
3.6.2 ผลของสนามไฟฟ้า	42
3.6.3 คำนวณหาแรงดันสนามแม่เหล็ก	43
3.7 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดี่ยวกับ 22 วงจรเดี่ยวสายไฟฟ้าคู่สำหรับทางตรงแบบ SD-TG-9	45
3.7.1 คำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย	45
3.7.2 ผลของสนามไฟฟ้า	47
3.7.3 คำนวณหาแรงดันสนามแม่เหล็ก	48
3.8 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรคู่กับ 22 วงจรเดี่ยวสำหรับทางตรงแบบ DS-TG-1	50
3.8.1 คำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย	50
3.8.2 ผลของสนามไฟฟ้า	52
3.8.3 คำนวณหาแรงดันสนามแม่เหล็ก	53
3.9 การเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	55
3.9.1 พัฒนาในการคำนวณ	56
3.9.1.1 เสารูปแบบ SS-TG-2	56
3.9.1.2 เสารูปแบบ SS-TG-8	57
3.9.1.3 เสารูปแบบ SD-TG-3	58
3.9.1.4 เสารูปแบบ SS-TG-3	59
3.9.1.5 เสารูปแบบ SD-TG-9	60
3.9.1.6 เสารูปแบบ DS-TG-1	61
3.10 การเขียนโปรแกรม GUI เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน	64
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	66
4.1 แนะนำโปรแกรมคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ	66
4.1.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรม	66
4.1.2 หน้าต่างแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณ	68
4.1.2.1 แรงดันเหนี่ยวนำ	68
4.1.2.1 Heatmap	68
4.1.3 ผลลัพธ์จากโปรแกรม	69
4.1.3.1 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-2	69
4.1.3.2 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-8	69

4.1.3.3 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SD-TG-3	70
4.1.3.4 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-3	70
4.1.3.5 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SD-TG-9	71
4.1.3.6 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ DS-TG-1	71
4.2 การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยววนได้โดยใช้เกณฑ์ต่างๆเพื่อหาพื้นที่อันตราย	72
4.2.1 พื้นที่อันตรายโดยใช้กราฟแสดงที่ให้ผลผ่านร่างกายมนุษย์	72
4.2.1.1 การคำนวณกระแสกรณีที่มีมนุษย์ผิวเปลี่ยกยืนเท้าเปล่าบนพื้นเปียก	74
4.2.1.2 การคำนวณกระแสกรณีที่มีมนุษย์ผิวแห้งยืนเท้าเปล่าบนพื้นแห้ง	75
4.2.2 พื้นที่อันตรายโดยใช้แรงดันเหนี่ยววนที่ระยะปลอดภัยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	78
4.3 พื้นที่อันตรายของเสาไฟฟ้าแต่ละรูปแบบ	81
4.3.1 วิเคราะห์เสาส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียว	82
4.3.2 วิเคราะห์เสาส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียว และ ระบบ 22 kV วงจรเดียว	82
4.3.3 วิเคราะห์เสาส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียวที่มีระบบ 22 kV และไม่มีระบบ 22 kV	82
4.3.4 วิเคราะห์เสาส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียวและ 115 kV วงจรคู่ที่มีสายส่ง 22 kV ในระบบ	82
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	83
5.1 สรุปผลการวิจัย	83
5.2 ข้อเสนอแนะ	84
บรรณานุกรม	85
ภาคผนวก	87
ประวัติผู้เขียน	94

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตาราง 2.1 ข้อมูลของลูกถ้วยชนิดต่างๆ	14
ตาราง 4.1 จีดจำกัดของกระแสที่ทำให้มนุษย์เกิดอันตราย	72
ตาราง 4.2 ค่าความต้านทานร่างกายมนุษย์	73
ตาราง 4.3 ค่าความต้านทานจำเพาะของเดิน	74
ตาราง 4.4 พื้นที่อันตรายของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV	81

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
รูป 2.1 สนามไฟฟ้ารอบๆ ประจุตัวนำ 2 ตัว และ สนามไฟฟ้าเมื่อเพิ่มตัวนำเป็น 3 ตัว	4
รูป 2.2 ศักย์ไฟฟ้าของตัวนำในทฤษฎี Image Charge	5
รูป 2.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำไฟฟ้ากับประจุ ความสูงเหนือพื้นดิน และรัศมีของตัวนำ	6
รูป 2.4 แรงดัน ณ ตำแหน่ง P บนดิน เมื่อใกล้กับตัวนำที่มีการจ่ายพลังงาน(Energized Conductor)	7
รูป 2.5 แรงดันเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่ง P ที่เป็นผลจากตัวนำที่มีพลังงานหลายตัว	8
รูป 2.6 สนามแม่เหล็กจากความสัมพันธ์ของจุดอ้างอิง P กับจุดที่มีตัวนำไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าหลายตัว	10
รูป 2.7 การจัดวางสายโครงสร้างระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่มีทั้งสายส่งระบบ 115 kV และระบบจำหน่าย 22 kV	12
รูป 2.8 ลูกถ้วยแขวนเซรามิก มาตรฐาน มอก. 354 ชนิด 52-3	13
รูป 2.9 ประเภทของลูกถ้วยระบบจำหน่าย 22 kV	13
รูป 2.10 ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในเรื่องระยะต่ำสุดตามแนวสายไฟฟ้ากับสิ่งก่อสร้าง	15
รูป 2.11 ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในเรื่องระยะต่ำสุดตามแนวสายไฟฟ้ากับสิ่งก่อสร้าง	16
รูป 3.1 เสารูปแบบ SS-TG-2	18
รูป 3.2 เสารูปแบบ SS-TG-2	18
รูป 3.3 เสารูปแบบ SS-TG-8	19
รูป 3.4 เสารูปแบบ SS-TG-8	19
รูป 3.5 เสารูปแบบ SD-TG-3	20
รูป 3.6 เสารูปแบบ SD-TG-3	20
รูป 3.7 เสารูปแบบ SS-TG-3	21
รูป 3.8 เสารูปแบบ SS-TG-3	21
รูป 3.9 คอนเดลล์กรุปร่างน้ำขนาด 100x50x5 mm ยาว 2.5 m	21
รูป 3.10 เสารูปแบบ SD-TG-9	22
รูป 3.11 เสารูปแบบ SD-TG-9	22

รูป 3.12 เสารูปแบบ DS-TG-1	23
รูป 3.13 เสารูปแบบ DS-TG-1	23
รูป 3.14 กำหนดจุดบนตัวนำของเสา SS-TG-2	25
รูป 3.15 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเสา SS-TG-2	25
รูป 3.16 กำหนดจุด P ของเสา SS-TG-2	28
รูป 3.17 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเสา SS-TG-2	29
รูป 3.18 กำหนดจุดบนตัวนำของเสา SS-TG-8	31
รูป 3.19 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเสา SS-TG-8	31
รูป 3.20 กำหนดจุด P ของเสา SS-TG-8	33
รูป 3.21 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเสา SS-TG-8	34
รูป 3.22 กำหนดจุดบนตัวนำของเสา SD-TG-3	35
รูป 3.23 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเสา SD-TG-3	35
รูป 3.24 กำหนดจุด P ของเสา SD-TG-3	37
รูป 3.25 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเสา SD-TG-3	38
รูป 3.26 กำหนดจุดบนตัวนำของเสา SS-TG-3	40
รูป 3.27 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเสา SS-TG-3	40
รูป 3.28 กำหนดจุด P ของเสา SS-TG-3	42
รูป 3.29 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเสา SS-TG-2	43
รูป 3.30 กำหนดจุดบนตัวนำของเสา SD-TG-9	45

รูป 3.31 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเสา SD-TG-9	45
รูป 3.32 กำหนดจุด P ของเสา SD-TG-9	47
รูป 3.33 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเสา SD-TG-9	48
รูป 3.34 กำหนดจุดบนตัวนำของเสา DS-TG-1	50
รูป 3.35 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเสา DS-TG-1	50
รูป 3.36 กำหนดจุด P ของเสา DS-TG-1	52
รูป 3.37 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเสา DS-TG-1	53
รูป 3.38 แสดงการใช้คำสั่ง Import Libraly	55
รูป 3.39 แสดงการใช้คำสั่งในการเปลี่ยนจาก polar form เป็น cartesian form	56
รูป 3.40 แสดงชุดข้อมูลคำสั่งในการเก็บค่าที่ได้จากการคำนวณของเสารูปแบบ SS-TG-8	57
รูป 3.41 แสดงชุดข้อมูลคำสั่งในการเก็บค่าที่ได้จากการคำนวณของเสารูปแบบ SD-TG-3	58
รูป 3.42 แสดงชุดข้อมูลคำสั่งในการเก็บค่าที่ได้จากการคำนวณของเสารูปแบบ SS-TG-3	59
รูป 3.43 แสดงชุดข้อมูลคำสั่งในการเก็บค่าที่ได้จากการคำนวณของเสารูปแบบ SD-TG-9	60
รูป 3.44 แสดงชุดข้อมูลคำสั่งในการเก็บค่าที่ได้จากการคำนวณของเสารูปแบบ DS-TG-1	61
รูป 3.45 แสดงคำสั่งในการสร้างกราฟแร่งตันเหนี่ยวแน่นในจุดที่สนใจ	62
รูป 3.46 แสดงคำสั่งที่ได้จากการคำนวณให้แสดงในรูปแบบของ Heatmap	63
รูป 3.47 แสดงโปรแกรม Qt Designer (Pyqt6 Tools) ที่ใช้ออกแบบ GUI	64
รูป 3.48 แสดงโค้ดที่ใช้ในการ Load UI ที่สร้างขึ้น และการเขียนฟังก์ชันของปุ่ม Calculate	65

รูป 3.49 แสดงโปรแกรมที่ผ่านการใช้ library Pyinstaller	65
รูป 4.1 แสดงหน้าต่างหลักของโปรแกรม	66
รูป 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากเสาไฟฟ้าที่ความสูงที่กำหนด	68
รูป 4.3 แรงดันเหนี่ยวนำ Heatmap	68
รูป 4.4 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-2	69
รูป 4.5 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-8	69
รูป 4.6 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SD-TG-3	70
รูป 4.7 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-3	70
รูป 4.8 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SD-TG-9	71
รูป 4.9 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ DS-TG-1	71
รูป 4.10 การสัมผัสวัตถุตัวนำ	73
รูป 4.11 พื้นที่อันตรายของเสาแบบ SS-TG-2 ในกรณีมีนูนอยู่ผิวเปลี่ยนเป็นพื้นเปียก	74
รูป 4.12 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SS-TG-2 กรณีที่มีนูนอยู่ผิวแห้งยืนเท้าเปล่าบนพื้นแห้ง	75
รูป 4.13 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SS-TG-8 กรณีที่มีนูนอยู่ผิวแห้งยืนเท้าเปล่าบนพื้นแห้ง	76
รูป 4.14 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SD-TG-3 กรณีที่มีนูนอยู่ผิวแห้งยืนเท้าเปล่าบนพื้นแห้ง	76
รูป 4.15 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SS-TG-3 กรณีที่มีนูนอยู่ผิวแห้งยืนเท้าเปล่าบนพื้นแห้ง	77
รูป 4.16 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SD-TG-9 กรณีที่มีนูนอยู่ผิวแห้งยืนเท้าเปล่าบนพื้นแห้ง	77
รูป 4.17 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ DS-TG-1 กรณีที่มีนูนอยู่ผิวแห้งยืนเท้าเปล่าบนพื้นแห้ง	78
รูป 4.18 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SS-TG-2 กรณีระดับแรงดันเหนี่ยวน้ำมากกว่า 30 kV	78
รูป 4.19 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SS-TG-8 กรณีระดับแรงดันเหนี่ยวน้ำมากกว่า 30 kV	79
รูป 4.20 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SD-TG-3 กรณีระดับแรงดันเหนี่ยวน้ำมากกว่า 30 kV	79
รูป 4.21 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SS-TG-3 กรณีระดับแรงดันเหนี่ยวน้ำมากกว่า 30 kV	80
รูป 4.22 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SD-TG-9 กรณีระดับแรงดันเหนี่ยวน้ำมากกว่า 30 kV	80
รูป 4.23 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ DS-TG-1 กรณีระดับแรงดันเหนี่ยวน้ำมากกว่า 30 kV	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของมนุษย์และเศรษฐกิจ โดยประเทศไทยจึงมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณการใช้ไฟฟ้าเฉลี่ยปีละ 1,000 เมกะวัตต์ จากสถิติในปี 2563 ที่ผ่านมาประเทศไทยผลิตพลังงานไฟฟ้ารวม 46,480.37 เมกะวัตต์ ซึ่งเพิ่มขึ้นจากปี 2562 ที่ผลิตพลังงานไฟฟ้า 45,298.25 เมกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ 2.6 [1] เพื่อตอบสนองความต้องการการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคแห่งประเทศไทยจึงดำเนินการเสริมระบบสายส่งและสายจำหน่ายไฟฟ้าให้มีความพร้อมสำหรับรองรับการขยายตัวของการใช้ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ [1] และเพื่อให้สามารถส่งไฟฟ้าไปยังผู้ใช้ที่อยู่ห่างจากจุดจำหน่ายเป็นระยะทางไกล จำเป็นต้องเพิ่มแรงดันในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในตัวสายส่งไฟฟ้า [2] อีกทั้งการเจริญเติบโตด้านเศรษฐกิจ ทำให้มีการก่อสร้างอาคารและสิ่งปลูกสร้างเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้มีสิ่งปลูกสร้างในบางบริเวณ เช่น ชุมชน เขตเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม มีแนวโน้มที่จะเข้าใกล้แนวเขตของระบบสายส่งไฟฟ้า หรือรุกล้ำเข้าไปในแนวสายไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดอันตรายต่อคนและสิ่งมีชีวิตในบริเวณใกล้เคียง เนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกมາตลอดเวลา [3]

การอาศัยและทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กค่าสูงเป็นเวลานาน ส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางร่างกาย เช่น โรคมะเร็งเม็ดเลือดขาว โรคมะเร็งต่อมน้ำเหลือง และโรคมะเร็งเนื้อเยื่ออ่อน เป็นต้น [4] นอกเหนือจากนี้ สนามแม่เหล็กไฟฟ้ายังทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยววนា (Induced voltage) ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อคนและสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในแนวสายส่งและบริเวณใกล้เคียงได้

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยววนา (Induced voltage) จากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นบนโครงสร้างอาคาร วัสดุที่มีลักษณะเป็นตัวนำไฟฟ้าทั้งที่มีการต่อลงดินและไม่มีการต่อลงดิน อันตรายที่เกิดขึ้นจากแรงดันเหนี่ยววนาแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ เกิดจากการสัมผัสจุดที่แรงดันสูง เกิดจากการสัมผัสระหว่างจุดที่มีศักดิ์แตกต่างกัน และเกิดจากการอยู่ในระยะที่ไม่ปลอดภัยทำให้เกิดการถ่ายจากจุดที่มีแรงดันสูง โดยระดับความรุนแรงมีความสัมพันธ์กับขนาดแรงดัน ขนาดกระแสง และระยะเวลาที่ถูกกระแสงไฟฟ้า [5] จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงอันตรายที่เกิดจากแรงดันเหนี่ยววนา ควรอยู่นอกแนวสายส่งไฟฟ้า หรืออีกวิธีคือการหลีกห่างจากบริเวณที่มีแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยววนาสูง โดยคำนึงถึงระยะห่างที่ปลอดภัย ซึ่งได้จากการตรวจวัดภาคสนาม จำเป็นต้องติดตั้งสายดินเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิง อีกทั้งยังต้องทำการต่อสายดินกับหม้อแปลงแรงดัน ต่อสายระหว่างหม้อแปลงกับตัวนำ ณ ตำแหน่งต้องการตรวจวัด [5] ซึ่งมีความยุ่งยากในการจัดหาและติดตั้งอุปกรณ์โดยวิศวกรหรือผู้ทดสอบที่มีความเชี่ยวชาญ

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้จัดทำจึงได้จัดทำโครงการวิเคราะห์ค่าแรงดันเหนี่ยวนำจากสายส่งกำลังไฟฟ้าของไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยใช้วิธีการคำนวณ และทำการเปรียบเทียบแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากการจัดวางสายตัวนำบนเสาไฟฟ้าตามรูปแบบต่างๆที่ใช้ในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ผลการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้สามารถนำไปใช้ในการประเมินระดับความอันตรายก่อนการตรวจจริง ทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำงานลงได้ อีกทั้งยังใช้เป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาแรงดันเหนี่ยวนำให้กับผู้ที่สนใจในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์และประเมินระดับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

1.3.1 ศึกษาและคำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากระบบสายส่งขนาด 115KV ที่มีการจัดวางสายตัวนำในรูปแบบต่างๆของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.3.1.1 ระบบสายส่ง 115 KV วงจรเดียว

1.3.1.2 ระบบสายส่งแบบผสม 115 KV วงจรเดียว กับ 22 วงจรเดียว

1.3.1.3 ระบบสายส่งแบบผสม 115 KV วงจรคู่ กับ 22 วงจรเดียว

1.3.2 เปรียบเทียบค่าแรงดันเหนี่ยวน้ำและระยะปลดภัยตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1.4.1.1 ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

1.4.1.2 ศึกษาเกี่ยวกับระยะปลดภัยและการจัดวางโครงสร้างของระบบส่งจ่ายไฟฟ้า

1.4.2 คำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

1.4.2.1 คำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สภาวะการจ่ายไฟลดปกติ

1.4.3 นำผลการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้มาทำการเปรียบเทียบระหว่างรูปแบบการจัดวางตัวนำต่างๆ

1.4.4 นำผลการเปรียบเทียบที่ได้มาประเมินตามมาตรฐานของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.4.5 ทำการสรุปการคำนวณแรงดันเหนี่ยวน้ำทั้งหมด

1.4.6 จัดทำรูปเล่ม

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ทราบเกี่ยวกับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากระบบสายส่ง 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

1.5.2 สามารถนำความรู้ไปใช้ในการวางแผนการตรวจวัดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบเบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้

1.6 ตารางการดำเนินงาน

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้อง

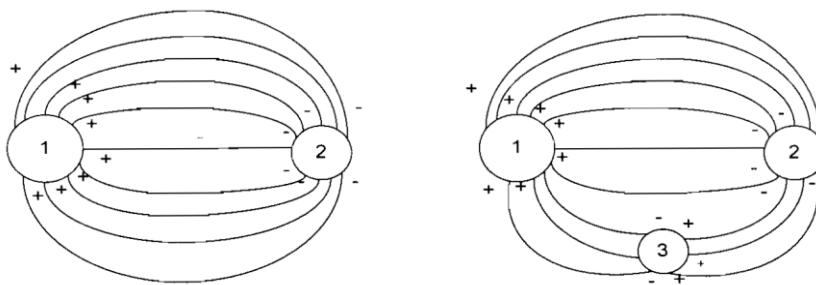
ในที่นี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและงานที่เกี่ยวข้องต่างๆเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาแรงคดีอ่อนเหนี่ยวนำไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้

2.1 แรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induced Voltage)

แรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Induced Voltage) หมายถึง แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากระบบสายส่งกำลังไฟฟ้าโดยแบ่งการเหนี่ยวนำของแรงดันที่เกิดขึ้นได้แก่การเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามไฟฟ้า (Electric Field Induction) และการเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field Induction) [6]

2.2 การเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้า (Electric Field Induction) หรือสนามไฟฟ้า (Electric Field)

สนามไฟฟ้าเป็นแรงกระทำที่เกิดขึ้นต่อประจุที่นำเข้ามาโดยบริเวณรอบประจุไฟฟ้าที่ไม่มีประจุไฟฟ้าที่นั่นจะมีสนามไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น เมื่อเกิดความต่างศักย์ระหว่างประจุ 2 ตัวที่วางอยู่ห่างกันระยะหนึ่งเมื่อนำวัตถุที่ 3 เข้ามาวางระหว่างประจุ 2 ตัวแรกจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในวัตถุที่ 3 นั้น



รูป 2.1 (ซ้าย) สนามไฟฟ้ารอบๆประจุตัวนำ 2 ตัว (ขวา) สนามไฟฟ้าเมื่อเพิ่มตัวนำเป็น 3 ตัว

จากรูป 2-1 (ซ้าย) จะเห็นว่ามีประจุไฟฟ้าตัวนำสองตัว ทำให้เกิดผลของสนามไฟฟ้ารอบๆตัวนำวิ่งจากข้าวบวกของตัวนำที่ 1 ไปยังประจุของตัวนำที่ 2 รูป 2.1 (ขวา) เมื่อมีประจุตัวนำที่ 3 จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าจากข้าวบวกประจุตัวนำที่ 1 ไปยังข้าวบวกประจุตัวนำที่ 3 และจากข้าวบวกประจุตัวนำที่ 3 ไปยังข้าวบวกประจุซึ่งจะเห็นว่าในประจุตัวนำที่ 3 เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่มีผลจากสนามไฟฟ้าเมื่อหรือเมื่อเกิดความต่างศักย์ระหว่างตัวนำจะมีผลของสนามไฟฟ้าเข้ามายังตัวนำ [6]

2.3 การเห็นี่ยวนำสำน้ำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic) หรือสำน้ำแม่เหล็ก (Magnetic Field)

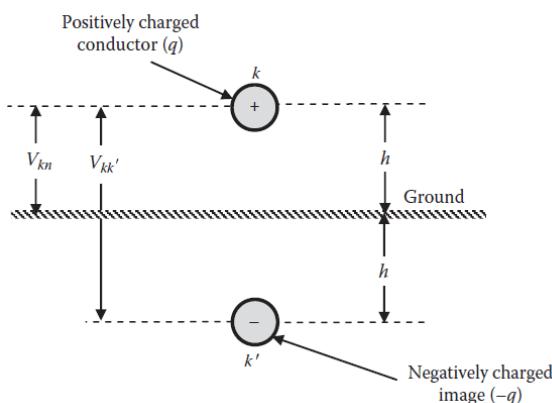
สำน้ำแม่เหล็ก (Magnetic Field) หมายถึง การที่ประจุเคลื่อนที่ทำให้เกิดสำน้ำแม่เหล็กขึ้นรอบประจุนั้น และสำน้ำแม่เหล็กนี้จะเกิดแรงกระทำต่อประจุอื่นๆ ที่เคลื่อนผ่านสำน้ำนี้จนเกิดสำน้ำแม่เหล็กรอบๆ โดยในที่นี้จะหมายถึงเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบๆ ตัวนำไฟฟ้าระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า (Electrical Power Transmission Line) โดยกฎพื้นฐานของการเห็นี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นจริงตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) คือ เมื่อสภาวะเส้นแรงแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงทำให้เกิดแรงดันเคลื่อนที่ (Electromotive force. emf) จะเห็นี่ยวนำรอบๆ ตามเส้นทางของตัวนำ จะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำบริเวณนั้น

สำหรับสายส่งแรงดันไฟฟ้าเห็นี่ยวนำเนื่องจากสำน้ำแม่เหล็กมักจะน้อยกว่าที่เกิดจากสำน้ำไฟฟ้า บางครั้งจึงมีการลดเว้นในกรณีสายส่งที่ทำงานภายใต้สภาวะปกติ อย่างไรก็ตาม ผลกระทบของสำน้ำแม่เหล็กไม่สามารถลดลงได้ในกรณีต่อไปนี้ [6]

- ตัวนำไฟฟ้าที่อยู่ภายใต้สภาวะชั่วครู่หรือความผิดปกติเป็นเพราะกระแสไฟกระชากระสูงพอที่จะสร้างแรงดันไฟฟ้าเห็นี่ยวนำจำนวนมากบนตัวนำที่ไม่มีไฟฟ้า
- การจ่ายที่กระแสสูง แรงดันจะต่ำ และลักษณะเสาที่ไม่ยาวมาก
- เมื่ออุปกรณ์ในอุตสาหกรรมมีกระแสสูง
- เมื่อสายส่งกำลังและสายที่ไม่ส่งกำลังไฟฟ้าอยู่ในลักษณะขนานกันบนเสาไฟฟ้าเป็นระยะทางไกล

2.4 ทฤษฎีการคำนวณค่าสำน้ำไฟฟ้าโดยวิธีเงาประจุ (Image charge method)

ทฤษฎีการคำนวณค่าสำน้ำไฟฟ้าโดยวิธีเงาประจุ (Image charge method) เป็นการกำหนดให้ประจุใดๆ บนพื้นดินมีประจุตรงข้ามที่สมดุลกับประจุที่พื้นดินและดินมีค่าสภาพยอมเท่ากับค่าสภาพยอมของอากาศอยู่ตระหง่านกันห่างจากระนาบเท่ากัน ดังภาพ 2-2 ที่มีแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวนำ k กับกราว์ด คือ V_{kn} และแรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวนำ k กับตัวนำ k' คือ $V_{kk'}$



รูป 2.2 ศักย์ไฟฟ้าของตัวนำในทฤษฎี Image Charge

แรงดันไฟฟ้า $V_{kk'}$ ที่เป็นผลมาจากการความเข้มของสนามไฟฟ้าของตัวนำ k และตัวนำ k' สามารถหาได้จาก

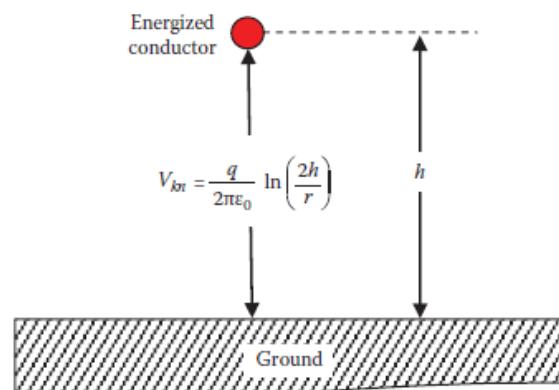
$$V_{kk'} = \frac{q}{\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad (2.1)$$

เนื่องจากกำหนดให้สภาพย้อมของดินเท่ากับอากาศ (air Permittivity) ดังนั้นแรงดันระหว่างตัวนำและผิวกราด

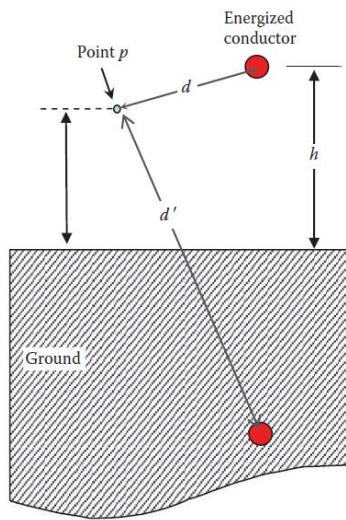
$$V_{kn} = \frac{V_{kk'}}{2} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad (2.2)$$

สามารถคำนวณหาแรงดัน ณ จุด P ในขั้นตอนแรกต้องคำนวณผลของประจุบางที่มีผลต่อวัตถุซึ่งไม่มีพลังงาน ณ จุด P

$$V_{p+} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{h}{d}\right) \quad (2.3)$$



รูป 2.3 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าที่ตัวนำไฟฟ้ากับประจุ ความสูงเหนือพื้นดิน และรัศมีของตัวนำ



รูป 2.4 แรงดัน ณ ตำแหน่ง P บนดิน เมื่อใกล้กับตัวนำที่มีการจ่ายพลังงาน(Energized Conductor)

สามารถคำนวณหา แรงดัน ณ จุด P ได้โดยใช้ทฤษฎี Image Charge

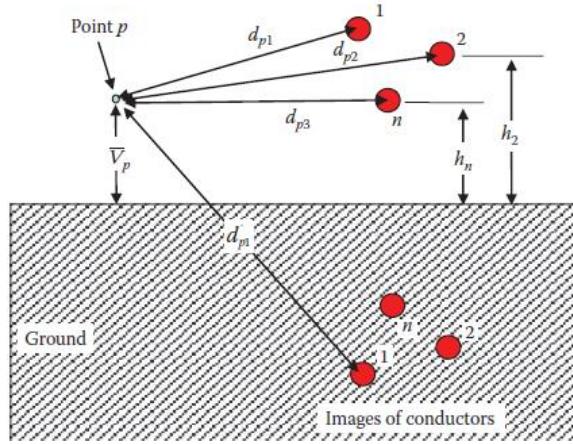
$$V_{p+} = \frac{-q}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{h}{d'}\right) = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d'}{h}\right) \quad (2.5)$$

$$V_{pn} = V_{p+} + V_{p-} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d'}{d}\right) \quad (2.6)$$

ให้ระวังไว้เสมอว่า q ในสมการนี้คือประจุ ในตัวนำที่มีการจ่ายพลังงาน , สามารถใช้สมการคำนวณจุด P ในพื้นที่รอบๆตัวนำที่มีพลังงาน โดยในรูปนี้ $d' = 2h$, โดย d เป็นรัศมีของตัวนำ r . [7]

2.4.1 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากตัวนำที่มีการจ่ายพลังงานหลายเฟส

บนระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามักจะมีมากกว่าหนึ่งวงจร ในหนึ่งวงจรนั้นจะมีสายส่ง 3 เฟส ผลของตัวนำเหล่านี้ต่อวัตถุซึ่งไม่มีแหล่งพลังงานต่ออยู่เป็นผลรวมของสนามไฟฟ้าจากตัวนำที่มีไฟฟ้าทั้งหมด เนื่องจากเป็นระบบ 3 เฟส จึงมีการเลื่อนเฟสเกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องใช้การคำนวณโดยใช้จำนวนจินตภาพ (Phasor analysis) มาช่วยในการคำนวณผลรวมจากสนามไฟฟ้าทั้งหมด จากรูป 2.5 สามารถคำนวณหาค่าแรงดัน ณ ตำแหน่ง P เนื่องจากสนามไฟฟ้า [7]



รูป 2.5 แรงดันเหนี่ยวนำ ณ ตำแหน่ง P ที่เป็นผลจากตัวนำที่มีพลังงานหลายตัว

ใช้ phasor analysis ในการคำนวณผลรวมของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อวัตถุ ณ จุด P

$$\begin{aligned} \bar{V}_{p1} &= \frac{\bar{q}_1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}}\right) \\ \bar{V}_{p2} &= \frac{\bar{q}_2}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}}\right) \\ &\vdots \\ \bar{V}_{pn} &= \frac{\bar{q}_n}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d'_{pn}}{d_{pn}}\right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

โดย V_{pi} คือ แรงดัน ณ จุด P ที่เป็นผลจากประจุของตัวนำ i ที่มีพลังงาน

q_i คือ ประจุของตัวนำ i ที่มีพลังงานต่อหน่วยความยาว

d_{pi} คือ ระยะห่างระหว่างจุด P กับตัวนำ i

d'_{pi} คือ ระยะห่างระหว่างจุด P กับ ภาพจำลองของตัวนำ i

คำนวณแรงดันทั้งหมด ณ จุด P จากผลรวมแรงดันทั้งหมด

$$\begin{aligned} \bar{V}_p &= \bar{V}_{p1} + \bar{V}_{p2} + \dots + \bar{V}_{pn} \\ \bar{V}_p &= \frac{\bar{q}_1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d'_{p1}}{d_{p1}}\right) + \frac{\bar{q}_2}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d'_{p2}}{d_{p2}}\right) + \dots + \frac{\bar{q}_n}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d'_{pn}}{d_{pn}}\right) \\ \bar{V}_p &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \ln\left(\frac{d'_{pi}}{d_{pi}}\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

2.4.2 การคำนวณหาค่าประจุต่อหน่วย

จากการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำในหัวข้อ 2.4.1 เมื่อย้ายตำแหน่ง P ไปยังผิวของตัวนำ และสามารถหาแรงดันไฟฟ้าของตัวนำได้ดังนี้ [7]

$$\bar{V} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\bar{q}_1 \ln\left(\frac{d'_{i1}}{d_{i1}}\right) + \bar{q}_2 \ln\left(\frac{d'_{i2}}{d_{i2}}\right) + \dots + \bar{q}_i \ln\left(\frac{d'_{ii}}{d_{ii}}\right) + \dots + \bar{q}_n \ln\left(\frac{d'_{in}}{d_{in}}\right) \right] \quad (2.8)$$

โดย d_{ii} คือรัศมีของตัวนำ |

$$\begin{aligned} d_{ii} &= r_i \\ d_{ii} &= 2h_i \\ d_{ij} &= d_{ji} \\ d'_{ij} &= d'_{ji} \end{aligned} \quad (2.9)$$

โดย r คือรัศมีของตัวนำ | ในตัวนำแบบบรรทัด (Bundled Conductor) r จะมีค่าเท่ากับ GMR

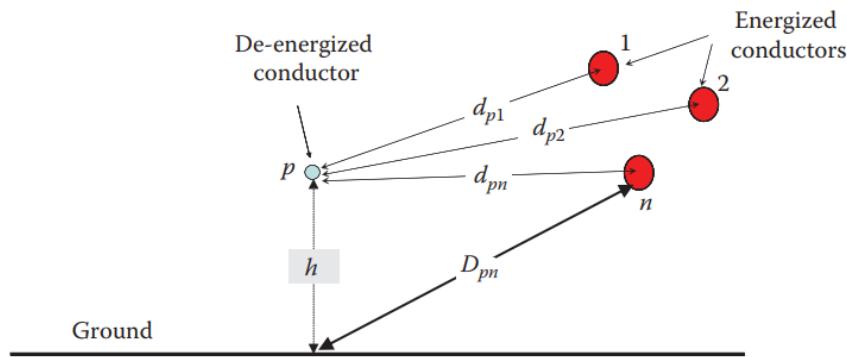
$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{2h_1}{r_1}\right) & \ln\left(\frac{d'_{12}}{d_{12}}\right) & \dots & \ln\left(\frac{d'_{1n}}{d_{1n}}\right) \\ \ln\left(\frac{d'_{21}}{d_{21}}\right) & \ln\left(\frac{2h_2}{r_2}\right) & \dots & \ln\left(\frac{d'_{2n}}{d_{2n}}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln\left(\frac{d'_{n1}}{d_{n1}}\right) & \ln\left(\frac{d'_{n2}}{d_{n2}}\right) & \dots & \ln\left(\frac{2h_n}{r_n}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{q}_1 \\ \bar{q}_2 \\ \vdots \\ \bar{q}_n \end{bmatrix} \quad (3.0)$$

สามารถหาประจุของตัวนำได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \bar{q}_1 \\ \bar{q}_2 \\ \vdots \\ \bar{q}_n \end{bmatrix} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{2h_1}{r_1}\right) & \ln\left(\frac{d'_{12}}{d_{12}}\right) & \dots & \ln\left(\frac{d'_{1n}}{d_{1n}}\right) \\ \ln\left(\frac{d'_{21}}{d_{21}}\right) & \ln\left(\frac{2h_2}{r_2}\right) & \dots & \ln\left(\frac{d'_{2n}}{d_{2n}}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln\left(\frac{d'_{n1}}{d_{n1}}\right) & \ln\left(\frac{d'_{n2}}{d_{n2}}\right) & \dots & \ln\left(\frac{2h_n}{r_n}\right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

2.5 ทฤษฎีการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กโดยวิธีซ้อนทับ (superposition theorem)

ทฤษฎีการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กโดยวิธีซ้อนทับ (superposition theorem) เป็นการคำนวณหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กโดยกำหนดจุดอ้างอิง P และหาระยะห่างระหว่างจุดอ้างอิงกับจุดของตัวนำไฟฟ้าหลายตัว [7]



รูป 2.6 สนามแม่เหล็กจากความสัมพันธ์ของจุดอ้างอิง P กับจุดที่มีตัวนำไฟฟ้าที่มีกำลังไฟฟ้าหลายตัว

2.5.1 แรงดันไฟเหนี่ยวนำเนื่องจากการกระแสไฟคงที่

สำหรับระบบสายส่งไฟฟ้าสามเฟสภายใต้สภาพแวดล้อมคงตัว กระแสของตัวนำที่มีพลังงานสามารถแทนด้วย [7]

$$i_a = I_{a\max} \sin(\omega t - \theta_a) = I_a \angle -\theta_a$$

$$i_b = I_{b\max} \sin(\omega t - \theta_b) = I_b \angle -\theta_b$$

$$i_c = I_{c\max} \sin(\omega t - \theta_c) = I_c \angle -\theta_c$$

$I_{a\max}$ คือกระแสสูงสุด (สูงสุด) ของเฟส a

θ_a คือมุมเฟสของเฟส a

อนุพันธ์ของกระแสเหล่านี้คือ

$$\frac{di_a}{dt} = \omega I_{a\max} \cos(\omega t - \theta_a)$$

$$\frac{di_b}{dt} = \omega I_{b\max} \cos(\omega t - \theta_b)$$

$$\frac{di_c}{dt} = \omega I_{c\max} \cos(\omega t - \theta_c)$$

แปลงสมการให้เป็นหน่วยrms

$$\frac{di_a}{dt} \Rightarrow \omega I_a \angle(90^\circ - \theta_a)$$

$$\frac{di_b}{dt} \Rightarrow \omega I_b \angle(90^\circ - \theta_b)$$

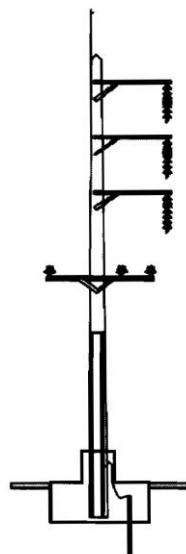
$$\frac{di_c}{dt} \Rightarrow \omega I_c \angle(90^\circ - \theta_c)$$

สมการแรงดันเนื้ิยวนำที่เกิดจากสนาณแม่เหล็กจะได้ดังนี้

$$E_p = 2 \times 10^{-7} \omega \left[\ln\left(\frac{D_{pa}}{d_{pa}}\right) \quad \ln\left(\frac{D_{pb}}{d_{pb}}\right) \quad \ln\left(\frac{D_{pc}}{d_{pc}}\right) \right] \begin{bmatrix} I_a \angle(90^\circ - \theta_a) \\ I_b \angle(90^\circ - \theta_b) \\ I_c \angle(90^\circ - \theta_c) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

2.6 องค์ประกอบของระบบสายส่ง 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้า โครงสร้างที่จำเป็นต้องใช้ในการพิจารณาได้แก่ ระบบสายส่ง 115 kV โดยจะแบ่งลักษณะตามการจัดวางสายตัวนำได้แก่ ระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว, ระบบสายส่ง 115 kV วงจรคู่, ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดี่ยว กับ 22 วงจรเดี่ยวและระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรคู่ กับ 22 วงจรเดี่ยว โดยระบบสายส่ง 115 kV จะมีการจัดวางสายตัวนำขนาด All Aluminium ขนาด 400 mm^2 และระบบจำหน่าย 22 kV จะใช้สายตัวนำขนาด All Aluminium ขนาด 185 mm^2 โดยสายตัวนำของระบบจำหน่ายจะวางแนวราบใต้แนวสายส่ง 115 kV ดังรูป 2-7 [6]



รูป 2.7 การจัดวางสายโครงสร้างระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่มีทั้งสายส่งระบบ 115 kV และระบบจำหน่าย 22 kV

2.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

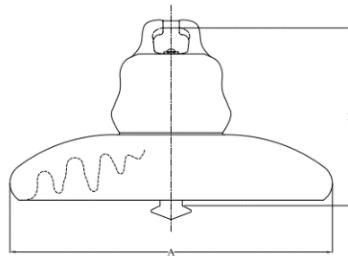
พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณได้แก่

2.7.1 ชนิดลูกถ้วยที่ใช้ในระบบสายส่ง 115 kV

หลักเกณฑ์หลักเกณฑ์ในการพิจารณาลูกถ้วยในการคำนวณแรงคลื่อนเหนี่ยวนำสำหรับระบบสายส่ง 115 kV มีด้วยกัน 2 ชนิดได้แก่

- 2.7.1.1 ลูกถ้วยแขวนเซรามิก (Suspension Type Porcelain Insulator) มาตรฐาน
มอก. 354 ชนิด 52-3

ความสูงของลูกถ้วยเซรามิก คือ 146 mm เนื่องจากโครงสร้างของเสาไฟฟ้าในระบบสายส่งแต่ละเฟสจะใช้ลูกถ้วยแขวนเซรามิกเรียงกัน 7 ลูก เพราะฉะนั้นความสูงทั้งหมดของลูกถ้วยที่ได้จะเท่ากับ 1022 mm หรือสูงประมาณ 1 m รูป

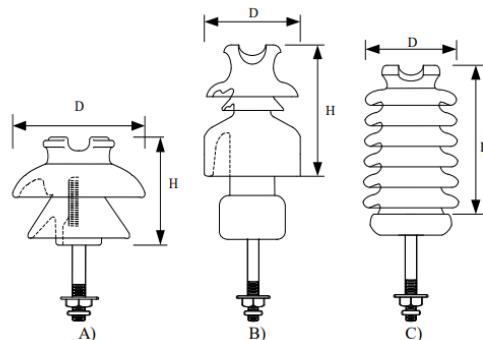


TIS 354 SUSPENSION-TYPE PORCELAIN INSULATOR	Type C Class 52-3	Type E Class 52-8
DIMENSIONS	A, maximum mm	273
	B mm	146 _{±3}

รูป 2.8 ลูกถ้วยแขวนเซรามิก มาตรฐาน มอก. 354 ชนิด 52-3

2.7.1.2 ลูกถ้วยก้านตรง(Pin-Type insulator) มาตรฐาน มอก.279 ชนิด 56-2

ความสูงของลูกถ้วยก้านตรงคือ 165 mm เนื่องจากโครงสร้างของเสาไฟฟ้าในระบบจำหน่ายแต่ละเฟสจะใช้ลูกถ้วยก้านตรง 1 ลูก ซึ่งรวมกับก้านลูกถ้วยจากรูป 2..9 จะมีความสูงเท่ากับ 432 mm หรือ 0.432 m



รูป 2.9 ประเภทของลูกถ้วยระบบจำหน่าย 22 kV

ตาราง 2.1 ข้อมูลของลูกถ่วงชนิดต่างๆ

ประเภท	ชนิดของลูกถ่วง	ความสูง (mm)	ความกว้าง (mm)	ความยาว (mm)
A	Pin Type(56-2)	165	229	432
B	Pin Post Type(56/57-2)	336	170	534
C	Line Post Type(57-2)	305	152	559

2.7.2 ข้อมูลระบบสายส่ง 115 kV

ข้อมูลที่ใช้คำนวณแรงดันเหนี่ยวนำได้แก่

- System voltage ($KV_{line-line,rms}$) 115 kV
- กำลังไฟฟ้าปรากฏ (Apparent Power) 320 MVA [9]
- สายตัวนำไฟฟ้า (Area of conductor) ขนาด 400 mm^2 เส้นผ่าศูนย์กลาง 25.65 mm

2.7.3 ข้อมูลระบบจำหน่าย 22 kV

ข้อมูลที่ใช้คำนวณแรงดันเหนี่ยวนำได้แก่

- System voltage ($KV_{line-line,rms}$) 22 kV
- สายตัวนำไฟฟ้า (Area of conductor) ขนาด 185 mm^2 เส้นผ่าศูนย์กลาง 15.98 mm

2.8 มาตรฐานระยะปลอดภัยที่การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคกำหนด

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้กำหนดระยะปลอดภัยระหว่างสิ่งปลูกสร้างต่างๆ กับแนวสายส่งไฟฟ้าดังด้วยรูปต่อไปนี้

ตารางที่ 1 ระยะห่างจากอุปกรณ์แนวระดับระหว่างไฟฟ้ากับโครงสร้าง									
ลักษณะผิวพื้นที่ไฟฟ้า NATURE OF SURFACE NEAR POWER LINES	ระยะห่างมาตรฐานของสายไฟฟ้า (เมตร) MINIMUM HORIZONTAL CLEARANCES OF POWER LINES (METERS)								
	5 kV	11-33 kV	69 kV	115 kV	230 kV	89 kV	115 kV		
1 ผนังด้านในปิดอย่างดี, ลูกฟูกและบานชานาน แบบ ไม่มีผู้เดินทาง ผ่านและไม่มีไฟฟ้า กับผนังและลูกฟูก โดยยุติธรรมทั้งหมด	0.30	0.15	1.50	0.60	0.30	0.15	1.80	2.30	3.00
1 CLOSE WALLS, GUARDED PEDESTRIAN BRIDGES AND SIGNS ATTACHED TO BUILDINGS									
2 ผนังด้านในปิดอย่างดี, ลูกฟูกและบานชานาน ที่มีคนเข้าใช้ เช่น, ลูกฟูกที่ต้องเข้ามาทุกวัน เช่นไฟฟ้า เครื่องจักร ฯลฯ และผู้คนที่ต้องเข้ามา และผู้คนที่ต้องเข้ามา	0.90	0.15	1.80	1.50	0.90	0.60	2.13	2.30	3.00
2 OPEN WALLS OR BALCONIES OR AREAS READILY ACCESSIBLE TO PEDESTRIANS, BRIDGES, POWER POSTS, STREET LIGHT POSTS, TRAFFIC LIGHT POSTS AND OTHER STRUCTURES									
กองบประมาณและไฟฟ้า เพื่อการก่อสร้างและก่อซ่อม	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค								
ผู้จัดการ ๗๔๘๖	ผู้จัดการ ๗๔๘๖								
ผู้จัดการ ๗๔๘๖	มาตรฐานระยะห่างที่ปลอดภัยในการก่อสร้างไฟฟ้า								
ผู้จัดการ ๗๔๘๖	STANDARD MINIMUM SAFE CLEARANCES FOR ELECTRICAL CONSTRUCTION								
ผู้จัดการ ๗๔๘๖	ผู้จัดการ ๗๔๘๖								

12/08/2545

รูป 2.10 ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในเรื่องระยะตัวสุดตามแนวสายไฟฟ้ากับสิ่งก่อสร้าง

ការប្រចាំខែត្រី
ASSEMBLY NO.

