

การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ
เนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

ANALYSIS OF INDUCED VOLTAGE ON NATURAL GAS PIPELINE
DUE TO HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINES

พัฒนา อินทนิ
PATTANA INTANI

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-324-013-6

การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ
เนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

ANALYSIS OF INDUCED VOLTAGE ON NATURAL GAS PIPELINE
DUE TO HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINES

พัฒนา อินทนิ

PATTANA INTANI

เลขที่.....
เลขทะเบียน 44045
วัน, เดือน, ปี 25 01 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2545

ISBN 974-324-013-6

**ANALYSIS OF INDUCED VOLTAGE ON NATURAL GAS PIPELINE
DUE TO HIGH VOLTAGE TRANSMISSION LINES**

PATTANA INTANI

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2002

ISBN 974-324-013-6

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ เนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
นักศึกษา	นายพัฒนา อินทนิ
รหัสประจำตัว	42061134
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

บทคัดย่อ

เนื้อหาวิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นผลจากท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเป็นท่อเหล็กมีฉนวนหุ้มฝังอยู่ใต้ดินวางขนานกับแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายในเขตการเดินสายไฟฟ้า (Right-of-way: ROW.) โดยใช้ทฤษฎีสายส่งไฟฟ้าในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ จากเทคนิคดังกล่าวได้ทำการจัดสร้างโปรแกรม AC mitigation โดยการพัฒนาด้วยภาษาวิชวลเบสิกเวอร์ชัน 6 (VISUAL BASIC VERSION 6) เมื่อนำโปรแกรมมาช่วยทำการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซที่วางขนานกับแนวสายส่งโดยแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของเสาส่งและโครงสร้างของท่อนส่งก๊าซมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างเสาส่ง กระแสที่ไหลในสายส่ง ความยาวของท่อนส่งก๊าซ ความลึกของท่อนส่งก๊าซ และอิมพีแดนซ์ที่จุดที่ท่อไม่ต่อเนื่องของท่อนส่งก๊าซเป็นหลัก เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำโดยใช้กราฟมาตรฐาน NACE พบว่ามีค่าความผิดพลาด 0.14 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำโปรแกรม AC mitigation ที่ได้จัดสร้างขึ้นทำการทดสอบกับ โครงสร้างที่มีการติดตั้งใช้งานที่อุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง พบว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าที่ได้จากการวัด และท้ายสุดของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการแสดงให้เห็นว่าสามารถทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำได้โดยการลดทอนค่าสนามไฟฟ้าตามแนวยาว (Longitudinal Electric Field: LEF) และการต่อระบบกราวด์ให้กับท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ พบว่าการลดทอนค่า LEF ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างเสาส่งและการต่อระบบกราวด์ให้กับท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ พบว่าการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับ ค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์และลักษณะการติดตั้งกราวด์เป็นหลัก

Thesis Title	Analysis of Induced Voltage on Natural Gas Pipeline due to High Voltage Transmission Lines
Student	Mr. Pattana Intani
Student ID.	42061134
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

This thesis presents an analysis of an induced voltage on natural gas pipelines due to high voltage transmission lines, parallel with the pipeline in the right-of-way width (R.O.W width). A mathematical model constructed, is based on the transmission line theory. The program, using Visual Basics version 6, is implemented for analyzing the induced voltage on the pipeline with a coating insulation as well as voltage mitigation techniques according to NACE standard. The results show that an induced voltage depend on types of the power lines, current in transmission lines, pipeline depth and terminal impedance. It is found that the analytical result has an error of 0.14%, compared with that from the NACE standard. It is found that the induced voltage reducing Longitudinal Electric Field(LEF), and pipeline grounding. The results show the mitigation of an induced voltage depends on mitigation factors, ground impedance and grounding installation.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี โดยได้รับคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยจากท่าน รศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความสนับสนุนช่วยเหลือในด้านต่างๆ และได้รับเงินสนับสนุนวิทยานิพนธ์จากคณะบัณฑิตวิทยาลัย

ขอขอบคุณ บริษัท บีเนท จำกัด และการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการตรวจวัดแรงดันเหนียวน้ำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติและข้อมูลทางเทคนิคตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณพิทักษ์ ปิ่นอนงค์ และพนักงานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยทุกท่าน ที่ได้ให้ความร่วมมือและสนับสนุนข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรม ไฟฟ้าที่เป็นสถานที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ผศ.ดร. วิจิตร ภิรมเรศ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เป็นครูผู้ซึ่งให้กำลังใจผู้เขียนมาตลอดตั้งแต่เข้าศึกษาและจบการศึกษา

ขอขอบคุณ ดร. อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่เป็นผู้ซึ่งให้ความช่วยเหลือด้านภาษาอังกฤษแก่ผู้เขียนในขณะที่ทำการศึกษาอยู่

ขอขอบคุณ นายสืบพงศ์ สุวรรณภูฏ ทิมงานวิจัยห้อง STAFF 2 ที่เป็นทั้งรุ่นพี่และเพื่อนที่ให้คำแนะนำตลอดมา

ขอขอบคุณ นายพรเทพ ปัญญาแก้ว ทิมงานวิจัยห้อง STAFF 2 ที่เป็นทั้งเพื่อนและรุ่นน้องที่เป็นกำลังใจ ยานพาหนะ และให้ความช่วยเหลือผู้เขียนตลอดมา

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรีของภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการจัดทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดาของข้าพเจ้า นายประกอบ อินทนิ และ มารดาข้าพเจ้า นางนารี อินทนิ ที่เป็นผู้ให้เนติข้าพเจ้า ซึ่งท่านเป็นผู้ให้ทุกอย่างแก่ข้าพเจ้า บุญคุณของท่านครั้งนี้หาที่เปรียบมิได้