9 3 0 1

គម្រោងទี่ 2 ទិន្នន័យអាជីវកម្មរបស់ខ្លួនដែលត្រូវបានបង្កើតឡើង នូវភាព និងសេវាអគ្គភាព (ទ)

TABLE 2 MINIMUM VERTICAL CLEARANCES OF POWER LINES ABOVE GROUND, WATER AREAS BUILDINGS OR OTHER STRUCTURES (CONTINUED)

ផ្នែកដែលត្រូវបង្កើតឡើង NATURE OF SURFACE UNDERNEATH POWER LINES	ទិន្នន័យអាជីវកម្មរបស់ខ្លួនដែលត្រូវបានបង្កើតឡើង (ពាណិជ្ជ) MINIMUM VERTICAL CLEARANCES OF POWER LINES (METERS)								
	5 kV		11-33 kV			69 kV 115 kV 230 kV			
	គ្រប់ប្រជុំ មិនមែនគ្រប់ សាច់គ្រប់ MULTIPLEX CABLES	គ្រប់ប្រជុំ សាច់គ្រប់ INSULATED CONDUCTORS	គ្រប់ប្រជុំ សាច់គ្រប់ BARE CONDUCTORS	គ្រប់ប្រជុំ សាច់គ្រប់ ដែលមានសាច់ PARTIALLY INSULATED CONDUCTORS	គ្រប់ប្រជុំ សាច់គ្រប់ ក្រោមគ្រប់ SPACE AERIAL CABLES	គ្រប់ប្រជុំ សាច់គ្រប់ ដែលមានការ បិទក្រប់ក្រង់ TWISTED AERIAL CABLES	គ្រប់ប្រជុំ សាច់គ្រប់ BARE CONDUCTORS		
7 ហេដ្ឋិកអគ្គិភ័យធម្មុទិន្នន័យ តាម ពីរដីជាតិការ 7 OVER PEDESTRIAN BRIDGES WITHOUT ROOF	3.50	2.40	4.60	4.60	3.50	2.40	4.90	5.10	5.80
8 ហេដ្ឋិកអគ្គិភ័យធម្មុទិន្នន័យ គេងបិទបានឈរ 8 OVER PEDESTRIAN BRIDGES WITH ROOF	4.10	0.15	3.00	3.00	4.10	0.15	3.40	3.60	4.30
9 ហេដ្ឋិក និងគោលការ គេងបិទ គិត គិត សំគាល់ប្រុងការ ផ្ទៃតិច	4.10	0.15	2.40	2.40	4.10	0.15	2.60	2.90	3.60
9 OVER OR UNDER SIGNS, TELEVISION-RADIO POSTS, OR INFAMMABLE SUBSTANCE TANKS			រាយការណ៍ 9) SEE NOTE				រាយការណ៍ 9) SEE NOTE		
10 ខាងការងារ និងអគ្គិភ័យ (ហេដ្ឋិកដែលត្រូវបានបង្កើត)	7.00	7.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.50	10.50	11.50
10 CROSSING ABOVE RAIL- ROAD OR ELECTRIC RAILROAD TRACKS (ABOVE SURFACE OF RAILS)									
11 ខាងការងារ និងអគ្គិភ័យ (ហេដ្ឋិកដែលត្រូវបានបង្កើត) កំណត់ការរាយការក្នុងរាយការណ៍ និងការងារ (h1) បិន្ទាកា 6.1 ម៉ែត្រ	h1 + 0.90	h1 + 0.90	h1 + 2.90	h1 + 2.90	h1 + 2.90	h1 + 2.90	h1 + 3.40	h1 + 4.40	h1 + 5.40
11 CROSSING ABOVE RAIL- ROAD OR ELECTRIC RAILROAD TRACKS WHICH LOAD GOODS MORE THAN 6.1 METRES IN HEIGHT (h1)									

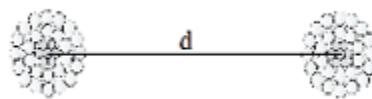
ការងារគ្នានេះបានបង្កើតឡើង នៅក្នុងក្រុងការងារ និងអគ្គិភ័យ	ការ ឲព័េរ សំរាប់ភាពិវឌ្ឍន៍	ឯកសារលេខ 502-015/17068 ព្រមទាំងរបៀប
ឯកសារលេខ 502-015/17068 ព្រមទាំងរបៀប	ឯកសារលេខ 5 ឯកសារ 2545 ពេលវេលានៅក្នុងការងារ និងអគ្គិភ័យ	ឯកសារលេខ 5 ឯកសារ 2545 ពេលវេលានៅក្នុងការងារ និងអគ្គិភ័យ
ឯកសារលេខ 5 ឯកសារ 2545 ពេលវេលានៅក្នុងការងារ និងអគ្គិភ័យ	ឯកសារលេខ 5 ឯកសារ 2545 ពេលវេលានៅក្នុងការងារ និងអគ្គិភ័យ	ឯកសារលេខ 5 ឯកសារ 2545 ពេលវេលានៅក្នុងការងារ និងអគ្គិភ័យ
ឯកសារលេខ 5 ឯកសារ 2545 ពេលវេលានៅក្នុងការងារ និងអគ្គិភ័យ	STANDARD MINIMUM SAFE CLEARANCES FOR ELECTRICAL CONSTRUCTION	ឯកសារលេខ 5 ឯកសារ 2545 ពេលវេលានៅក្នុងការងារ និងអគ្គិភ័យ

1208.2545

รูป 2.11 ข้อกำหนดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคในเรื่องระบบต่ำสุดตามแนวสายไฟฟ้ากับสิ่งก่อสร้าง

2.9 สายตัวนำควบ (bundling of conductor wire)

ในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงบางชนิดจะมีการวางสายตัวนำ 2 สายหรือมากกว่าเป็นสายควบโดยมีการติดตั้งตัวยึด (Spacer) ระหว่างสายตัวนำเข้าด้วยกันเป็นหนึ่งเฟล ซึ่งสายตัวนำแต่ละเส้นมีค่าต่างๆ ที่เท่ากันหรือสมมาตรกัน (Symmetrical) และมีบางกรณีที่สายตัวนำควบไม่สมมาตรกัน (Unsymmetrical) จึงทำให้มีความแตกต่างกันในด้านของการคำนวณ โดยโครงงานนี้เป็นการศึกษาระบบสายส่ง 115 kV ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยมีการจำแนกลักษณะสายตัวนำที่แตกต่างกันซึ่งโครงสร้างเสาไฟฟ้าบางชนิดมีลักษณะสายตัวนำควบเช่น ระบบสายส่ง 115 kV วงจรคู่ เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการคำนวณหาค่าของสายตัวนำควบหรือที่เรียกว่าค่า GMR (geometric mean radius) [6]



รูป 2.12 สายตัวนำควบ

สายตัวนำควบ หรือ GMR มีสูตรดังนี้

$$GMR = \sqrt{r \times d} \quad (3.6)$$

โดย r = รัศมีของตัวนำไฟฟ้า (m)

d = ระยะห่างระหว่างสายตัวนำ (m)

บทที่ 3

การดำเนินงาน/วิธีวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการคำนวนหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของระบบสายส่ง 115 kV และ ระบบสายส่งแบบผสม ซึ่งจำเป็นต้องรู้ลักษณะโครงสร้างจำเพาะของเสาแต่ละชนิดไฟฟ้าและเข้าใจถึงวิธีการคำนวนหาค่าประจุไฟฟ้าต่อหน่วยซึ่งนำไปสู่การคำนวนหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำได้

3.1 โครงสร้างของระบบสายส่ง 115 kV

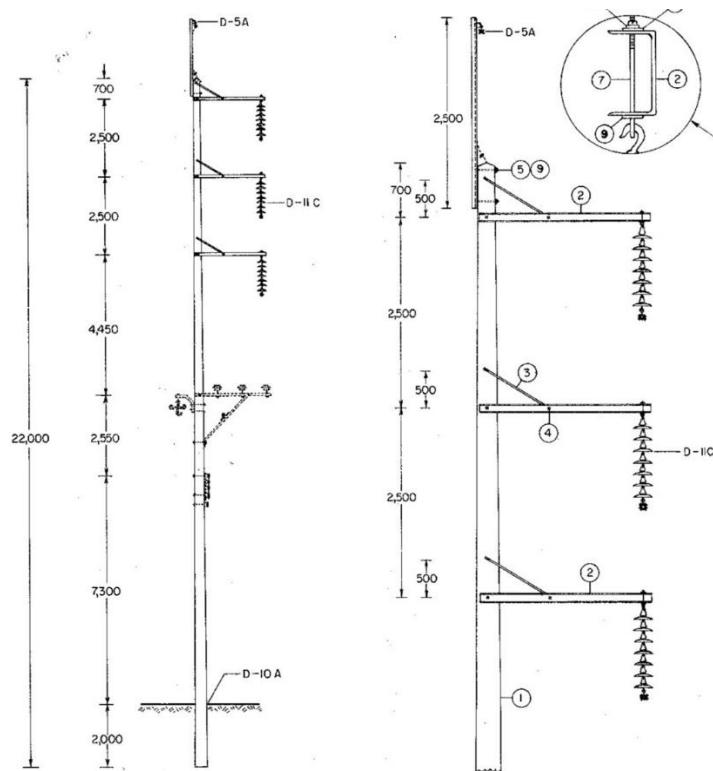
โครงสร้างของระบบสายส่ง 115 kV แบ่งตามลักษณะการวางของสายด้านนำได้ทั้งหมด 3 ประเภท [10] ดังนี้

3.1.1 ระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดียว

3.1.1.1 ระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดียวสำหรับทางตรงแบบ SS-TG-2

องค์ประกอบของเสาชนิดนี้ที่ต้องใช้ในการคำนวนแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำได้แก่

- เสาคอนกรีตยาว 22 m
- คอกนสายแบบเหล็กขนาด 100x50x3.2 mm ยาว 4.20 m



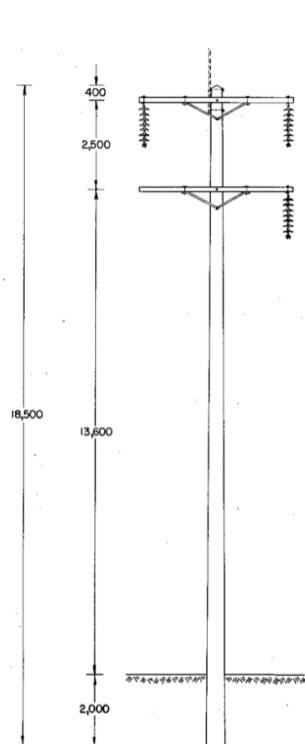
รูป 3.1 เสารูปแบบ SS-TG-2

รูป 3.2 เสารูปแบบ SS-TG-2

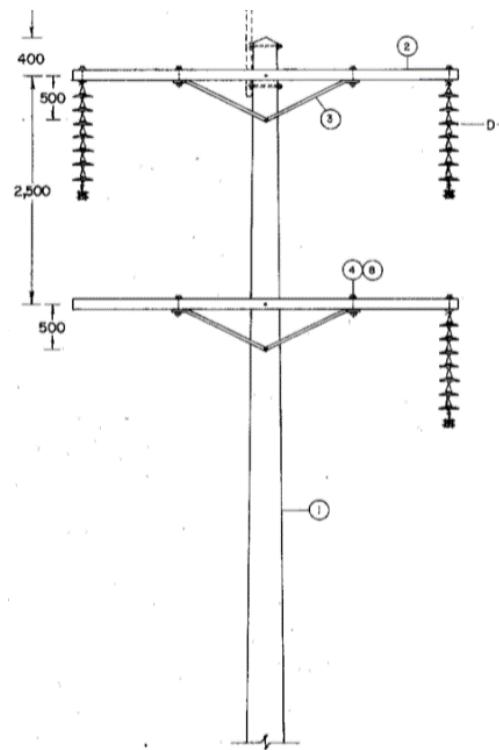
3.1.1.2 ระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยวสำหรับทางตรงแบบ SS-TG-8

องค์ประกอบของเสาชนิดนี้ที่ต้องใช้ในการคำนวณแรงเคลื่อนเหนี่ยวน้ำได้แก่

- เสาคอนกรีตยาว 18.5 m
- คอกสายแบบเหล็กขนาด 100x50x3.2 mm ยาว 4.20 m



รูป 3.3 เสารูปแบบ SS-TG-8

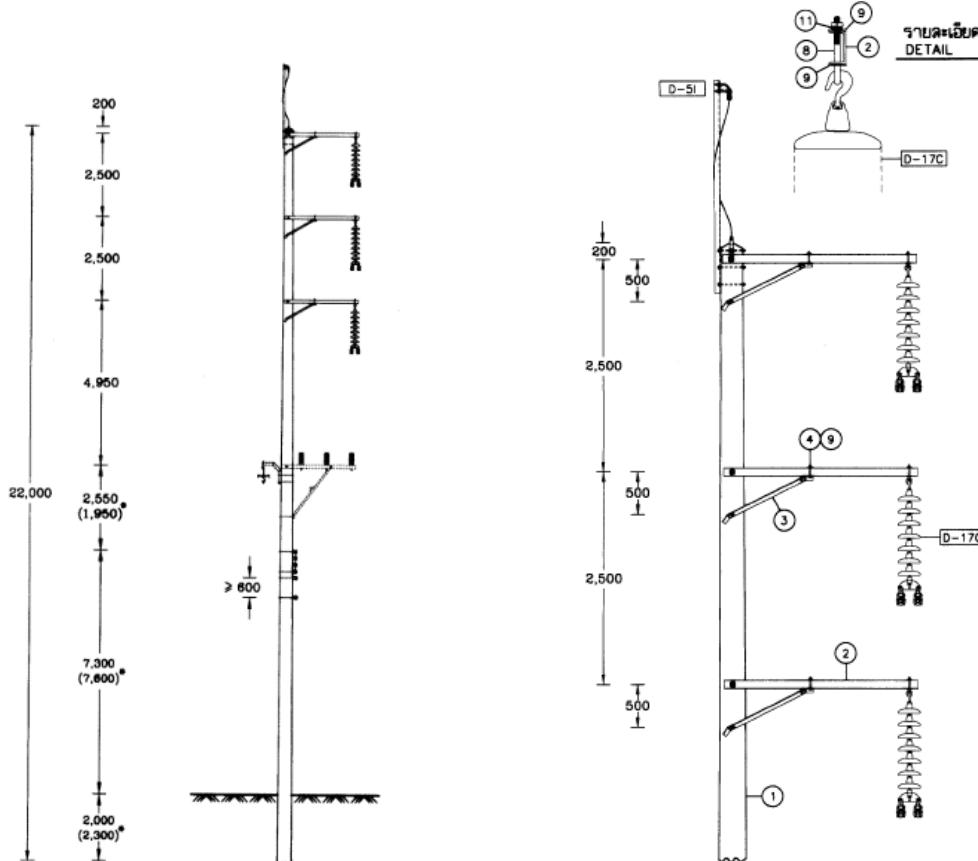


รูป 3.4 เสารูปแบบ SS-TG-8

3.1.1.3 ระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าคู่ สำหรับทางตรงแบบ SD-TG-3

องค์ประกอบของเสาชนิดนี้ที่ต้องใช้ในการคำนวณแรงเคลื่อนเหนี่ยวน้ำได้แก่

- เสาคอนกรีตยาว 22 m
- เหล็กปูรงน้ำหนัก 100x50x5 mm ยาว 2.25 m



รูป 3.5 เสารูปแบบ SD-TG-3

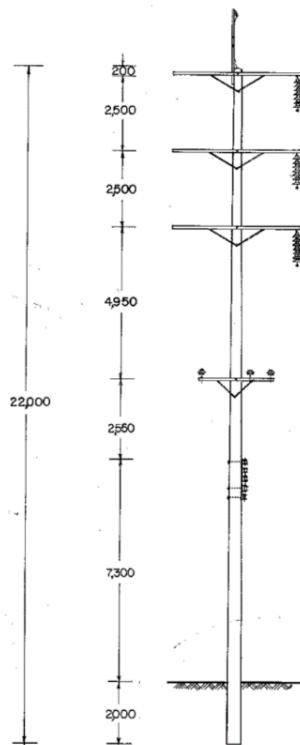
รูป 3.6 เสารูปแบบ SD-TG-3

3.1.2 ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดี่ยว กับ 22 วงจรเดี่ยว

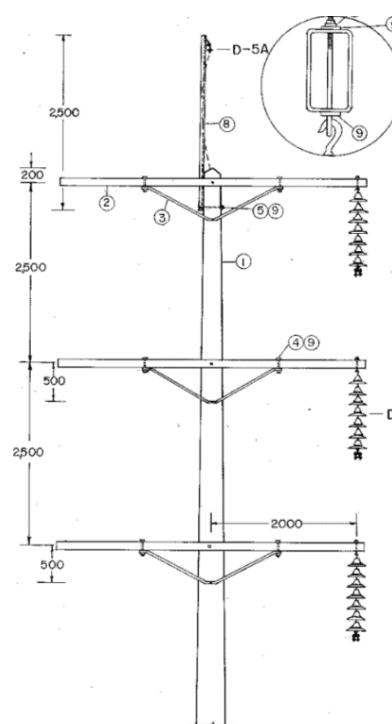
3.1.2.1 ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดี่ยว กับ 22 วงจรเดี่ยว สำหรับทางตรงแบบ SS-TG-3

องค์ประกอบของเสาชนิดนี้ที่ต้องใช้ในการคำนวณแรงเคลื่อนไหวน้ำได้แก่

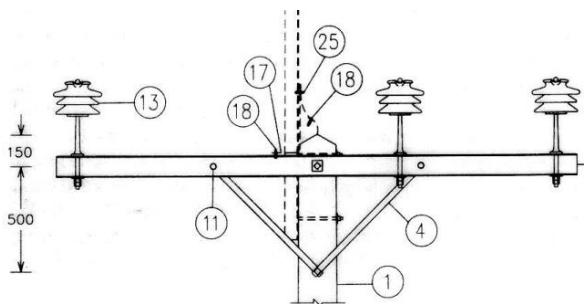
- เสาคอนกรีตยาว 22 m
- คอกเหล็กปูนร่องน้ำขนาด $100 \times 50 \times 5$ mm ยาว 4.20 m
- คอกเหล็กปูนร่องน้ำขนาด $100 \times 50 \times 5$ mm ยาว 2.5 m



รูป 3-7 เสารูปแบบ SS-TG-3



รูป 3-8 เสารูปแบบ SS-TG-3

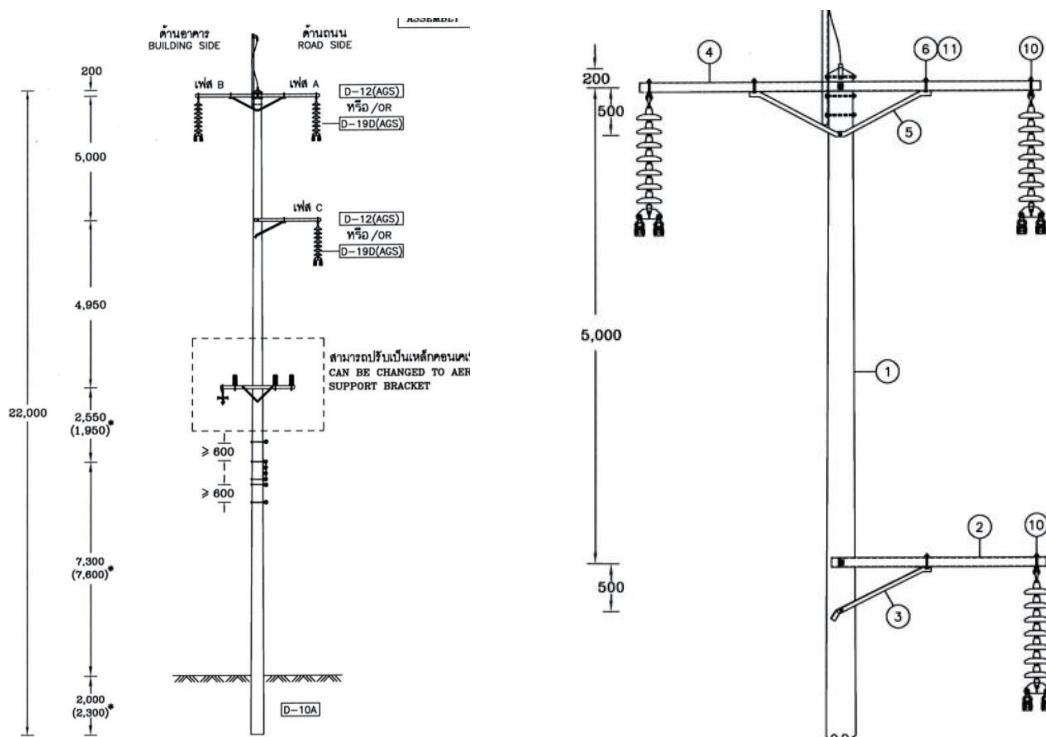


รูป 3.9 คอกเหล็กปูนร่องน้ำขนาด $100 \times 50 \times 5$ mm ยาว 2.5 m

3.1.2.2 ระบบสายส่งแบบผสม 115 KV วงจรเดี่ยว กับ 22 วงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าคู่ สำหรับทางตงแบบ SD-TG-9

องค์ประกอบของเสาชนิดนี้ที่ต้องใช้ในการคำนวณแรงเคลื่อนเนื้ยวน้ำได้แก่

- เสาคอนกรีตยาว 22 m
- เหล็กปูนรังน้ำขนาด 100x50x5 mm ยาว 4.20 m
- เหล็กปูนรังน้ำขนาด 100x50x5 mm ยาว 2.250 m
- ค้อนเหล็กปูนรังน้ำขนาด 100x50x5 mm ยาว 2.5 m รูป 3.9



รูป 3.10 เสารูปแบบ SD-TG-9

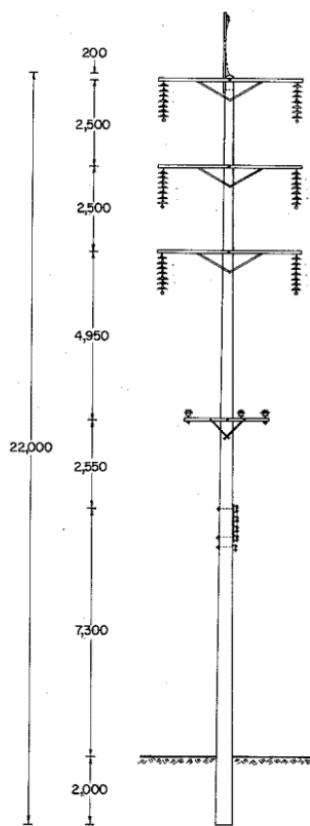
รูป 3.11 เสารูปแบบ SD-TG-9

3.1.3 ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรคู่ กับ 22 วงจรเดี่ยว

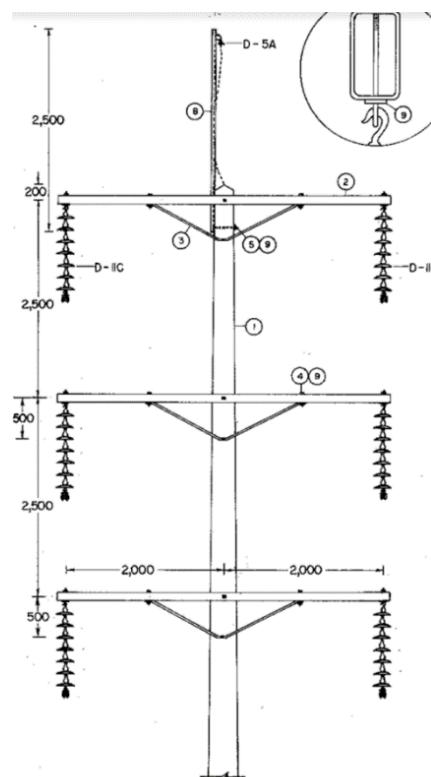
3.1.3.1 ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรคู่ กับ 22 วงจรเดี่ยวสำหรับทางทรงแบบ DS-TG-1

องค์ประกอบของเสาชนิดนี้ที่ต้องใช้ในการคำนวณแรงเคลื่อนไหวยาน้ำได้แก่

- เสาคอนกรีตยาว 22 m
- คอกสายแบบเหล็กขนาด $100 \times 50 \times 3.2$ mm ยาว 4.20 m
- คอกเหล็กปูรงน้ำขนาด $100 \times 50 \times 5$ mm ยาว 2.5 m รูป 3-9



รูป 3.12 เสารูปแบบ DS-TG-1



รูป 3.13 เสารูปแบบ DS-TG-1

3.2 ตำแหน่งที่สนใจในการหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำ

3.2.1 อาคารอยู่ในแนวระดับเดียวกับสายไฟฟ้า

ผู้จัดทำได้ใช้เกณฑ์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคว่าด้วยการกำหนดระยะห่างต่ำสุดตามแนวระดับสายไฟฟ้า กับสิ่งก่อสร้างขึ้นไว้เพื่อป้องกันอันตรายจากสายส่งไฟฟ้าในการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามฟ้า จาก รูป 2-10 กำหนดให้สายส่ง 115 kV ห่างจากผนังด้านปิดและผนังด้านเปิดของอาคาร 2.30 m โดยความสูงของ อาคารปิดกับสายตัวนำไฟฟ้าอยู่ในระดับเดียวกัน

หมายเหตุ ผนังด้านเปิดของอาคารคือผนังอาคารที่บุคลสามารถยืนส่วนของร่างกายหรือวัตถุมาสัมผัสสายไฟฟ้า ได้โดยพลังเหลือ

หมายเหตุ ผนังด้านปิดของอาคารคือผนังอาคารที่บุคลไม่สามารถยืนส่วนของร่างกายหรือวัตถุมาสัมผัสสายไฟฟ้า ได้โดยพลังเหลือ

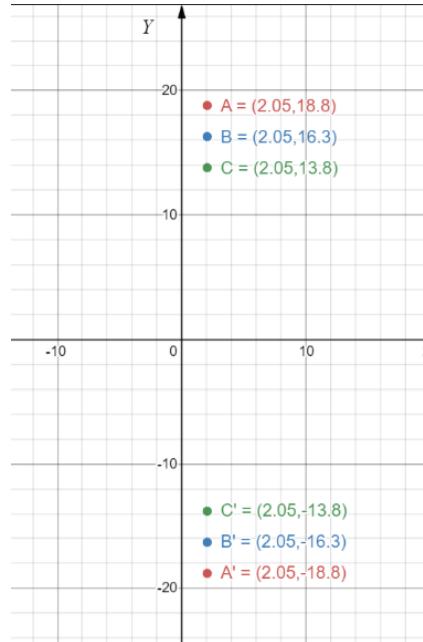
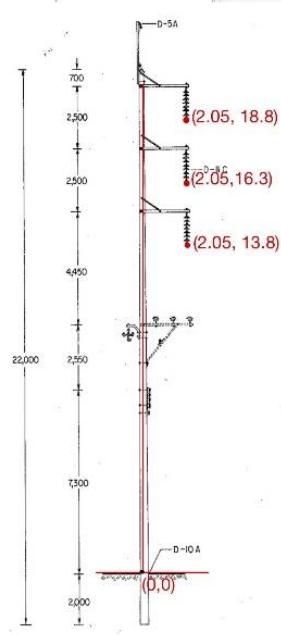
3.2.2 วัตถุที่มีสภาพนำไฟฟ้า

การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามแม่เหล็กจำเป็นต้องใช้ข้อมูลความยาวของวัตถุที่มีสภาพนำไฟฟ้า ผู้จัดทำจึงได้กำหนดให้วัตถุที่มีสภาพนำไฟฟ้ามีความยาว 1 m โดยการจัดวางของวัตถุนั้นจะอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับหัวข้อ 3.2.1 แต่มีลักษณะนานกันไปตามแนวของสายส่งไฟฟ้า

3.3 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวสำหรับสายส่ง 115 kV

ในหัวข้อนี้จะแสดงการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวสำหรับสายส่ง 115 kV ในที่นี้จะแสดงตัวอย่างการคำนวณของระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดียวสำหรับทางตรงแบบ SS-TG-2 (หัวข้อ 3.1.1.1)

3.3.1 ขั้นตอนการคำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย



รูป 3.14 กำหนดจุดบนตัวนำของเสา SS-TG-2 รูป 3.15 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเสา SS-TG-2

นำข้อมูลเสาที่ได้จากหัวข้อ 3.1 มาหาจุดที่สายไฟพ้อยู่ โดยกำหนดให้จุดอ้างอิงให้ง่ายต่อการคำนวณ ดังรูป 3.14 ซึ่งกำหนดให้จุด $(0,0)$ เป็นจุดอ้างอิง และจุดสีแดงเป็นจุดที่สายไฟพ้อยู่ เมื่อทำการกำหนดจุดเรียบร้อยแล้ว ให้นำวิธีการ Image Charge มาใช้ โดยกำหนดให้มีจุดประจุที่เท่ากัน อยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกันลึกลงไปในพื้นดิน จะได้ภาพดังรูป 3.15 หลังจากนั้นทำการหาระยะทางระหว่างจุด AB' , AC' , BC' , AB , AC และ BC

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3.1)$$

$$d'_{AB} = \sqrt{(2.05 - 2.05)^2 + (18.8 + 16.3)^2} = 35.1$$

$$d'_{AC} = \sqrt{(2.05 - 2.05)^2 + (18.8 + 13.8)^2} = 32.6$$

$$d'_{BC} = \sqrt{(2.05 - 2.05)^2 + (16.3 + 13.8)^2} = 30.1$$

$$d_{AB} = \sqrt{(2.05 - 2.05)^2 + (18.8 - 16.3)^2} = 2.5$$

$$d_{AC} = \sqrt{(2.05 - 2.05)^2 + (18.8 - 13.8)^2} = 5.0$$

$$d_{BC} = \sqrt{(2.05 - 2.05)^2 + (16.3 - 13.8)^2} = 2.5$$

หลังจากนั้นคำนวณประจุต่อความยาวโดยใช้สมการ

$$\begin{bmatrix} \bar{q}_1 \\ \bar{q}_2 \\ \vdots \\ \bar{q}_n \end{bmatrix} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{2h_1}{r_1}\right) & \ln\left(\frac{d'_{12}}{d_{12}}\right) & \dots & \ln\left(\frac{d'_{1n}}{d_{1n}}\right) \\ \ln\left(\frac{d'_{21}}{d_{21}}\right) & \ln\left(\frac{2h_2}{r_2}\right) & \dots & \ln\left(\frac{d'_{2n}}{d_{2n}}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \ln\left(\frac{d'_{n1}}{d_{n1}}\right) & \ln\left(\frac{d'_{n2}}{d_{n2}}\right) & \dots & \ln\left(\frac{2h_n}{r_n}\right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_n \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

โดย r คือรัศมีความกว้างของสายไฟฟ้า หากเป็นสาย bundle ให้ค่า r คือ GMR

โดย h คือระยะจากพื้นถึงสายไฟ

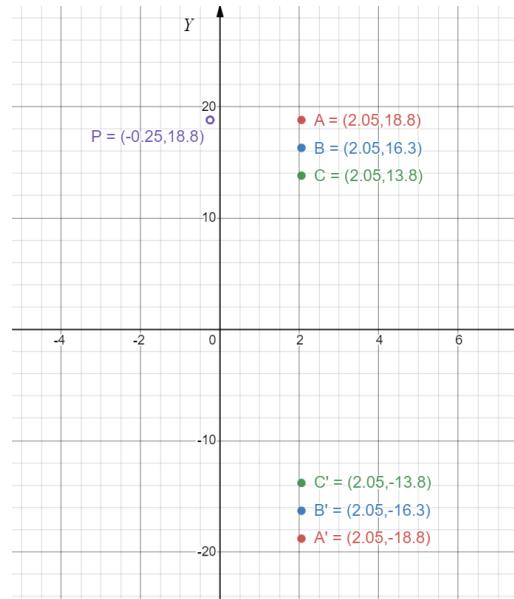
หมายเหตุ r ในที่นี้คือรัศมีของสายไฟฟ้าตามข้อมูล 2.7.2 คือ 0.012825

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \end{bmatrix} &= 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{2(18.8)}{0.012825}\right) & \ln\left(\frac{35.1}{2.5}\right) & \ln\left(\frac{32.6}{5}\right) \\ \ln\left(\frac{35.1}{2.5}\right) & \ln\left(\frac{2(16.3)}{0.012825}\right) & \ln\left(\frac{30.1}{2.5}\right) \\ \ln\left(\frac{32.6}{5.0}\right) & \ln\left(\frac{30.1}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{2(13.8)}{0.012825}\right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (3.3) \\
\begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \end{bmatrix} &= 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 7.983 & 2.642 & 1.875 \\ 2.642 & 7.840 & 2.488 \\ 1.875 & 2.488 & 7.674 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \end{bmatrix} &= 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 0.1442 & -0.0417 & -0.0217 \\ -0.0417 & 0.1542 & -0.0398 \\ -0.0217 & -0.0398 & 0.1485 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0.2984 \angle 0.5177 \\ 0.2695 \angle -5.575 \\ 0.3221 \angle 4.5274 \end{bmatrix} \mu C/m
\end{aligned}$$

3.3.2 ขั้นตอนการคำนวณหาแรงเคลื่อนเนี้ยวนำที่มีผลต่อจุดที่สนใจ

3.3.2.1 ผลของสนามไฟฟ้า

ในการหาค่าแรงดันเนี้ยวนำ ต้องกำหนดจุดที่ต้องการหาค่าแรงดัน (จุด P) โดยในการที่นี้จะกำหนดให้จุด P อยู่ห่างจากเฟส A 2.30 m ตามระยะปลอดภัยที่การไฟฟ้ากำหนด จึงได้ตำแหน่งจุด P (-0.25,18.8) และจึงคำนวณหาระยะห่างระหว่างจุด P กับจุดต่างๆ



รูป 3.16 กำหนดจุด P ของเสา SS-TG-2

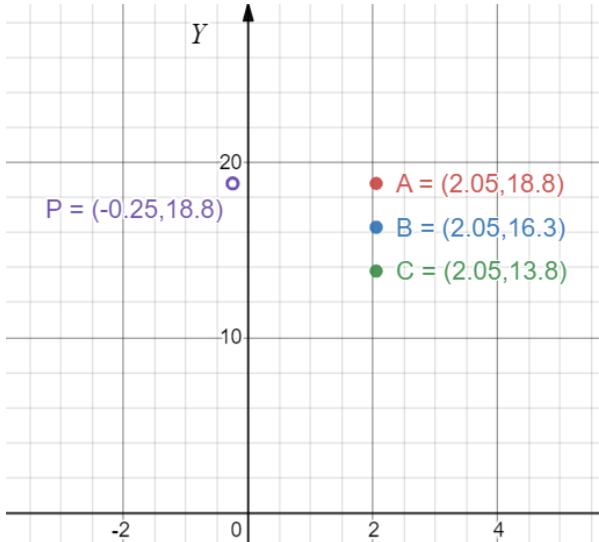
$$\begin{aligned}
 dpa &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (18.8 - 18.8)^2} = 2.30 \\
 dpb &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (18.8 - 16.3)^2} = 11.54 \\
 dpc &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (18.8 - 13.8)^2} = 5.50 \\
 d'pa &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (18.8 + 18.8)^2} = 37.67 \\
 d'pb &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (18.8 + 16.3)^2} = 35.18 \\
 d'pc &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (18.8 + 13.8)^2} = 32.68
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

คำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำโดยใช้สูตร 2.8 ต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\bar{V}_p &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \ln \left(\frac{d'_{pi}}{d_{pi}} \right) \\ \bar{V} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\bar{q}_A \ln \left(\frac{d'_{pa}}{d_{pa}} \right) + \bar{q}_B \ln \left(\frac{d'_{pb}}{d_{pb}} \right) + \bar{q}_C \ln \left(\frac{d'_{pc}}{d_{pc}} \right) \right] \\ \bar{V} &= \frac{10^{-6}}{2\pi\epsilon_0} \left[(0.2984 \angle 0.5177) \ln \left(\frac{37.67}{2.3} \right) + (0.2695 \angle -5.575) \ln \left(\frac{35.18}{11.54} \right) + (0.3221 \angle 4.5274) \ln \left(\frac{32.68}{5.5} \right) \right] \\ \bar{V} &= 36.555 \angle -0.2364 KV\end{aligned}\tag{3.5}$$

3.3.2.2 ผลของสนามแม่เหล็ก

ในการคำนวณหาผลของสนามแม่เหล็กใช้ Superposition Theorem โดยในการคำนวณสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังภาพที่ 3.16



รูป 3.17 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเสา SS-TG-2

$$\begin{aligned}d_{pa} &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (18.8 - 18.8)^2} = 2.3 \\ d_{pb} &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (18.8 - 16.3)^2} = 3.39 \\ d_{pc} &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (18.8 - 13.8)^2} = 5.50 \\ D_{pa} &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (0 - 18.8)^2} = 18.94 \\ D_{pb} &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (0 - 16.3)^2} = 16.46 \\ D_{pc} &= \sqrt{(-0.25 - 2.05)^2 + (0 - 13.8)^2} = 13.99\end{aligned}\tag{3.6}$$

คำนวณหากระแสไฟฟ้าระบบ

$$I = \frac{S}{V} \quad \text{สายส่ง } 115 \text{ kV จากข้อมูลหัวข้อ 2.7.2}$$

$$I = \frac{320MVA}{\sqrt{3} \times 115KV} \quad (3.7)$$

$$I = 1606.539A$$

คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสูตร [11]

$$E_p = 2 \times 10^{-7} \omega \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{D_{pa}}{d_{pa}}\right) & \ln\left(\frac{D_{pb}}{d_{pb}}\right) & \ln\left(\frac{D_{pc}}{d_{pc}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \angle \theta_A \\ I_b \angle \theta_B \\ I_c \angle \theta_C \end{bmatrix}$$

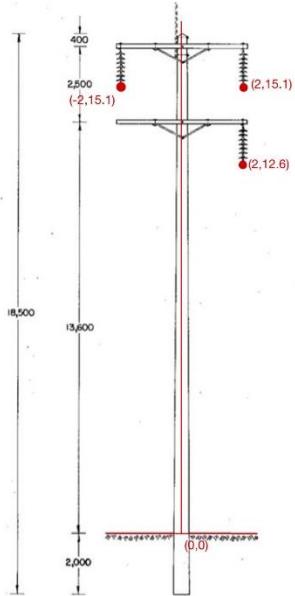
$$E_p = 2 \times 10^{-7} (100\pi) \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{18.94}{2.3}\right) & \ln\left(\frac{16.46}{3.39}\right) & \ln\left(\frac{13.99}{5.50}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$E_p = 0.4661 \angle -0.2925V/m$$

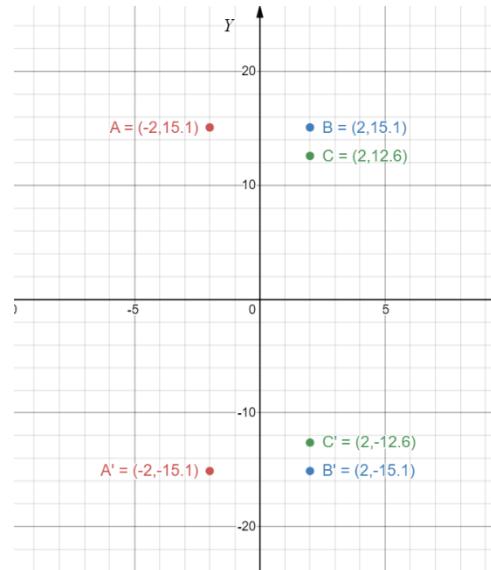
$$V_p = E_p l = (0.4661 \angle -0.2925) \times 1 = 0.4661 \angle -0.2925V \quad (3.8)$$

จากรูปแบบการคำนวณข้างต้นสามารถนำไปใช้หาแรงดันเหนี่ยวนำของเสาไฟฟ้าระบบต่างๆ ในที่นี้ได้แก่ ระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยวสำหรับทางตรงแบบ SS-TG-2 , ระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าคู่ สำหรับทางตรงแบบ SD-TG-3 , ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดี่ยว กับ 22 วงจรเดี่ยว สำหรับทางตรงแบบ SS-TG-3 , ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดี่ยว กับ 22 วงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าคู่ สำหรับทางตรงแบบ SD-TG-9 และ ระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรคู่ กับ 22 วงจรเดี่ยวสำหรับทางตรงแบบ SD-TG-1 โดยจะค่าแรงดันเหนี่ยวนำดังต่อไปนี้

3.4 การคำนวณแรงดันเหนี่ยวระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดี่ยวสำหรับทางตรงแบบ SS-TG-8



รูป 3.18 กำหนดจุดบนตัวนำของเสา SS-TG-8



รูป 3.19 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเสา SS-TG-8

3.4.1 คำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย

$$\begin{aligned}
 d &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\
 d'_{AB} &= \sqrt{(-2 - 2)^2 + (15.1 + 15.1)^2} = 30.463 \\
 d'_{AC} &= \sqrt{(-2 - 2)^2 + (15.1 + 12.6)^2} = 27.987 \\
 d'_{BC} &= \sqrt{(2 - 2)^2 + (15.1 + 12.6)^2} = 27.7 \\
 d_{AB} &= \sqrt{(-2 - 2)^2 + (15.1 - 15.1)^2} = 4 \\
 d_{AC} &= \sqrt{(-2 - 2)^2 + (15.1 - 12.6)^2} = 4.716 \\
 d_{BC} &= \sqrt{(2 - 2)^2 + (15.1 - 12.6)^2} = 2.5
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \end{bmatrix} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{2(15.1)}{0.012825}\right) & \ln\left(\frac{30.463}{4}\right) & \ln\left(\frac{27.987}{4.716}\right) \\ \ln\left(\frac{30.463}{4}\right) & \ln\left(\frac{2(15.1)}{0.012825}\right) & \ln\left(\frac{27.7}{2.5}\right) \\ \ln\left(\frac{27.987}{4.716}\right) & \ln\left(\frac{27.7}{2.5}\right) & \ln\left(\frac{2(12.6)}{0.012825}\right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$$

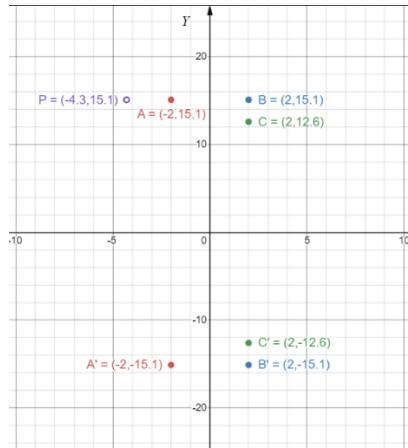
$$\begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \end{bmatrix} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 7.764 & 2.030 & 1.780 \\ 2.030 & 7.764 & 2.405 \\ 1.780 & 2.405 & 7.583 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \end{bmatrix} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 0.1421 & -0.0297 & -0.0239 \\ -0.0297 & 0.1490 & -0.0403 \\ -0.0239 & -0.0403 & 0.1503 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3266 \angle 0.1375 \\ 0.2927 \angle -5.0089 \\ 0.3186 \angle 4.6309 \end{bmatrix} \mu C/m$$

3.4.2 ผลของสนามไฟฟ้า

ตำแหน่งจุด P คือ (-4.3,15.1)



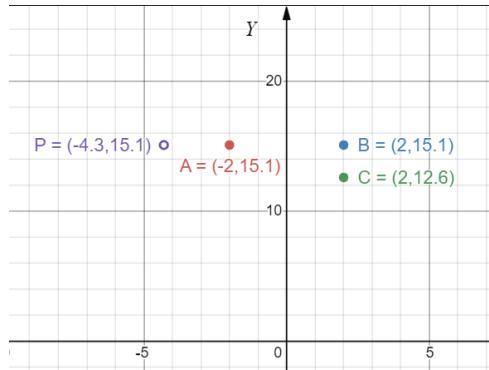
รูป 3.20 กำหนดจุด P ของเสา SS-TG-8

$$\begin{aligned}
 dpa &= \sqrt{(-4.3+2)^2 + (15.1-15.1)^2} = 2.300 \\
 dpb &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (15.1-15.1)^2} = 6.300 \\
 dpc &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (15.1-12.6)^2} = 6.778 \\
 d'pa &= \sqrt{(-4.3+2)^2 + (15.1+15.1)^2} = 30.287 \\
 d'pb &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (15.1+15.1)^2} = 30.850 \\
 d'pc &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (15.1+12.6)^2} = 28.407
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

แรงดันเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าจะได้

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_p &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \ln \left(\frac{d'_{pi}}{d_{pi}} \right) \\
 \bar{V} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\bar{q}_A \ln \left(\frac{d'_{pa}}{d_{pa}} \right) + \bar{q}_B \ln \left(\frac{d'_{pb}}{d_{pb}} \right) + \bar{q}_C \ln \left(\frac{d'_{pc}}{d_{pc}} \right) \right] \\
 &= \frac{10^{-6}}{2\pi\epsilon_0} \left[(0.3266 \angle 0.1375) \ln \left(\frac{30.287}{2.3} \right) + (0.2927 \angle -5.0089) \ln \left(\frac{30.85}{6.3} \right) + (0.3186 \angle 4.6309) \ln \left(\frac{28.407}{6.778} \right) \right] \\
 &= 31.643 \angle -0.06 KV
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

3.4.3 ผลของสนามแม่เหล็ก



รูป 3.21 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเสา SS-TG-8

$$\begin{aligned}
 d_{pa} &= \sqrt{(-4.3+2)^2 + (15.1-15.1)^2} = 2.30 \\
 d_{pb} &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (15.1-15.1)^2} = 6.30 \\
 d_{pc} &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (15.1-12.6)^2} = 6.78 \\
 D_{pa} &= \sqrt{(-4.3+2)^2 + (0-15.1)^2} = 15.27 \\
 D_{pb} &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (0-15.1)^2} = 16.36 \\
 D_{pc} &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (0-12.6)^2} = 14.09
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

คำนวณหากระแสไฟฟ้าระบบสายส่ง 115 kV จากข้อมูลทั่วๆ ไป 2.7.2

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{S}{V} \\
 I &= \frac{320MVA}{\sqrt{3} \times 115KV} \\
 I &= 1606.539A
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

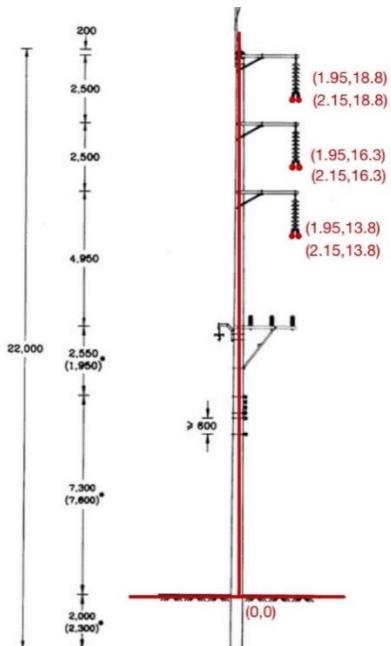
คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสูตร

$$\begin{aligned}
 E_p &= 2 \times 10^{-7} \omega \left[\ln \left(\frac{D_{pa}}{d_{pa}} \right) \quad \ln \left(\frac{D_{pb}}{d_{pb}} \right) \quad \ln \left(\frac{D_{pc}}{d_{pc}} \right) \right] \begin{bmatrix} I_a \angle \theta_A \\ I_b \angle \theta_B \\ I_c \angle \theta_C \end{bmatrix} \\
 E_p &= 2 \times 10^{-7} (100\pi) \left[\ln \left(\frac{15.27}{2.3} \right) \quad \ln \left(\frac{16.36}{6.3} \right) \quad \ln \left(\frac{14.09}{6.78} \right) \right] \begin{bmatrix} 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

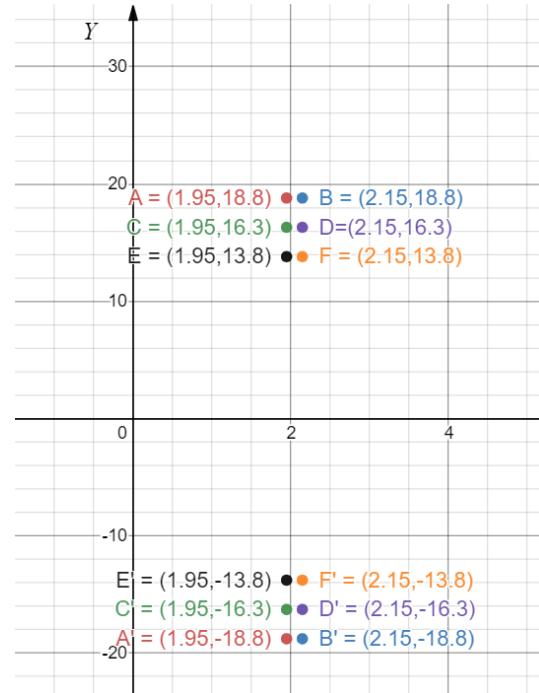
$$E_p = 0.361 \angle -0.130V/m$$

$$V_p = E_p l = (0.361 \angle -0.130V) \times 1 = 0.361 \angle -0.130V \tag{3.14}$$

3.5 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำระบบสายส่ง 115 kV วงจรเดียวสายไฟฟ้าคู่ สำหรับทางตรงแบบ SD-TG-3



รูป 3.22 กำหนดจุดบนตัวนำของเสา SD-TG-3



รูป 3.23 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเสา SD-TG-3

3.5.1 คำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

$$d'_{AB} = \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (18.8 + 18.8)^2} = 37.60$$

$$d'_{AC} = \sqrt{(1.95 - 1.95)^2 + (18.8 + 16.3)^2} = 35.10$$

$$d'_{AD} = \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (18.8 + 16.3)^2} = 35.10$$

$$d'_{AE} = \sqrt{(1.95 - 1.95)^2 + (18.8 + 13.8)^2} = 32.60$$

$$d'_{AF} = \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (18.8 + 13.8)^2} = 32.60$$

$$d'_{BC} = \sqrt{(2.15 - 1.95)^2 + (18.8 + 16.3)^2} = 35.10$$

$$d'_{BD} = \sqrt{(2.15 - 2.15)^2 + (18.8 + 16.3)^2} = 35.10$$

$$d'_{BE} = \sqrt{(2.15 - 1.95)^2 + (18.8 + 13.8)^2} = 32.60$$

$$d'_{BF} = \sqrt{(2.15 - 2.15)^2 + (18.8 + 13.8)^2} = 32.60$$

$$d'_{CD} = \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (16.3 + 16.3)^2} = 32.60$$

$$d'_{CE} = \sqrt{(1.95 - 1.95)^2 + (16.3 + 13.8)^2} = 30.10$$

$$d'_{CF} = \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (16.3 + 13.8)^2} = 30.10$$

$$d'_{DE} = \sqrt{(2.15 - 1.95)^2 + (16.3 + 13.8)^2} = 30.10$$

$$d'_{DF} = \sqrt{(2.15 - 2.15)^2 + (16.3 + 13.8)^2} = 30.10$$

$$d'_{EF} = \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (1.38 + 13.8)^2} = 27.60$$

$$\begin{aligned}
 d_{AB} &= \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (18.8 - 18.8)^2} = 0.20 \\
 d_{AC} &= \sqrt{(1.95 - 1.95)^2 + (18.8 - 16.3)^2} = 2.50 \\
 d_{AD} &= \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (18.8 - 16.3)^2} = 2.51 \\
 d_{AE} &= \sqrt{(1.95 - 1.95)^2 + (18.8 - 13.8)^2} = 5.00 \\
 d_{AF} &= \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (18.8 - 13.8)^2} = 5.00 \\
 d_{BC} &= \sqrt{(2.15 - 1.95)^2 + (18.8 - 16.3)^2} = 2.51 \\
 d_{BD} &= \sqrt{(2.15 - 2.15)^2 + (18.8 - 16.3)^2} = 2.50 \\
 d_{BE} &= \sqrt{(2.15 - 1.95)^2 + (18.8 - 13.8)^2} = 5.00 \\
 d_{BF} &= \sqrt{(2.15 - 2.15)^2 + (18.8 - 13.8)^2} = 5.00 \\
 d_{CD} &= \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (16.3 - 16.3)^2} = 0.20 \\
 d_{CE} &= \sqrt{(1.95 - 1.95)^2 + (16.3 - 13.8)^2} = 2.5 \\
 d_{CF} &= \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (16.3 - 13.8)^2} = 2.51 \\
 d_{DE} &= \sqrt{(2.15 - 1.95)^2 + (16.3 - 13.8)^2} = 2.51 \\
 d_{DF} &= \sqrt{(2.15 - 2.15)^2 + (16.3 - 13.8)^2} = 2.50 \\
 d_{EF} &= \sqrt{(1.95 - 2.15)^2 + (1.38 - 13.8)^2} = 0.20
 \end{aligned}$$

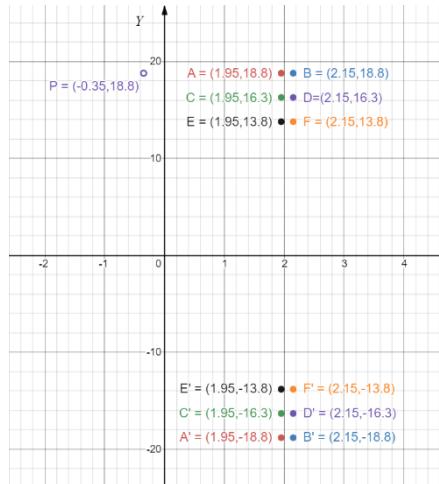
หมายเหตุ ค่า GMR ของระบบสายส่ง 115 kV สายคู่จากสมการ 3.15 จะได้

$$GMR = \sqrt{r \times d} = \sqrt{0.012825 \times 0.2} = 0.506 \text{ m} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E \\ \bar{q}_F \end{bmatrix} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{2(18.8)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{37.60}{0.20}\right) & \ln\left(\frac{35.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{35.10}{2.51}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) \\ \ln\left(\frac{37.60}{0.20}\right) & \ln\left(\frac{2(18.8)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{35.10}{2.51}\right) & \ln\left(\frac{35.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) \\ \ln\left(\frac{35.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{35.10}{2.51}\right) & \ln\left(\frac{2(16.3)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{0.20}\right) & \ln\left(\frac{30.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{30.10}{2.51}\right) \\ \ln\left(\frac{35.10}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{35.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{23.60}{0.20}\right) & \ln\left(\frac{2(16.3)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{30.10}{2.51}\right) & \ln\left(\frac{30.10}{2.50}\right) \\ \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{30.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{30.10}{2.51}\right) & \ln\left(\frac{2(13.8)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{27.60}{0.20}\right) \\ \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{30.10}{2.51}\right) & \ln\left(\frac{30.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{27.60}{0.20}\right) & \ln\left(\frac{2(13.8)}{0.0506}\right) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E \\ \bar{q}_F \end{bmatrix} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 7.9800 & 5.2300 & 2.6400 & 2.6300 & 1.8700 & 18.7000 \\ 5.2300 & 7.9800 & 2.6300 & 2.6400 & 1.8700 & 1.8700 \\ 2.6400 & 2.6300 & 7.8400 & 5.0900 & 2.4800 & 2.4800 \\ 1.9400 & 2.6400 & 5.0900 & 7.8400 & 2.4800 & 2.4800 \\ 1.8700 & 1.8700 & 2.4800 & 2.4800 & 7.6700 & 4.9200 \\ 1.8700 & 1.8700 & 2.4800 & 2.4800 & 4.9200 & 7.6700 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E \\ \bar{q}_F \end{bmatrix} = 2\pi\epsilon_0 \begin{bmatrix} 0.2706 & -0.1066 & 0.0527 & 0.0541 & 0.6019 & -1.0544 \\ -0.1655 & 0.2129 & -0.0575 & -0.0589 & -0.3799 & 0.6329 \\ -0.0444 & -0.0078 & 0.2231 & -0.1407 & -0.1147 & 0.1572 \\ 0.0251 & -0.0357 & -0.1270 & 0.2369 & 0.0399 & -0.1135 \\ -0.0118 & -0.0072 & -0.0182 & -0.0182 & 0.2033 & -0.0881 \\ -0.0118 & -0.0072 & -0.0182 & -0.0182 & -0.1603 & 0.2755 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \\
& \begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E \\ \bar{q}_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.1812 \angle -1.041 \\ 0.812 \angle -1.041 \\ 0.1512 \angle 8.397 \\ 0.1512 \angle 8.397 \\ 0.2030 \angle -5.839 \\ 0.2030 \angle -5.8539 \end{bmatrix} \mu C/m
\end{aligned} \quad (3.16)$$

3.5.2 ผลของสนามไฟฟ้า

ตำแหน่งจุด P คือ (-0.35,18.8)



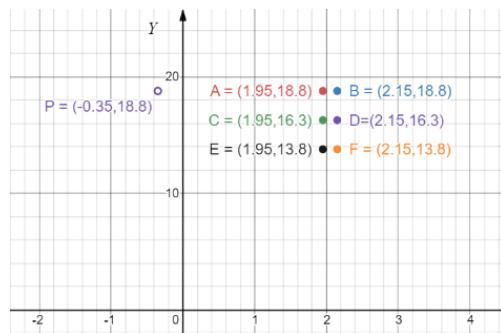
รูป 3.24 กำหนดจุด P ของเสา SD-TG-3

$$\begin{aligned}
 dpa &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (18.8 - 18.8)^2} = 2.30 \\
 dpb &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (18.8 - 18.8)^2} = 2.50 \\
 dpc &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (18.8 - 16.3)^2} = 3.39 \\
 pdp &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (18.8 - 16.3)^2} = 3.53 \\
 dpe &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (18.8 - 13.8)^2} = 5.50 \\
 dpf &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (18.8 - 13.8)^2} = 5.59 \\
 d'pa &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (18.8 + 18.8)^2} = 37.67 \\
 d'pb &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (18.8 + 18.8)^2} = 37.68 \\
 d'pc &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (18.8 + 16.3)^2} = 35.17 \\
 d'pd &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (18.8 + 16.3)^2} = 35.18 \\
 d'pe &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (18.8 + 13.8)^2} = 32.68 \\
 d'pf &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (18.8 + 13.8)^2} = 32.69
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

แรงดันสนามไฟฟ้าจะได้

$$\begin{aligned}\bar{V}_p &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \ln \left(\frac{d'_{pi}}{d_{pi}} \right) \\ \bar{V} &= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\bar{q}_A \ln \left(\frac{d'_{pa}}{d_{pa}} \right) + \bar{q}_B \ln \left(\frac{d'_{pb}}{d_{pb}} \right) + \bar{q}_C \ln \left(\frac{d'_{pc}}{d_{pc}} \right) + \bar{q}_D \ln \left(\frac{d'_{pd}}{d_{pd}} \right) + \bar{q}_E \ln \left(\frac{d'_{pe}}{d_{pe}} \right) + \bar{q}_F \ln \left(\frac{d'_{pf}}{d_{pf}} \right) \right] \\ \bar{V} &= \frac{10^{-6}}{2\pi\epsilon_0} \left[(0.1812\angle -1.041) \ln \left(\frac{37.67}{2.3} \right) + (0.1812\angle -1.041) \ln \left(\frac{37.68}{2.5} \right) + (0.1512\angle 8.397) \ln \left(\frac{35.17}{3.39} \right) \right. \\ &\quad \left. + (0.1512\angle 8.397) \ln \left(\frac{35.18}{3.53} \right) + (0.2030\angle -5.839) \ln \left(\frac{32.68}{5.50} \right) + (0.2030\angle -5.839) \ln \left(\frac{32.69}{5.59} \right) \right] \\ \bar{V} &= 43.291\angle 0.2565KV\end{aligned}\quad (3.18)$$

3.5.3 คำนวณหาแรงดันสนามแม่เหล็ก



รูป 3.25 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเสา SD-TG-3

$$\begin{aligned}d_{pa} &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (18.8 - 18.8)^2} = 2.30 \\ d_{pb} &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (18.8 - 18.8)^2} = 2.50 \\ d_{pc} &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (18.8 - 16.3)^2} = 3.39 \\ d_{pd} &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (18.8 - 16.3)^2} = 3.53 \\ d_{pe} &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (18.8 - 13.8)^2} = 5.50 \\ d_{pf} &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (18.8 - 13.8)^2} = 5.59 \\ D_{pa} &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (0 - 18.8)^2} = 18.94 \\ D_{pb} &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (0 - 18.8)^2} = 18.96 \\ D_{pc} &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (0 - 16.3)^2} = 16.46 \\ D_{pd} &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (0 - 16.3)^2} = 16.49 \\ D_{pe} &= \sqrt{(-0.35 - 1.95)^2 + (0 - 13.8)^2} = 13.99 \\ D_{pf} &= \sqrt{(-0.35 - 2.15)^2 + (0 - 13.8)^2} = 14.02\end{aligned}\quad (3.19)$$

คำนวณหากระแสไฟฟ้าระบบสายส่ง 115 kV จากข้อมูลหัวข้อ 2.7.2

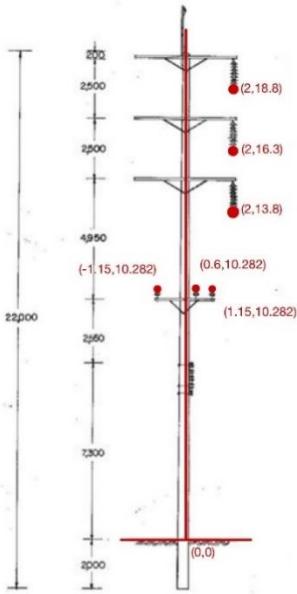
$$\begin{aligned} I &= \frac{S}{V} \\ I &= \frac{320 MVA}{\sqrt{3} \times 115 KV} \\ I &= 1606.539 A \end{aligned} \quad (3.6)$$

คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสูตร

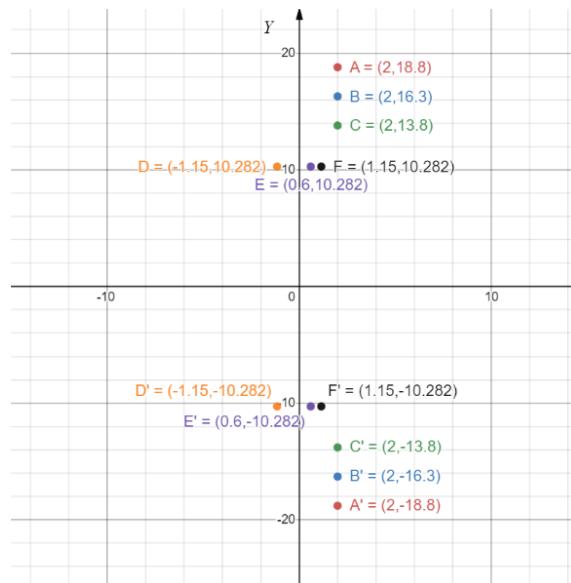
$$\begin{aligned} E_p &= 2 \times 10^{-7} \alpha \left[\ln\left(\frac{D_{pa}}{d_{pa}}\right) \ln\left(\frac{D_{pb}}{d_{pb}}\right) \ln\left(\frac{D_{pc}}{d_{pc}}\right) \ln\left(\frac{D_{pd}}{d_{pd}}\right) \ln\left(\frac{D_{pe}}{d_{pe}}\right) \ln\left(\frac{D_{ph'}}{d_{h'}}\right) \right] \begin{bmatrix} I_a \angle \theta_A \\ I_b \angle \theta_B \\ I_c \angle \theta_C \end{bmatrix} \\ E_p &= 2 \times 10^{-7} \alpha \left[\ln\left(\frac{18.94}{2.3}\right) \ln\left(\frac{18.96}{2.5}\right) \ln\left(\frac{16.46}{3.39}\right) \ln\left(\frac{16.49}{3.53}\right) \ln\left(\frac{13.99}{5.50}\right) \ln\left(\frac{14.02}{5.59}\right) \right] \begin{bmatrix} 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \\ E_p &= 2 \times 10^{-7} (100\pi) \left[\ln\left(\frac{18.94}{2.3}\right) \ln\left(\frac{18.96}{2.5}\right) \ln\left(\frac{16.46}{3.39}\right) \ln\left(\frac{16.49}{3.53}\right) \ln\left(\frac{13.99}{5.50}\right) \ln\left(\frac{14.02}{5.59}\right) \right] \begin{bmatrix} 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \\ E_p &= 0.9188 \angle 0.291 V/m \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$V_p = E_p l = (0.9188 \angle 0.291) \times 1 = 0.9188 \angle 0.291 V \quad (3.21)$$

3.6 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดี่ยว กับ 22 วงจรเดี่ยว สำหรับทางตรงแบบ SS-TG-3



รูป 3.26 กำหนดจุดบนตัวนำของเสา SS-TG-3



รูป 3.27 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเสา SS-TG-3

3.6.1 คำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย

$$\begin{aligned}
 d &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\
 d'_{AB} &= \sqrt{(2-2)^2 + (18.8+16.3)^2} = 35.1 \\
 d'_{AC} &= \sqrt{(2-2)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.6 \\
 d'_{AD} &= \sqrt{(2+1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.25 \\
 d'_{AE} &= \sqrt{(2-0.6)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.11 \\
 d'_{AF} &= \sqrt{(2-1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.09 \\
 d'_{BC} &= \sqrt{(2-2)^2 + (16.3+13.8)^2} = 30.1 \\
 d'_{BD} &= \sqrt{(2+1.15)^2 + (16.3+10.282)^2} = 26.76 \\
 d'_{BE} &= \sqrt{(2-0.6)^2 + (16.3+10.282)^2} = 26.61 \\
 d'_{BF} &= \sqrt{(2-1.15)^2 + (16.3+13.8)^2} = 26.59 \\
 d'_{CD} &= \sqrt{(2+1.15)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.28 \\
 d'_{CE} &= \sqrt{(2-0.6)^2 + (16.3+10.282)^2} = 24.12 \\
 d'_{CF} &= \sqrt{(2-1.15)^2 + (16.3+10.282)^2} = 24.09 \\
 d'_{DE} &= \sqrt{(-1.15-0.6)^2 + (10.282+10.282)^2} = 20.63 \\
 d'_{DF} &= \sqrt{(-1.15-1.15)^2 + (10.282+10.282)^2} = 20.69 \\
 d'_{EF} &= \sqrt{(0.6-1.15)^2 + (10.282+10.282)^2} = 20.57
 \end{aligned}$$

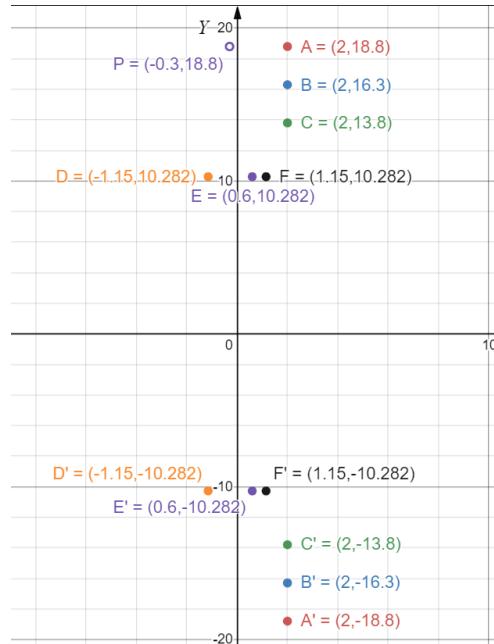
$$\begin{aligned}
 d_{AB} &= \sqrt{(2-2)^2 + (18.8-16.3)^2} = 2.50 \\
 d_{AC} &= \sqrt{(2-2)^2 + (18.8-13.8)^2} = 5.00 \\
 d_{AD} &= \sqrt{(2+1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.08 \\
 d_{AE} &= \sqrt{(2-0.6)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.63 \\
 d_{AF} &= \sqrt{(2-1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.56 \\
 d_{BC} &= \sqrt{(2-2)^2 + (16.3-13.8)^2} = 2 \\
 d_{BD} &= \sqrt{(2+1.15)^2 + (16.3-10.282)^2} \\
 d_{BE} &= \sqrt{(2-0.6)^2 + (16.3-10.282)^2} = 6.17 \\
 d_{BF} &= \sqrt{(2-1.15)^2 + (16.3-13.8)^2} = 6.07 \\
 d_{CD} &= \sqrt{(2+1.15)^2 + (13.8-10.282)^2} = 4.72 \\
 d_{CE} &= \sqrt{(2-0.6)^2 + (16.3-10.282)^2} = 3.78 \\
 d_{CF} &= \sqrt{(2-1.15)^2 + (16.3-10.282)^2} = 3.61 \\
 d_{DE} &= \sqrt{(-1.15-0.6)^2 + (10.282-10.282)^2} = 1.75 \\
 d_{DF} &= \sqrt{(-1.15-1.15)^2 + (10.282-10.282)^2} = 2.3 \\
 d_{EF} &= \sqrt{(0.6-1.15)^2 + (10.282-10.282)^2} = 0.55
 \end{aligned} \tag{3.22}$$

จากข้อมูลหัวข้อ 2.7.3 รัศมีของสายไฟฟาระบบจำนวนาย 22 kV คือ 0.00799 m

$$\begin{aligned}
 \left[\begin{array}{c} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E \\ \bar{q}_F \end{array} \right] &= 2\pi\epsilon_0 \left[\begin{array}{ccccccc} \ln\left(\frac{2(18.8)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{35.1}{2.5}\right) & \ln\left(\frac{32.6}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{29.25}{9.08}\right) & \ln\left(\frac{29.11}{8.63}\right) & \ln\left(\frac{29.09}{8.56}\right) & \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \ln\left(\frac{35.1}{2.5}\right) & \ln\left(\frac{2(16.3)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{30.1}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{26.76}{6.79}\right) & \ln\left(\frac{26.61}{6.17}\right) & \ln\left(\frac{26.59}{6.07}\right) & \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \ln\left(\frac{32.6}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{30.1}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{2(13.8)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{24.28}{4.72}\right) & \ln\left(\frac{24.12}{3.78}\right) & \ln\left(\frac{24.09}{3.61}\right) & \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \ln\left(\frac{29.25}{9.08}\right) & \ln\left(\frac{26.76}{6.79}\right) & \ln\left(\frac{24.28}{4.72}\right) & \ln\left(\frac{2(10.282)}{0.00799}\right) & \ln\left(\frac{20.63}{1.75}\right) & \ln\left(\frac{20.69}{2.30}\right) & \frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \ln\left(\frac{29.11}{8.63}\right) & \ln\left(\frac{26.61}{6.17}\right) & \ln\left(\frac{24.12}{3.78}\right) & \ln\left(\frac{20.63}{1.75}\right) & \ln\left(\frac{2(10.282)}{0.00799}\right) & \ln\left(\frac{20.57}{0.55}\right) & \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \ln\left(\frac{29.09}{8.56}\right) & \ln\left(\frac{26.59}{6.07}\right) & \ln\left(\frac{24.09}{3.61}\right) & \ln\left(\frac{20.69}{2.30}\right) & \ln\left(\frac{20.57}{0.55}\right) & \ln\left(\frac{2(10.282)}{0.00799}\right) & \frac{22 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{array} \right]^{-1} \\
 \left[\begin{array}{c} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E \\ \bar{q}_F \end{array} \right] &= 2\pi\epsilon_0 \left[\begin{array}{ccccccc} 7.9800 & 2.6400 & 1.8700 & 1.1600 & 1.2100 & 1.2200 & \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ 2.6400 & 7.8400 & 2.4800 & 1.3700 & 1.4600 & 1.4700 & \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ 1.8700 & 2.4800 & 7.6700 & 1.6300 & 1.8500 & 1.8900 & \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ 1.1600 & 1.3700 & 1.6300 & 7.8500 & 2.4600 & 2.1900 & \frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ 1.2100 & 1.4600 & 1.8500 & 2.4600 & 7.8500 & 3.6200 & \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ 1.2200 & 1.4700 & 1.8900 & 2.1900 & 3.6200 & 7.8500 & \frac{22 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{array} \right]^{-1} \\
 \left[\begin{array}{c} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E \\ \bar{q}_F \end{array} \right] &= 2\pi\epsilon_0 \left[\begin{array}{ccccccc} 0.1456 & -0.0398 & -0.0182 & -0.0073 & -0.0056 & -0.0062 & \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ -0.0398 & 0.1567 & -0.0350 & -0.0094 & -0.0079 & -0.0085 & \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ -0.0182 & -0.0350 & 0.1571 & -0.0142 & -0.0152 & -0.0175 & \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ -0.0073 & -0.0094 & -0.0142 & 0.1485 & -0.0306 & -0.0210 & \frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ -0.0056 & -0.0079 & -0.0152 & -0.0306 & 0.1730 & -0.0652 & \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ -0.0062 & -0.0085 & -0.0175 & -0.0210 & -0.0652 & 0.1701 & \frac{22 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \end{array} \right]^{-1} \\
 \left[\begin{array}{c} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E \\ \bar{q}_F \end{array} \right] &= \left[\begin{array}{c} 0.310 \angle 0.535 \\ 0.285 \angle -5.215 \\ 0.351 \angle 4.230 \\ 0.460 \angle -179.470 \\ 0.519 \angle -172.104 \\ 0.598 \angle 175.336 \end{array} \right] \mu C/m
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

3.6.2 ผลของสนามไฟฟ้า

ตำแหน่งจุด P คือ (-0.3,18.8)



รูป 3.28 กำหนดจุด P ของเสา SS-TG-3

$$\begin{aligned}
 dpa &= \sqrt{(-0.3-2)^2 + (18.8-18.8)^2} = 2.3 \\
 dpb &= \sqrt{(-0.3-2)^2 + (18.8-16.3)^2} = 3.39 \\
 dpc &= \sqrt{(-0.3-2)^2 + (18.8-13.8)^2} = 5.50 \\
 dpd &= \sqrt{(-0.3+1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.56 \\
 dpe &= \sqrt{(-0.3-0.6)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.56 \\
 dpf &= \sqrt{(-0.3-1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.64 \\
 d'pa &= \sqrt{(-0.3-2)^2 + (18.8+18.8)^2} = 37.67 \\
 d'pb &= \sqrt{(-0.3-2)^2 + (18.8+16.3)^2} = 35.17 \\
 d'pc &= \sqrt{(-0.3-2)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.68 \\
 d'pd &= \sqrt{(-0.3+1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.09 \\
 d'pe &= \sqrt{(-0.3-0.6)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.09 \\
 d'pf &= \sqrt{(-0.3-1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.11
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

แรงดันสนามไฟฟ้าจะได้

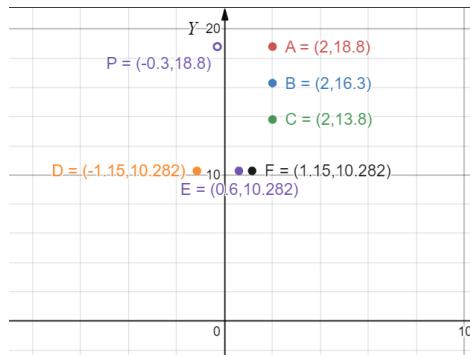
$$\bar{V}_p = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \ln \left(\frac{d'_{pi}}{d_{pi}} \right) \quad (3.25)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\bar{q}_A \ln \left(\frac{d'_{pa}}{d_{pa}} \right) + \bar{q}_B \ln \left(\frac{d'_{pb}}{d_{pb}} \right) + \bar{q}_C \ln \left(\frac{d'_{pc}}{d_{pc}} \right) + \bar{q}_D \ln \left(\frac{d'_{pd}}{d_{pd}} \right) + \bar{q}_E \ln \left(\frac{d'_{pe}}{d_{pe}} \right) + \bar{q}_F \ln \left(\frac{d'_{pf}}{d_{pf}} \right) \right]$$

$$\bar{V} = \frac{10^{-6}}{2\pi\epsilon_0} \left[(0.310 \angle 0.535) \ln \left(\frac{37.67}{2.3} \right) + (0.285 \angle -5.215) \ln \left(\frac{35.17}{3.39} \right) + (0.351 \angle 4.230) \ln \left(\frac{32.68}{5.50} \right) + (0.460 \angle -179.470) \ln \left(\frac{29.09}{8.56} \right) + (0.519 \angle -172.104) \ln \left(\frac{29.09}{8.56} \right) + (0.598 \angle 175.336) \ln \left(\frac{29.11}{8.64} \right) \right]$$

$$\bar{V} = 35.288 \angle -0.2827 KV$$

3.6.3 คำนวณหาแรงดันสนามแม่เหล็ก



รูป 3.29 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเสา SS-TG-2

$$dpa = \sqrt{(-0.3-2)^2 + (18.8-18.8)^2} = 2.3 \quad (3.26)$$

$$dpb = \sqrt{(-0.3-2)^2 + (18.8-16.3)^2} = 3.39$$

$$dpc = \sqrt{(-0.3-2)^2 + (18.8-13.8)^2} = 5.50$$

$$dpd = \sqrt{(-0.3+1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.56$$

$$dpe = \sqrt{(-0.3-0.6)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.56$$

$$dpf = \sqrt{(-0.3-1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.64$$

$$Dpa = \sqrt{(-0.3-2)^2 + (0-18.8)^2} = 18.94$$

$$Dpb = \sqrt{(-0.3-2)^2 + (0-16.3)^2} = 16.46$$

$$Dpc = \sqrt{(-0.3-2)^2 + (0-13.8)^2} = 13.99$$

$$Dpd = \sqrt{(-0.3+1.15)^2 + (0-10.282)^2} = 10.31$$

$$Dpe = \sqrt{(-0.3-0.6)^2 + (0-10.282)^2} = 10.32$$

$$Dpf = \sqrt{(-0.3-1.15)^2 + (0-10.282)^2} = 10.38$$

คำนวณหากระแสไฟฟ้าระบบสายส่ง 115 kV จากข้อมูลหัวข้อ 2.7.2

$$\begin{aligned} I &= \frac{S}{V} \\ I &= \frac{320MVA}{\sqrt{3} \times 115KV} \\ I &= 1606.539A \end{aligned} \quad (3.6)$$

กระแสไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV จากข้อมูลหัวข้อ 2.7.3

$$\begin{aligned} I &= \frac{S}{V} \\ I &= \frac{320MVA}{\sqrt{3} \times 22KV} \\ I &= 8397.822A \end{aligned} \quad (3.27)$$

คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสูตร

$$E_p = 2 \times 10^{-7} \omega \left[\ln \left(\frac{D_{pa}}{d_{pa}} \right) \ln \left(\frac{D_{pb}}{d_{pb}} \right) \ln \left(\frac{D_{pc}}{d_{pc}} \right) \ln \left(\frac{D_{pd}}{d_{pd}} \right) \ln \left(\frac{D_{pe}}{d_{pe}} \right) \ln \left(\frac{D_{pf}}{d_{pf}} \right) \right] \begin{bmatrix} I_a \angle \theta_A \\ I_b \angle \theta_B \\ I_c \angle \theta_C \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

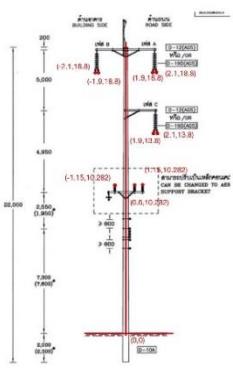
$$E_p = 2 \times 10^{-7} \omega \left[\ln \left(\frac{18.94}{2.3} \right) \ln \left(\frac{18.96}{2.5} \right) \ln \left(\frac{16.46}{3.39} \right) \ln \left(\frac{16.49}{3.53} \right) \ln \left(\frac{13.99}{5.50} \right) \ln \left(\frac{14.02}{5.59} \right) \right] \begin{bmatrix} 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 8397.822 \angle 0^\circ \\ 8397.822 \angle -120^\circ \\ 8397.822 \angle 120^\circ \end{bmatrix}$$

$$E_p = 2 \times 10^{-7} (100\pi) \left[\ln \left(\frac{18.94}{2.3} \right) \ln \left(\frac{16.94}{3.39} \right) \ln \left(\frac{13.99}{5.50} \right) \ln \left(\frac{10.31}{8.56} \right) \ln \left(\frac{10.32}{8.64} \right) \ln \left(\frac{10.38}{8.64} \right) \right] \begin{bmatrix} 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 8397.822 \angle 0^\circ \\ 8397.822 \angle -120^\circ \\ 8397.822 \angle 120^\circ \end{bmatrix}$$

$$E_p = 0.7598 \angle -0.1833V/m$$

$$V_p = E_p l = (0.7598 \angle -0.1833) \times 1 = 0.7598 \angle -0.1833V \quad (3.29)$$

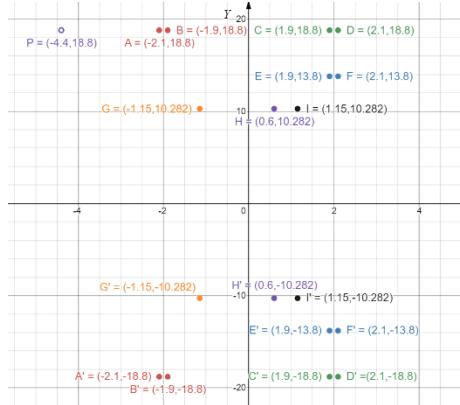
3.7 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรเดี่ยว กับ 22 วงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าคู่สำหรับทางตรงแบบ SD-TG-9



รูป 3.30 กำหนดจุดบนตัวนำของเส้า SD-TG-9

3.7.1 คำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย

$$\begin{aligned}
 d &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\
 d'_{AB} &= \sqrt{(-2.1+1.9)^2 + (18.8+18.8)^2} = 37.60 \\
 d'_{AC} &= \sqrt{(-2.1-1.9)^2 + (18.8+18.8)^2} = 37.81 \\
 d'_{AD} &= \sqrt{(-2.1-2.1)^2 + (18.8+18.8)^2} = 37.83 \\
 d'_{AE} &= \sqrt{(-2.1-1.9)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.84 \\
 d'_{AF} &= \sqrt{(-2.1-2.1)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.86 \\
 d'_{AG} &= \sqrt{(-2.1+1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.09 \\
 d'_{AH} &= \sqrt{(-2.1-0.6)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.20 \\
 d'_{AI} &= \sqrt{(-2.1-1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.26 \\
 d'_{BC} &= \sqrt{(-1.9-1.9)^2 + (18.8+18.8)^2} = 37.79 \\
 d'_{BD} &= \sqrt{(-1.9-2.1)^2 + (18.8+18.8)^2} = 37.81 \\
 d'_{BE} &= \sqrt{(-1.9-1.9)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.82 \\
 d'_{BF} &= \sqrt{(-1.9-2.1)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.84 \\
 d'_{BG} &= \sqrt{(-1.9+1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.09 \\
 d'_{BH} &= \sqrt{(-1.9-0.6)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.18 \\
 d'_{BI} &= \sqrt{(-1.9-1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.24 \\
 d'_{CD} &= \sqrt{(1.9-2.1)^2 + (18.8+18.8)^2} = 37.60 \\
 d'_{CE} &= \sqrt{(1.9-1.9)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.60 \\
 d'_{CF} &= \sqrt{(1.9-2.1)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.60 \\
 d'_{CG} &= \sqrt{(1.9+1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.24 \\
 d'_{CH} &= \sqrt{(1.9-0.6)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.11 \\
 d'_{CI} &= \sqrt{(1.9-1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.09 \\
 d'_{DE} &= \sqrt{(2.1-1.9)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.60 \\
 d'_{DF} &= \sqrt{(2.1-2.1)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.60 \\
 d'_{DG} &= \sqrt{(2.1+1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.26 \\
 d'_{DH} &= \sqrt{(2.1-0.6)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.12 \\
 d'_{DI} &= \sqrt{(2.1-1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.09 \\
 d'_{EF} &= \sqrt{(1.9-2.1)^2 + (13.8+13.8)^2} = 27.60 \\
 d'_{EG} &= \sqrt{(1.9+1.15)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.27 \\
 d'_{EH} &= \sqrt{(1.9-0.6)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.11 \\
 d'_{EI} &= \sqrt{(1.9-1.15)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.09 \\
 d'_{FG} &= \sqrt{(2.1+1.15)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.30 \\
 d'_{FH} &= \sqrt{(2.1-0.6)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.12 \\
 d'_{FI} &= \sqrt{(2.1-1.15)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.10 \\
 d'_{GH} &= \sqrt{(-1.15-0.6)^2 + (10.282+10.282)^2} = 20.63 \\
 d'_{GI} &= \sqrt{(-1.15-1.15)^2 + (10.282+10.282)^2} = 20.69 \\
 d'_{HI} &= \sqrt{(0.6-1.15)^2 + (10.282+10.282)^2} = 20.57
 \end{aligned}$$



รูป 3.31 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเส้า SD-TG-9

$$\begin{aligned}
 d &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\
 d_{AB} &= \sqrt{(-2.1+1.9)^2 + (18.8-18.8)^2} = 0.20 \\
 d_{AC} &= \sqrt{(-2.1-1.9)^2 + (18.8-18.8)^2} = 4.00 \\
 d_{AD} &= \sqrt{(-2.1-2.1)^2 + (18.8-18.8)^2} = 4.20 \\
 d_{AE} &= \sqrt{(-2.1-1.9)^2 + (18.8-13.8)^2} = 6.43 \\
 d_{AF} &= \sqrt{(-2.1-2.1)^2 + (18.8-13.8)^2} = 6.52 \\
 d_{AG} &= \sqrt{(-2.1+1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.57 \\
 d_{AH} &= \sqrt{(-2.1-0.6)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.93 \\
 d_{AI} &= \sqrt{(-2.1-1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.11 \\
 d_{BC} &= \sqrt{(-1.9-1.9)^2 + (18.8-18.8)^2} = 3.80 \\
 d_{BD} &= \sqrt{(-1.9-2.1)^2 + (18.8-18.8)^2} = 4.00 \\
 d_{BE} &= \sqrt{(-1.9-1.9)^2 + (18.8-13.8)^2} = 6.28 \\
 d_{BF} &= \sqrt{(-1.9-2.1)^2 + (18.8-13.8)^2} = 6.40 \\
 d_{BG} &= \sqrt{(-1.9+1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.55 \\
 d_{BH} &= \sqrt{(-1.9-0.6)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.87 \\
 d_{BI} &= \sqrt{(-1.9-1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.04 \\
 d_{CD} &= \sqrt{(1.9-2.1)^2 + (18.8-18.8)^2} = 0.20 \\
 d_{CE} &= \sqrt{(1.9-1.9)^2 + (18.8-13.8)^2} = 5.00 \\
 d_{CF} &= \sqrt{(1.9-2.1)^2 + (18.8-13.8)^2} = 5.00 \\
 d_{CG} &= \sqrt{(1.9+1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.04 \\
 d_{CH} &= \sqrt{(1.9-0.6)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.61 \\
 d_{CI} &= \sqrt{(1.9-1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.55 \\
 d_{DE} &= \sqrt{(2.1-1.9)^2 + (18.8-13.8)^2} = 5.00 \\
 d_{DF} &= \sqrt{(2.1-2.1)^2 + (18.8-13.8)^2} = 5.00 \\
 d_{DG} &= \sqrt{(2.1+1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.11 \\
 d_{DH} &= \sqrt{(2.1-0.6)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.64 \\
 d_{DI} &= \sqrt{(2.1-1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 8.57 \\
 d_{EF} &= \sqrt{(1.9-2.1)^2 + (13.8-13.8)^2} = 0.20 \\
 d_{EG} &= \sqrt{(1.9+1.15)^2 + (13.8-10.282)^2} = 4.65 \\
 d_{EH} &= \sqrt{(1.9-0.6)^2 + (13.8-10.282)^2} = 3.75 \\
 d_{EI} &= \sqrt{(1.9-1.15)^2 + (13.8-10.282)^2} = 3.59 \\
 d_{FG} &= \sqrt{(2.1+1.15)^2 + (13.8-10.282)^2} = 4.78 \\
 d_{FH} &= \sqrt{(2.1-0.6)^2 + (13.8-10.282)^2} = 3.82 \\
 d_{FI} &= \sqrt{(2.1-1.15)^2 + (13.8-10.282)^2} = 3.64 \\
 d_{GH} &= \sqrt{(-1.15-0.6)^2 + (10.282+10.282)^2} = 1.75 \\
 d_{GI} &= \sqrt{(-1.15-1.15)^2 + (10.282+10.282)^2} = 2.30 \\
 d_{HI} &= \sqrt{(0.6-1.15)^2 + (10.282+10.282)^2} = 0.54
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

$$\begin{bmatrix}
\ln\left(\frac{2(18.8)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{37.60}{0.20}\right) & \ln\left(\frac{37.81}{4.00}\right) & \ln\left(\frac{37.83}{4.20}\right) & \ln\left(\frac{32.84}{6.43}\right) & \ln\left(\frac{32.86}{6.52}\right) & \ln\left(\frac{29.09}{8.57}\right) & \ln\left(\frac{29.20}{8.93}\right) & \ln\left(\frac{29.26}{9.11}\right) \\
\ln\left(\frac{37.60}{0.20}\right) & \ln\left(\frac{2(18.8)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{37.49}{3.80}\right) & \ln\left(\frac{37.81}{4.00}\right) & \ln\left(\frac{32.82}{6.28}\right) & \ln\left(\frac{32.84}{6.40}\right) & \ln\left(\frac{29.09}{8.55}\right) & \ln\left(\frac{29.18}{8.87}\right) & \ln\left(\frac{29.24}{9.04}\right) \\
\bar{q}_A & \ln\left(\frac{37.81}{4.00}\right) & \ln\left(\frac{37.49}{3.80}\right) & \ln\left(\frac{2(18.8)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{37.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{29.24}{9.04}\right) & \ln\left(\frac{29.11}{8.61}\right) & \ln\left(\frac{29.09}{8.55}\right) \\
\bar{q}_B & \ln\left(\frac{37.83}{4.20}\right) & \ln\left(\frac{37.81}{4.00}\right) & \ln\left(\frac{37.60}{4.00}\right) & \ln\left(\frac{2(18.8)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{29.26}{9.11}\right) & \ln\left(\frac{29.12}{8.64}\right) & \ln\left(\frac{29.09}{8.57}\right) \\
\bar{q}_C & \ln\left(\frac{32.84}{6.43}\right) & \ln\left(\frac{32.82}{6.28}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{27.60}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{24.27}{4.65}\right) & \ln\left(\frac{24.11}{3.75}\right) & \ln\left(\frac{24.09}{3.59}\right) \\
\bar{q}_D & \ln\left(\frac{32.86}{6.52}\right) & \ln\left(\frac{32.84}{6.40}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{27.60}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{24.30}{4.78}\right) & \ln\left(\frac{24.12}{3.82}\right) & \ln\left(\frac{24.10}{3.64}\right) \\
\bar{q}_E & \ln\left(\frac{29.09}{8.57}\right) & \ln\left(\frac{29.09}{8.55}\right) & \ln\left(\frac{29.24}{9.04}\right) & \ln\left(\frac{29.26}{9.11}\right) & \ln\left(\frac{24.27}{4.65}\right) & \ln\left(\frac{24.30}{4.78}\right) & \ln\left(\frac{20.63}{0.00799}\right) & \ln\left(\frac{20.69}{1.75}\right) \\
\bar{q}_F & \ln\left(\frac{29.20}{8.93}\right) & \ln\left(\frac{29.18}{8.87}\right) & \ln\left(\frac{29.11}{8.61}\right) & \ln\left(\frac{29.12}{8.64}\right) & \ln\left(\frac{24.11}{3.75}\right) & \ln\left(\frac{24.12}{3.82}\right) & \ln\left(\frac{2(10.282)}{0.00799}\right) & \ln\left(\frac{20.57}{0.54}\right) \\
\bar{q}_G & \ln\left(\frac{29.26}{9.11}\right) & \ln\left(\frac{29.24}{9.04}\right) & \ln\left(\frac{29.09}{8.55}\right) & \ln\left(\frac{29.09}{8.57}\right) & \ln\left(\frac{24.10}{3.59}\right) & \ln\left(\frac{24.10}{3.64}\right) & \ln\left(\frac{2(10.282)}{0.00799}\right) & \ln\left(\frac{2(10.282)}{0.00799}\right) \\
& & & & & & & & \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
& & & & & & & & \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
& & & & & & & & \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}}
\end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix}
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}}
\end{bmatrix}$$

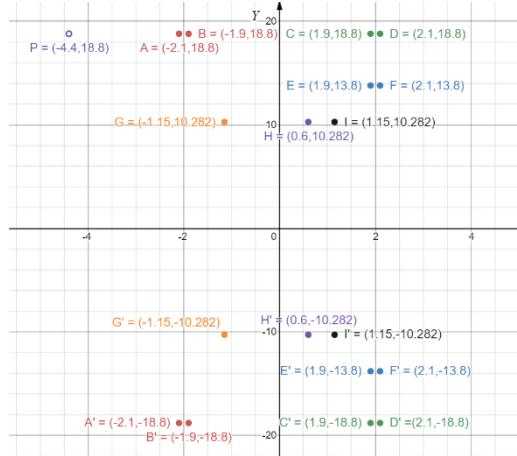
$$\begin{bmatrix}
\bar{q}_A \\
\bar{q}_B \\
\bar{q}_C \\
\bar{q}_D \\
\bar{q}_E \\
\bar{q}_F \\
\bar{q}_G \\
\bar{q}_H \\
\bar{q}_I
\end{bmatrix} = 2\pi\varepsilon_0 \begin{bmatrix}
7.9800 & 5.2300 & 2.2400 & 2.1900 & 1.6300 & 1.6100 & 1.2200 & 1.1800 & 1.1600 \\
5.2300 & 7.9800 & 2.2800 & 2.2400 & 1.6500 & 1.6300 & 1.2200 & 1.1900 & 1.1700 \\
2.2400 & 2.2800 & 7.9800 & 5.2300 & 1.8700 & 1.8700 & 1.8700 & 1.2100 & 1.2200 \\
2.1900 & 2.2400 & 5.2300 & 7.9400 & 1.8700 & 1.8700 & 1.1600 & 1.2100 & 1.2200 \\
1.6300 & 1.6500 & 1.8700 & 1.8700 & 7.9400 & 4.9200 & 1.6500 & 1.8600 & 1.9000 \\
1.6100 & 1.6300 & 1.8700 & 1.8700 & 4.9220 & 7.6700 & 6.2300 & 1.8400 & 1.8900 \\
1.2200 & 1.2200 & 1.8700 & 1.1600 & 1.6500 & 6.2300 & 7.6700 & 2.4600 & 2.1900 \\
1.1800 & 1.1900 & 1.2100 & 1.2100 & 1.8600 & 1.8400 & 2.4600 & 7.6700 & 3.6400 \\
1.1600 & 1.1700 & 1.2200 & 1.2200 & 1.9000 & 1.8900 & 2.1900 & 3.6400 & 7.6700
\end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix}
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}}
\end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\begin{bmatrix}
\bar{q}_A \\
\bar{q}_B \\
\bar{q}_C \\
\bar{q}_D \\
\bar{q}_E \\
\bar{q}_F \\
\bar{q}_G \\
\bar{q}_H \\
\bar{q}_I
\end{bmatrix} = 2\pi\varepsilon_0 \begin{bmatrix}
0.2257 & -0.1374 & -0.0126 & -0.0109 & -0.0069 & -0.0050 & -0.0012 & -0.0045 & -0.0040 \\
-0.1374 & 0.2268 & -0.0139 & -0.0124 & -0.0048 & -0.0102 & 0.0033 & -0.0053 & -0.0044 \\
-0.0126 & -0.0139 & 0.2475 & -0.1530 & -0.0780 & 0.1352 & -0.1326 & 0.0156 & 0.0054 \\
-0.0109 & -0.0124 & -0.1530 & 0.2410 & 0.0469 & -0.1245 & 0.1054 & -0.0199 & -0.0121 \\
-0.0069 & -0.0048 & -0.0780 & 0.0469 & 0.4700 & -0.6511 & 0.4817 & -0.0831 & -0.0474 \\
-0.0049 & -0.0102 & 0.1352 & -0.1245 & -0.6515 & 1.3123 & -0.9979 & 0.1358 & 0.0591 \\
-0.0012 & 0.0033 & -0.1326 & 0.1054 & 0.4820 & -0.9980 & 0.9159 & -0.1356 & -0.0666 \\
-0.0045 & -0.0053 & 0.0156 & -0.0199 & -0.0831 & 0.1358 & -0.1356 & 0.1940 & -0.0641 \\
-0.0040 & -0.0044 & 0.0054 & -0.0121 & -0.0474 & 0.0590 & -0.0666 & -0.0641 & 0.1793
\end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix}
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\
\frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}}
\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}
\bar{q}_A \\
\bar{q}_B \\
\bar{q}_C \\
\bar{q}_D \\
\bar{q}_E \\
\bar{q}_F \\
\bar{q}_G \\
\bar{q}_H \\
\bar{q}_I
\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}
0.189 \angle -0.44 \\
0.180 \angle -0.57 \\
0.169 \angle 4.95 \\
0.176 \angle 4.76 \\
0.224 \angle -3.95 \\
0.225 \angle -3.93 \\
0.697 \angle 178.6 \\
0.681 \angle -176.3 \\
0.766 \angle 173.8
\end{bmatrix} \mu C/m$$

3.7.2 ผลของสนามไฟฟ้า

ตำแหน่งจุด P คือ (-4.4,18.8)



รูป 3.32 กำหนดจุด P ของเสา SD-TG-9

$$\begin{aligned}
 dpa &= \sqrt{(-4.4+2.1)^2 + (18.8-18.8)^2} = 2.30 \\
 dpb &= \sqrt{(-4.4+1.9)^2 + (18.8-18.8)^2} = 2.50 \\
 dpc &= \sqrt{(-4.4-1.9)^2 + (18.8-18.8)^2} = 6.30 \\
 dpd &= \sqrt{(-4.4-2.1)^2 + (18.8-18.8)^2} = 6.50 \\
 dpe &= \sqrt{(-4.4-1.9)^2 + (18.8-13.8)^2} = 8.04 \\
 dpf &= \sqrt{(-4.4-2.1)^2 + (18.8-13.8)^2} = 8.20 \\
 dpq &= \sqrt{(-4.4+1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.11 \\
 dph &= \sqrt{(-4.4-0.6)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.87 \\
 dpi &= \sqrt{(-4.4-1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 10.16 \\
 d'pa &= \sqrt{(-4.4+2.1)^2 + (18.8+18.8)^2} = 37.67 \\
 d'pb &= \sqrt{(-4.4+1.9)^2 + (18.8+18.8)^2} = 37.68 \\
 d'pc &= \sqrt{(-4.4-1.9)^2 + (18.8+18.8)^2} = 38.12 \\
 d'pd &= \sqrt{(-4.4-2.1)^2 + (18.8+18.8)^2} = 38.15 \\
 d'pe &= \sqrt{(-4.4-1.9)^2 + (18.8+13.8)^2} = 33.20 \\
 d'pf &= \sqrt{(-4.4-2.1)^2 + (18.8+13.8)^2} = 33.24 \\
 d'pg &= \sqrt{(-4.4+1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.26 \\
 d'ph &= \sqrt{(-4.4-0.6)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.50 \\
 d'pi &= \sqrt{(-4.4-1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.60
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

แรงดันสนามไฟฟ้าจะได้

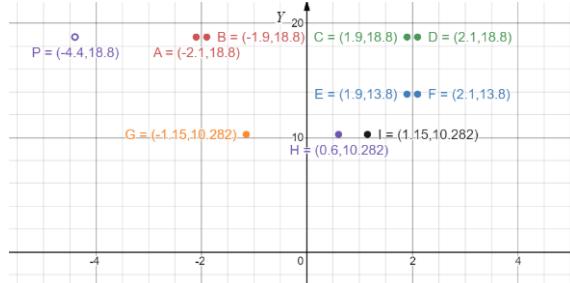
$$\bar{V}_p = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \ln \left(\frac{d'_{pi}}{d_{pi}} \right)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\bar{q}_A \ln \left(\frac{d'_{pa}}{d_{pa}} \right) + \bar{q}_B \ln \left(\frac{d'_{pb}}{d_{pb}} \right) + \bar{q}_C \ln \left(\frac{d'_{pc}}{d_{pc}} \right) + \bar{q}_D \ln \left(\frac{d'_{pd}}{d_{pd}} \right) + \bar{q}_E \ln \left(\frac{d'_{pe}}{d_{pe}} \right) + \bar{q}_F \ln \left(\frac{d'_{pf}}{d_{pf}} \right) + \bar{q}_G \ln \left(\frac{d'_{pg}}{d_{pg}} \right) + \bar{q}_H \ln \left(\frac{d'_{ph}}{d_{ph}} \right) + \bar{q}_I \ln \left(\frac{d'_{pi}}{d_{pi}} \right) \right] \quad (3.33)$$

$$\bar{V} = \frac{10^{-6}}{2\pi\epsilon_0} \left[(0.189\angle -0.44) \ln \left(\frac{37.67}{2.3} \right) + (0.180\angle -0.57) \ln \left(\frac{37.68}{2.50} \right) + (0.169\angle 4.95) \ln \left(\frac{38.12}{6.30} \right) \right. \\ \left. + (0.176\angle 4.76) \ln \left(\frac{38.15}{6.50} \right) + (0.224\angle -3.95) \ln \left(\frac{33.20}{8.04} \right) + (0.225\angle -3.93) \ln \left(\frac{33.24}{8.20} \right) \right. \\ \left. + (0.697\angle 178.6) \ln \left(\frac{29.26}{9.11} \right) + (0.681\angle -176.3) \ln \left(\frac{29.50}{9.87} \right) + (0.766\angle 173.8) \ln \left(\frac{29.60}{10.16} \right) \right]$$

$$\bar{V} = 35.990\angle 0.125KV$$

3.7.3 คำนวณหาแรงดันสนามแม่เหล็ก



รูป 3-33 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเส้า SD-TG-9

$$dpa = \sqrt{(-4.4+2.1)^2 + (18.8-18.8)^2} = 2.30$$

$$dpb = \sqrt{(-4.4+1.9)^2 + (18.8-18.8)^2} = 2.50$$

$$dpc = \sqrt{(-4.4-1.9)^2 + (18.8-18.8)^2} = 6.30$$

$$dpd = \sqrt{(-4.4-2.1)^2 + (18.8-18.8)^2} = 6.50$$

$$dpe = \sqrt{(-4.4-1.9)^2 + (18.8-13.8)^2} = 8.04$$

$$dpf = \sqrt{(-4.4-2.1)^2 + (18.8-13.8)^2} = 8.20$$

$$dpg = \sqrt{(-4.4+1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.11$$

$$dph = \sqrt{(-4.4-0.6)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.87$$

$$dpi = \sqrt{(-4.4-1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 10.16$$

$$Dpa = \sqrt{(-4.4+2.1)^2 + (0-18.8)^2} = 18.94 \quad (3.34)$$

$$Dpb = \sqrt{(-4.4+1.9)^2 + (0-18.8)^2} = 18.96$$

$$Dpc = \sqrt{(-4.4-1.9)^2 + (0-18.8)^2} = 19.82$$

$$Dpd = \sqrt{(-4.4-2.1)^2 + (0-18.8)^2} = 19.89$$

$$Dpe = \sqrt{(-4.4-1.9)^2 + (0-13.8)^2} = 15.17$$

$$Dpf = \sqrt{(-4.4-2.1)^2 + (0-13.8)^2} = 15.25$$

$$Dpg = \sqrt{(-4.4+1.15)^2 + (0-10.282)^2} = 10.78$$

$$Dph = \sqrt{(-4.4-0.6)^2 + (0-10.282)^2} = 11.43$$

$$Dpi = \sqrt{(-4.4-1.15)^2 + (0-10.282)^2} = 11.68$$

คำนวณหากระแสไฟฟ้าระบบสายส่ง 115 kV จากข้อมูลหัวข้อ 2.7.2

$$\begin{aligned} I &= \frac{S}{V} \\ I &= \frac{320MVA}{\sqrt{3} \times 115KV} \\ I &= 1606.539A \end{aligned} \quad (3.6)$$

กระแสไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV จากข้อมูลหัวข้อ 2.7.3

$$\begin{aligned} I &= \frac{S}{V} \\ I &= \frac{320MVA}{\sqrt{3} \times 22KV} \\ I &= 8397.822A \end{aligned} \quad (3.27)$$

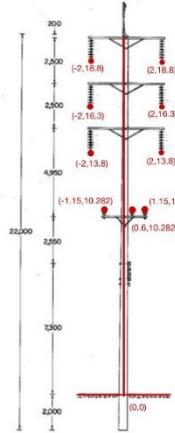
คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสูตร

$$\begin{aligned} E_p &= 2 \times 10^{-7} \omega \left[\ln\left(\frac{D_{pa}}{d_{pa}}\right) \ln\left(\frac{D_{pb}}{d_{pb}}\right) \ln\left(\frac{D_{pc}}{d_{pc}}\right) \ln\left(\frac{D_{pd}}{d_{pe}}\right) \ln\left(\frac{D_{pe}}{d_{pe}}\right) \ln\left(\frac{D_{pf}}{d_{pg}}\right) \ln\left(\frac{D_{pg}}{d_{ph}}\right) \ln\left(\frac{D_{ph}}{d_{pi}}\right) \right] \begin{bmatrix} I_a \angle \theta_A \\ I_b \angle \theta_B \\ I_c \angle \theta_C \end{bmatrix} \\ E_p &= 2 \times 10^{-7} \omega \left[\ln\left(\frac{18.94}{2.30}\right) \ln\left(\frac{18.96}{2.50}\right) \ln\left(\frac{19.82}{6.30}\right) \ln\left(\frac{19.89}{6.50}\right) \ln\left(\frac{15.17}{8.04}\right) \ln\left(\frac{15.25}{8.20}\right) \ln\left(\frac{10.78}{9.11}\right) \ln\left(\frac{11.43}{9.87}\right) \ln\left(\frac{11.68}{10.16}\right) \right] \begin{bmatrix} 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 8397.822 \angle 0^\circ \\ 8397.822 \angle -120^\circ \\ 8397.822 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \\ E_p &= 2 \times 10^{-7} (100\pi) \left[\ln\left(\frac{18.94}{2.30}\right) \ln\left(\frac{18.96}{2.50}\right) \ln\left(\frac{19.82}{6.30}\right) \ln\left(\frac{19.89}{6.50}\right) \ln\left(\frac{15.17}{8.04}\right) \ln\left(\frac{15.25}{8.20}\right) \ln\left(\frac{10.78}{9.11}\right) \ln\left(\frac{11.43}{9.87}\right) \ln\left(\frac{11.68}{10.16}\right) \right] \begin{bmatrix} 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 8397.822 \angle 0^\circ \\ 8397.822 \angle -120^\circ \\ 8397.822 \angle 120^\circ \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.35)$$

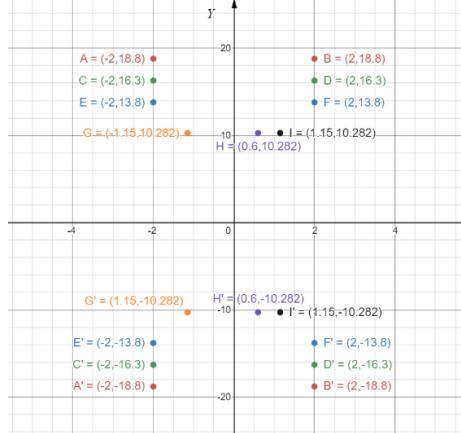
$$E_p = 1.115 \angle 0.158V/m$$

$$V_p = E_p l = (1.115 \angle 0.158) \times 1 = 1.115 \angle 0.158V \quad (3.36)$$

3.8 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำระบบสายส่งแบบผสม 115 kV วงจรคู่ กับ 22 วงจรเดี่ยวสำหรับทางตรงแบบ DS-TG-1



รูป 3.34 กำหนดจุดบนตัวนำของเส้า DS-TG-1



รูป 3.35 กำหนดจุดด้วยวิธี Image Charge ของเส้า DS-TG-1

3.8.1 คำนวณหาประจุไฟฟ้าต่อหน่วย

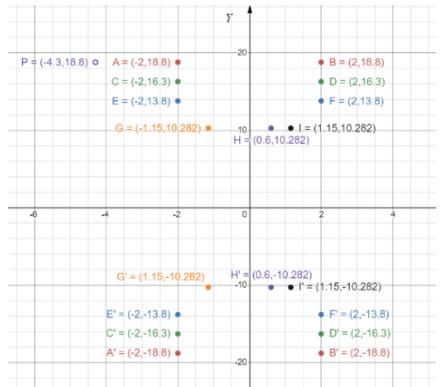
$$\begin{aligned}
 d &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\
 d'_{AB} &= \sqrt{(-2-2)^2 + (18.8+18.8)^2} = 37.81 \\
 d'_{AC} &= \sqrt{(-2+2)^2 + (18.8+16.3)^2} = 35.10 \\
 d'_{AD} &= \sqrt{(-2-2)^2 + (18.8+16.3)^2} = 35.32 \\
 d'_{AE} &= \sqrt{(-2+2)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.60 \\
 d'_{AF} &= \sqrt{(-2-2)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.84 \\
 d'_{AG} &= \sqrt{(-2+1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.09 \\
 d'_{AH} &= \sqrt{(-2-0.6)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.19 \\
 d'_{AI} &= \sqrt{(-2-1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.25 \\
 d'_{AJ} &= \sqrt{(2+2)^2 + (18.8+16.3)^2} = 35.32 \\
 d'_{BD} &= \sqrt{(2-2)^2 + (18.8+16.3)^2} = 35.10 \\
 d'_{BE} &= \sqrt{(2+2)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.84 \\
 d'_{BF} &= \sqrt{(2-2)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.60 \\
 d'_{BG} &= \sqrt{(2+1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.25 \\
 d'_{BH} &= \sqrt{(2-0.6)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.11 \\
 d'_{BI} &= \sqrt{(2-1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.09 \\
 d'_{CD} &= \sqrt{(-2-2)^2 + (16.3+16.3)^2} = 32.84 \\
 d'_{CE} &= \sqrt{(-2+2)^2 + (16.3+13.8)^2} = 30.10 \\
 d'_{CF} &= \sqrt{(-2-2)^2 + (16.3+13.8)^2} = 30.36 \\
 d'_{CG} &= \sqrt{(-2+1.15)^2 + (16.3+10.282)^2} = 26.59 \\
 d'_{CH} &= \sqrt{(-2-0.6)^2 + (16.3+10.282)^2} = 26.70 \\
 d'_{CI} &= \sqrt{(-2-1.15)^2 + (16.3+10.282)^2} = 26.76 \\
 d'_{DE} &= \sqrt{(2+2)^2 + (16.3+13.8)^2} = 30.36 \\
 d'_{DF} &= \sqrt{(2-2)^2 + (16.3+13.8)^2} = 30.10 \\
 d'_{DG} &= \sqrt{(2+1.15)^2 + (16.3+10.282)^2} = 26.76 \\
 d'_{DH} &= \sqrt{(2-0.6)^2 + (16.3+10.282)^2} = 26.61 \\
 d'_{DI} &= \sqrt{(2-1.15)^2 + (16.3+10.282)^2} = 26.59 \\
 d'_{EF} &= \sqrt{(-2-2)^2 + (13.8+13.8)^2} = 27.88 \\
 d'_{EG} &= \sqrt{(-2+1.15)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.09 \\
 d'_{EH} &= \sqrt{(-2-0.6)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.22 \\
 d'_{EI} &= \sqrt{(-2-1.15)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.28 \\
 d'_{FG} &= \sqrt{(2+1.15)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.28 \\
 d'_{FH} &= \sqrt{(2-0.6)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.12 \\
 d'_{FI} &= \sqrt{(2-1.15)^2 + (13.8+10.282)^2} = 24.09 \\
 d'_{GH} &= \sqrt{(-1.15-0.6)^2 + (10.282+10.282)^2} = 20.63 \\
 d'_{GI} &= \sqrt{(-1.15-1.15)^2 + (10.282+10.282)^2} = 20.69 \\
 d'_{HI} &= \sqrt{(0.6-1.15)^2 + (10.282+10.282)^2} = 20.57
 \end{aligned} \tag{3.37}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E = 2\pi\varepsilon_0 \begin{bmatrix} \ln\left(\frac{2(18.8)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{37.81}{4.00}\right) & \ln\left(\frac{35.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{35.32}{4.71}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{32.84}{6.40}\right) & \ln\left(\frac{29.09}{8.56}\right) & \ln\left(\frac{29.19}{8.90}\right) & \ln\left(\frac{29.25}{9.08}\right) \\ \ln\left(\frac{37.81}{4.00}\right) & \ln\left(\frac{2(18.8)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{35.32}{4.71}\right) & \ln\left(\frac{35.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{32.84}{6.40}\right) & \ln\left(\frac{32.60}{5.00}\right) & \ln\left(\frac{29.25}{9.08}\right) & \ln\left(\frac{29.11}{8.63}\right) & \ln\left(\frac{29.09}{8.56}\right) \\ \ln\left(\frac{35.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{35.32}{4.71}\right) & \ln\left(\frac{2(16.3)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{32.84}{4.00}\right) & \ln\left(\frac{30.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{30.32}{4.70}\right) & \ln\left(\frac{26.59}{6.07}\right) & \ln\left(\frac{26.70}{6.55}\right) & \ln\left(\frac{27.76}{6.79}\right) \\ \ln\left(\frac{35.32}{4.71}\right) & \ln\left(\frac{35.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{32.84}{4.00}\right) & \ln\left(\frac{2(16.3)}{0.0506}\right) & \ln\left(\frac{30.36}{4.71}\right) & \ln\left(\frac{30.10}{2.50}\right) & \ln\left(\frac{26.76}{6.79}\right) & \ln\left(\frac{26.61}{6.17}\right) & \ln\left(\frac{26.59}{6.07}\right) \\ \bar{q}_F \\ \bar{q}_G \\ \bar{q}_H \\ \bar{q}_I \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E = 2\pi\varepsilon_0 \begin{bmatrix} 7.9800 & 2.2400 & 2.6400 & 2.0100 & 1.8700 & 1.6300 & 1.2200 & 1.1800 & 0.8500 \\ 2.2400 & 7.9800 & 2.0100 & 2.6400 & 1.6300 & 1.8700 & 1.1600 & 1.2100 & 1.2200 \\ 2.6400 & 2.0100 & 7.8400 & 2.1000 & 2.4800 & 1.8600 & 1.4700 & 1.4000 & 1.4000 \\ 2.0100 & 2.6400 & 2.1000 & 7.8400 & 8.1600 & 2.4800 & 1.3700 & 1.4600 & 1.4700 \\ 1.8700 & 1.6300 & 2.4800 & 8.1600 & 7.6700 & 1.9400 & 1.8900 & 1.7100 & 1.6300 \\ 1.6300 & 1.8700 & 1.8600 & 2.4800 & 1.9400 & 7.6700 & 1.6300 & 1.8500 & 1.8900 \\ 1.2200 & 1.1600 & 1.4700 & 1.3700 & 1.8900 & 1.6300 & 7.8500 & 2.4600 & 2.1900 \\ 1.1800 & 1.2100 & 1.4000 & 1.4600 & 1.7100 & 1.8500 & 2.4600 & 7.8500 & 3.6400 \\ 0.8500 & 1.2200 & 1.4000 & 1.4700 & 1.6300 & 1.8900 & 2.1900 & 3.6400 & 7.8500 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \\ \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E = 2\pi\varepsilon_0 \begin{bmatrix} 0.1518 & -0.0265 & -0.0354 & -0.0016 & -0.0132 & -0.0115 & -0.0064 & -0.0067 & 0.0047 \\ -0.0265 & 0.1290 & -0.0053 & 0.1241 & -0.1447 & -0.0283 & 0.0063 & 0.0003 & -0.0045 \\ -0.0354 & -0.0053 & 0.1520 & -0.0898 & 0.0658 & -0.0082 & -0.0157 & -0.0073 & -0.0095 \\ -0.0016 & 0.1241 & -0.0898 & -0.8894 & 0.9624 & 0.0637 & -0.0769 & -0.0305 & -0.0161 \\ -0.0132 & -0.1447 & 0.0658 & 0.9624 & -0.8812 & -0.0871 & 0.0643 & 0.0224 & 0.0076 \\ -0.0082 & -0.0283 & -0.0082 & 0.0637 & -0.0871 & 0.1512 & -0.0059 & -0.0116 & -0.0161 \\ -0.0152 & -0.0769 & 0.0643 & -0.0059 & -0.1452 & -0.0313 & -0.0210 & -0.0161 & -0.0161 \\ -0.0064 & 0.0063 & -0.0157 & -0.0769 & 0.0643 & -0.0059 & 0.1452 & -0.0313 & -0.0210 \\ -0.0067 & 0.0003 & -0.0073 & -0.0305 & 0.0224 & -0.0116 & -0.0313 & 0.1736 & -0.0659 \\ 0.0047 & -0.0045 & -0.0095 & -0.0161 & 0.0076 & -0.0161 & -0.0210 & -0.0659 & 0.1710 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{115 \times 10^3 \angle 120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{22 \times 10^3 \angle 0^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \\ \frac{22 \times 10^3 \angle -120^\circ}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \\ \bar{q}_A \\ \bar{q}_B \\ \bar{q}_C \\ \bar{q}_D \\ \bar{q}_E = \mu C / m \\ \bar{q}_F \\ \bar{q}_G \\ \bar{q}_H \\ \bar{q}_I & \begin{bmatrix} 0.213 \angle -0.96 \\ 0.214 \angle -0.96 \\ 0.196 \angle 7.47 \\ 0.196 \angle 7.45 \\ 0.273 \angle -5.30 \\ 0.274 \angle -5.30 \\ 0.113 \angle 178.77 \\ 0.910 \angle -177.23 \\ 0.953 \angle 175.24 \end{bmatrix} \end{array} \quad (3.38)$$