ท้ายสุดหากมีข้อความในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เกิดความผิดพลาดขึ้นหรือการวิเคราะห์ไม่ครบถ้วน ผู้เขียนขออภัยไว้แต่ผู้เดียว และ ขอขอบคุณผู้อ่านวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้เขียนได้แต่หวังว่าผู้อ่านจะได้ความรู้จากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ไม่มากก็น้อย

พัฒนา อินทนิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	VI
สารบัญตาราง.....	XIII
สารบัญรูป.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	4
1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีของแรงดันเหนียวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 หลักการของแรงดันเหนียวนำ.....	7
2.3 การคำนวณแรงดันเหนียวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	8
2.3.1 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนียวนำ.....	9
2.3.2 การคำนวณหาแรงดันเหนียวนำกรณีท่อขนาน กับสายส่งตลอดแนวท่อ.....	12
2.3.3 การคำนวณแรงดันเหนียวนำกรณีท่อไม่ขนานกับแนวสายส่ง ตลอดแนวท่อ.....	15
2.3.4 การใช้ทฤษฎีโหนดในการวิเคราะห์แรงดันเหนียวนำในกรณีท่อไม่ขนานกับ แนวสายส่งตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อ.....	17

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 การคำนวณหาค่า Longitudinal Electric Field ของระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล.....	19
2.4.1 Longitudinal Electric Field :LEF.....	19
2.4.1.1 ลำดับกระแส (Current Sequence).....	20
2.4.1.2 คาร์สันมิวชวลอิมพีแดนซ์(Carson’s Mutual Impedance).....	20
2.4.1.3 ลำดับอิมพีแดนซ์(Impedance Sequence).....	21
2.4.1.4 กระแสสมดุล (Balance Phase Current).....	22
2.5 การสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของท่อส่งก๊าซ(Pipelines Modeling).....	22
2.5.1 โครงสร้างของท่อส่งก๊าซ.....	22
2.5.2 การคำนวณพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ.....	23
2.6 บทสรุป.....	25
บทที่ 3 การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	26
3.1 บทนำ.....	26
3.2 การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซ	26
3.2.1 กราวด์รูด(Groud rod)	26
3.2.1.1 อัตราส่วนการลดทอนแรงดัน.....	27
3.2.1.2 อิมพีแดนซ์ของกราวด์รูด.....	28
3.2.2 กราวด์ไวร์(Ground wire)	29
3.2.2.1 อัตราส่วนการลดทอนแรงดัน.....	30
3.2.2.2 อัตราส่วนของ LEF.....	32
3.2.2.3 การหาค่ารัศมีที่เหมาะสม.....	33
3.2.2.4 การหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์.....	33
3.3 สรุป.....	35
บทที่ 4 โปรแกรมคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	36
4.1 บทนำ.....	36
4.2 วัตถุประสงค์ของโปรแกรม.....	36

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 ส่วนประกอบของโปรแกรม.....	37
4.3.1 ส่วนคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ.....	37
4.3.1.1 หน้าต่างหลักของ โปรแกรม(Main Program).....	37
4.3.1.2 ข้อมูลอินพุต(input data).....	39
4.3.1.2.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า.....	39
4.3.1.2.2 พารามิเตอร์ท่อส่งก๊าซ.....	43
4.3.1.3 ส่วนแสดงผล(Output Data).....	49
4.3.1.3.1 กราฟ LEF.....	50
4.3.1.3.2 กราฟแรงดันเหนี่ยวนำ.....	51
4.3.1.3.3 ข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ ที่ได้จากการคำนวณ.....	52
4.3.2 ส่วนคำนวณระบบกราวด์.....	55
4.3.2.1 กราวด์ร็อค.....	55
4.3.2.2 กราวด์ไวร์.....	59
4.4 ขั้นตอนการทำงาน of โปรแกรม AC mitigation.....	62
4.4.1 ขั้นตอนการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ.....	63
4.4.1.1 ขั้นตอนการคำนวณพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	64
4.4.1.2 ขั้นตอนการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าตามแนวยาว:LEF.....	65
4.4.2 ขั้นตอนการคำนวณกราวด์.....	65
4.4.2.1 ขั้นตอนการคำนวณกราวด์ร็อค.....	66
4.4.2.2 ขั้นตอนการคำนวณกราวด์ไวร์.....	67
4.4.2.2.1 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาด Center connection ground wire.....	68
4.4.2.2.2 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาด Perpendicular connection ground wire.....	69
4.4.2.2.3 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาด End connection ground wire.....	70
4.5 เงื่อนไขของการใช้โปรแกรม.....	72

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.6 สอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	72
4.6.1 การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม AC Mitigation กับกราฟมาตรฐาน.....	73
4.6.2 การเปรียบเทียบ ค่าคงที่การแพร่ของคลื่นที่ได้จาก โปรแกรม AC Mitigation กับกราฟมาตรฐาน.....	74
4.6.3 การเปรียบเทียบค่า อิมพีแดนซ์คุณสมบัติที่ได้จาก โปรแกรม AC Mitigation กับกราฟมาตรฐาน.....	75
4.6.4 การเปรียบเทียบการคำนวณ โดยใช้กราฟกับการคำนวณ โดยใช้โปรแกรม AC mitigation.....	76
4.6.4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ.....	76
4.6.4.2 วิธีการคำนวณจากกราฟ.....	77
4.6.4.3 ผลจากการคำนวณ โดยการใช้โปรแกรม.....	78
4.7 การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำกับ โครงสร้างจริง.....	79
4.7.1 การวัดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	81
4.7.2 การคำนวณ โดยใช้โปรแกรม AC mitigation.....	84
4.8 สรุป.....	90
บทที่ 5 การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	91
5.1 บทนำ	91
5.2 การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ กรณีทีแนวท่อวางขนาน กับแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง	91
5.2.1 กรณีการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างของเสาส่ง.....	92
5.2.1.1 โครงสร้างเสาส่งที่มรการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....	92
5.2.1.1.1 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	94
5.2.1.1.2 แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อ.....	95
5.2.1.1.3 ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการ ส่งจ่าย.....	96