3.8.2 ผลของสนาณไฟฟ้า

ตัวแหน่งจุด P คือ (-4.3,18.8)



รูป 3.36 กำหนดจุด P ของเสา DS-TG-1

$$\begin{aligned}
 dpa &= \sqrt{(-4.3+2)^2 + (18.8-18.8)^2} = 2.30 \\
 dpb &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (18.8-18.8)^2} = 6.30 \\
 dpc &= \sqrt{(-4.3+2)^2 + (18.8-16.3)^2} = 3.39 \\
 dpd &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (18.8-16.3)^2} = 6.77 \\
 dpe &= \sqrt{(-4.3+2)^2 + (18.8-13.8)^2} = 5.50 \\
 dpf &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (18.8-13.8)^2} = 8.04 \\
 dpg &= \sqrt{(-4.3+1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.08 \\
 dph &= \sqrt{(-4.3-0.6)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.82 \\
 dpi &= \sqrt{(-4.3-1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 10.11 \\
 d' pa &= \sqrt{(-4.3+2)^2 + (18.8+18.8)^2} = 37.67 \\
 d' pb &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (18.8+18.8)^2} = 38.12 \\
 d' pc &= \sqrt{(-4.3+2)^2 + (18.8+16.3)^2} = 35.17 \\
 d' pd &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (18.8+16.3)^2} = 35.66 \\
 d' pe &= \sqrt{(-4.3+2)^2 + (18.8+13.8)^2} = 32.68 \\
 d' pf &= \sqrt{(-4.3-2)^2 + (18.8+13.8)^2} = 33.20 \\
 d' pg &= \sqrt{(-4.3+1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.25 \\
 d' ph &= \sqrt{(-4.3-0.6)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.49 \\
 d' pi &= \sqrt{(-4.3-1.15)^2 + (18.8+10.282)^2} = 29.58
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

แรงดันสนามไฟฟ้าจะได้

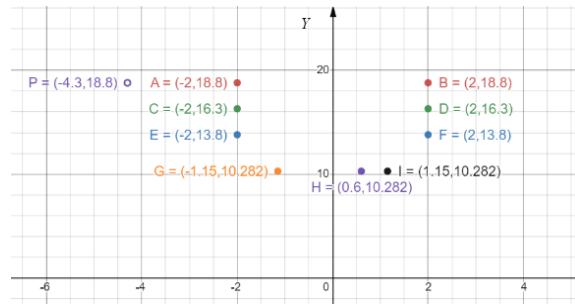
$$\bar{V}_p = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \bar{q}_i \ln \left(\frac{d'_{pi}}{d_{pi}} \right) \quad (3.40)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[\bar{q}_A \ln \left(\frac{d'_{pa}}{d_{pa}} \right) + \bar{q}_B \ln \left(\frac{d'_{pb}}{d_{pb}} \right) + \bar{q}_C \ln \left(\frac{d'_{pc}}{d_{pc}} \right) + \bar{q}_D \ln \left(\frac{d'_{pd}}{d_{pd}} \right) + \bar{q}_E \ln \left(\frac{d'_{pe}}{d_{pe}} \right) + \bar{q}_F \ln \left(\frac{d'_{pf}}{d_{pf}} \right) + \bar{q}_G \ln \left(\frac{d'_{pg}}{d_{pg}} \right) + \bar{q}_H \ln \left(\frac{d'_{ph}}{d_{ph}} \right) + \bar{q}_I \ln \left(\frac{d'_{pi}}{d_{pi}} \right) \right]$$

$$\bar{V} = \frac{10^{-6}}{2\pi\epsilon_0} \left[(0.213\angle -0.96) \ln \left(\frac{37.67}{2.3} \right) + (0.214\angle -0.96) \ln \left(\frac{38.12}{6.30} \right) + (0.196\angle 7.47) \ln \left(\frac{35.17}{3.39} \right) + (0.196\angle 7.45) \ln \left(\frac{35.66}{6.77} \right) + (0.273\angle -5.30) \ln \left(\frac{32.68}{5.50} \right) + (0.274\angle -5.30) \ln \left(\frac{33.20}{8.04} \right) + (0.113\angle 178.77) \ln \left(\frac{29.25}{9.08} \right) + (0.910\angle -177.23) \ln \left(\frac{29.49}{9.82} \right) + (0.953\angle 175.24) \ln \left(\frac{29.58}{10.11} \right) \right]$$

$$\bar{V} = 41.917\angle 0.289KV$$

3.8.3 คำนวณหาแรงดันสนามแม่เหล็ก



รูป 3.37 คำนวณพารามิเตอร์ใน superposition theorem ของเส้น DS-TG-1

$$dpa = \sqrt{(-4.3+2)^2 + (18.8-18.8)^2} = 2.30$$

$$dpb = \sqrt{(-4.3-2)^2 + (18.8-18.8)^2} = 6.30$$

$$dpc = \sqrt{(-4.3+2)^2 + (18.8-16.3)^2} = 3.39$$

$$dpd = \sqrt{(-4.3-2)^2 + (18.8-16.3)^2} = 6.77$$

$$dpe = \sqrt{(-4.3+2)^2 + (18.8-13.8)^2} = 5.50$$

$$dpf = \sqrt{(-4.3-2)^2 + (18.8-13.8)^2} = 8.04$$

$$dpq = \sqrt{(-4.3+1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.08$$

$$dph = \sqrt{(-4.3-0.6)^2 + (18.8-10.282)^2} = 9.82$$

$$dpi = \sqrt{(-4.3-1.15)^2 + (18.8-10.282)^2} = 10.11$$

$$Dpa = \sqrt{(-4.3+2)^2 + (0-18.8)^2} = 18.94$$

$$Dpb = \sqrt{(-4.3-2)^2 + (0-18.8)^2} = 19.82$$

$$Dpc = \sqrt{(-4.3+2)^2 + (0-16.3)^2} = 16.46$$

$$Dpd = \sqrt{(-4.3-2)^2 + (0-16.3)^2} = 17.47$$

$$Dpe = \sqrt{(-4.3+2)^2 + (0-13.8)^2} = 13.99$$

$$Dpf = \sqrt{(-4.3-2)^2 + (0-13.8)^2} = 15.17$$

$$Dpq = \sqrt{(-4.3+1.15)^2 + (0-10.282)^2} = 10.75$$

$$Dph = \sqrt{(-4.3-0.6)^2 + (0-10.282)^2} = 11.38$$

$$Dpi = \sqrt{(-4.3-1.15)^2 + (0-10.282)^2} = 11.63$$
(3.41)

คำนวณหากระแสไฟฟ้าระบบสายส่ง 115 kV จากข้อมูลหัวข้อ 2.7.2

$$\begin{aligned} I &= \frac{S}{V} \\ I &= \frac{320MVA}{\sqrt{3} \times 115KV} \\ I &= 1606.539A \end{aligned} \quad (3.6)$$

กระแสไฟฟ้าระบบจำหน่าย 22 kV จากข้อมูลหัวข้อ 2.7.3

$$\begin{aligned} I &= \frac{S}{V} \\ I &= \frac{320MVA}{\sqrt{3} \times 22KV} \\ I &= 8397.822A \end{aligned} \quad (3.27)$$

คำนวณหาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสูตร

$$E_p = 2 \times 10^{-7} \omega \left[\ln\left(\frac{D_{pa}}{d_{pa}}\right) \ln\left(\frac{D_{pb}}{d_{pb}}\right) \ln\left(\frac{D_{pc}}{d_{pc}}\right) \ln\left(\frac{D_{pd}}{d_{pe}}\right) \ln\left(\frac{D_{pf}}{d_{pe}}\right) \ln\left(\frac{D_{pg}}{d_{pg}}\right) \ln\left(\frac{D_{ph}}{d_{ph}}\right) \ln\left(\frac{D_{pi}}{d_{pi}}\right) \right] \begin{bmatrix} I_a \angle \theta_A \\ I_b \angle \theta_B \\ I_c \angle \theta_C \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$E_p = 2 \times 10^{-7} \omega \left[\ln\left(\frac{37.67}{2.30}\right) \ln\left(\frac{38.12}{6.30}\right) \ln\left(\frac{35.17}{3.39}\right) \ln\left(\frac{35.66}{6.77}\right) \ln\left(\frac{32.68}{5.50}\right) \ln\left(\frac{33.20}{8.04}\right) \ln\left(\frac{29.25}{9.08}\right) \ln\left(\frac{29.49}{9.82}\right) \ln\left(\frac{29.58}{10.11}\right) \right] \begin{bmatrix} 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 8397.822 \angle 0^\circ \\ 8397.822 \angle -120^\circ \\ 8397.822 \angle 120^\circ \end{bmatrix}$$

$$E_p = 2 \times 10^{-7} (100\pi) \left[\ln\left(\frac{37.67}{2.30}\right) \ln\left(\frac{38.12}{6.30}\right) \ln\left(\frac{35.17}{3.39}\right) \ln\left(\frac{35.66}{6.77}\right) \ln\left(\frac{32.68}{5.50}\right) \ln\left(\frac{33.20}{8.04}\right) \ln\left(\frac{29.25}{9.08}\right) \ln\left(\frac{29.49}{9.82}\right) \ln\left(\frac{29.58}{10.11}\right) \right] \begin{bmatrix} 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle 0^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle -120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 1606.539 \angle 120^\circ \\ 8397.822 \angle 0^\circ \\ 8397.822 \angle -120^\circ \\ 8397.822 \angle 120^\circ \end{bmatrix}$$

$$E_p = 1.117 \angle 0.172V/m$$

$$V_p = E_p l = (1.117 \angle 0.172) \times 1 = 1.117 \angle 0.172V \quad (3.42)$$

3.9 การเขียนโปรแกรมเพื่ocomputation แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยววนิม

จากการศึกษาการคำนวณแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยววนิม จากระบบส่งจ่ายไฟฟ้ารูปแบบต่างๆของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค พบร่วมความยุ่งยากในการคำนวณในแต่ละจุดสูง และใช้เวลาในการคำนวณนาน จึงเขียนโปรแกรมขึ้นเพื่อคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยววนิมให้สะดวกและง่ายต่อการคำนวณโดยมีโค้ดคร่าวๆดังนี้

```

1 from icecream import ic
2 import numpy as np
3 import pandas as pd
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import seaborn as sns
6 from itertools import combinations
7 from tqdm import tqdm
8
9
10 def pol2cart(r, theta): # define function polar form <--> cartesian
11     z = r * np.exp(1j * (theta * np.pi / 180))
12     x, y = z.real, z.imag
13     return complex(x, y)
14
15
16 def cart2pol(x, y):
17     z = x + y * 1j
18     r, theta_rad = np.abs(z), np.angle(z)
19     theta = theta_rad * 180 / np.pi
20     return r, theta
21
22
23 def cal_distance(Xa, Xb, Ya, Yb): # *function find Distance between 2 point
24     distance = np.sqrt((Xa - Xb) ** 2 + (Ya - Yb) ** 2)
25     return distance
26

```

รูป 3.38 แสดงการใช้คำสั่ง Import Library

บรรทัดที่ 1-7 คือการ Import Library ที่จำเป็นต้องใช้

บรรทัดที่ 10-13 เป็นฟังก์ชันในการเปลี่ยนจาก polar form เป็น cartesian form

บรรทัดที่ 16-20 เป็นฟังก์ชันในการเปลี่ยนจาก cartesian form เป็น polar form

บรรทัดที่ 23-25 เป็นฟังก์ชันในการคำนวณระยะห่างระหว่างจุด 2 จุด

```

28 def calculate(xp, yp, obj_size):
29     with np.errstate(divide='ignore', invalid='ignore'):
30         if case == 1:
31             (xa, ya) = (2.05, 18.8)
32             (xb, yb) = (2.05, 16.3)
33             (xc, yc) = (2.05, 13.8)
34             (r_a, theta_a) = (115000, 0)
35             (r_b, theta_b) = (115000, -120)
36             (r_c, theta_c) = (115000, 120)
37             conductor = ('a', 'b', 'c')
38             comb = combinations([conductor[i] for i in range(len(conductor))], 2)
39             distant, distantp, vphase, iphase = {}, {}, {}, {}, {}
40
41             for i in list(comb):
42                 key = str(i[0]) + str(i[1])
43                 distant[key] = cal_distance(varsO['x' + i[0]], varsO['y' + i[0]], varsO['y' + i[1]], varsO['y' + i[1]])
44                 distantp[key] = cal_distance(varsO['x' + i[0]], varsO['x' + i[1]], varsO['y' + i[0]], -varsO['y' + i[1]])
45             for i in conductor:
46                 key = str('p' + i)
47                 distant[key] = cal_distance(xp, varsO['x' + i], yp, varsO['y' + i])
48                 distantp[key] = cal_distance(xp, varsO['x' + i], yp, -varsO['y' + i])
49                 distantD[key] = cal_distance(xp, varsO['x' + i], 0, varsO['y' + i])
50                 vphase[i] = pol2cart(varsO['x' + i], np.radians(varsO['theta' + i]))
51                 iphase[i] = pol2cart(line_current_115, np.radians(varsO['theta' + i]))
52
53             v_complex = np.array([[np.divide(vphase['a'], np.sqrt(3)), [np.divide(vphase['b'], np.sqrt(3))]],
54                                   [np.divide(vphase['c'], np.sqrt(3))]]]
55             Matrix = np.array([
56                 [[np.log(2 * np.divide(ya, r_115)), np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab']))],
57                  [np.log(np.divide(distantp['ac'], distant['ac']))],
58                  [np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab']))], np.log(2 * np.divide(yb, r_115)),
59                  [np.log(np.divide(distantp['bc'], distant['bc']))],
60                  [np.log(np.divide(distantp['ac'], distant['ac']))], np.log(np.divide(distantp['bc'], distant['bc']))],
61                  [np.log(2 * np.divide(yc, r_115))]],
62                  q_cart = (2 * np.pi * EPSILON_0) * np.matmul(np.linalg.inv(Matrix), v_complex)
63                  vpe = np.divide(((q_cart[0] * np.log(np.divide(distantp['pa'], distant['pa'])))) +
64                               (q_cart[1] * np.log(np.divide(distantp['pb'], distant['pb'])))) +
65                               (q_cart[2] * np.log(np.divide(distantp['pc'], distant['pc']))), (2 * np.pi * EPSILON_0))
66                  i_complex = np.array([[iphase['a']], [iphase['b']], [iphase['c']]])
67                  SuperPosition = np.array([[np.log(np.divide(distantp['pa'], distant['pa'])),
68                                         np.log(np.divide(distantp['pb'], distant['pb']))),
69                                         np.log(np.divide(distantp['pc'], distant['pc']))]])
69                  matrix2 = np.matmul(SuperPosition, i_complex)
70                  ep = 2 * (10 ** -7) * 100 * np.pi * matrix2
71                  vpm = ep * obj_size
72                  vp = vpm + vpe
73                  (vp, VI) = cart2pol(np.real(vp), np.imag(vp))
74                  return round(VP[0][0], 2)
75
76

```

รูป 3.39 แสดงการใช้คำสั่งในการเปลี่ยนจาก polar form เป็น cartesian form

3.9.1 ฟังก์ชันในการคำนวณ

โดยฟังก์ชันในการคำนวณจะเป็นการกำหนดให้รับค่า case เข้ามาว่าเป็นรูปแบบเส้น直ด้านโดยแบ่งตัวอย่างรูปแบบเส้าได้ดังนี้

3.9.1.1 เสารูปแบบ SS-TG-2

บรรทัดที่ 31-36 จะทำการกำหนด ตำแหน่ง ศักย์ไฟฟ้าและมุมไฟฟ้าของสายตัวนำ

บรรทัดที่ 37-51 จะทำการคำนวณระยะห่างระหว่างจุดแต่ละจุดแบบไม่ซ้ำกัน (combination) และทำการกำหนดค่า V และ I ของแต่ละเฟลสลงในเมทริกซ์

บรรทัดที่ 53-62 ทำการกำหนดค่าต่างๆเพื่อใช้ในการคำนวณหาประจุต่อน้ำในบรรทัดที่ 62

บรรทัดที่ 62-65 ทำการคำนวณค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำอันเนื่องมาจากผลของ
สนามไฟฟ้า

บรรทัดที่ 66-72 ทำการกำหนดค่าต่างๆและคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำอัน
เนื่องมาจากผลของสนามแม่เหล็ก

บรรทัดที่ 73-75 ทำการนำผลของทั้งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมารวมกันแล้วจึงส่ง
ค่ากลับ

เขียนโปรแกรมในการคำนวณซึ่งในเสาแต่ละรูปแบบ

3.9.1.2 เสารูปแบบ SS-TG-8

```

81     if case == 2: # case 2: 115kv L1 R2
82         (xa, ya) = (-2, 15.1)
83         (xb, yb) = (2, 15.1)
84         (xc, yc) = (2, 12.6)
85         (r_a, theta_a) = (115000, 0)
86         (r_b, theta_b) = (115000, -120)
87         (r_c, theta_c) = (115000, 120)
88         conductor = ('a', 'b', 'c')
89         comb = combinations([conductor[i] for i in range(len(conductor))], 2)
90         distant, distantp, distantD, vphase, iphase = {}, {}, {}, {}, {}
91
92         for i in list(comb):
93             key = str(str(i[0]) + str(i[1]))
94             distant[key] = cal_distance(varsO['x' + i[0]], varsO['x' + i[1]], varsO['y' + i[0]], varsO['y' + i[1]])
95             distantp[key] = cal_distance(varsO['x' + i[0]], varsO['x' + i[1]], varsO['y' + i[0]], -varsO['y' + i[1]])
96         for i in conductor:
97             key = str('p' + i)
98             distantp[key] = cal_distance(xp, varsO['x' + i], yp, varsO['y' + i])
99             distantD[key] = cal_distance(xp, varsO['x' + i], 0, varsO['y' + i])
100            distantD[key] = cal_distance(xp, varsO['x' + i], 0, varsO['y' + i])
101            vphase[i] = pol2cart(varsO['x' + i], np.radians(varsO['theta_' + i]))
102            iphase[i] = pol2cart(line_current_115, np.radians(varsO['theta_' + i]))
103
104            v_complex = np.array([[np.divide(vphase['a'], np.sqrt(3))], [np.divide(vphase['b'], np.sqrt(3))],
105                                  [np.divide(vphase['c'], np.sqrt(3))]])
106            Matrix = np.array(
107                [[np.log(2 * np.divide(ya, r_115)), np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
108                 np.log(np.divide(distantp['ac'], distant['ac']))],
109                 [np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])), np.log(2 * np.divide(yb, r_115)),
110                  np.log(np.divide(distantp['bc'], distant['bc']))],
111                 [np.log(np.divide(distantp['ac'], distant['ac'])), np.log(np.divide(distantp['bc'], distant['bc'])),
112                  np.log(2 * np.divide(yc, r_115))]])
113            q_cart = (2 * np.pi * EPSILON_0) * np.matmul(np.linalg.inv(Matrix), v_complex)
114            vpe = np.divide(((q_cart[0] * np.log(np.divide(distantp['pa'], distant['pa'])))) +
115                            (q_cart[1] * np.log(np.divide(distantp['pb'], distant['pb'])))) +
116                            (q_cart[2] * np.log(np.divide(distantp['pc'], distant['pc']))), (2 * np.pi * EPSILON_0))
117            i_complex = np.array([[iphase['a'], iphase['b'], iphase['c']]])
118            SuperPosition = np.array([[np.log(np.divide(distantD['pa'], distant['pa'])),
119                                      np.log(np.divide(distantD['pb'], distant['pb'])),
120                                      np.log(np.divide(distantD['pc'], distant['pc']))]])
121            matrix2 = np.matmul(SuperPosition, i_complex)
122            ep = 2 * (10 ** -7) * 100 * np.pi * matrix2
123            vpm = ep * obj_size
124            vp = vpm + vpe
125            (VP, VI) = cart2pol(np.real(vp), np.imag(vp))
126            return round(VP[0][0], 2)
127
128

```

รูป 3.40 แสดงชุดข้อมูลคำสั่งในการเก็บค่าที่ได้จากการคำนวณของเสารูปแบบ SS-TG-8

3.9.1.3 เสารูปแบบ SD-TG-3

```

128 if case == 3: # case 3: 115kv R3 Bundle
129     (xa, ya) = (1.95, 18.0)
130     (xb, yb) = (2.15, 18.0)
131     (xc, yc) = (1.95, 16.3)
132     (xd, yd) = (2.15, 16.3)
133     (xe, ye) = (1.95, 13.8)
134     (xf, yf) = (2.15, 13.8)
135     (x_a, theta_a) = (115000, 0)
136     (x_b, theta_b) = (115000, 0)
137     (x_c, theta_c) = (115000, 120)
138     (x_d, theta_d) = (115000, 120)
139     (x_e, theta_e) = (115000, -120)
140     (x_f, theta_f) = (115000, -120)
141     conductor = ('a', 'b', 'c', 'd', 'e', 'f')
142     comb = combinations([conductor[i] for i in range(len(conductor))], 2)
143     distant, distantD, vphase, iphase = {}, {}, {}, {}, {}
144     for i in list(comb):
145         key = str(i[0]) + str(i[1])
146         distant[key] = cal_distance(vars()['x' + i[0]], vars()['y' + i[0]], vars()['x' + i[1]], vars()['y' + i[1]])
147         distantD[key] = cal_distance(vars()['x' + i[0]], vars()['y' + i[1]], vars()['x' + i[0]], vars()['y' + i[1]])
148         distantp[key] = cal_distance(vars()['x' + i[0]], vars()['y' + i[1]], vars()['x' + i[0]], vars()['y' + i[1]])
149
150     for i in conductor:
151         key = str('p' + i)
152         distant[key] = cal_distance(xp, vars()['x' + i], yp, vars()['y' + i])
153         distantp[key] = cal_distance(xp, vars()['x' + i], yp, -vars()['y' + i])
154         distantD[key] = cal_distance(xp, vars()['x' + i], 0, vars()['y' + i])
155         vphase[i] = pol2cart(vars()['x' + i], np.radians(vars()['theta_' + i]))
156         iphase[i] = pol2cart(line_current_115, np.radians(vars()['theta_' + i]))
157
158     v_complex = np.array([[np.divide(vphase['a'], np.sqrt(3)), [np.divide(vphase['b'], np.sqrt(3))], [np.divide(vphase['c'], np.sqrt(3))], [np.divide(vphase['d'], np.sqrt(3))], [np.divide(vphase['e'], np.sqrt(3))], [np.divide(vphase['f'], np.sqrt(3))]]]
159
160     Matrix = np.array([[np.log(2 * np.divide(ya, gm_r115)), np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])), np.log(np.divide(distantp['ac'], distant['ac'])), np.log(np.divide(distantp['ad'], distant['ad'])), np.log(np.divide(distantp['ae'], distant['ae'])), np.log(np.divide(distantp['af'], distant['af'])), [np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])), np.log(2 * np.divide(yb, gm_r115)), np.log(np.divide(distantp['bc'], distant['bc'])), np.log(np.divide(distantp['bd'], distant['bd'])), np.log(np.divide(distantp['be'], distant['be'])), np.log(np.divide(distantp['bf'], distant['bf']))], [np.log(np.divide(distantp['ac'], distant['ac'])), np.log(np.divide(distantp['bc'], distant['bc'])), np.log(2 * np.divide(yc, gm_r115)), np.log(np.divide(distantp['cd'], distant['cd'])), np.log(np.divide(distantp['ce'], distant['ce'])), np.log(np.divide(distantp['cf'], distant['cf'])), [np.log(np.divide(distantp['ad'], distant['ad'])), np.log(np.divide(distantp['bd'], distant['bd'])), np.log(np.divide(distantp['cd'], distant['cd'])), np.log(2 * np.divide(ye, gm_r115)), np.log(np.divide(distantp['de'], distant['de'])), np.log(np.divide(distantp['df'], distant['df'])), [np.log(np.divide(distantp['ae'], distant['ae'])), np.log(np.divide(distantp['be'], distant['be'])), np.log(np.divide(distantp['ce'], distant['ce'])), np.log(np.divide(distantp['de'], distant['de'])), np.log(2 * np.divide(yf, gm_r115))], q_cart = (2 * np.pi * EPSILON_0) * np.matmul(np.linalg.inv(Matrix), v_complex)
198     vpe = np.divide(((q_cart[0] * np.log(np.divide(distantp['pa'], distant['pa'])) + q_cart[1] * np.log(np.divide(distantp['pb'], distant['pb']))) + q_cart[2] * np.log(np.divide(distantp['pc'], distant['pc']))) + q_cart[3] * np.log(np.divide(distantp['pd'], distant['pd']))) + q_cart[4] * np.log(np.divide(distantp['pe'], distant['pe']))) + q_cart[5] * np.log(np.divide(distantp['pf'], distant['pf']))), (2 * np.pi * EPSILON_0))
199     i_complex = np.array([[[iphase['a']], [[iphase['b']], [[iphase['c']], [[iphase['d']], [[iphase['e']], [[iphase['f']]]]]]]])
200     SuperPosition = np.array([[np.log(np.divide(distantD['pa'], distant['pa'])), np.log(np.divide(distantD['pb'], distant['pb'])), np.log(np.divide(distantD['pc'], distant['pc'])), np.log(np.divide(distantD['pd'], distant['pd'])), np.log(np.divide(distantD['pe'], distant['pe'])), np.log(np.divide(distantD['pf'], distant['pf']))]])
201
202     matrix2 = np.matmul(SuperPosition, i_complex)
203     ep = 2 * (10 ** -7) * 100 * np.pi * matrix2
204     vpm = ep * obj_size
205     vp = vpm + vpe
206     (vp, vi) = cart2pol(np.real(vp), np.imag(vp))
207     return round(vp[0][0], 2)
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219

```

รูป 3.41 แสดงชุดข้อมูลคำสั่งในการเก็บค่าที่ได้จากการคำนวณของเสารูปแบบ SD-TG-3

3.9.1.4 เสารูปแบบ SS-TG-3

```

220     if case == 4: # case 4: 115kv R3 +22kv
221         (xa, ya) = (2, 18.8)
222         (xb, yb) = (2, 16.3)
223         (xc, yc) = (2, 13.8)
224         (xd, yd) = (-1.13, 10.282)
225         (xe, ye) = (0.6, 10.282)
226         (xf, yf) = (1.15, 10.282)
227         (r_a, theta_a) = (115000, 0)
228         (r_b, theta_b) = (115000, -120)
229         (r_c, theta_c) = (115000, 120)
230         (r_d, theta_d) = (22000, 0)
231         (r_e, theta_e) = (22000, -120)
232         (r_f, theta_f) = (22000, 120)
233         conductor = ('a', 'b', 'c', 'd', 'e', 'f')
234         comb = combinations([conductor[i] for i in range(len(conductor))], 2)
235         distant, distantp, distantD, vphase, iphase = {}, {}, {}, {}, {}
236         for i in list(comb):
237             key = str(str(i[0]) + str(i[1]))
238             distant[key] = cal_distance(vars()['x' + i[0]], vars()['y' + i[1]], vars()['y' + i[0]],
239                                         vars()['y' + i[1]])
240             distantp[key] = cal_distance(vars()['x' + i[0]], vars()['x' + i[1]], vars()['y' + i[0]],
241                                         - vars()['y' + i[1]])
242         for i in conductor:
243             key = str('p' + i)
244             distant[key] = cal_distance(xp, vars()['x' + i], yp, vars()['y' + i])
245             distantp[key] = cal_distance(xp, vars()['x' + i], yp, - vars()['y' + i])
246             distantD[key] = cal_distance(xp, vars()['x' + i], 0, vars()['y' + i])
247             vphase[i] = pol2cart(vars()['x' + i], np.radians(vars()['theta_' + i]))
248             if i in ('a', 'b', 'c'):
249                 iphase[i] = pol2cart(line_current_115, np.radians(vars()['theta_' + i]))
250             if i in ('d', 'e', 'f'):
251                 iphase[i] = pol2cart(line_current_22, np.radians(vars()['theta_' + i]))
252
253         v_complex = np.array([[np.divide(vphase['a'], np.sqrt(3)), [np.divide(vphase['b'], np.sqrt(3)),
254                               [np.divide(vphase['c'], np.sqrt(3)),
255                                 [np.divide(vphase['d'], np.sqrt(3)), [np.divide(vphase['e'], np.sqrt(3)),
256                                   [np.divide(vphase['f'], np.sqrt(3))]]]]]
257         Matrix = np.array([[np.log(2 * np.divide(ya, x_115)), np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
258                           np.log(np.divide(distantp['ac'], distant['ac'])), np.log(np.divide(distantp['ad'], distant['ad'])),
259                           np.log(np.divide(distantp['ae'], distant['ae'])), np.log(np.divide(distantp['af'], distant['af'])),
260                           [np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])), np.log(2 * np.divide(yb, x_115)),
261                             np.log(np.divide(distantp['bc'], distant['bc'])), np.log(np.divide(distantp['bd'], distant['bd'])),
262                             np.log(np.divide(distantp['be'], distant['be'])), np.log(np.divide(distantp['bf'], distant['bf'])),
263                             [np.log(np.divide(distantp['ac'], distant['ac'])), np.log(np.divide(distantp['bc'], distant['bc'])),
264                               np.log(2 * np.divide(ye, x_115)), np.log(np.divide(distantp['cd'], distant['cd'])),
265                               np.log(np.divide(distantp['ce'], distant['ce'])), np.log(np.divide(distantp['cf'], distant['cf'])),
266                               [np.log(np.divide(distantp['ad'], distant['ad'])), np.log(np.divide(distantp['bd'], distant['bd'])),
267                                 np.log(np.divide(distantp['cd'], distant['cd'])), np.log(2 * np.divide(yd, x_22)),
268                                 np.log(np.divide(distantp['de'], distant['de'])), np.log(np.divide(distantp['df'], distant['df'])),
269                                 [np.log(np.divide(distantp['ae'], distant['ae'])), np.log(np.divide(distantp['be'], distant['be'])),
270                                   np.log(np.divide(distantp['ce'], distant['ce'])), np.log(np.divide(distantp['de'], distant['de'])),
271                                   np.log(2 * np.divide(ye, x_22)), np.log(np.divide(distantp['ef'], distant['ef'])),
272                                   [np.log(np.divide(distantp['af'], distant['af'])), np.log(np.divide(distantp['bf'], distant['bf'])),
273                                     np.log(np.divide(distantp['cf'], distant['cf'])), np.log(np.divide(distantp['df'], distant['df'])),
274                                     np.log(np.divide(distantp['ef'], distant['ef'])), np.log(2 * np.divide(yf, x_22))]]]
275         q_cart = 2 * np.pi * EPSILON_0 * np.matmul(np.linalg.inv(Matrix), v_complex)
276         vpe = np.divide(((q_cart[0] * np.log(np.divide(distantp['pa'], distant['pa'])) +
277                         q_cart[1] * np.log(np.divide(distantp['pb'], distant['pb']))) + (
278                         q_cart[2] * np.log(np.divide(distantp['pc'], distant['pc']))) + (
279                         q_cart[3] * np.log(np.divide(distantp['pd'], distant['pd']))) + (
280                         q_cart[4] * np.log(np.divide(distantp['pe'], distant['pe']))) + (
281                         q_cart[5] * np.log(np.divide(distantp['pf'], distant['pf']))), (2 * np.pi * EPSILON_0))
282         i_complex = np.array(
283             [[iphase['a'], [iphase['b'], [iphase['c'], [iphase['d'], [iphase['e'], [iphase['f']]]]]]
284             SuperPosition = np.array([[np.log(np.divide(distantD['pa'], distant['pa'])),
285                                       np.log(np.divide(distantD['pb'], distant['pb'])),
286                                       np.log(np.divide(distantD['pc'], distant['pc'])),
287                                       np.log(np.divide(distantD['pd'], distant['pd'])),
288                                       np.log(np.divide(distantD['pe'], distant['pe'])),
289                                       np.log(np.divide(distantD['pf'], distant['pf']))]])
290         matrix2 = np.matmul(SuperPosition, i_complex)
291         ep = 2 * (10 ** -7) * 100 * np.pi * matrix2
292         vpm = ep * obj_size
293         vp = vpm + vpe
294         (VP, VI) = cart2pol(np.real(vp), np.imag(vp))
295         return round(VP[0][0], 2)
296

```

รูป 3.42 แสดงชุดข้อมูลคำสั่งในการเก็บค่าที่ได้จากการคำนวณของเสารูปแบบ SS-TG-3

3.9.1.5 เสารูปแบบ SD-TG-9

```

297     if case == 5: # case 5: 115kv Double Circuit RI+L2 + 22kv
298         (x_a, ya) = (-2.1, 18.8)
299         (x_b, yb) = (-1.9, 18.8)
300         (x_c, yc) = (1.9, 18.8)
301         (x_d, yd) = (1.9, 18.8)
302         (x_e, ye) = (1.9, 18.8)
303         (x_f, xf) = (2.1, 18.8)
304         (x_g, yg) = (-1.15, 10.282)
305         (x_h, yh) = (0.6, 10.282)
306         (x_i, yi) = (1.15, 10.282)
307         (x_a, theta_a) = (115000, 0)
308         (x_b, theta_b) = (115000, 0)
309         (x_c, theta_c) = (115000, 120)
310         (x_d, theta_d) = (115000, 120)
311         (x_e, theta_e) = (115000, -120)
312         (x_f, theta_f) = (115000, -120)
313         (x_g, theta_g) = (22000, 0)
314         (x_h, theta_h) = (22000, -120)
315         (x_i, theta_i) = (22000, 120)
316         conductor = ('a', 'b', 'c', 'd', 'e', 'f', 'g', 'h', 'i')
317         comb = combinations([conductor[i] for i in range(len(conductor))], 2)
318         distances, distantp, vphase, iphase = [0, 0, 0, 0, 0]
319         for i in combinations:
320             key = str(i[0]) + str(i[1])
321             distant[key] = cal_distance(varsO['x' + i[0]], varsO['x' + i[1]], varsO['y' + i[0]], varsO['y' + i[1]])
322             distant0[key] = cal_distance(varsO['x' + i[0]], varsO['x' + i[1]], 0, varsO['y' + i[1]])
323             vphase[i] = pol2cart(varsO['x' + i[0]], np.radians(varsO['theta' + i[1]]))
324             if i in ('a', 'b', 'c', 'd', 'e', 'f'):
325                 iphase[i] = pol2cart(line_current_115, np.radians(varsO['theta' + i[1]]))
326             if i in ('g', 'h', 'i'):
327                 iphase[i] = pol2cart(line_current_22, np.radians(varsO['theta' + i[1]]))
328             v_complex = np.array(([np.divide(vphase['a'], np.sqrt(3))), np.divide(vphase['b'], np.sqrt(3))),
329                                 [np.divide(vphase['c'], np.sqrt(3)), np.divide(vphase['d'], np.sqrt(3))],
330                                 [np.divide(vphase['e'], np.sqrt(3)), np.divide(vphase['f'], np.sqrt(3))],
331                                 [np.divide(vphase['g'], np.sqrt(3)), np.divide(vphase['h'], np.sqrt(3))],
332                                 [np.divide(vphase['i'], np.sqrt(3))]))
333             Matrix = np.array([np.log(2 * np.divide(ya, r_115)), np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
334                               np.log(np.divide(distantp['ac'], distant['ac'])), np.log(np.divide(distantp['ad'], distant['ad'])),
335                               np.log(np.divide(distantp['ae'], distant['ae'])), np.log(np.divide(distantp['af'], distant['af'])),
336                               np.log(np.divide(distantp['ag'], distant['ag'])), np.log(np.divide(distantp['ah'], distant['ah'])),
337                               np.log(np.divide(distantp['ai'], distant['ai'])),
338                               (np.log(2 * np.divide(yb, r_115)), np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
339                               np.log(np.divide(distantp['bc'], distant['bc'])), np.log(np.divide(distantp['cd'], distant['cd'])),
340                               np.log(np.divide(distantp['ce'], distant['ce'])), np.log(np.divide(distantp['de'], distant['de'])),
341                               np.log(np.divide(distantp['eg'], distant['eg'])), np.log(np.divide(distantp['eh'], distant['eh'])),
342                               np.log(np.divide(distantp['eg'], distant['eg'])), np.log(np.divide(distantp['gh'], distant['gh'])),
343                               np.log(np.divide(distantp['gi'], distant['gi'])),
344                               (np.log(2 * np.divide(yb, r_115)), np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
345                               np.log(np.divide(distantp['bc'], distant['bc'])), np.log(np.divide(distantp['bd'], distant['bd'])),
346                               np.log(np.divide(distantp['be'], distant['be'])), np.log(np.divide(distantp['bf'], distant['bf'])),
347                               np.log(np.divide(distantp['bg'], distant['bg'])), np.log(np.divide(distantp['bh'], distant['bh'])),
348                               np.log(np.divide(distantp['bi'], distant['bi'])),
349                               (np.log(2 * np.divide(yc, r_115)), np.log(np.divide(distantp['bc'], distant['bc'])),
350                               np.log(np.divide(distantp['ca'], distant['ca'])), np.log(np.divide(distantp['cd'], distant['cd'])),
351                               np.log(np.divide(distantp['ce'], distant['ce'])), np.log(np.divide(distantp['cf'], distant['cf'])),
352                               np.log(np.divide(distantp['cg'], distant['cg'])), np.log(np.divide(distantp['ch'], distant['ch'])),
353                               np.log(np.divide(distantp['ci'], distant['ci'])),
354                               (np.log(2 * np.divide(yd, r_115)), np.log(np.divide(distantp['ad'], distant['ad'])),
355                               np.log(np.divide(distantp['bd'], distant['bd'])), np.log(np.divide(distantp['cd'], distant['cd'])),
356                               np.log(np.divide(distantp['de'], distant['de'])), np.log(np.divide(distantp['df'], distant['df'])),
357                               np.log(np.divide(distantp['dg'], distant['dg'])), np.log(np.divide(distantp['dh'], distant['dh'])),
358                               np.log(np.divide(distantp['di'], distant['di'])),
359                               (np.log(2 * np.divide(ye, r_115)), np.log(np.divide(distantp['ae'], distant['ae'])),
360                               np.log(np.divide(distantp['be'], distant['be'])), np.log(np.divide(distantp['de'], distant['de'])),
361                               np.log(2 * np.divide(ye, r_115)), np.log(np.divide(distantp['ef'], distant['ef'])),
362                               np.log(np.divide(distantp['eg'], distant['eg'])), np.log(np.divide(distantp['eh'], distant['eh'])),
363                               np.log(np.divide(distantp['ei'], distant['ei'])),
364                               (np.log(2 * np.divide(yf, r_115)), np.log(np.divide(distantp['af'], distant['af'])),
365                               np.log(np.divide(distantp['cf'], distant['cf'])), np.log(np.divide(distantp['df'], distant['df'])),
366                               np.log(np.divide(distantp['ef'], distant['ef'])), np.log(2 * np.divide(yf, r_115)),
367                               np.log(np.divide(distantp['gf'], distant['gf'])), np.log(np.divide(distantp['hf'], distant['hf'])),
368                               np.log(np.divide(distantp['if'], distant['if'])),
369                               (np.log(2 * np.divide(yg, r_115)), np.log(np.divide(distantp['bg'], distant['bg'])),
370                               np.log(np.divide(distantp['cg'], distant['cg'])), np.log(np.divide(distantp['dg'], distant['dg'])),
371                               np.log(np.divide(distantp['eg'], distant['eg'])), np.log(np.divide(distantp['fg'], distant['fg'])),
372                               np.log(2 * np.divide(yg, r_22)), np.log(np.divide(distantp['gh'], distant['gh'])),
373                               np.log(np.divide(distantp['hg'], distant['hg'])),
374                               (np.log(2 * np.divide(yh, r_115)), np.log(np.divide(distantp['bh'], distant['bh'])),
375                               np.log(np.divide(distantp['ch'], distant['ch'])), np.log(np.divide(distantp['dh'], distant['dh'])),
376                               np.log(np.divide(distantp['eh'], distant['eh'])), np.log(np.divide(distantp['fh'], distant['fh'])),
377                               np.log(np.divide(distantp['ih'], distant['ih'])),
378                               (np.log(2 * np.divide(yi, r_115)), np.log(np.divide(distantp['ai'], distant['ai'])),
379                               np.log(np.divide(distantp['ci'], distant['ci'])), np.log(np.divide(distantp['di'], distant['di'])),
380                               np.log(np.divide(distantp['ei'], distant['ei'])), np.log(np.divide(distantp['fi'], distant['fi'])),
381                               np.log(np.divide(distantp['gi'], distant['gi'])), np.log(np.divide(distantp['hi'], distant['hi'])),
382                               np.log(2 * np.divide(yi, r_22))),
383             q_cart = 2 * np.pi * EPSILON_0 * np.matmul(np.linalg.inv(Matrix), v_complex)
384             vpe = np.divide((q_cart[0] * np.log(np.divide(distantp['pa'], distant['pa'])) +
385                             (q_cart[1] * np.log(np.divide(distantp['pb'], distant['pb']))) +
386                             (q_cart[2] * np.log(np.divide(distantp['pc'], distant['pc']))) +
387                             (q_cart[3] * np.log(np.divide(distantp['pd'], distant['pd']))) +
388                             (q_cart[4] * np.log(np.divide(distantp['pe'], distant['pe']))) +
389                             (q_cart[5] * np.log(np.divide(distantp['pf'], distant['pf']))) +
390                             (q_cart[6] * np.log(np.divide(distantp['pg'], distant['pg']))) +
391                             (q_cart[7] * np.log(np.divide(distantp['ph'], distant['ph']))) +
392                             (q_cart[8] * np.log(np.divide(distantp['pi'], distant['pi']))), (2 * np.pi * EPSILON_0))
393             i_complex = np.array([[iphase['a'], iphase['b'], iphase['c'], iphase['d'], iphase['e'],
394                                   iphase['f'], iphase['g'], iphase['h'], iphase['i']]])
395             SuperPosition = np.array([[np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
396                                       np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
397                                       np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
398                                       np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
399                                       np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
400                                       np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
401                                       np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
402                                       np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
403                                       np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab'])),
404                                       np.log(np.divide(distantp['ab'], distant['ab']))])
405             matrix2 = np.matmul(SuperPosition, i_complex)
406             ep = 2 * (10 ** -7) * 100 * np.pi * matrix2
407             vpm = ep * obj_size
408             vp = vpm + vpe
409             (vp, Vt) = cart2pol(np.real(vp), np.imag(vp))
410             return round(vp[0][0], 2)