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2.1.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและความสูง ของเสาส่ง.....	97
5.2.1.1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและระยะห่าง ระหว่างตัวนำของสายส่ง.....	99
5.2.1.2 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....	100
5.2.1.2.1 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ.....	101
5.2.1.2.2 แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อน.....	102
5.2.1.2.3 ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลัง ในการส่งจ่าย.....	103
5.2.1.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูง ของเสาส่ง.....	104
5.2.1.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและระยะห่าง ระหว่างตัวนำของสายส่ง.....	106
5.2.1.3 กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	107
5.2.1.3.1 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ.....	109
5.2.1.3.2 แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อน.....	110
5.2.1.3.3 ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการ ส่งจ่าย.....	110
5.2.1.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและความสูง ของเสาส่ง.....	112
5.2.1.3.5 ผลกระทบของแรงดันเหนี่ยวนำกับการเพิ่มระยะ ระหว่างเฟส.....	113
5.2.1.4 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	115
5.2.1.4.1 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ.....	116
5.2.1.4.2 แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อน.....	117
5.2.1.4.3 ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง กำลังในการส่งจ่าย.....	118

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.2.1.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำ กับความสูงของเสาส่ง.....	119
5.2.1.4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำ กับการเพิ่มระยะเฟส.....	121
5.2.1.5 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....	123
5.2.1.5.1 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ.....	124
5.2.1.5.2 แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดบนท่อนส่งก๊าซ.....	125
5.2.1.5.3 ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง กำลังในการส่งจ่าย.....	126
5.2.1.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำ และความสูงของเสาส่ง.....	127
5.2.1.5.5 ผลกระทบของแรงดันเหนี่ยวนำกับการเพิ่มระยะ เฟส.....	129
5.2.1.5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับ การปรับระยะระหว่างวงจร.....	131
5.2.2 กรณีที่พารามิเตอร์ของท่อเปลี่ยนแปลง.....	132
5.2.2.1 กรณีความยาวของท่อมีการเปลี่ยนแปลง.....	132
5.2.2.2 กรณีความลึกของท่อมีการเปลี่ยนแปลง.....	133
5.2.2.3 กรณีความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนแปลง.....	134
5.2.2.4 กรณีความต้านทานจำเพาะฉนวนของท่อเปลี่ยนแปลง.....	135
5.2.2.5 กรณีความหนาของท่อมี่ค่าเปลี่ยนแปลงไป.....	136
5.2.2.6 กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีการเปลี่ยนแปลง	137
5.2.2.7 กรณีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของท่อมีการเปลี่ยน แปลง.....	138
5.2.2.8 เมื่ออิมพีแดนซ์ของโหลดและอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีการ เปลี่ยนแปลง.....	139
5.3 สรุป.....	146

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 การวิเคราะห์การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งกำลังทางธรรมชาติ.....	147
6.1 บทนำ.....	147
6.2 อันตรายที่เกิดขึ้นกับมนุษย์.....	147
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับค่า LEF.....	149
6.4 การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำโดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของเสาส่ง.....	149
6.4.1 กรณีโครงสร้างของเสาส่งเป็นแบบแนวนอน.....	150
6.4.1.1 ความสูงของเสาส่ง(Line height).....	151
6.4.1.2 ระยะระหว่างเฟส(Phase spacing).....	152
6.4.1.3 การจัดลำดับเฟส(Phase sequence).....	153
6.4.2 กรณีโครงสร้างของเสาส่งเป็นแบบสามเหลี่ยม.....	154
6.4.2.1 ความสูงของเสาส่ง(Line height).....	155
6.4.2.2 การเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำ(SV,SH).....	156
6.4.2.3 การจัดลำดับเฟส(Phase sequence).....	158
6.4.3 กรณีโครงโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	158
6.4.3.1 ความสูงของเสาส่ง(h).....	159
6.4.3.2 การเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำ(s).....	160
6.4.3.3 การจัดลำดับเฟสของสายส่ง(Phase sequence).....	162
6.4.4 กรณีโครงโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	162
6.4.4.1 ความสูงของเสาส่ง(Line height).....	163
6.4.4.2 ระยะระหว่างเฟส(Phase spacing).....	164
6.4.4.3 การจัดลำดับเฟสของสายส่ง(Phase sequence).....	166
6.4.5 กรณีโครงโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....	168
6.4.5.1 ความสูงของเสาส่ง(Line height).....	169
6.4.5.2 ระยะระหว่างเฟส(Phase spacing).....	170
6.4.5.3 การเพิ่มระยะระหว่างวงจร.....	173
6.4.5.4 การจัดลำดับเฟสของสายส่ง(Phase sequence)	174

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.5 การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำโดยการต่อกราวด์ให้กับท่อส่งก๊าซ.....	177
6.5.1 ระบบกราวด์.....	178
6.5.2 อัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ (Voltage mitigation factor).....	178
6.5.3 กรณีขนาดของท่อเปลี่ยนแปลง.....	179
6.5.4 ระบบกราวด์รูด(Ground rod)	184
6.5.5 ระบบกราวด์ไวร์(Ground wire)	190
6.5.5.1 การหารัศมีที่เหมาะสม.....	191
6.5.5.2 การหาความยาวของกราวด์ไวร์ (Mitigation conductor length).....	195
6.6 ตัวอย่างการคำนวณการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ.....	202
6.7 สรุป.....	205
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	207
7.1 บทนำ.....	207
7.2 โปรแกรมคำนวณและลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ.....	207
7.3 การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำ.....	208
7.3.1 พารามิเตอร์ของเสาส่งเปลี่ยนแปลง.....	208
7.3.2 พารามิเตอร์ของท่อที่มีการเปลี่ยนแปลง.....	209
7.4 การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ.....	209
7.4.1 การลดทอน โดยการออกแบบโครงสร้างเสาส่ง.....	209
7.4.2 การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำโดยการต่อกราวด์	210
7.5 ผลที่ได้รับ.....	211
7.6 ข้อเสนอแนะ.....	211
7.7 งานวิจัยที่พัฒนาต่อไป.....	212