```

รูป 3.43 แสดงชุดข้อมูลคำสั่งในการเก็บค่าที่ได้จากการคำนวณของเสารูปแบบ SD-TG-9

3.9.1.6 เสารูปแบบ DS-TG-1

```

132     if case == 6: # case 6: 115kv Double Circuit + 22kv
133         (x0, y0) = (-2, 18.8)
134         (x0, y0) = (2, 18.8)
135         (x0, y0) = (-2, 16.3)
136         (x0, y0) = (2, 16.3)
137         (x0, y0) = (-2, 13.8)
138         (x0, y0) = (2, 13.8)
139         (x0, y0) = (-1.15, 10.282)
140         (x0, y0) = (0.6, 10.282)
141         (x0, y0) = (1.15, 10.282)
142         (x0, y0) = (0.6, 10.282)
143         (x0, y0) = (1.15, 10.282)
144         (x0, y0) = (115000, 0)
145         (x0, theta_0) = (115000, 120)
146         (x0, theta_0) = (115000, 120)
147         (x0, theta_0) = (115000, -120)
148         (x0, theta_0) = (115000, -120)
149         (x0, theta_0) = (22000, 0)
150         (x0, theta_0) = (22000, -120)
151         (x0, theta_0) = (22000, 120)
152         conductor = ('a', 'b', 'c', 'd', 'e', 'f', 'g', 'h', 'i')
153         comb = combinations([conductor], 2)
154         distant, distantp, distantD, vphase, iphase = {}, {}, {}, {}
155         for i in comb:
156             key = str(i[0]) + str(i[1])
157             distant[key] = cal_distance(varsO['x' + i[0]], varsO['y' + i[0]], varsO['x' + i[1]], varsO['y' + i[1]])
158             distantp[key] = cal_distance(varsO['x' + i[0]], varsO['y' + i[0]], varsO['x' + i[1]], varsO['y' + i[1]], varsO['y' + i[1]])
159             distantD[key] = cal_distance(varsO['x' + i[0]], varsO['y' + i[0]], 0, varsO['y' + i[1]])
160             vphase[i] = polarcar((varsO['x' + i[0]], varsO['y' + i[0]]), [theta_0, 0])
161             iphase[i] = polarcar((varsO['x' + i[0]], varsO['y' + i[0]]), [theta_0, np.pi])
162             if 'i' in (a, b, c, d, e, f):
163                 iphase[i] = iphase[i] + np.radians(varsO['theta_a' + i[1]])
164             if 'i' in (g, h, i):
165                 iphase[i] = iphase[i] + np.radians(varsO['theta_b' + i[1]])
166             if 'i' in (a, b, c, d, e, f, g, h):
167                 iphase[i] = iphase[i] + np.radians(varsO['theta_c' + i[1]])
168             v_complex = np.array([[np.divide(vphase[i[0]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[0]], np.sqrt(3))],
169                                 [np.divide(vphase[i[1]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[1]], np.sqrt(3))],
170                                 [np.divide(vphase[i[2]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[2]], np.sqrt(3))],
171                                 [np.divide(vphase[i[3]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[3]], np.sqrt(3))],
172                                 [np.divide(vphase[i[4]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[4]], np.sqrt(3))],
173                                 [np.divide(vphase[i[5]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[5]], np.sqrt(3))],
174                                 [np.divide(vphase[i[6]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[6]], np.sqrt(3))],
175                                 [np.divide(vphase[i[7]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[7]], np.sqrt(3))],
176                                 [np.divide(vphase[i[8]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[8]], np.sqrt(3))],
177                                 [np.divide(vphase[i[9]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[9]], np.sqrt(3))],
178                                 [np.divide(vphase[i[10]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[10]], np.sqrt(3))],
179                                 [np.divide(vphase[i[11]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[11]], np.sqrt(3))],
180                                 [np.divide(vphase[i[12]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[12]], np.sqrt(3))],
181                                 [np.divide(vphase[i[13]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[13]], np.sqrt(3))],
182                                 [np.divide(vphase[i[14]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[14]], np.sqrt(3))],
183                                 [np.divide(vphase[i[15]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[15]], np.sqrt(3))],
184                                 [np.divide(vphase[i[16]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[16]], np.sqrt(3))],
185                                 [np.divide(vphase[i[17]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[17]], np.sqrt(3))],
186                                 [np.divide(vphase[i[18]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[18]], np.sqrt(3))],
187                                 [np.divide(vphase[i[19]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[19]], np.sqrt(3))],
188                                 [np.divide(vphase[i[20]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[20]], np.sqrt(3))],
189                                 [np.divide(vphase[i[21]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[21]], np.sqrt(3))],
190                                 [np.divide(vphase[i[22]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[22]], np.sqrt(3))],
191                                 [np.divide(vphase[i[23]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[23]], np.sqrt(3))],
192                                 [np.divide(vphase[i[24]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[24]], np.sqrt(3))],
193                                 [np.divide(vphase[i[25]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[25]], np.sqrt(3))],
194                                 [np.divide(vphase[i[26]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[26]], np.sqrt(3))],
195                                 [np.divide(vphase[i[27]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[27]], np.sqrt(3))],
196                                 [np.divide(vphase[i[28]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[28]], np.sqrt(3))],
197                                 [np.divide(vphase[i[29]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[29]], np.sqrt(3))],
198                                 [np.divide(vphase[i[30]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[30]], np.sqrt(3))],
199                                 [np.divide(vphase[i[31]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[31]], np.sqrt(3))],
200                                 [np.divide(vphase[i[32]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[32]], np.sqrt(3))],
201                                 [np.divide(vphase[i[33]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[33]], np.sqrt(3))],
202                                 [np.divide(vphase[i[34]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[34]], np.sqrt(3))],
203                                 [np.divide(vphase[i[35]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[35]], np.sqrt(3))],
204                                 [np.divide(vphase[i[36]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[36]], np.sqrt(3))],
205                                 [np.divide(vphase[i[37]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[37]], np.sqrt(3))],
206                                 [np.divide(vphase[i[38]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[38]], np.sqrt(3))],
207                                 [np.divide(vphase[i[39]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[39]], np.sqrt(3))],
208                                 [np.divide(vphase[i[40]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[40]], np.sqrt(3))],
209                                 [np.divide(vphase[i[41]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[41]], np.sqrt(3))],
210                                 [np.divide(vphase[i[42]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[42]], np.sqrt(3))],
211                                 [np.divide(vphase[i[43]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[43]], np.sqrt(3))],
212                                 [np.divide(vphase[i[44]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[44]], np.sqrt(3))],
213                                 [np.divide(vphase[i[45]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[45]], np.sqrt(3))],
214                                 [np.divide(vphase[i[46]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[46]], np.sqrt(3))],
215                                 [np.divide(vphase[i[47]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[47]], np.sqrt(3))],
216                                 [np.divide(vphase[i[48]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[48]], np.sqrt(3))],
217                                 [np.divide(vphase[i[49]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[49]], np.sqrt(3))],
218                                 [np.divide(vphase[i[50]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[50]], np.sqrt(3))],
219                                 [np.divide(vphase[i[51]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[51]], np.sqrt(3))],
220                                 [np.divide(vphase[i[52]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[52]], np.sqrt(3))],
221                                 [np.divide(vphase[i[53]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[53]], np.sqrt(3))],
222                                 [np.divide(vphase[i[54]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[54]], np.sqrt(3))],
223                                 [np.divide(vphase[i[55]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[55]], np.sqrt(3))],
224                                 [np.divide(vphase[i[56]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[56]], np.sqrt(3))],
225                                 [np.divide(vphase[i[57]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[57]], np.sqrt(3))],
226                                 [np.divide(vphase[i[58]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[58]], np.sqrt(3))],
227                                 [np.divide(vphase[i[59]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[59]], np.sqrt(3))],
228                                 [np.divide(vphase[i[60]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[60]], np.sqrt(3))],
229                                 [np.divide(vphase[i[61]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[61]], np.sqrt(3))],
230                                 [np.divide(vphase[i[62]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[62]], np.sqrt(3))],
231                                 [np.divide(vphase[i[63]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[63]], np.sqrt(3))],
232                                 [np.divide(vphase[i[64]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[64]], np.sqrt(3))],
233                                 [np.divide(vphase[i[65]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[65]], np.sqrt(3))],
234                                 [np.divide(vphase[i[66]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[66]], np.sqrt(3))],
235                                 [np.divide(vphase[i[67]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[67]], np.sqrt(3))],
236                                 [np.divide(vphase[i[68]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[68]], np.sqrt(3))],
237                                 [np.divide(vphase[i[69]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[69]], np.sqrt(3))],
238                                 [np.divide(vphase[i[70]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[70]], np.sqrt(3))],
239                                 [np.divide(vphase[i[71]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[71]], np.sqrt(3))],
240                                 [np.divide(vphase[i[72]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[72]], np.sqrt(3))],
241                                 [np.divide(vphase[i[73]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[73]], np.sqrt(3))],
242                                 [np.divide(vphase[i[74]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[74]], np.sqrt(3))],
243                                 [np.divide(vphase[i[75]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[75]], np.sqrt(3))],
244                                 [np.divide(vphase[i[76]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[76]], np.sqrt(3))],
245                                 [np.divide(vphase[i[77]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[77]], np.sqrt(3))],
246                                 [np.divide(vphase[i[78]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[78]], np.sqrt(3))],
247                                 [np.divide(vphase[i[79]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[79]], np.sqrt(3))],
248                                 [np.divide(vphase[i[80]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[80]], np.sqrt(3))],
249                                 [np.divide(vphase[i[81]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[81]], np.sqrt(3))],
250                                 [np.divide(vphase[i[82]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[82]], np.sqrt(3))],
251                                 [np.divide(vphase[i[83]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[83]], np.sqrt(3))],
252                                 [np.divide(vphase[i[84]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[84]], np.sqrt(3))],
253                                 [np.divide(vphase[i[85]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[85]], np.sqrt(3))],
254                                 [np.divide(vphase[i[86]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[86]], np.sqrt(3))],
255                                 [np.divide(vphase[i[87]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[87]], np.sqrt(3))],
256                                 [np.divide(vphase[i[88]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[88]], np.sqrt(3))],
257                                 [np.divide(vphase[i[89]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[89]], np.sqrt(3))],
258                                 [np.divide(vphase[i[90]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[90]], np.sqrt(3))],
259                                 [np.divide(vphase[i[91]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[91]], np.sqrt(3))],
260                                 [np.divide(vphase[i[92]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[92]], np.sqrt(3))],
261                                 [np.divide(vphase[i[93]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[93]], np.sqrt(3))],
262                                 [np.divide(vphase[i[94]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[94]], np.sqrt(3))],
263                                 [np.divide(vphase[i[95]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[95]], np.sqrt(3))],
264                                 [np.divide(vphase[i[96]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[96]], np.sqrt(3))],
265                                 [np.divide(vphase[i[97]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[97]], np.sqrt(3))],
266                                 [np.divide(vphase[i[98]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[98]], np.sqrt(3))],
267                                 [np.divide(vphase[i[99]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[99]], np.sqrt(3))],
268                                 [np.divide(vphase[i[100]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[100]], np.sqrt(3))],
269                                 [np.divide(vphase[i[101]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[101]], np.sqrt(3))],
270                                 [np.divide(vphase[i[102]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[102]], np.sqrt(3))],
271                                 [np.divide(vphase[i[103]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[103]], np.sqrt(3))],
272                                 [np.divide(vphase[i[104]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[104]], np.sqrt(3))],
273                                 [np.divide(vphase[i[105]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[105]], np.sqrt(3))],
274                                 [np.divide(vphase[i[106]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[106]], np.sqrt(3))],
275                                 [np.divide(vphase[i[107]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[107]], np.sqrt(3))],
276                                 [np.divide(vphase[i[108]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[108]], np.sqrt(3))],
277                                 [np.divide(vphase[i[109]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[109]], np.sqrt(3))],
278                                 [np.divide(vphase[i[110]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[110]], np.sqrt(3))],
279                                 [np.divide(vphase[i[111]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[111]], np.sqrt(3))],
280                                 [np.divide(vphase[i[112]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[112]], np.sqrt(3))],
281                                 [np.divide(vphase[i[113]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[113]], np.sqrt(3))],
282                                 [np.divide(vphase[i[114]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[114]], np.sqrt(3))],
283                                 [np.divide(vphase[i[115]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[115]], np.sqrt(3))],
284                                 [np.divide(vphase[i[116]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[116]], np.sqrt(3))],
285                                 [np.divide(vphase[i[117]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[117]], np.sqrt(3))],
286                                 [np.divide(vphase[i[118]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[118]], np.sqrt(3))],
287                                 [np.divide(vphase[i[119]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[119]], np.sqrt(3))],
288                                 [np.divide(vphase[i[120]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[120]], np.sqrt(3))],
289                                 [np.divide(vphase[i[121]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[121]], np.sqrt(3))],
290                                 [np.divide(vphase[i[122]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[122]], np.sqrt(3))],
291                                 [np.divide(vphase[i[123]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[123]], np.sqrt(3))],
292                                 [np.divide(vphase[i[124]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[124]], np.sqrt(3))],
293                                 [np.divide(vphase[i[125]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[125]], np.sqrt(3))],
294                                 [np.divide(vphase[i[126]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[126]], np.sqrt(3))],
295                                 [np.divide(vphase[i[127]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[127]], np.sqrt(3))],
296                                 [np.divide(vphase[i[128]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[128]], np.sqrt(3))],
297                                 [np.divide(vphase[i[129]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[129]], np.sqrt(3))],
298                                 [np.divide(vphase[i[130]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[130]], np.sqrt(3))],
299                                 [np.divide(vphase[i[131]], np.sqrt(3)), np.divide(vphase[i[131]], np.sqrt(3))],
299 q.cart = 2 * np.pi * EPSILON_0 * np.natural(np.linalg.inv(Matrix))
300 vpe = np.divide([q.cart[0] + 1j * np.log(np.divide(distant[pa], distant[pa]))], complex)
301 q.cart[0] = np.log(np.divide(distant[pb], distant[pb])) + q.cart[0]
302 q.cart[1] = np.log(np.divide(distant[pc], distant[pc])) + q.cart[1]
303 q.cart[2] = np.log(np.divide(distant[pd], distant[pd])) + q.cart[2]
304 q.cart[3] = np.log(np.divide(distant[pe], distant[pe])) + q.cart[3]
305 q.cart[4] = np.log(np.divide(distant[pg], distant[pg])) + q.cart[4]
306 q.cart[5] = np.log(np.divide(distant[ph], distant[ph])) + q.cart[5]
307 q.cart[6] = np.log(np.divide(distant[pi], distant[pi])) + q.cart[6]
308 q.cart[7] = np.log(np.divide(distant[ph], distant[ph])) + q.cart[7]
309 q.cart[8] = 2 * np.pi * EPSILON_0 * np.natural(np.linalg.inv(Matrix))
310 vpe = np.divide([q.cart[0] + 1j * np.log(np.divide(distant[pa], distant[pa]))], complex)
311 i_complex = [[iphase['a']], [iphase['b']], [iphase['c']], [iphase['d']], [iphase['e']], [iphase['f']]],
312 SuperPosition = np.array([[np.log(np.divide(distant[pa], distant[pa])), np.log(np.divide(distant[pa], distant[pa])) + i_complex[0]],
313                             [np.log(np.divide(distant[pb], distant[pb])), np.log(np.divide(distant[pb], distant[pb])) + i_complex[1]],
314                             [np.log(np.divide(distant[pc], distant[pc])), np.log(np.divide(distant[pc], distant[pc])) + i_complex[2]],
315                             [np.log(np.divide(distant[pd], distant[pd])), np.log(np.divide(distant[pd], distant[pd])) + i_complex[3]],
316                             [np.log(np.divide(distant[pe], distant[pe])), np.log(np.divide(distant[pe], distant[pe])) + i_complex[4]],
317                             [np.log(np.divide(distant[pg], distant[pg])), np.log(np.divide(distant[pg], distant[pg])) + i_complex[5]],
318                             [np.log(np.divide(distant[ph], distant[ph])), np.log(np.divide(distant[ph], distant[ph])) + i_complex[6]],
319                             [np.log(np.divide(distant[pi], distant[pi])), np.log(np.divide(distant[pi], distant[pi])) + i_complex[7]]])
320 matrix2 = np.matmul(SuperPosition, i_complex)
321 ep = 2 * (10 ** -7) * 100 * np.pi * matrix2
322 vpe = ep * obj_size
323 vp = vpe + vpe
324 (VP, VI) = cart2pol(np.real(vp), np.imag(vp))
325 return round(VP[0][0], 2)

```

รูป 3.44 แสดงชุดข้อมูลคำสั่งในการเก็บค่าที่ได้จากการคำนวณของเสารูปแบบ DS-TG-1

```

528 r_115 = 0.012825
529 r_22 = 0.00799
530 gmrx_115 = 0.05069
531 line_current_115 = 1606.539
532 line_current_22 = 8397.8 ##### 
533 EPSILON_0 = 8.854 * pow(10, -12)
534 v_safe = 43292.21
535 con = 'y'
536
537 while con == 'y' or con == 'Y':
538     case = int(input('Enter Case: '))
539     obj_size = float(input('Enter Size: '))
540     inter_h = float(input('Enter interested height : '))
541
542     # Graph on interested High
543     m_xp = []
544     v_induce = []
545     x_ax = np.arange(-15, 15, 0.1)
546     y_ax = np.arange(0.1, 30, 0.1)
547     x_ax = np.round(x_ax, 2)
548     y_ax = np.round(y_ax, 2)
549     z_ax = np.zeros(shape=(len(y_ax), len(x_ax)))
550     z_con = np.zeros(shape=(len(y_ax), len(x_ax)))
551     cx = -1
552     for Distance_x in x_ax:
553         Distance_x = round(Distance_x, 2)
554         m_xp.append(Distance_x)
555         v_induce.append(calculate(Distance_x, inter_h, obj_size))
556     data = {'distance': m_xp, 'Induced Voltage': v_induce}
557     df = pd.DataFrame.from_dict(data)
558     df.set_index('distance', inplace=True)
559     title_h = str('Induce Voltage & Distance (High '+str(inter_h)+')')
560     df.plot(figsize=(10, 8), ylabel='Induce Voltage(V)', xlabel='Distance(m)', title=title_h, grid=True)

```

รูป 3.45 แสดงคำสั่งในการสร้างกราฟแรงดันเหนี่ยวนำในจุดที่สนใจ

บรรทัดที่ 528-535 ทำการกำหนดค่าตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการคำนวณ

บรรทัดที่ 537-540 ทำการรับค่ารูปแบบเส้า ขนาดของวัตถุที่ถูกเหนี่ยวนำ และ ความสูงที่สนใจ

บรรทัดที่ 542-560 ทำการกำหนดตัวแปรต่างๆเพื่อใช้ในการสร้างกราฟแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางในระดับความสูงที่สนใจ

```

526 # heatmap
527     with tqdm(total=len(x_ax) * len(y_ax)) as pbar:
528         for x_vax in x_ax:
529             cx += 1
530             cy = -1
531             for y_vax in y_ax:
532                 cy += 1
533                 z_ax[cy][cx] = calculate(x_vax, y_vax, obj_size)
534                 pbar.update(1)
535                 if calculate(x_vax, y_vax, obj_size) >= v_safe:
536                     z_con[cy][cx] = 1
537                 else:
538                     z_con[cy][cx] = 0
539
540     # Normal Heatmap
541     df = pd.DataFrame(data=z_ax, columns=x_ax, index=y_ax)
542     plt.figure(figsize=(16, 9))
543     heatmap = sns.heatmap(df, cbar_kws={'label': 'Induce Voltage(V)'}, cmap='Spectral')
544     heatmap.invert_yaxis()
545     heatmap.set(xlabel='Distance(m)', ylabel='High(m)', title='Induce Voltage & Distance')
546
547     # safe zone Heatmap
548     df = pd.DataFrame(data=z_con, columns=x_ax, index=y_ax)
549     plt.figure(figsize=(16, 9))
550     heatmap = sns.heatmap(df, cmap='OrRd', cbar=False)
551     heatmap.invert_yaxis()
552     heatmap.invert_xaxis()
553     heatmap.set(xlabel='Distance(m)', ylabel='High(m)', title='Danger Zone')
554     plt.show()
555
556     print('Calculate Again ?')
557     con = str(input('Enter y or n: '))
558 else:
559     exit()

```

รูป 3.46 แสดงคำสั่งที่ได้จากการคำนวนให้แสดงในรูปแบบของ Heatmap

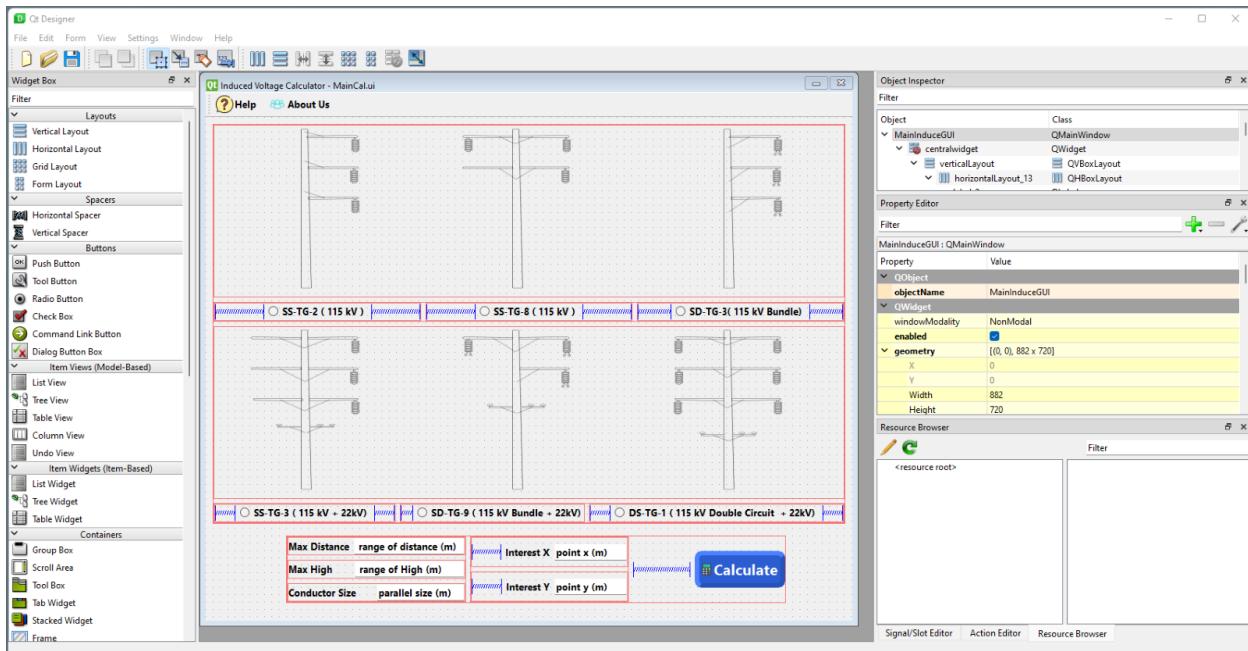
บรรทัดที่ 526 – 538 ทำการคำนวนค่าแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากทำการเลื่อนตำแหน่งจุดที่สนใจไปรอบๆตัวตามระยะที่กำหนดในบรรทัดที่ 545-546 และทำการแปลงค่าจากข้อมูลที่คำนวนมาแล้วเพื่อหาจุดที่ไม่ปลอดภัย

บรรทัดที่ 540-545 ทำการแสดงข้อมูลที่คำนวนเรียบร้อยแล้วมาในรูปแบบของ Heatmap

บรรทัดที่ 547-554 ทำการแสดงข้อมูลจุดที่ไม่ปลอดภัยในรูปแบบของ Heatmap

3.10 การเขียนโปรแกรม GUI เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน

ในการใช้งานโปรแกรมในหัวข้อ 3.10 นั้นจำเป็นต้องติดตั้ง python และ library อื่นๆ ซึ่งค่อนข้างมีความยุ่งยากสำหรับผู้ใช้งานทางผู้จัดทำจึงมีความคิดที่จะพัฒนาโปรแกรมในรูปแบบ GUI (Graphic User Interface) ซึ่งง่ายต่อการใช้งาน โดยใช้ PyQt6 ที่เป็น library สำหรับการเขียนโปรแกรมภาษา Python ในรูปแบบ GUI และ PyInstaller ทำการแปลงโปรแกรมภาษา python ให้เป็น Executable file (.exe) ทำให้สามารถใช้งานโปรแกรมภาษา Python บนระบบปฏิบัติการ Windows ได้โดยไม่ต้องติดตั้ง Python



รูป 3.47 แสดงโปรแกรม Qt Designer (PyQt6 Tools) ที่ใช้ออกแบบ GU

เมื่อออกแบบหน้าต่างโปรแกรมเสร็จก็จะได้หน้าต่างโปรแกรมที่มีความสวยงามและง่ายต่อการใช้งานแต่หน้าต่างนี้ยังไม่สามารถใช้ได้ จำเป็นต้องเขียนฟังก์ชันการทำงานของโปรแกรมโดยการโหลด UI ที่เราได้ออกแบบไว้มาและทำการเขียนฟังก์ชันต่างๆเพิ่มเข้าไปโดยใช้ PyQt6 ซึ่งจำเป็นต้องเขียนโปรแกรมให้อยู่ในรูปแบบของโปรแกรมเชิงวัตถุ หรือ Python OOP (Object-Oriented Programming) ซึ่งหมายความว่าจะต้องเขียนโปรแกรมในรูปแบบ GUI หลังจากทดสอบว่าโปรแกรมสามารถใช้งานได้ตามที่ต้องการแล้วจึงทำการแปลงไฟล์โดยใช้ PyInstaller เพื่อให้สามารถนำไปใช้กับคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นได้อย่างสะดวก

```

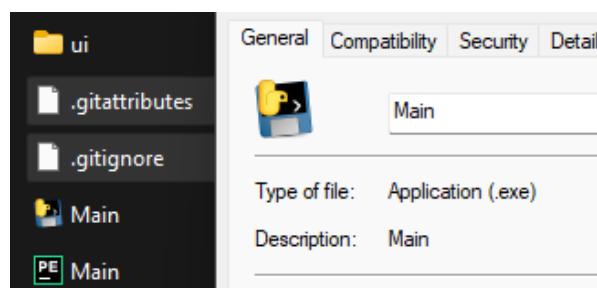
class MainWindow(QMainWindow):
    def __init__(self):
        super().__init__()
        uic.loadUi("ui/MainCal.ui", self)
        # Font Setup For ErrorDialog
        font = QFont()
        font.setFamily("Leelawadee UI")
        font.setPointSize(12)
        self.error_dialog = QErrorMessage()
        self.error_dialog.setFont(font)
        # event control
        self.calculate_btn.clicked.connect(self.calculate_clicked)

    def check_null_value(self):
        if not self.conduc_size.text():
            self.error_dialog.showMessage('Please Enter Conductor Size')
        elif not self.inter_y.text():
            self.error_dialog.showMessage('Please Enter Interest Y')
        elif not self.inter_x.text():
            self.error_dialog.showMessage('Please Enter Interest X ')
        elif not self.max_h.text():
            self.error_dialog.showMessage('Please Enter Max High')
        elif not self.max_dis.text():
            self.error_dialog.showMessage('Please Enter Max Distance')
        else:
            self.stepcalc()

    app = QApplication(sys.argv)
    w = MainWindow()
    w.show()
    app.exec()

```

รูป 3.48 แสดงโค้ดที่ใช้ในการ Load UI ที่สร้างขึ้น และการเขียนฟังก์ชันของปุ่ม Calculate



รูป 3.49 แสดงโปรแกรมที่ผ่านการใช้ library Pyinstaller

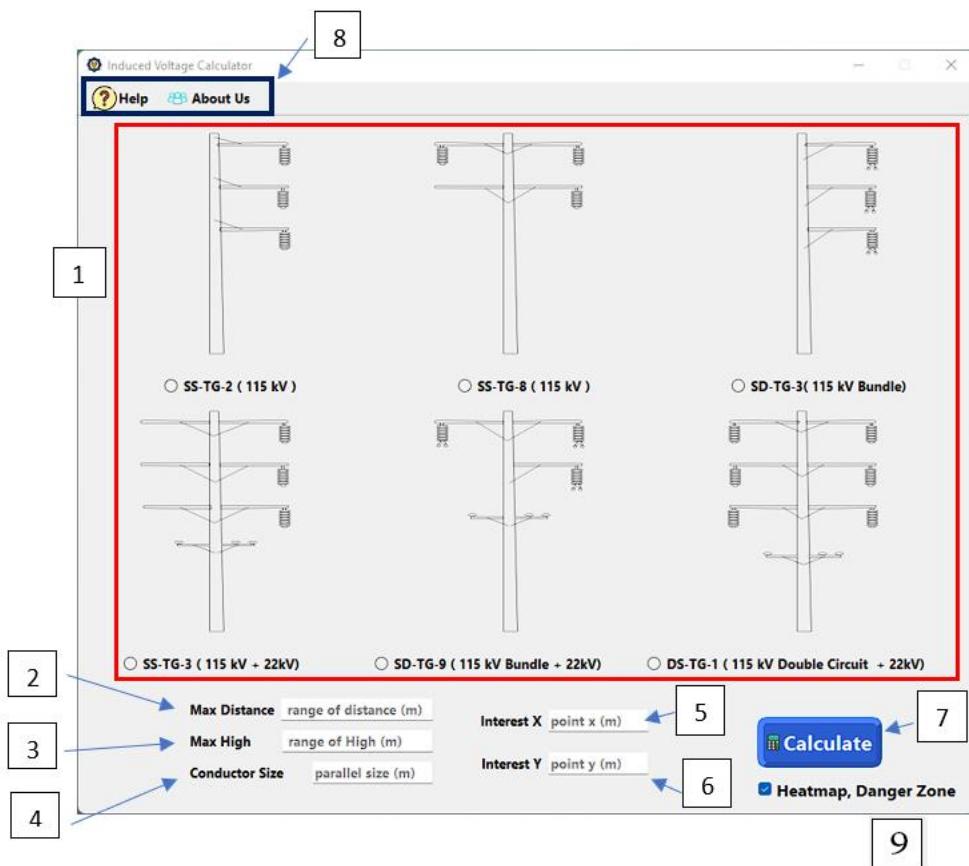
บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำจากเสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบต่างๆของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค และ เขียนโปรแกรมขึ้นเพื่อความสะดวกในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำจึงได้โปรแกรมที่มีความง่ายต่อการใช้งาน สามารถนำผลที่ได้จากการเขียนโปรแกรมไปใช้ในการประเมินพื้นที่อันตรายได้ โดยใช้เกณฑ์จากแรงดัน และ กระแสที่เหล่าผู้ร่างกายของมนุษย์ เพื่อวิเคราะห์เบริยบเทียบรูปแบบเสาไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ ในการหารูปแบบเสาไฟฟ้าที่มีความปลอดภัยมากที่สุด

4.1 แนะนำโปรแกรมคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ

4.1.1 หน้าต่างหลักของโปรแกรม



รูป 4.1 แสดงหน้าต่างหลักของโปรแกรม

หมายเลขอ 1 – ส่วนที่ใช้เลือกชนิดของเสาไฟฟ้ารูปแบบต่างๆของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ต้องการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำสามารถเลือกได้เพียงแค่ 1 ชนิดต่อการคำนวณหนึ่งครั้ง

หมายเลขอ 2 – Max Distance ใช้สำหรับกำหนดระยะที่ต้องการคำนวณนับจากกึ่งกลางเสาไปทางซ้ายและขวาในหน่วย m

หมายเลขอ 3 – Max High ใช้สำหรับกำหนดระยะของความสูงที่ต้องการคำนวณ นับจากพื้นถึงส่วนสูงที่กำหนดในหน่วย m

หมายเลขอ 4 – Conductor Size ใช้สำหรับระบุความยาวของตัวนำซึ้งขนาดกับสายไฟฟ้าในหน่วย m

หมายเลขอ 5 – Interest X ใช้สำหรับระบุค่า X ในจุดที่เราสนใจจะคำนวณในหน่วย m โดยค่า X คือระยะทางจากจุดที่สนใจไปยังจุดกึ่งกลางเสา

หมายเลขอ 6 – Interest Y ใช้สำหรับระบุค่า Y ในจุดที่เราสนใจจะคำนวณในหน่วย m โดยค่า Y คือระยะทางจากจุดที่สนใจไปยังจุดกึ่งกลางเสา

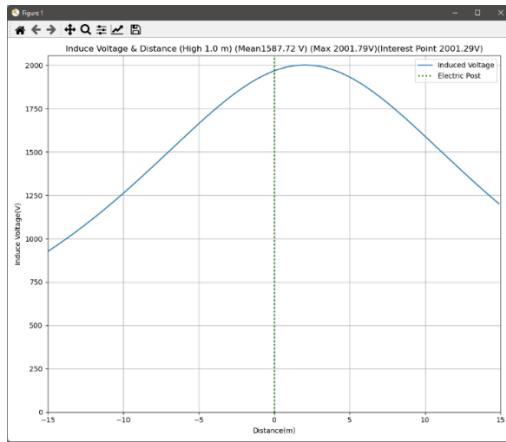
หมายเลขอ 7 – ปุ่ม Calculate กดเพื่อคำนวณค่าต่างๆที่ผู้ใช้กรอกลงในหมายเลขอ 1-6 (จำเป็นต้องกรอกข้อมูลในทุกช่อง ให้ครบถ้วนจึงสามารถคำนวณได้)

หมายเลขอ 8 – Menu Bar ซึ่งประกอบด้วย Help เป็นหน้าต่างบอกวิธีการใช้งาน และ About Us เป็นหน้าต่างที่บอกข้อมูลของโปรแกรมและผู้พัฒนาโปรแกรม

หมายเลขอ 9 – Check Box Heatmap, Danger Zone ทำเครื่องหมายใน Check box เพื่อคำนวณ Heatmap และ Danger Zone

4.1.2 หน้าต่างแสดงผลลัพธ์จากการคำนวณ

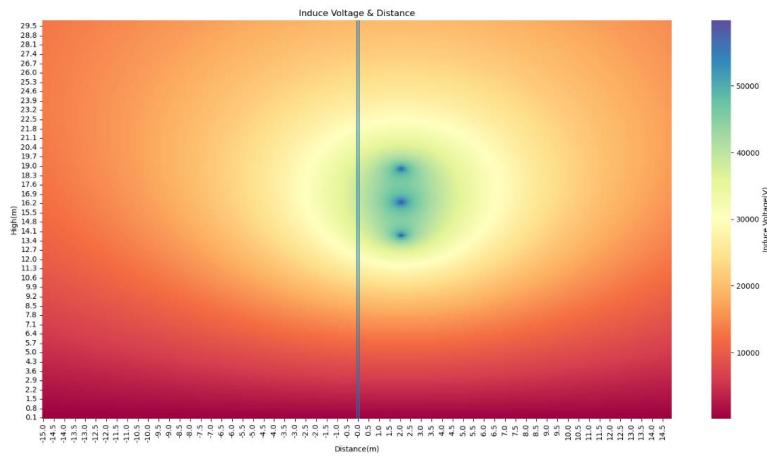
4.1.2.1 แรงดันเหนี่ยวนำ



รูป 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากเสาไฟฟ้าที่ความสูงที่กำหนด

หน้าต่างนี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากเสาไฟฟ้า ที่ความสูงตามที่ผู้ใช้งานได้กรอกข้อมูลไว้ในหน้าต่างหลักก่อนการคำนวณ ซึ่งด้านบนของกราฟจะแสดงว่าคำนวณที่ความสูงเท่าไร ค่าเฉลี่ยและค่าที่สูงที่สุดมีค่าเท่าไร สุดท้ายก็จะแสดงค่าร่วจุดที่ผู้ใช้งานได้ระบุในหน้าต่างหลักของโปรแกรม มีแรงดันเหนี่ยวนำเป็นเท่าไร

4.1.2.1 Heatmap



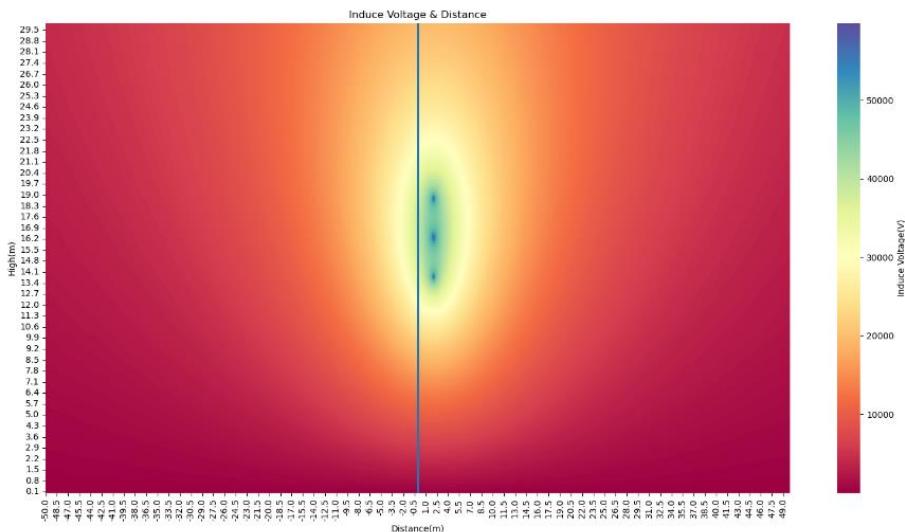
รูป 4.3 แรงดันเหนี่ยวนำ Heatmap

หน้าต่างนี้จะแสดงแรงดันเหนี่ยวนำรอบๆเสาไฟฟ้า ในระยะที่ผู้ใช้ได้กรอกข้อมูลลงในหน้าต่างหลักซึ่งเปรียบเทียบกับแรงดันเหนี่ยวนำบริเวณรอบๆเป็นสิ่งต่างๆ ผู้ใช้จะได้เห็นภาพรวมของแรงดันเหนี่ยวนำบริเวณรอบๆเสาไฟฟ้า เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