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	213
ภาคผนวก ก. กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ.....	214
ภาคผนวก ข. มาตรฐาน NACE.....	218
ภาคผนวก ค. อุปกรณ์ DC Isolation/AC Coupling.....	232
ภาคผนวก ง. การลดทอนค่า LEF.....	236
ภาคผนวก จ. ตัวอย่างการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ.....	264
ภาคผนวก ฉ. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์.....	271
ประวัติผู้เขียน.....	284

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เงื่อนไขในการหาค่า Z_1 และ Z_213
4.1	ข้อมูลระบบไฟฟ้า.....76
4.2	ข้อมูลของท่อส่งก๊าซ.....77
4.3	ข้อมูลได้จากโปรแกรม AC mitigation.....78
4.4	ตารางพารามิเตอร์ของสายส่ง.....80
4.5	ข้อมูลของท่อส่งก๊าซ.....80
4.6	การแบ่งส่วนย่อยในการคำนวณ.....80
4.7	ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ.....83
5.1	ข้อมูลของท่อส่งก๊าซ.....92
5.2	ข้อมูลโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....93
5.3	ข้อมูลโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....101
5.4	ข้อมูลโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....108
5.5	ข้อมูลโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....116
5.6	ข้อมูลโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....124
5.7	เงื่อนไขอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลด.....139
6.1	การจัดลำดับเฟสสำหรับ โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....154
6.2	การจัดลำดับเฟสสำหรับ โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....158
6.3	การจัดลำดับเฟสสำหรับ โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....162
6.4	ตารางแสดงเงื่อนไขการจัดลำดับเฟส.....166
6.5	เปอร์เซ็นต์การลดทอนจากการจัดลำดับเฟส.....167
6.6	ตารางความต้านทานจำเพาะของกราวด์ไวร์.....191
6.7	รัศมีที่เหมาะสม.....194
6.8	ข้อมูลที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ.....203
ผ.5.1	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ.....265
ผ.5.2	พารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ.....266
ผ.6.1	เปอร์เซ็นต์การลดทอนค่า LEF กรณีโครงสร้างเสาส่ง มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร โดยการจัดลำดับเฟส.....237
ผ.6.2	ค่า LEF จากการจัดลำดับเฟสของโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....252

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	ผังการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำโดยแบ่งตามลักษณะของDistributed Source Analysis8
2.2	วงจรเทียบเคียงท่อส่งก๊าซธรรมชาติ[3].....9
2.3	ลักษณะของท่อที่วางขนานกับสายส่ง.....13
2.4	วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าของท่อส่งก๊าซ.....13
2.5	วงจรเทียบเคียงเทวินิน.....15
2.6	การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อในกรณีที่แบ่งท่อออกเป็นหลายส่วน.....18
2.7	โครงสร้างของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....23
3.1	กราวด์รูด(Ground rod).....27
3.2	วงจรเทียบเคียงเทวินินที่ใช้ในการคำนวณอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ..27
3.3	การเชื่อมต่อกราวด์ไวร์แบบ Center connection ground wire.....29
3.4	การเชื่อมต่อกราวด์ไวร์แบบ End connection ground wire.....30
3.5	วงจรสมมูลที่ใช้ในการคำนวณหาแรงดันตกคร่อมกราวด์ไวร์..... 30
4.1	หน้าตาเริ่มต้นการทำงานของ โปรแกรม AC mitigation.....37
4.2	หน้าตาหลักของ โปรแกรม AC Mitigation.....38
4.3	หน้าตารับข้อมูลระบบไฟฟ้า.....39
4.4	ส่วนกระแสของสายส่ง..40
4.5	ส่วนตำแหน่งของสายส่ง.....40
4.6	ส่วนข้อมูลอื่นๆ.....41
4.7	ส่วนการทำงาน.....41
4.8	หน้าตาข้อมูลเสริม.....42
4.9	ส่วนโครงสร้างเสาส่ง.....42
4.10	หน้าตารับข้อมูลของท่อส่งก๊าซของ โปรแกรม AC Mitigation.....43
4.11	ส่วนพารามิเตอร์ของท่อ.....43
4.12	ส่วนการแบ่งท่อออกเป็นส่วนย่อย.....44
4.13	หน้าตาการเลือกเงื่อนไขการวางท่อ.....45
4.14	เงื่อนไขความไม่ต่อเนื่องของท่อส่งก๊าซ.....46
4.15	ตารางรายละเอียดส่วนย่อยของท่อส่งก๊าซ.....48
4.16	ส่วนของการทำงาน.....48