4.1.3 ผลลัพธ์จากโปรแกรม

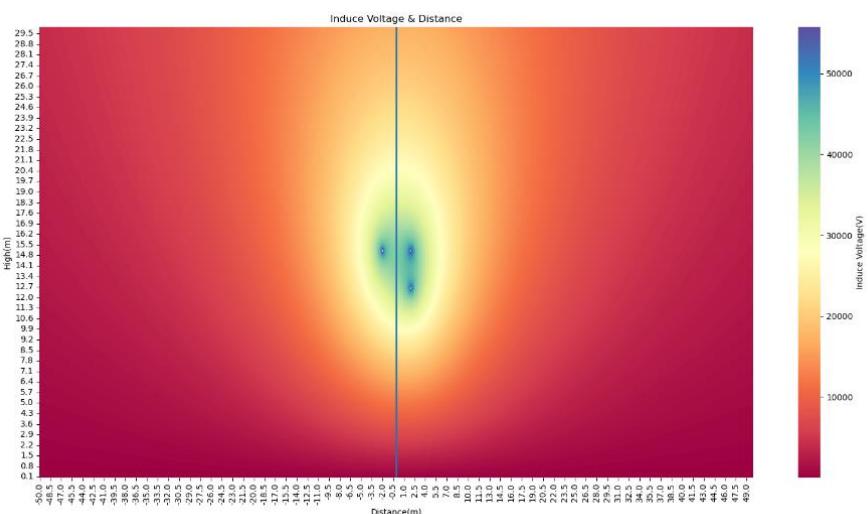
ในการทดลองคำนวณด้วยโปรแกรมเพื่อนำค่าแรงดันเหนี่ยวนำมาใช้เคราะห์หาพื้นที่อันตรายทางผู้จัดทำจิํงกำหนดพื้นที่ที่ใช้ในการวิเคราะห์รอบๆ เสาไฟฟ้าเป็นระยะทาง 50 m จากทางซ้าย และ 50 m จากทางขวาของเสาไฟฟ้า สูงจากพื้นดิน 30 m โดยตัวนำที่ถูกเห็นี่ยวนำมีความยาวนานกับสายส่ง 1 m โดยจะนำผลการทดลองที่เป็น Heatmap ไปใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

4.1.3.1 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-2



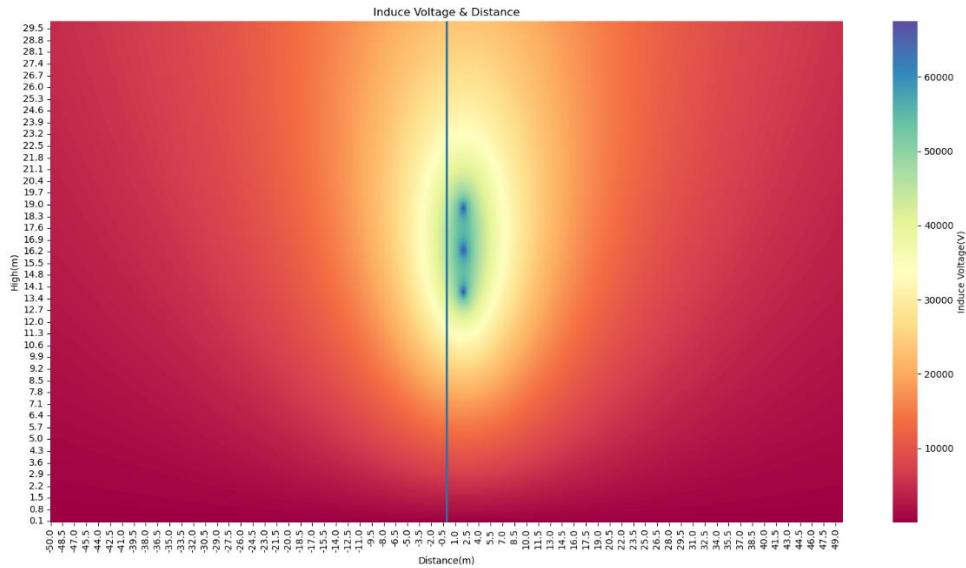
รูป 4.4 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-2

4.1.3.2 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-8



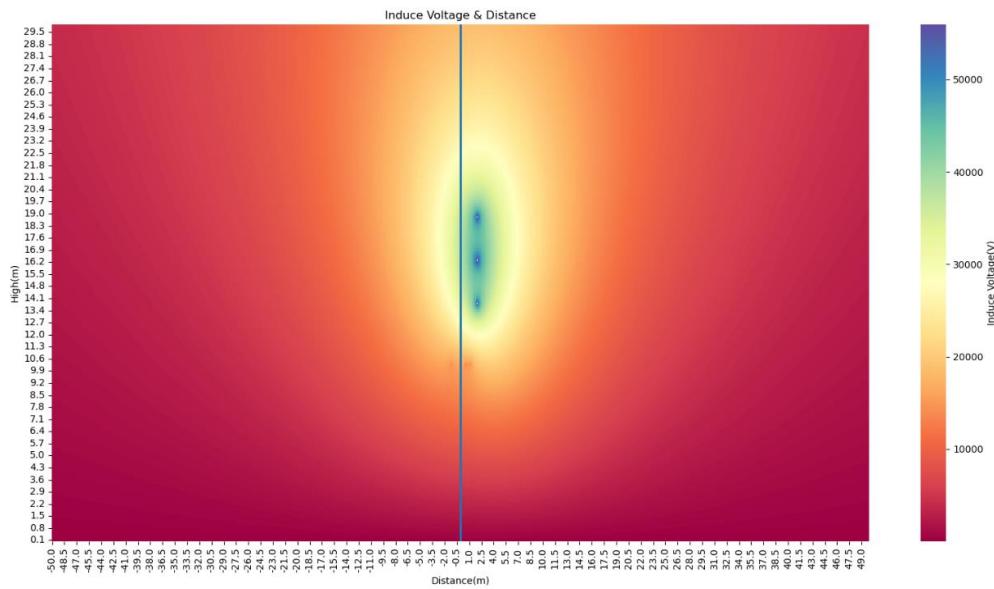
รูป 4.5 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-8

4.1.3.3 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SD-TG-3



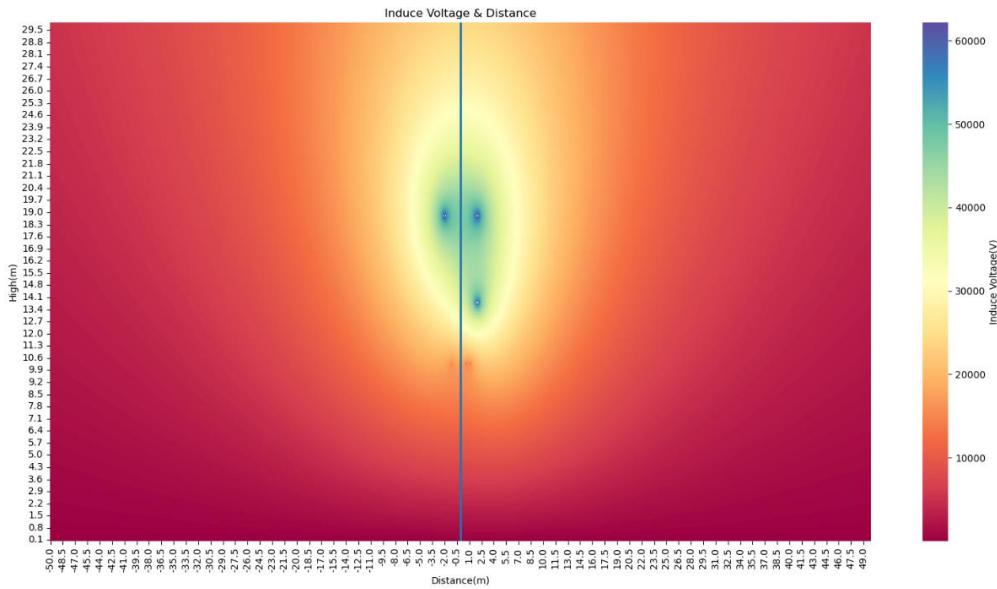
รูป 4.6 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SD-TG-3

4.1.3.4 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-3



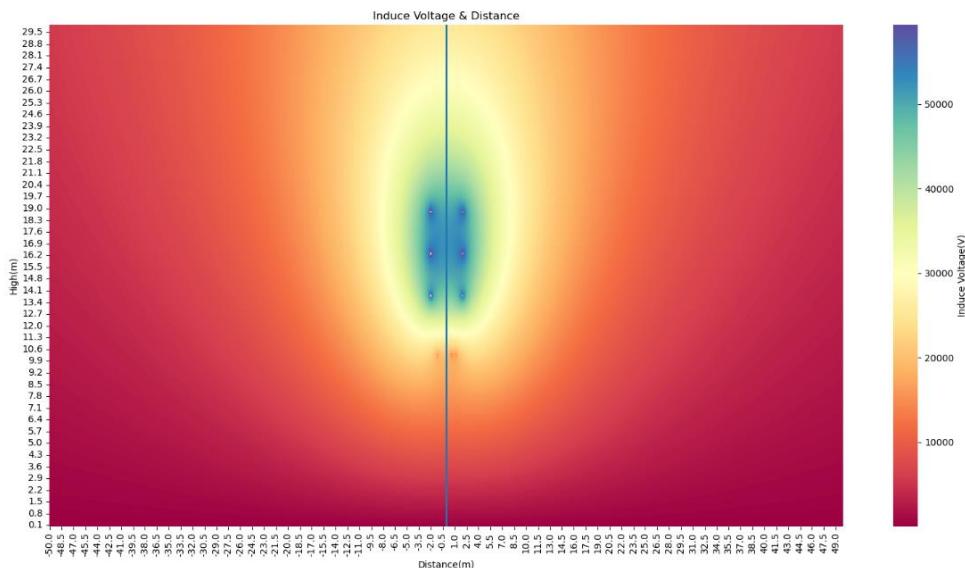
รูป 4.7 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-3

4.1.3.5 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SD-TG-9



รูป 4.8 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SD-TG-9

4.1.3.6 เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ DS-TG-1



รูป 4.9 แรงดันเหนี่ยวนำรอบๆ เสาส่งกำลังไฟฟ้ารูปแบบ DS-TG-1

4.2 การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเนี่ยวนำโดยใช้เกณฑ์ต่างๆเพื่อหาพื้นที่อันตราย

ผู้จัดทำได้ทำการวิเคราะห์หาพื้นที่อันตรายที่เกิดจากมนุษย์สัมผัสกับตัวนำที่ไม่ได้ต่อลงดิน โดยทางผู้จัดทำจะใช้แผนภาพ Heatmap ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมในหัวข้อ 4.1.3 โดยใช้เกณฑ์ในการแบ่งพื้นที่อันตรายออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ใช้กระแสที่เหล่านร่างกายมนุษย์และกรณีที่ใช้แรงดันเนี่ยวนำจากการคำนวณตามมาตรฐานระยะปลอดภัยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

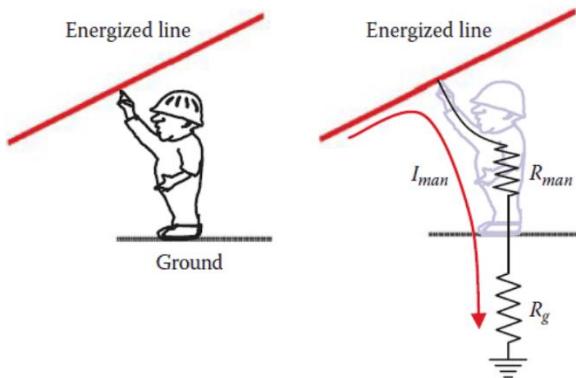
4.2.1 พื้นที่อันตรายโดยใช้กระแสที่เหล่านร่างกายมนุษย์

ผลกระทบของกระแสที่เหล่านร่างกายมนุษย์ตามมาตรฐาน IEEE Standard [8] สามารถสรุปค่าของกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อร่างกายมนุษย์ได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ขีดจำกัดของกระแสที่ทำให้มนุษย์เกิดอันตราย

เกณฑ์	กระแสไฟฟ้า (mA)			
	ร้อยละ 0.5 ของประชากร		ร้อยละ 50 ของประชากร	
	ผู้ชาย	ผู้หญิง	ผู้ชาย	ผู้หญิง
ระดับเริ่มต้น : ผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถปล่อยวัตถุที่ได้รับพลังงานที่จับได้	9	6	16	10.5
ระยะที่ส่งผลถึงระบบหายใจหายใจ : เกิดสภาพหายใจไม่ตรงจังหวะ	100	67	23	15

จากตาราง 4.1 จะสังเกตได้ว่าค่าของกระแสไฟฟ้าขั้นต่ำมีผลทำให้มนุษย์มีอาการเกร็งตัวของกล้ามเนื้อ (Let-go level) เกิดขึ้นใน 50 เปอร์เซ็นของมนุษย์เพศชายเท่ากับ 16 mA และมนุษย์หญิงเท่ากับ 10.5 mA ผู้จัดทำจึงได้ทำการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าที่เหลู่ร่างกาย (I_{man}) โดยใช้ค่ากระแสของผู้หญิงเป็นเกณฑ์เนื่องจากมีค่าต่ำกว่าผู้ชาย



รูป 4.10 การสัมผัสวัตถุตัวนำ

$$I_{man} = \frac{V}{R_{man} + R_g} \quad (4.1)$$

$$R_g \approx 1.5\rho \quad (4.2)$$

จากรูป 4.10 สามารถคำนวณกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ได้จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 โดยในที่ V คือแรงดันเหนี่ยวนำที่วัตถุ, R_{man} คือความต้านทานของมนุษย์ในสภาพต่างๆ และ R_g คือความต้านทานของดิน โดยจะเปลี่ยนแปลงตามค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) ดังแสดงในตารางที่ 4-2 และ 4-3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ค่าความต้านทานร่างกายมนุษย์ [7]

ประเภทความต้านทานร่างกายมนุษย์	ค่าความต้านทาน (Ω)
ผิวหนังแห้ง	600,000
ผิวหนังเปียก	1,000
มือไปยังเท้า	400 - 600
หูไปยังหู	100

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน [7]

	องค์ประกอบของดิน			
	อินทรีย์เปียก	ชื้น	แห้ง	พื้นทิน
ความต้านทานจำเพาะ $\rho(\Omega-m)$	10	100	1000	10,000

เมื่อได้ทราบถึงวิธีการคำนวณกระแสแล้ว ทางผู้จัดทำจะนำเอาวิธีการคำนวณนี้ไปใช้หาพื้นที่อันตราย โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่มีนูชาญ์ผิวนังเปียกยืนเห้าเปล่ำบันพื้นเปียก และ กรณีที่มีนูชาญ์ผิวนังแห้งยืนเห้าเปล่ำบันพื้นแห้ง

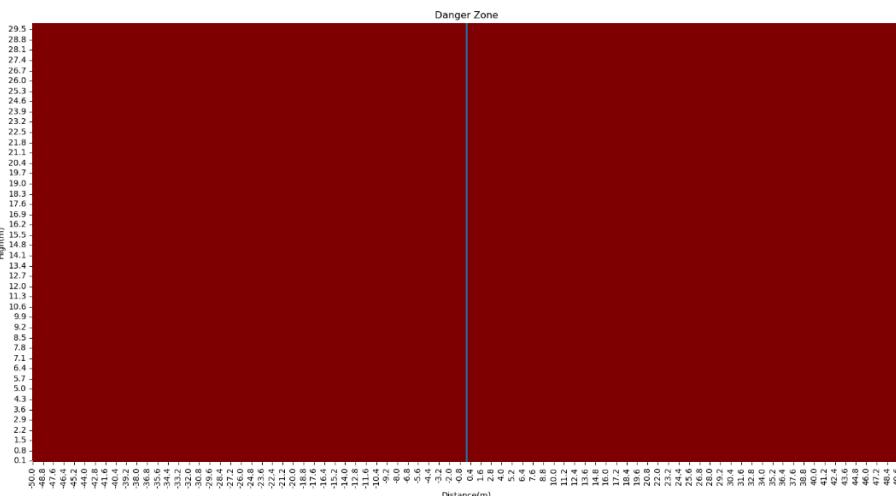
4.2.1.1 การคำนวณกระแสกรณีที่มีนูชาญ์ผิวนังเปียกยืนเห้าเปล่ำบันพื้นเปียก

ในการคำนวณกระแสกรณีที่มีนูชาญ์ผิวนังเปียกยืนเห้าเปล่ำบันพื้นเปียก โดยกำหนดให้

$$R_{man} = 1,000 \Omega \text{ และ } R_g = 1.5 \times 100 = 150 \Omega \text{ และสามารถคำนวณกระแสได้ดังสมการ}$$

$$I_{man} = \frac{V}{R_{man} + R_g} = \frac{V}{1,000 \Omega + 150 \Omega} \quad (4.3)$$

เมื่อนำกระแสที่ได้มาเปรียบเทียบกับกระแสที่ทำให้เกิดล้มเนื้อมีอาการเกร็งตัวที่ 10.5 mA เพื่อทำการหาพื้นที่อันตรายจะได้ผลจากโปรแกรมตั้งตัวอย่างที่แสดงในรูป 4-11



รูป 4.11 พื้นที่อันตรายของเสาแบบ SS-TG-2 ในกรณีมีนูชาญ์ผิวนังเปียกยืนเห้าเปล่ำบันพื้นเปียก

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมสีแดงหมายถึงพื้นที่อันตรายที่กระแสเกิน 10.5 mA พบร่างกระแสที่แหล่งผ่านร่างกายมุชย์ในกรณีที่มุชย์ผิวเปลี่ยนเป็นเข้าเปลี่ยนน้ำในระยะไปทางซ้ายและทางขวาฝั่งละ 50 m เป็นสีแดงทั้งหมด โดยผู้จัดทำได้ทำการคำนวณลักษณะนี้กับเสารูปแบบที่เหลือพบว่าได้พื้นที่สีแดงทั้งหมดเช่นเดียวกัน แสดงว่าข้อบกพร่องที่ใช้พิจารณาอยู่นี้ไม่มีพื้นที่ปลอดภัยอยู่เลย ทางผู้จัดทำเห็นว่ากรณีนี้เป็นกรณีที่ไม่ได้พบปอยจังไม่นำมาเป็นเกณฑ์ในการวิเคราะห์ในโครงการนี้

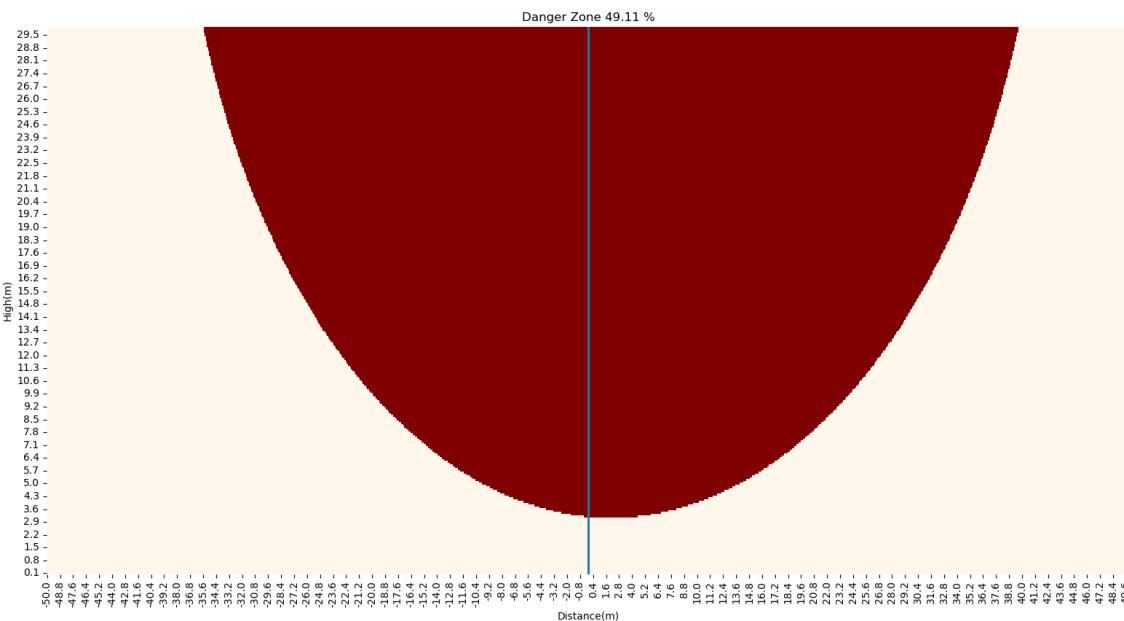
4.2.1.2 การคำนวณกระแสกรณีที่มุชย์ผิวแห้งยืนเท้าเปลี่ยนพื้นแห้ง

ในการคำนวณกระแสกรณีที่มุชย์ผิวเปลี่ยนเป็นเข้าเปลี่ยนน้ำพื้นแห้งจากตาราง 4-2 และ 4-3 จะได้

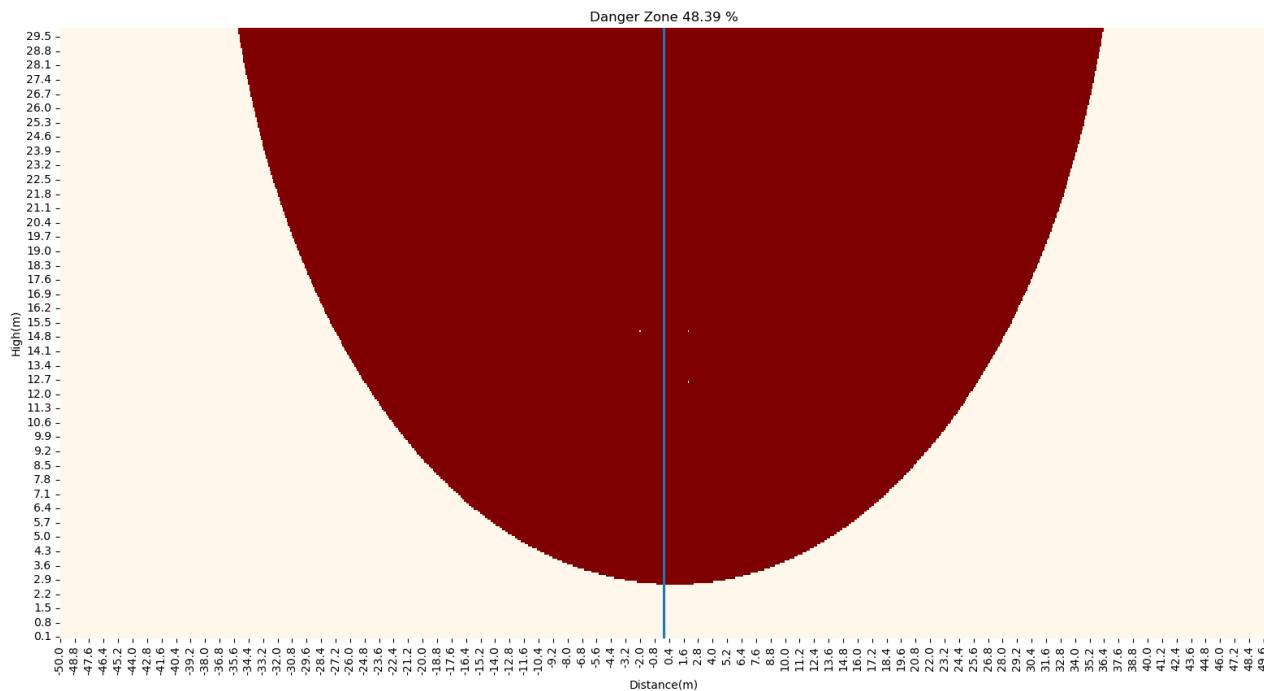
$$R_{man} = 600,000 \Omega \text{ และ } R_g = 1.5 \times 1000 = 1500 \Omega \text{ และ } \text{สามารถคำนวณกระแสได้ดังสมการ}$$

$$I_{man} = \frac{V}{R_{man} + R_g} = \frac{V}{600,000 \Omega + 1,500 \Omega} \quad (4.4)$$

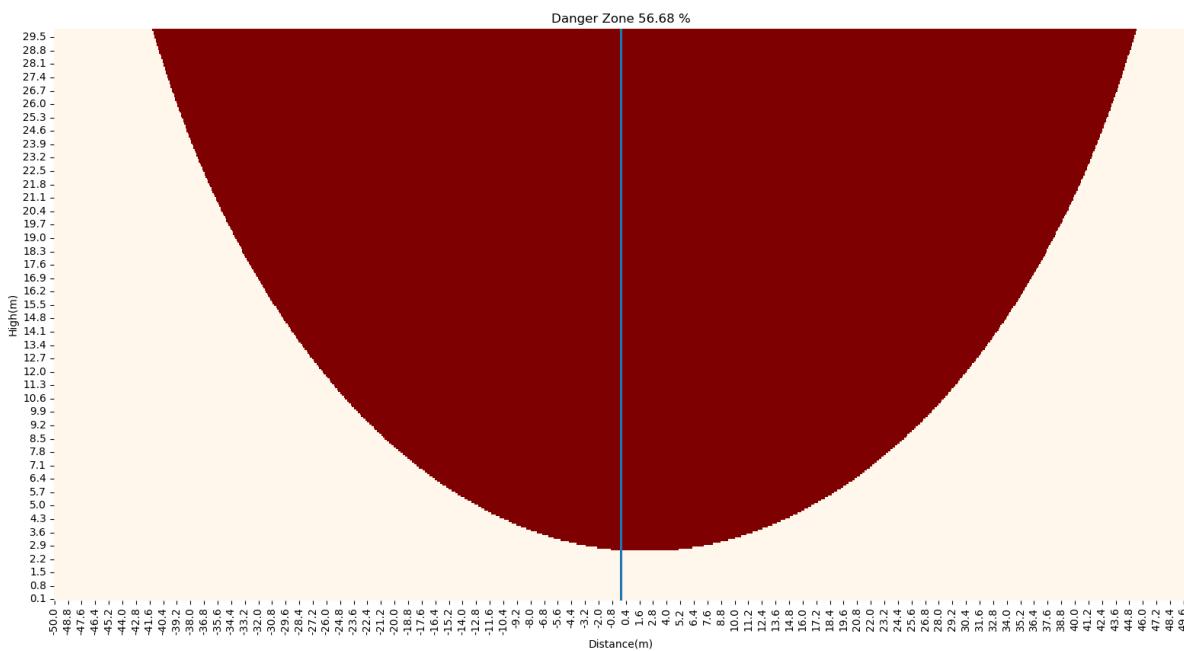
เมื่อนำกระแสที่ได้มาเปรียบเทียบกับกระแสที่ทำให้กล้ามเนื้อมีอาการเกร็งตัวที่ 10.5 mA เพื่อทำการพื้นที่อันตรายจะได้ผลจากโปรแกรมดังนี้



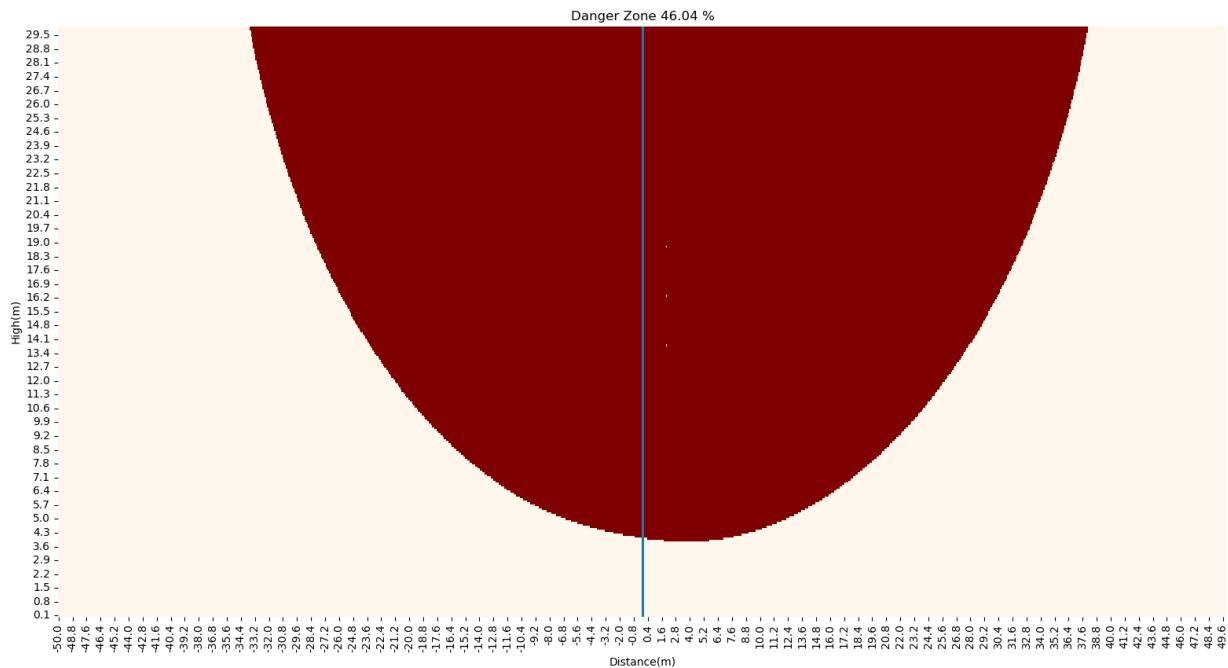
รูป 4.12 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SS-TG-2 กรณีที่มุชย์ผิวแห้งยืนเท้าเปลี่ยนพื้นแห้ง



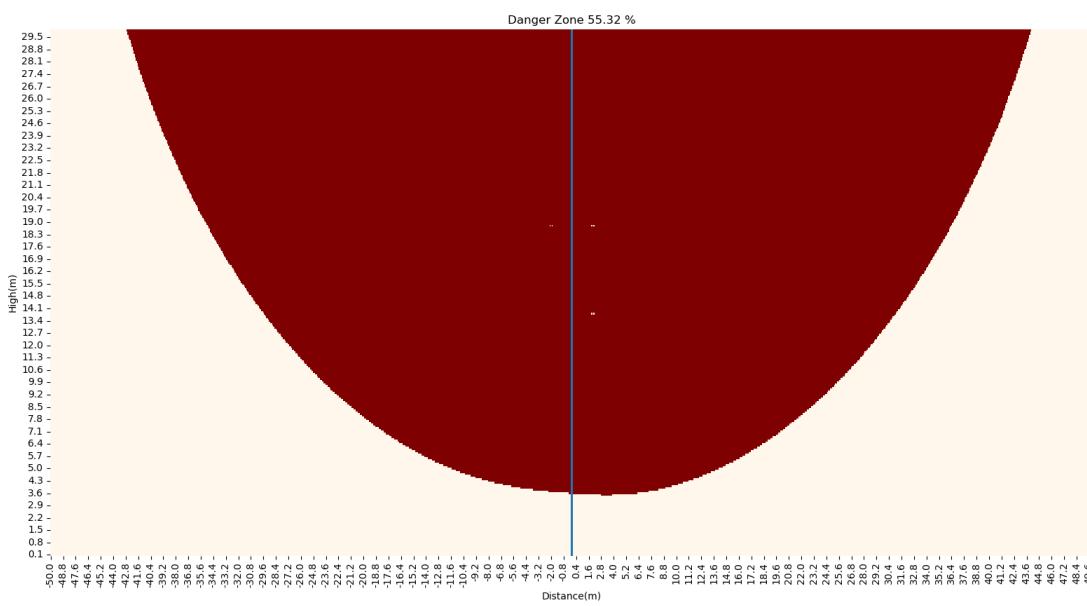
ຮູບ 4.13 ພົນທອນຕາຍຂອງເສດຖະບັນແບບ SS-TG-8 ກຽນທມນູ່ຊົມົງລົງຜົວແກ້ງຢືນເທົາເປົ່າບັນພື້ນແກ້ງ



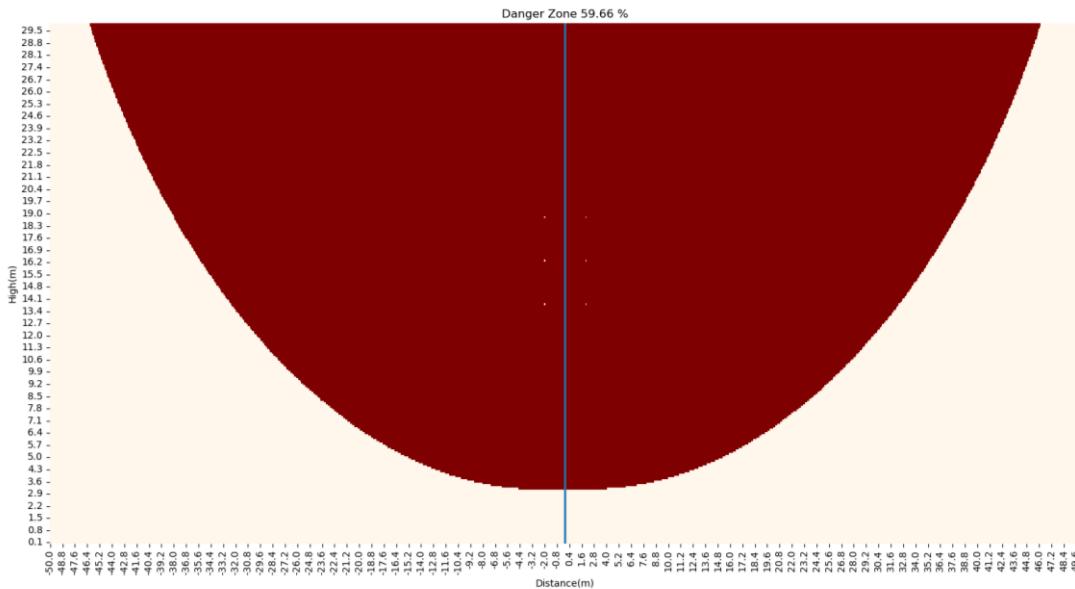
ຮູບ 4.14 ພົນທອນຕາຍຂອງເສດຖະບັນແບບ SD-TG-3 ກຽນທມນູ່ຊົມົງລົງຜົວແກ້ງຢືນເທົາເປົ່າບັນພື້ນແກ້ງ



ຮັບ 4.15 ພົນທອນຕາຍຂອງເສົາຮປແບບ SS-TG-3 ກຣນົມນູ່ຢືນຜົວແທ້ຢືນເທົາເປົ່າບັນພື້ນແທ້



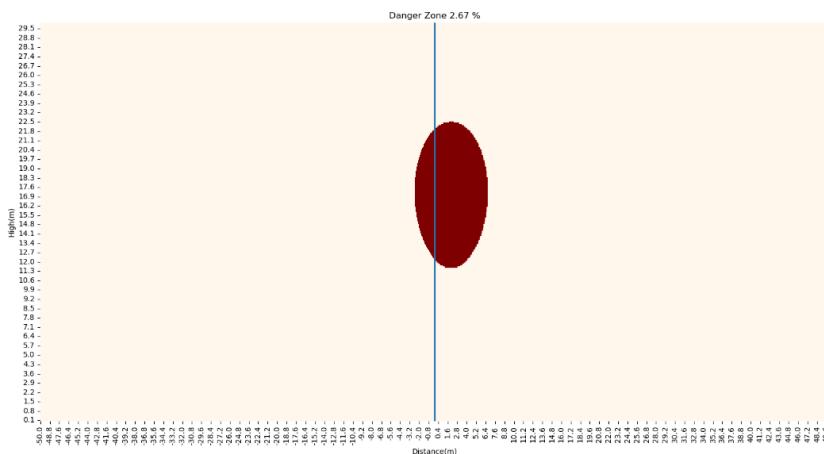
ຮັບ 4.16 ພົນທອນຕາຍຂອງເສົາຮປແບບ SD-TG-9 ກຣນົມນູ່ຢືນຜົວແທ້ຢືນເທົາເປົ່າບັນພື້ນແທ້



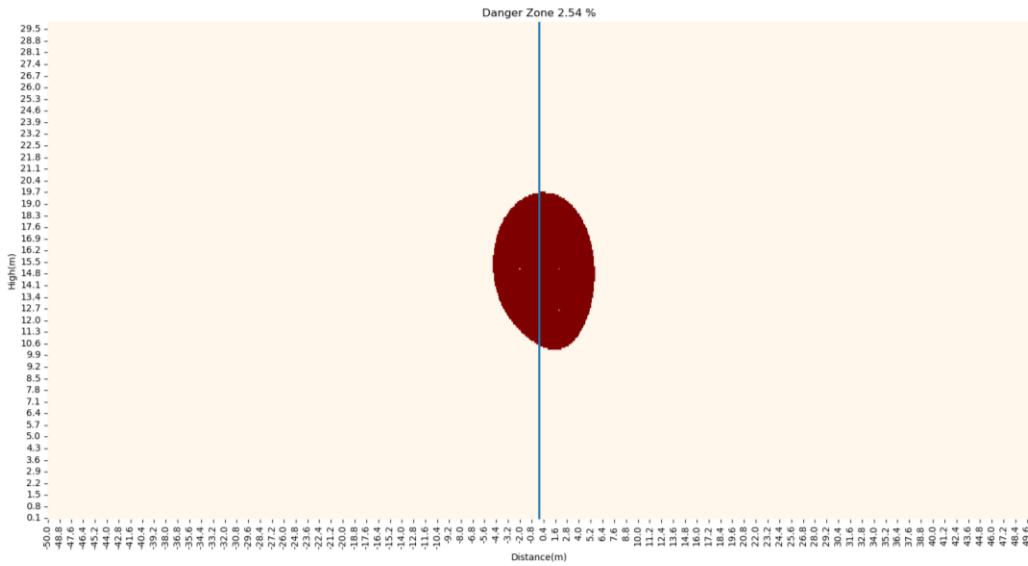
รูป 4.17 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ DS-TG-1 กรณีที่มีนูชย์ผิวแห้งยืนเห้าเปล่านพื้นแห้ง

4.2.2 พื้นที่อันตรายโดยใช้แรงดันเหนี่ยวนำที่ระยะปลอดภัยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

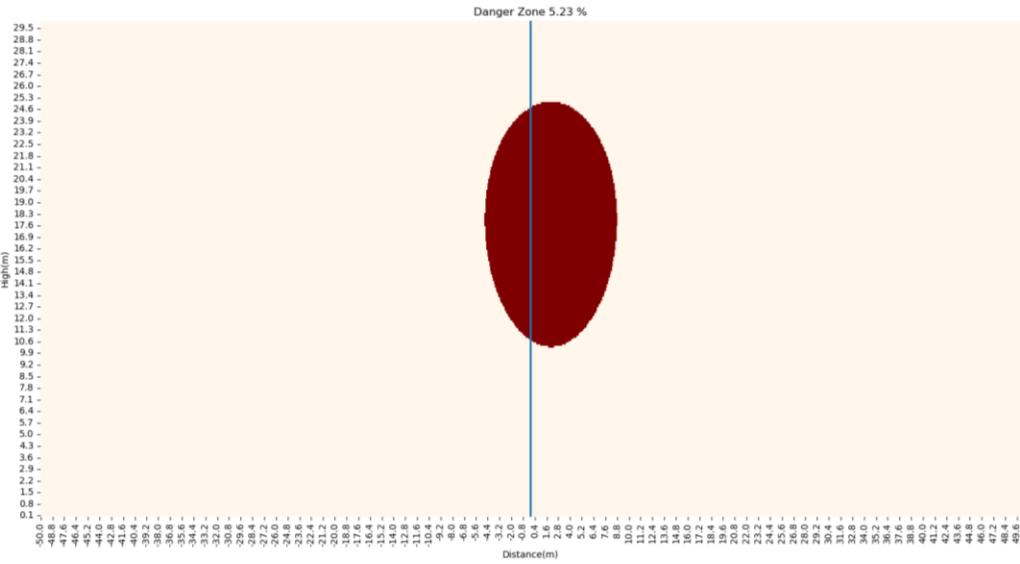
การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีมาตรฐานความปลอดภัยระหว่างสายตัวนำกับบัตเตอร์โดยให้ห่างกันในระดับเดียวกับสายตัวนำอย่างน้อย 2.3 m ทางผู้จัดทำจึงได้ทำการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำในระยะห่าง 2.3 m จากสายตัวนำที่อยู่ใกล้ผู้สัมผัสทางด้านซ้ายของตัวเสาไฟฟ้าได้แรงดันเหนี่ยวนำจากเสาทุกรูปแบบดังนี้ 36.55 kV , 31.64 kV , 43.29 kV , 35.28 kV , 35.99 kV และ 41.91 kV จากผลการคำนวณที่ได้ จะเห็นว่ามีค่าแรงดันเหนี่ยวนำตั้งแต่ 30 kV ขึ้นไป ทางผู้จัดทำจึงสรุปว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่มากกว่า 30 kV อาจทำให้เกิดอันตรายได้ ผู้จัดทำจึงใช้ค่า 30 kV เป็นเกณฑ์ในการคำนวณหาพื้นที่อันตราย เมื่อทำการคำนวณด้วยโปรแกรมจะได้ผลลัพธ์ดังนี้