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ส่วนข้อมูลเสริม.....	49
4.18 โครงสร้างของท่อส่งก๊าซ.....	49
4.19 หน้าต่างกราฟ LEF.....	50
4.20 ส่วนการทำงาน.....	51
4.21 หน้าต่างกราฟแรงดันเหนี่ยวนำ.....	51
4.22 ส่วนการทำงานของหน้าต่างแสดงแรงดันเหนี่ยวนำ.....	52
4.23 หน้าต่างแรงดันเหนี่ยวนำและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซที่ได้จากการคำนวณ.....	53
4.24 ส่วนของตารางแสดงแรงดันเหนี่ยวนำ.....	53
4.25 ส่วนแสดงพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ.....	54
4.26 ส่วนของข้อมูลเสริม.....	54
4.27 ส่วนการทำงาน.....	54
4.28 หน้าต่างที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ.....	55
4.29 ส่วนข้อมูลเบื้องต้นของกราวด์ร็อค.....	56
4.30 ส่วนแสดงผล.....	57
4.31 ส่วนข้อมูลเสริม.....	57
4.32 ส่วนลักษณะการติดตั้งกราวด์ร็อค.....	58
4.33 ส่วนการทำงาน.....	58
4.34 หน้าต่างที่ใช้ในการคำนวณอิมพีแดนซ์ของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ.....	59
4.35 ส่วนข้อมูลเบื้องต้น.....	60
4.36 ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ.....	61
4.37 ส่วนข้อมูลเสริม.....	61
4.38 ลักษณะการติดตั้งกราวด์ไวร์.....	62
4.39 ส่วนการทำงาน.....	62
4.40 ขั้นตอนการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซของโปรแกรม AC mitigation.....	63
4.41 ขั้นตอนการคำนวณพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ.....	64
4.42 ขั้นตอนการคำนวณค่า LEF.....	65
4.43 แสดงการคำนวณหาขนาดของกราวด์ร็อคที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ.....	66
4.44 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของกราวด์ไวร์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ.....	67

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของกราวด์ไวร์กรณีการติดตั้งกราวด์แบบ Center connection ground wire.....	68
4.46 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของกราวด์ไวร์กรณีการติดตั้งกราวด์แบบ Perpendicular ground wire.....	69
4.47 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของกราวด์ไวร์กรณีการติดตั้งกราวด์แบบ End connection ground wire.....	71
4.48 ค่า LEF มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบกับค่า LEF ที่ได้จากโปรแกรม AC mitigation เมื่อโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	73
4.49 ค่า LEF มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบกับค่า LEF ที่ได้จากโปรแกรม AC mitigation เมื่อโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....	73
4.50 ค่า Pipeline propagation constantที่ใช้ในการออกแบบและได้จากโปรแกรม AC Mitigation...	74
4.51 ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อก๊าซที่ใช้ในการออกแบบและที่ได้จากโปรแกรม AC Mitigation.....	75
4.52 ลักษณะของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV.....	79
4.53 ลักษณะแนวท่อกระทำกับแนวสายส่ง.....	81
4.54 โวลต์มิเตอร์.....	81
4.55 ลักษณะของตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดันเหนี่ยวนำ.....	82
4.56 การต่อเชื่อมกับจุดที่ต้องการตรวจวัดแรงดันเหนี่ยวนำ.....	82
4.57 การติดตั้งกราวด์รูดที่ใช้วัดแรงดันเหนี่ยวนำ.....	83
4.58 การวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำ.....	83
4.59 หน้าต่างป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า.....	84
4.60 หน้าต่างแสดงกราฟ LEF ที่ได้จากการคำนวณ.....	85
4.61 หน้าต่างป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ.....	85
4.62 เสร็จสิ้นการป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ.....	86
4.63 แรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบกราฟฟิก เมื่อทำการส่งจ่ายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 300 MW.....	86
4.64 แรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบข้อ.....	87
4.65 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 60 MW.....	87

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.66	แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนทอส่งกำลังที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 120 MW.....88
4.67	แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนทอส่งกำลังที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 210 MW.....88
4.68	แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนทอส่งกำลังที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 300 MW.....88
5.1	แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำ.....91
5.2	ลักษณะ โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนและการวางท่อ ที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำ.....93
5.3	แรงดันบนทอส่งกำลังกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....94
5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....95
5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อเมื่อกระแสของ สายส่งมีการเปลี่ยนแปลงกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....96
5.6	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสของสายส่ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....97
5.7	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งที่ตำแหน่งต่าง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....98
5.8	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....98
5.9	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสที่แนวท่ออยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....99
5.10	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟส กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....99
5.11	ลักษณะ โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....100
5.12	แรงดันเหนี่ยวนำบนทอส่งกำลังกรณี โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำ เป็นรูปสามเหลี่ยม.....102
5.13	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....103
5.14	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อเมื่อกระแสของ สายส่งมีการเปลี่ยนแปลงกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....103

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสของสายส่ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....	104
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งที่ตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....	105
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....	105
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสที่แนวที่อยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....	106
5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....	107
5.20 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	108
5.21 แรงดันบนท่อนส่งก๊าซกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	109
5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	110
5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อเมื่อกระแสของ สายส่งมีการเปลี่ยนแปลงกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	111
5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสของสายส่ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	111
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งที่ตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	112
5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	113
5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสที่แนวที่อยู่ในตำแหน่ง ต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	114
5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟส กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นในแนวตั้ง 1 วงจร.....	114
5.29 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	115
5.30 แรงดันบนท่อนส่งก๊าซกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	117

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	117
5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อเมื่อกระแส ของสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	118
5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสของสายส่ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	119
5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งที่ตำแหน่งต่าง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	120
5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	120
5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวตั้งที่แนวท่อ อยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	121
5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง กรณีเสาส่งที่มี การจัดวางตัวในแนวตั้ง 2 วงจร.....	121
5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวนอนที่แนวท่อ อยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	122
5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวนอน กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร.....	122
5.40 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....	123
5.41 แรงดันบนบัพทอส่งก๊าซกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....	125
5.42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....	126
5.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อเมื่อกระแส ของสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....	126
5.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสของสายส่ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....	127

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.45	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งที่ตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....128
5.46	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....128
5.47	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวตั้งที่แนวท่อ อยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....129
5.48	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นในแนวตั้ง 4 วงจร.....129
5.49	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวนอนที่แนวท่อ อยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....130
5.50	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวนอน กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นในแนวตั้ง 4 วงจร.....130
5.51	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างวงจรที่แนวท่อ อยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....131
5.52	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างวงจร กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นในแนวตั้ง 4 วงจร.....131
5.53	อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวท่อกับแรงดันเหนี่ยวนำ.....133
5.54	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความลึกของท่อ(a).....133
5.55	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความต้านทานจำเพาะของดิน(ρ_e).....134
5.56	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความต้านทานจำเพาะของฉนวนท่อ(Rc).135
5.57	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาท่อกับแรงดันเหนี่ยวนำ(t).....136
5.58	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อส่งก๊าซ (D).....137
5.59	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความซึมซาบสัมพัทธ์ของท่อ (μ_r).....138
5.60	แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = 0$ และ $Z_2 = 0$140
5.61	แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = Z_0$ และ $Z_2 = Z_0$141
5.62	แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = \infty$ และ $Z_2 = \infty$142

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.63 แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = Z_0$ และ $Z_2 = 0$ $Z_1 = 0$ และ $Z_2 = Z_0$	143
5.64 แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = 0$ และ $Z_2 = \infty$, $Z_1 = \infty$ และ $Z_2 = 0$	144
5.65 แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = Z_0$ และ $Z_2 = \infty$, $Z_2 = Z_0$ และ $Z_1 = \infty$	145
6.1 อันตรายที่เกิดขึ้นกับมนุษย์เนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ.....	148
6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับค่า LEF.....	149
6.3 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน.....	150
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF.....	151
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF, ฉลี่ย.....	151
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเฟสกับค่า LEF.....	152
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเฟสกับค่า LEF, ฉลี่ย.....	153
6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF.....	154
6.9 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม.....	155
6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF.....	155
6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF, ฉลี่ย.....	156
6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) และระยะระหว่างเฟสในแนวนอน(SH)กับค่า LEF.....	157
6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) และระยะระหว่างเฟสในแนวนอน(SH)กับค่า LEF, ฉลี่ย.....	157
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF.....	158
6.15 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร.....	159
6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF.....	159
6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของเสาส่งกับค่า LEF, ฉลี่ย.....	160
6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสกับค่า LEF.....	161
6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสกับค่า LEF, ฉลี่ย.....	161

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.20	การกระจายค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการจัดลำดับเฟส.....162
6.21	โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางค้ำนำของสายส่งในแนวตั้ง 2 วงจร.....163
6.22	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF.....163
6.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF เฉลี่ย.....164
6.24	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) และระยะระหว่างเฟส ในแนวนอน(SH)ค่า LEF.....165
6.25	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) และระยะระหว่างเฟส ในแนวนอน(SH)ค่า LEF เฉลี่ย.....165
6.26	ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF.....167
6.27	โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางค้ำนำในแนวตั้ง 4 วงจร.....168
6.28	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF.....169
6.29	ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF เฉลี่ย.....170
6.30	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) กับค่า LEF.....170
6.31	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) กับค่า LEF เฉลี่ย.....171
6.32	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวนอน(HS) กับค่า LEF.....172
6.33	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวนอน(HS) กับค่า LEF เฉลี่ย.....172
6.34	ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มระยะระหว่างวงจร 1 และ 3 กับวงจร 2 และ 4 กับค่า LEF.....173
6.35	ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มระยะระหว่างวงจร 1 และ 3 กับวงจร 2 และ 4 กับค่า LEF เฉลี่ย.....173
6.36	ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 1-6.....174
6.37	ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 7-12.....175
6.38	ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 13-18.....175
6.39	ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 19-24.....176
6.40	ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 25-30.....176
6.41	ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 31-36.....177
6.42	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อ กับความต้านทานจำเพาะของดิน.....178

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $ Z_m / Z_o $ กับอัตราส่วน $ V_{ind} / V_{mit} $	179
6.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อท่อมีขนาด 10 นิ้ว.....	180
6.45 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อท่อมีขนาด 20 นิ้ว.....	181
6.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อท่อมีขนาด 30 นิ้ว.....	182
6.47 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อท่อมีขนาด 40 นิ้ว.....	183
6.48 ลักษณะการติดตั้งกราวด์ร็อค.....	184
6.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของ กราวด์ร็อคกับความยาว.....	185
6.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ของท่อ 10 นิ้ว.....	186
6.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ของท่อ 20 นิ้ว.....	187
6.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ของท่อ 30 นิ้ว.....	188
6.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ของท่อ 40 นิ้ว.....	189
6.54 ตำแหน่งในการติดตั้งกราวด์ไวร์.....	190
6.55 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_pX_w กับ R_wX_p ของท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 และ 20 นิ้ว.....	192
6.56 ความสัมพันธ์ระหว่าง R_pX_w กับ R_wX_p ของท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 และ 40 นิ้ว.....	193
6.57 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ของท่อ 10 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Commercial aluminum wire.....	195
6.58 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ของท่อ 10 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Commercial hard drawn copper.....	196

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.59 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 10 นิ้ว เมื่อสายกราฟด์เป็น Zin-coated steel wire.....	196
6.60 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 20 นิ้ว เมื่อสายกราฟด์เป็น Commercial aluminum wire.....	197
6.61 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 20 นิ้ว เมื่อสายกราฟด์เป็น Commercial hard drawn copper.....	197
6.62 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 20 นิ้ว เมื่อสายกราฟด์เป็น Zin-coated steel wire.....	198
6.63 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 30 นิ้ว เมื่อสายกราฟด์เป็น Commercial aluminum wire.....	198
6.64 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 30 นิ้ว เมื่อสายกราฟด์เป็น Commercial hard drawn copper.....	199
6.65 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 30 นิ้ว เมื่อสายกราฟด์เป็น Zin-coated steel wire.....	199
6.66 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 40 นิ้ว เมื่อสายกราฟด์เป็น Commercial aluminum wire.....	200
6.67 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 40 นิ้ว เมื่อสายกราฟด์เป็น Commercial hard drawn copper.....	200
6.68 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 40 นิ้ว เมื่อสายกราฟด์เป็น Zin-coated steel wire.....	201
6.69 ลักษณะ โครงสร้างเสาส่งและการวางแนวท่อที่ใช้ในการคำนวณ.....	202
6.70 แสดงค่า LEF ที่ตำแหน่งการวางสายกราฟด์กับตำแหน่งการวางท่อ.....	204
6.71 ลักษณะการติดตั้งกราฟด์.....	205
ผ.4.1 ตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันสูงสุด.....	215
ผ.4.2 Normalize Longitudinal Electric Field[8].....	215
ผ.4.3 กราฟ Propagation Constant [8].....	216
ผ.4.4 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซกรณีเปิดวงจร(Open circuit voltage) [8].....	216