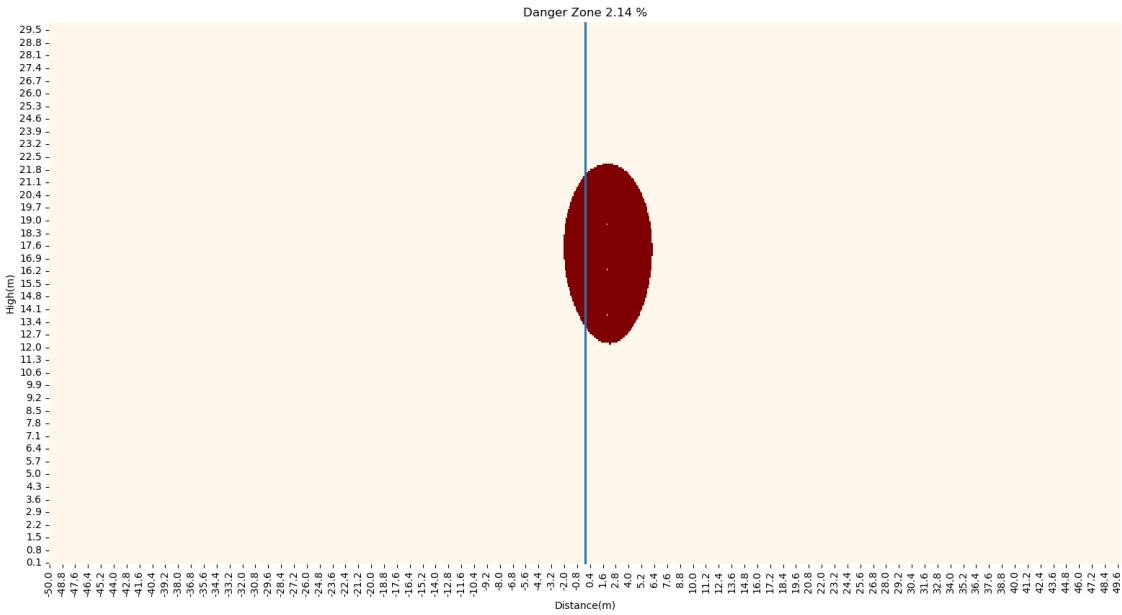
รูป 4.18 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SS-TG-2 กรณีระยะดับแรงดันเหนี่ยวนำมากกว่า 30 kV



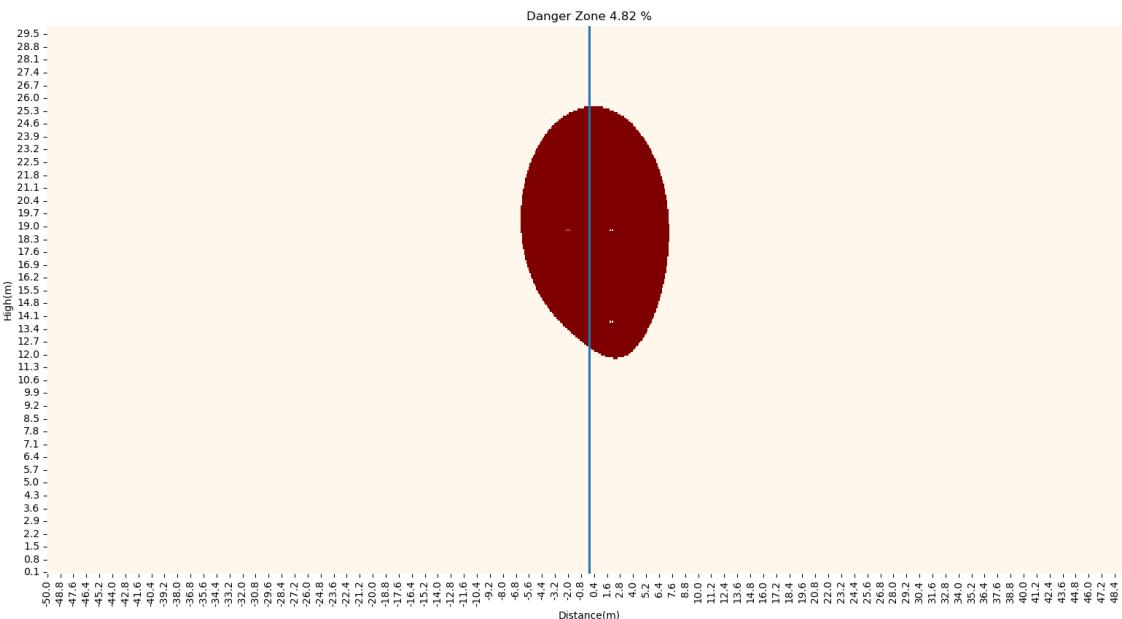
รูป 4.19 พื้นที่อันตรายของเสาสูงแบบ SS-TG-8 กรณีระดับแรงดันเหนือiyานำมากกว่า 30 kV



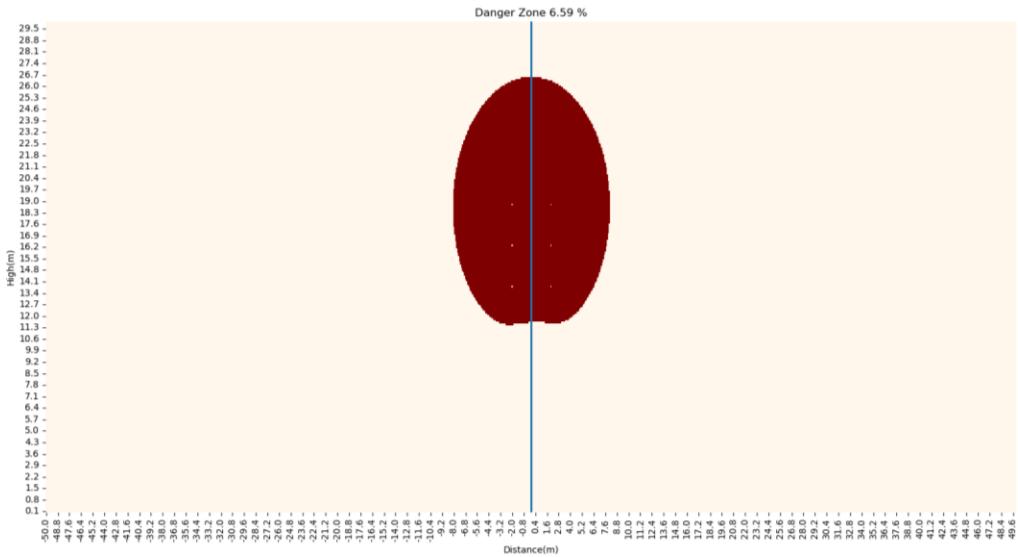
รูป 4.20 พื้นที่อันตรายของเสาสูงแบบ SD-TG-3 กรณีระดับแรงดันเหนือiyานำมากกว่า 30 kV



รูป 4.21 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SS-TG-3 กรณีระดับแรงดันเหนือiyานนำมากกว่า 30 kV



รูป 4.22 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ SD-TG-9 กรณีระดับแรงดันเหนือiyานนำมากกว่า 30 kV



รูป 4.23 พื้นที่อันตรายของเสารูปแบบ DS-TG-1 กรณีระดับแรงดันเหนือiyaw มากกว่า 30 kV

4.3 พื้นที่อันตรายของเสาไฟฟ้าแต่ละรูปแบบ

จากการคำนวณหาพื้นที่อันตรายสามารถนำมาใช้ในการหารูปแบบเสาไฟฟ้าที่ดีที่สุดโดยเกณฑ์กระแสที่ให้ผลผ่านร่างกายมนุษย์และเกณฑ์แรงดันเหนือiyaw นำจากระยะปลดภัยของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคได้ผลดังตาราง 4.4

ตาราง 4.4 พื้นที่อันตรายของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 115 kV

รูปแบบเสาไฟฟ้า	พื้นที่อันตราย	
	กระแสไฟหล่อร่างกาย (%)	แรงดันไฟฟ้าเหนือiyaw (%)
SS-TG-2	49.11	2.67
SS-TG-8	48.39	2.54
SD-TG-3	56.68	5.23
SS-TG-3	46.04	2.14
SD-TG-9	55.32	4.82
DS-TG-1	59.66	6.59

4.3.1 วิเคราะห์เสาส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียว

รูปแบบเสาส่งกำลังไฟฟ้าแบบ 115 kV วงจรเดียวที่ใช้ในการวิเคราะห์มีทั้งหมด 3 แบบได้แก่ รูปแบบ SS-TG-2 , SS-TG-8 และ SD-TG-3 ซึ่งพบว่าเสาส่งกำลังไฟฟ้าแบบ SS-TG-8 ที่มีการจัดวางสายตัวนำทั้งสองฝั่งของเสา มีพื้นที่อันตรายน้อยกว่า SS-TG-2 ที่มีการจัดวางสายตัวนำฝั่งเดียว เนื่องจาก การจัดวางตัวนำไว้ทั้งสองฝั่งจะทำให้ตัวนำทั้งสามตัวอยู่ใกล้กันมากขึ้น มีผลทำให้สนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็กเกิดการหักล้างกัน ส่วนเสารูปแบบ SD-TG-3 ที่มีการจัดวางสายตัวนำฝั่งเดียวอีกทั้งเป็น สายควบ จะมีพื้นที่อันตรายที่มากกว่า SS-TG-2 ซึ่งเป็นสายตัวนำแบบเดียว เนื่องจากสายควบมีค่ารัศมี เฉลี่ยทางเรขาคณิต (GMR) ที่มากกว่ารัศมีของสายตัวนำเดียว ส่งผลให้ตัวนำชนิดนี้เมื่อยื่นอยู่ใกล้จุดที่ สนใจมากขึ้น ค่าแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น พื้นที่อันตรายจึงเพิ่มขึ้น

4.3.2 วิเคราะห์เสาส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียว และ ระบบ 22 kV วงจรเดียว

รูปแบบเสาส่งกำลังไฟฟ้าแบบ 115 kV วงจรเดียวและระบบ 22 kV วงจรเดียว ที่ใช้ในการ วิเคราะห์มีทั้งหมด 2 แบบได้แก่รูปแบบ SS-TG-3 และ SD-TG-9 พบว่าเสาส่งกำลังไฟฟ้าแบบ SS-TG-3 ที่มีการจัดวางสายตัวนำฝั่งเดียวและเป็นสายเดียว มีพื้นที่อันตรายน้อยกว่าแบบ SD-TG-9 มีที่การจัดวาง สายตัวนำทั้งสองฝั่งและเป็นสายควบ ทำให้เห็นว่าสายควบมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่อันตรายมากกว่า การจัดวางสายตัวนำแบบฝั่งเดียว

4.3.3 วิเคราะห์เสาส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียวที่มีระบบ 22 kV และไม่มีระบบ 22 kV

จากพิจารณาเสารูปแบบ SS-TG-3 ซึ่งเป็นเสาส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียวที่มีระบบ 22 kV และเสารูปแบบ SS-TG-2 ซึ่งเป็นเสาส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียวที่ไม่มีระบบ 22 kV พบว่าเสา รูปแบบ SS-TG-3 มีพื้นที่อันตรายน้อยกว่า SS-TG-2 สาเหตุอาจมาจากการเพิ่มระบบ 22 kV ส่งผลให้มี การหักล้างกันของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

4.3.4 วิเคราะห์เสาส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียวและ 115 kV วงจรคู่ที่มีสายส่ง 22 kV ในระบบ

จากพิจารณาเสารูปแบบ DS-TG-1 ซึ่งเป็นเสากำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรคู่ที่มีระบบ 22 kV และ เสารูปแบบ SS-TG-3 ซึ่งเป็นเสาส่งกำลังไฟฟ้า 115 kV วงจรเดียวที่มีระบบ 22 kV โดยเสาทั้งสองรูปแบบ มีการจัดวางตัวนำฝั่งเดียวเหมือนกัน พบว่าเสารูปแบบ DS-TG-1 มีพื้นที่อันตรายมากกว่ารูปแบบ SS-TG-3 สาเหตุอาจมาจากการมีสายตัวนำที่มีแรงดันสูงเพิ่มขึ้นในระบบแต่เนื่องจากมีการจัดวางตัวนำที่สลับเพส กันพื้นที่อันตรายจึงเพิ่มขึ้นไม่มาก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากสายส่งกำลังไฟฟ้าของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคโดยทำการวิเคราะห์และประเมินระดับแรงดันที่เกิดขึ้นโดยจะจำแนกจากระบบสายส่งขนาด 115 KV ที่มีการจัดวางสายตัวนำในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ ระบบสายส่ง 115 KV วงจรเดียว, ระบบสายส่งแบบผสม 115 KV วงจรเดียว กับ 22 วงจรเดียว และ ระบบสายส่งแบบผสม 115 KV วงรคุ กับ 22 วงจรเดียว

จากที่ผู้จัดทำได้ทำการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ทฤษฎีของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้า และทฤษฎีของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กและรวมข้อมูลโครงสร้างของระบบสายส่งของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ทำงานในสภาพปกติจากนั้นทำการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น โดยในการคำนวณนั้นมีความซับซ้อนและใช้เวลาในการคำนวณด้วยมือナン ผู้จัดทำจึงเลือกโปรแกรม Python มาใช้ในการคำนวณ เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่ายต่อการใช้งาน และความแม่นยำในการคำนวณ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงรูปแบบของกราฟ แรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าในระดับความสูงที่สนใจและแพนกวิป Heatmap ของแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยรอบเสาส่ง กำลังไฟฟ้าในระยะที่กำหนด จากนั้นนำค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้ไปใช้หาพื้นที่อันตราย เนื่องจากการที่มนุษย์สัมผัสตัวนำที่ถูกเหนี่ยวนำแล้วไม่ต่องดิน พร้อมแสดงยังแสดงร้อยละของพื้นที่อันตรายต่อพื้นที่ทั้งหมด

พื้นที่อันตรายที่ได้จากการคำนวณกระแสไฟฟ้าที่เหลือผ่านร่างกายมนุษย์ เปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าขั้นต่ำที่ทำให้มนุษย์ส่วนใหญ่เกิดอาการกล้ามเนื้อเกร็งซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.5 mA แบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่มนุษย์ยืนเท้าเปล่าบนพื้นเปียกและผิวนังของมนุษย์เปียกขึ้น และกรณีที่มนุษย์ยืนเท้าเปล่าบนพื้นแห้งและผิวนังของมนุษย์แห้ง พบว่ากรณีที่มนุษย์ยืนเท้าเปล่าบนพื้นเปียกและผิวนังของมนุษย์เปียกขึ้นนั้นมีพื้นที่อันตรายเท่ากับ 100% จึงไม่ใช้กรณีนี้ในการวิเคราะห์ต่อไป ผู้จัดทำจึงเลือกใช้กรณีที่มนุษย์ยืนเท้าเปล่าบนพื้นแห้งและผิวนังของมนุษย์แห้งเนื่องจากเป็นกรณีที่พบได้ทั่วไปและสามารถแสดงให้เห็นพื้นที่อันตรายในระยะที่สนใจ ส่วนพื้นที่อันตรายเนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากการประยุกต์ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคที่ระยะ 2.3 m ในระดับเดียวกับตัวนำพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำไฟฟ้าจากเสาไฟฟ้าทุกรูปแบบมีค่าไม่น้อยกว่า 30 KV

พื้นที่อันตรายโดยใช้เกณฑ์ทั้งสองที่กล่าวไปข้างต้น พบว่าเสาไฟฟ้าทุกรูปแบบมีรูปร่างของพื้นที่อันตรายใกล้เคียงกันกล่าวคือ เมื่อวิเคราะห์รูปแบบการจัดวางตัวนำระหว่างรูปแบบ SS-TG-2 ที่มี การจัดวางสายตัวนำฝั่งเดียว และ SS-TG-8 ที่มีการจัดวางสายตัวนำทั้งสองฝั่ง พบว่าเสารูปแบบ SS-TG-8 มีพื้นที่อันตรายน้อยกว่า จึงสรุปได้ว่าเสาส่งกำลังไฟฟ้าที่มีการจัดวางสายตัวนำทั้งสองฝั่งเป็นเสาส่งกำลังไฟฟ้าที่ดี และเมื่อเปรียบเทียบเสารูปแบบ SS-TG-2 ซึ่งเป็นรูปแบบสายเดียว และ SD-TG-3 ซึ่งเป็นรูปแบบสายควบ พบว่า SS-TG-2 มีพื้นที่อันตรายน้อยกว่า จึงสรุปได้ว่าเสาส่งกำลังไฟฟ้าที่มีรูปแบบสายเดียวเป็นเสาส่งกำลังไฟฟ้าที่ดี เมื่อวิเคราะห์เสาส่ง

กำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-3 ที่มีการจัดวางตัวนำผู้เดียวและเป็นสายเดี่ยว กับ SS-TG-9 ที่มีการจัดวางตัวนำหางสองฝั่งและเป็นสายควบคุมบ่าฯ เสารูปแบบ SS-TG-3 มีพื้นที่อันตรายน้อยกว่า จึงสรุปได้ว่าสายควบคุมมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของพื้นที่อันตรายมากกว่าการจัดวางสายตัวนำแบบผู้เดียว เมื่อวิเคราะห์เสาร่างกำลังไฟฟ้ารูปแบบ SS-TG-2 ซึ่งเป็นเสาร์ที่ไม่มีระบบจำหน่าย 22 kV และ SS-TG-3 ซึ่งเป็นเสาร์ที่มีระบบจำหน่าย 22 kV พบร้าฯ เสารูปแบบ SS-TG-3 มีพื้นที่อันตรายน้อยกว่า จึงสรุปได้ว่าเมื่อมีระบบจำหน่าย 22 kV จะช่วยให้พื้นที่อันตรายลดลง และเมื่อวิเคราะห์เสาร่างกำลังไฟฟ้ารูปแบบ DS-TG-1 ซึ่งเป็นเสาร่างไฟฟ้าแบบผสม วงจรคู่ พบร้าฯ เมื่อมีการเพิ่มวงจรส่งจ่ายไฟฟ้าทำให้พื้นที่อันตรายเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีการวางตัวนำสลับเพสกันระหว่างวงจรจึงทำให้พื้นที่อันตรายไม่เพิ่มขึ้นมากนัก

เมื่อพิจารณาเสาร่างกำลังไฟฟ้าทุกรูปแบบจะได้ว่า เสารูปแบบ SS-TG-3 มีพื้นที่อันตรายน้อยที่สุด แต่ผลจากการวิเคราะห์พบว่าเสาร์ที่มีพื้นที่อันตรายน้อยที่สุดคราวนี้ลักษณะเป็นเสาร่างกำลังไฟฟ้าแบบผสม วงจรเดี่ยว ใช้สายตัวนำเดี่ยว และมีการจัดวางตัวนำแบบสองฝั่ง ซึ่งการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคไม่มีใช้ในปัจจุบัน เนื่องจากมีความไม่สะดวกในการติดตั้งและดูแลรักษา รวมไปถึงมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่มากกว่าเสารูปแบบ SS-TG-3

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การวิเคราะห์ในโครงงานนี้เป็นเพียงการวิเคราะห์ในสภาพการทำงานปกติเท่านั้น หากทำการวิเคราะห์ในสภาพวิเคราะห์และแผนพิจารณาที่ต้องการจะเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลกระทบของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่มีขนาดเพิ่มขึ้นมาก

5.2.2 ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำในโครงงานนี้จะคำนวณรอบๆเส้าไฟฟ้ารูปแบบต่างๆ โดยใช้โปรแกรมภาษา Python ซึ่งมีการคำนวณที่ซับซ้อนจึงทำให้โปรแกรมทำงานช้า และ พบรปัญหาหน้าต่างหลักของโปรแกรมค้างอยู่บ่อยครั้ง สามารถแก้ปัญหาได้โดยการเขียนโปรแกรมในรูปแบบของ Multi-Threading ซึ่งจะเป็นการใช้ทรัพยากรห้องหมอดของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ

บรรณานุกรม

[1] กำลังการผลิต กฟผ. [ออนไลน์] สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2564

https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=452&Itemid=116

[2] ความรู้เกี่ยวกับไฟฟ้าแรงสูง. [ออนไลน์] สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2564

<https://www.mea.or.th/profile/123/311>

[3] Electric and Magnetic Fields from Power Lines. [ออนไลน์] สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2564

<https://www.epa.gov/radtown/electric-and-magnetic-fields-power-lines>

[4] นพ.วิวัฒน์ เอกบุรณะวัฒน์ (2556). ผลกระทบสุขภาพจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังอ่อน (ELF-EMF)

[ออนไลน์] สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2564

https://www.summacheeva.org/article/elf_emf

[5] แผนกวิจัยระบบไฟฟ้า กองวิจัย (2564). รายงานผลการศึกษาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขณะปฏิบัติงานในระบบจำหน่ายที่ดับไฟโดยมีระบบสายส่ง 115 KV จ่ายไฟอยู่เหนือระบบจำหน่าย

[6] จรุญศักดิ์ ลิขิตพลิน (2550). การวิเคราะห์แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในระบบจำหน่ายโดยวิธีปกติเบรี่ยบเทียบ กับวิธีการจำลองแบบด้วยโปรแกรม ATP/EMTP

[7] Mohamed El-sharkawi, “Electric Safety Practice and Standaeds,” Broken Sound Parkway, NW, USA: CRC Press. 2014.

[8] IEEE Guide to Grounding During the Installation of Overhead Transmission Line Conductors, IEEE Standard 524a, 1993.

- [9] แผนกวิจัยระบบไฟฟ้า กองวิจัย (2561). ผลการศึกษาและผลการวิเคราะห์การเกิดเพลิงใหม่สายสื่อสารกรณีเกิดลัดวงจรจากระบบจำหน่ายเข้าสู่ระบบสื่อสารโทรคมนาคม และกรณีการเหนี่ยวนำจากระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบสื่อสารฯ
- [10] กองวิศวกรรมไฟฟ้าและเครื่องกล การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. [ออนไลน์] สืบค้นเมื่อ 10 กันยายน 2564 <https://peagateway.pea.co.th/remote/login?lang=en>
- [11] ภาควิชานักวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าของระบบสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับแรงดัน 230 kV ที่ใช้งานในพื้นที่จำกัด

ភាគុណវក

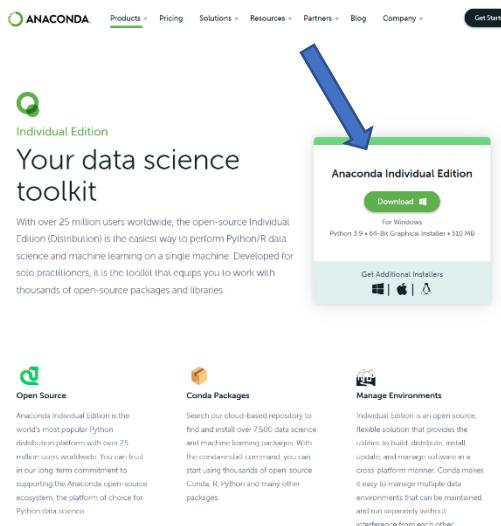
ภาคผนวก

วิธีการติดตั้งโปรแกรม

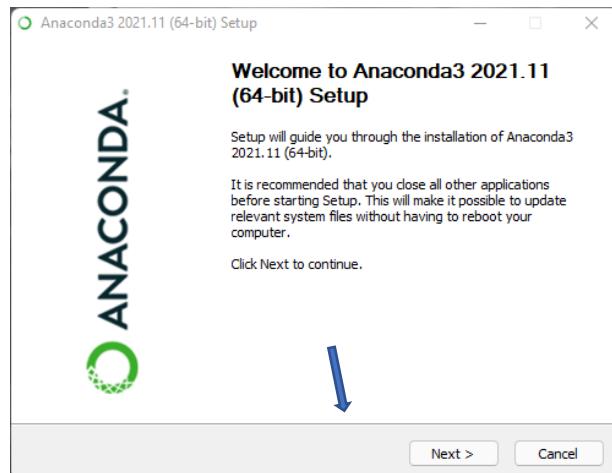
ขั้นตอนการติดตั้ง Anaconda3

เพื่อความสะดวกในการใช้งานควรติดตั้ง anaconda3 เพื่อใช้งานโปรแกรมภาษา python พร้อมกับ Library ที่เหมาะสมกับการทำงาน Data Science เพื่อลดความยุ่งยากในการโหลด Library ต่างๆ

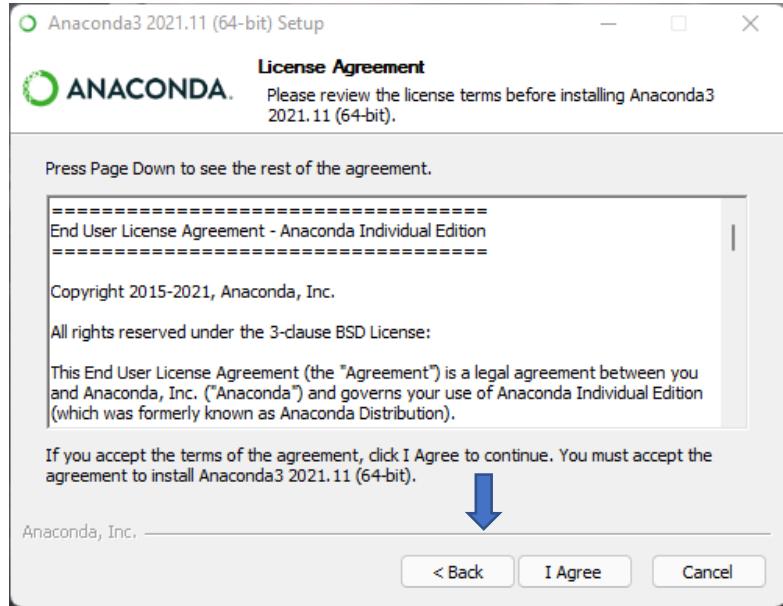
1. โหลดตัวติดตั้ง Anaconda จาก <https://www.anaconda.com/products/individual> เมื่อทำการโหลดเรียบร้อยให้ทำการเปิดโปรแกรมขึ้นมาเพื่อทำการติดตั้ง



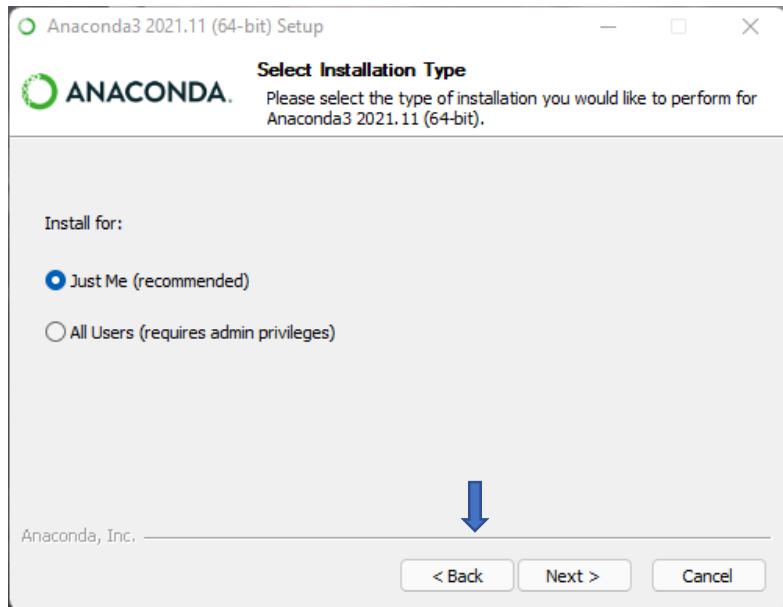
2. กดปุ่ม Next >



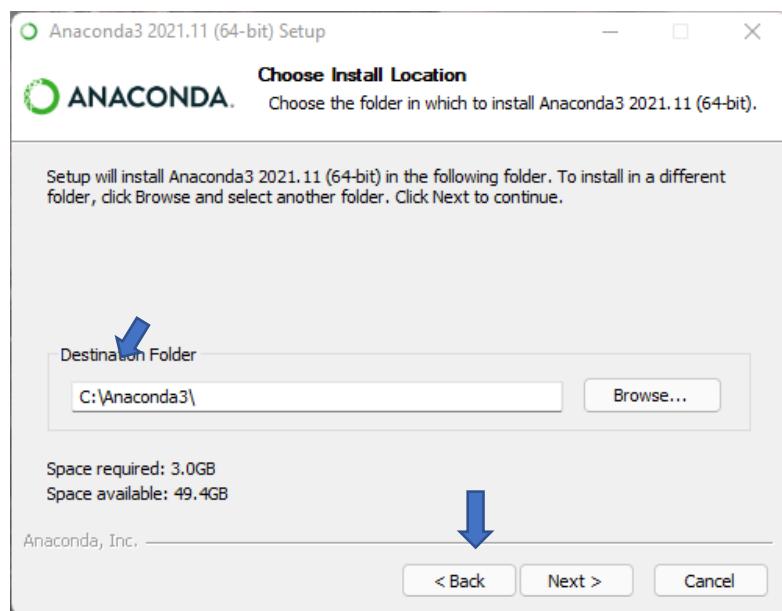
3. ກົດປຸ່ມ I Agree



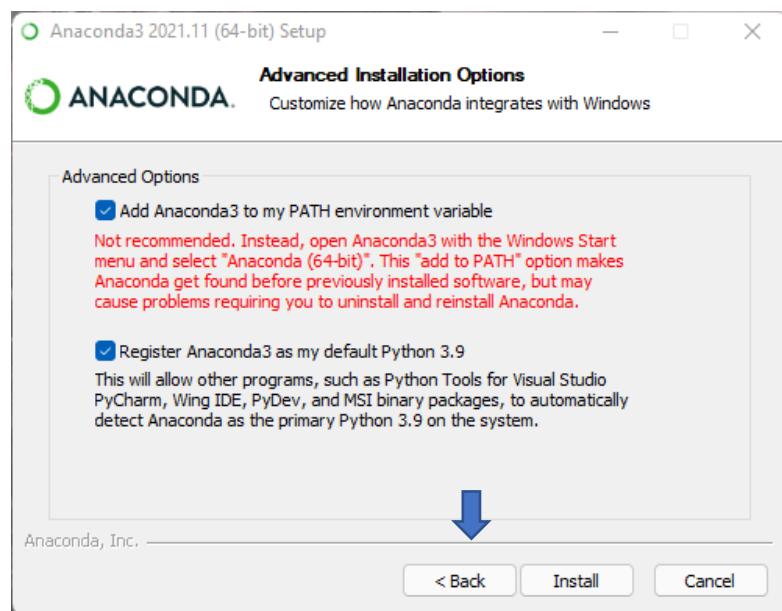
4. ກົດປຸ່ມ Next >



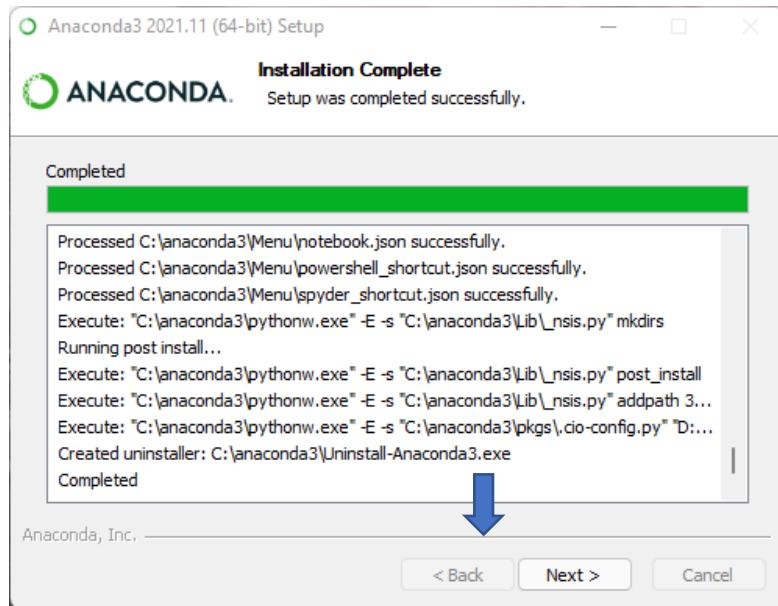
5.เลือกตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งและกดปุ่ม Next >



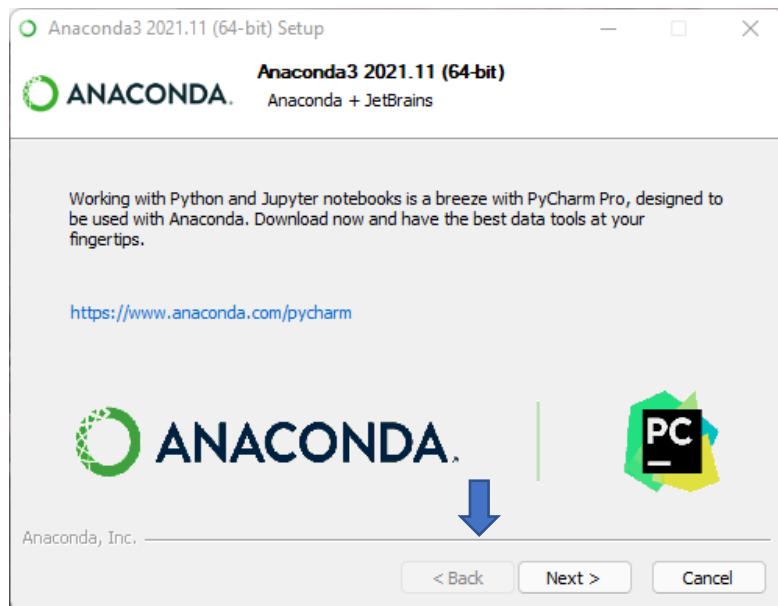
6.เลือก Add Anaconda3 to my PATH environment variable และ Register Anaconda3 as my default Python 3.9 แล้วกดปุ่ม Install



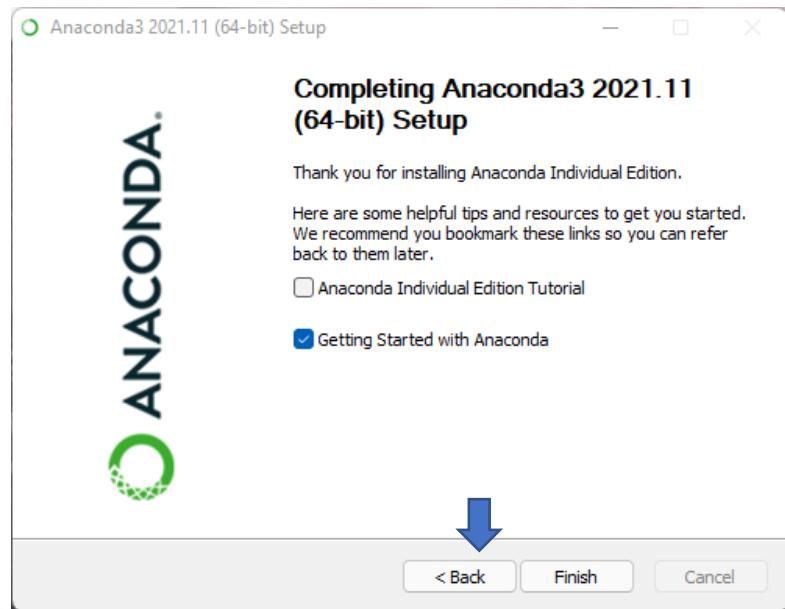
7. จากนั้นโปรแกรมจะติดตั้งลงคอมพิวเตอร์ ร่องนกว่าจะขึ้นว่า Completed และมีปุ่ม Next ขึ้นมาให้กดปุ่มนี้



8. กดปุ่ม Next



9. กดปุ่ม Finish เมื่อทำถึงขั้นตอนนี้ก็อ้วติดตั้ง Anaconda3 สำเร็จเรียบร้อยแล้ว



การติดตั้ง Python Library

ทำการเปิด Start Menu ขึ้นมา และทำการค้นหา Command Prompt แล้วกดเปิดโปรแกรม พิมพ์คำสั่ง pip install [ชื่อ library] รอน library โหลดเสร็จก็สามารถใช้งาน library ได้

```

C:\Users\team>pip install seaborn
Defaulting to user installation because normal site-packages is not writable
Collecting seaborn
  Downloading seaborn-0.11.2-py3-none-any.whl (292 kB)
    292.8/292.8 kB 3.6 MB/s eta 0:00:00
Collecting matplotlib>2.2
  Downloading matplotlib-3.5.2-cp38-cp38-win_amd64.whl (7.2 MB)
    7.0/7.2 kB 30.6 MB/s eta 0:00:00
Requirement already satisfied: numpy>=1.15 in c:\users\team\appdata\roaming\python\python38\site-packages (from seaborn) (1.22.4)
Requirement already satisfied: pandas>=0.23 in c:\users\team\appdata\roaming\python\python38\site-packages (from seaborn) (1.4.2)
Collecting scipy>1.0
  Downloading scipy-1.8.1-cp38-cp38-win_amd64.whl (36.9 kB)
    36.9/36.9 kB 38.4 MB/s eta 0:00:00
Collecting kiwisolver>1.0.1
  Downloading kiwisolver-1.4.2-cp38-cp38-win_amd64.whl (55 kB)
    55.4/55.4 kB 2.8 MB/s eta 0:00:00
Collecting pyparsing>2.2.1
  Downloading pyparsing-3.0.9-py3-none-any.whl (98 kB)
    98.3/98.3 kB 5.5 MB/s eta 0:00:00
Collecting fonttools>4.22.0
  Downloading fonttools-4.33.3-py3-none-any.whl (920 kB)
    920.4/920.4 kB 61.4 MB/s eta 0:00:00
Requirement already satisfied: pillow>=6.2.0 in c:\program files\python38\lib\site-packages (from matplotlib>2.2>seaborn) (9.0.1)
Requirement already satisfied: python-dateutil>=2.7 in c:\users\team\appdata\roaming\python\python38\site-packages (from matplotlib>2.2>seaborn) (2.8.2)
Collecting cylcer>0.10
  Downloading cylcer-0.11.0-py3-none-any.whl (6.4 kB)
Collecting packaging>=20.0
  Using cached packaging-21.3-py3-none-any.whl (10 kB)
Requirement already satisfied: pytz>=2020.1 in c:\users\team\appdata\roaming\python\python38\site-packages (from pandas>0.23>seaborn) (2022.1)
Requirement already satisfied: six>1.5 in c:\users\team\appdata\roaming\python\python38\site-packages (from python-dateutil>=2.7>matplotlib>2.2>seaborn) (1.16.0)
Installing collected packages: scipy, pyparsing, kiwisolver, fonttools, cylcer, packaging, matplotlib, seaborn
  WARNING: The scripts fonttools.exe, pypmerge.exe, pyfsubset.exe and tttx.exe are installed in 'C:\Users\team\AppData\Roaming\Python\Python38\Scripts' which is not on PATH.
  Consider adding this directory to PATH or, if you prefer to suppress this warning, use --no-warn-script-location.
Successfully installed cylcer-0.11.0 fonttools-4.33.3 kiwisolver-1.4.2 matplotlib-3.5.2 packaging-21.3 pyparsing-3.0.9 scipy-1.8.1 seaborn-0.11.2
C:\Users\team>

```

Library ที่จำเป็นในการเขียนโปรแกรมคำนวณ

1.Numpy – เป็น Library ที่นิยมใช้ในการคำนวณทางด้าน Data Science, Data Analytics

2.pandas – เป็น Library สำหรับการจัดการข้อมูลต่างๆได้ง่ายขึ้น

3.Matplotlib – เป็น Library พื้นฐานในการสร้างกราฟ

4.seaborn - เป็น Library ที่เป็นส่วนเสริมของ Matplotlib ใช้ในการทำ Data Visualization

5.QtPy - เป็น Library ในการสร้างโปรแกรมรูปแบบ Graphical User Interface (GUI)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ

นายกฤตพล นบນอบ

วันเดือนปีเกิด

7 ธันวาคม 2541

วุฒิการศึกษา

วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ชื่อ

นายณัฐพงศ์ ศิริวัฒน์เพทุรย์

วันเดือนปีเกิด

20 พฤษภาคม 2542

วุฒิการศึกษา

วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์