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ผ.4.5 ลักษณะของท่อที่ไม่ต่อเนื่อง[8].....	217
ผ.4.6 อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อ(Characteristic impedance of pipe)[8].....	217
ผ.5.1 แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนือยวนำ.....	267

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันปัญหาด้านสภาพแวดล้อมเป็นพิษทวีความรุนแรงมากขึ้น ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากการใช้เชื้อเพลิงที่ไม่สะอาด ดังนั้นความต้องการใช้พลังงานที่สะอาดจึงเป็นประเด็นที่ถูกหยิบยกขึ้นมาพูดคุยเสมอ เช่นการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ การใช้พลังงานลม และการใช้พลังงานความร้อน ซึ่งพลังงานดังกล่าวเป็นพลังงานที่สะอาดและมีอยู่ตามธรรมชาติ แต่ความต้องการใช้พลังงานในปัจจุบันมีมากขึ้นเป็นทวีคูณพลังงานที่ได้จากแสงอาทิตย์ พลังงานจากลม และพลังงานความร้อนกลับไม่เพียงพอต่อความต้องการ เมื่อเป็นเช่นนั้นอีกทางเลือกหนึ่งคือการใช้พลังงานจากก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดและมีอยู่ตามธรรมชาติ ซึ่งเป็นที่นิยมทั้งในด้านอุตสาหกรรมขนส่ง อุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้า และการใช้ก๊าซธรรมชาติตามที่อยู่อาศัย เมื่อความต้องการก๊าซธรรมชาติมีมากขึ้นจึงได้มีการนำก๊าซธรรมชาติจากแหล่งที่อยู่ เช่นทะเลขึ้นมาผ่านโรงแยกก๊าซและส่งต่อไปยังผู้ที่มีความต้องการใช้พลังงานจากก๊าซธรรมชาติ ในการส่งผ่านก๊าซธรรมชาติจำเป็นต้องส่งผ่านทางท่อส่งก๊าซซึ่งเป็นท่อเหล็กเนื่องจากท่อเหล็กสามารถทนแรงอัดได้สูงจึงสามารถส่งได้ระยะไกล การส่งถ่ายก๊าซโดยทั่วไปท่อจะถูกฝังลงใต้ดินซึ่งการฝังท่อไม่สามารถทำการฝังท่อได้โดยตรงเนื่องจากปัญหาการผุกร่อนของท่อส่งก๊าซ ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยทำการติดตั้งระบบป้องกันสนิม (Cathodic Protection:CP) ให้กับท่อส่งก๊าซ ทำให้โครงสร้างของท่อส่งก๊าซเปลี่ยนไปคือจะมีฉนวนหุ้มท่อส่งก๊าซเพิ่มขึ้นมาเพื่อป้องกันไม่ให้ท่อสัมผัสกับดิน โดยทั่วไปการวางแนวท่อส่งก๊าซจำเป็นต้องวางภายใต้เขตการเดินสายไฟฟ้า (Right-of-Way:ROW) ขนานตามแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเนื่องจากปัญหาการเวนคืนที่ดินและปัญหาด้านการทำลายธรรมชาติ เมื่อเป็นเช่นนั้นปัญหาที่ตามมาคือปัญหาการรบกวนจากสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากกระแสในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ที่เป็นท่อเหล็ก มีฉนวนหุ้มและฝังอยู่ใต้ดิน แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อคนที่สัมผัสกับส่วนที่เชื่อมต่อกับท่อส่งก๊าซเช่นจุดที่ใช้ในการบำรุงรักษาท่อส่งก๊าซ ซึ่งความรุนแรงที่เกิดขึ้นเริ่มต้นจากหาคะตึงเสถียรชีวิต ได้ถ้าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเกินกว่ามาตรฐาน NACE(National Association of Corrosion Engineering Standard, RP0177-83 Item No.53039 ดังภาคผนวก ข.) กำหนดคือแรงดันเหนี่ยวนำต้องไม่เกิน 15 โวลต์ ปัญหาดังกล่าวสามารถทำการแก้ไขปัญหาได้โดยการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่จะเกิดขึ้นก่อนที่จะทำการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติ หากพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่คำนวณได้มีค่ามากกว่ามาตรฐานกำหนดจะต้องทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำดังกล่าวเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับคนที่ทำงานบำรุงรักษาท่อส่งก๊าซ

ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้นำเสนอการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำและได้ทำการพัฒนาโปรแกรม AC mitigation ขึ้นมาเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติและช่วยในการหาขนาดของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำให้เป็นไปตามข้อกำหนดในมาตรฐาน NACE โดยอาศัยสภาวะแวดล้อมในประเทศ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของการทำวิทยานิพนธ์นี้เพื่อวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่แนวท่อนส่งก๊าซธรรมชาติมีฉนวนหุ้มฝังอยู่ใต้ดินและอยู่ในเขตการเดินสายไฟฟ้า พร้อมทั้งทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1) สามารถอธิบายการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้ เพื่อทำความเข้าใจถึงกลไกที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติที่มีแหล่งกำเนิดเป็นสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
- 2) สามารถทำการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเพื่อหาตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุด
- 3) สามารถลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE เพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับชีวิตของผู้ปฏิบัติงานบำรุงรักษาแนวท่อนส่งก๊าซ
- 4) สามารถพัฒนาโปรแกรม AC mitigation ด้วยภาษา VISUAL BASIC เพื่อใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติที่มีฉนวนหุ้มฝังอยู่ใต้ดินและแนวท่อนอยู่ภายใต้เขตการเดินสายไฟฟ้ารวมทั้งสามารถลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยที่ท่อนส่งก๊าซเป็นท่อเหล็กมีฉนวนหุ้มฝังอยู่ใต้ดินวางขนานกับแนวสายส่ง มีสมมติฐานของการศึกษาดังนี้

- 1) แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นผลจากกระแสในสายส่งที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาก่อให้เกิดสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาเคลื่อนที่ตัดผ่านแนวท่อนที่วางขนานกับแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนี่ยวนำทำให้

เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าบนท่อดึงก๊าซธรรมชาติซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไหลในวงปิดที่เหมาะสมตามกฎของฟาราเดย์

- 2) จุดที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างของเสาส่งและจำนวนวงจรที่ใช้ในการส่งจ่ายและลักษณะการวางแนวท่อดึงก๊าซ
- 3) การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยน โครงสร้างของเสาส่งและการติดตั้งกราวด์ให้กับท่อดึงก๊าซธรรมชาติ โดยแรงดันเหนี่ยวนำหลังการลดทอนต้องไม่เกิน 15 โวลต์
- 4) โปรแกรม AC mitigation ซึ่งถูกพัฒนาจากภาษา VISUAL BASIC สามารถทำการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อดึงก๊าซและสามารถทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อดึงก๊าซ ได้โดยการแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วนคือส่วนที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำและส่วนที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ โดยส่วนที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำได้ทำการแบ่งท่อดึงออกเป็นช่วงๆจากจุดที่ไม่ต่อเนื่องเริ่มต้นถึงจุดไม่ต่อเนื่องถัดไปโดยค่าที่ได้จากการคำนวณจะเป็นค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของท่อดึงย่อยนั้นๆ สำหรับส่วนการลดทอนสามารถทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำได้โดยการต่อกราวด์รูด(Ground rod) และกราวด์ไวร์(Ground wire)ในตำแหน่งที่แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุดให้กับท่อดึงก๊าซธรรมชาติ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

จากกฎของฟาราเดย์(Faraday's Law) กล่าวไว้ว่า “สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า(Electromotive force :emf) ซึ่งทำให้เกิดเป็นกระแสไฟไหลในวงปิดที่เหมาะสม[1]” จากกฎของฟาราเดย์สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$emf = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

ถ้าเส้นวงปิดเป็นขดลวดตัวนำที่มีจำนวนรอบมี N รอบ จากสมการ (1.1) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$emf = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2)$$

เมื่อ ϕ เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดในแต่ละขดและค่า emf เป็นศักย์ไฟฟ้าซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์มีหน่วยเป็นโวลต์ ดังนั้นเราสามารถกำหนดนิยามของ emf ได้จากอินทิกรัลเชิงเส้นของสนามไฟฟ้าได้ดังนี้

$$emf = \oint \vec{E} \cdot d\vec{L} \quad (1.3)$$

โดย \vec{E} คือความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m) และ $d\vec{L}$ เป็นความยาวของวงปิด (m) ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งกำลังกระแสไฟฟ้า เป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กเนื่องจากสายส่งและความเข้มของสนามแม่เหล็กจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเทคนิคในสมการที่ (1.3) ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำคือการพิจารณาผลกระทบเนื่องจากสนามแม่เหล็กในรูปของสนามไฟฟ้าตามแนวยาวแทนการคิดผลกระทบที่เกิดขึ้นทางสนามแม่เหล็กโดยตรงเนื่องมาจากการสร้างแบบจำลองมีความยุ่งยาก และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำจากทฤษฎีของสายส่งรวมทั้งได้นำเอาวงจรเทียบเคียงเทวินินมาร่วมทำการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำด้วย

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนดังนี้

- 1) วิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งกำลังกระแสไฟฟ้าที่มีฉนวนหุ้มฝังอยู่ใต้ดินและแนวท่ออยู่ภายใต้เขตการเดินสายไฟฟ้า ตามลักษณะของแนวท่อที่กระทำกับแนวสายส่งไฟฟ้า โดยแบ่งเป็นลักษณะของแนวท่อที่ขนานกับสายส่งตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อและลักษณะของแนวท่อที่ไม่ขนานกับสายส่งตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อ เช่นมีการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างสายส่งกับแนวท่อ แนวท่อมีการหักผ่านสายส่ง จุดที่มีการเชื่อมต่อท่อโดยใช้ฉนวนกัน เป็นต้น
- 2) สร้างโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งกำลังกระแสไฟฟ้าที่ฝังอยู่ใต้ดินและแนวท่ออยู่ภายใต้เขตปลอดภัยของการเดินสาย พร้อมทั้งลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อส่งกำลังกระแสไฟฟ้าเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE โดยพัฒนาจากโปรแกรมภาษา VISUAL BASIC ซึ่งโปรแกรมที่จัดสร้างขึ้นเรียกว่าโปรแกรม AC mitigation

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงโดยทำการพัฒนาโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งกำลังกระแสไฟฟ้าที่ฝัง

อยู่ใต้ดินและแนวท่ออยู่ภายใต้เขตการเดินสายไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนของการศึกษาสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- 1) ศึกษาพฤติกรรมการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
- 2) ศึกษาหลักการและเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่ใต้ดินและแนวท่ออยู่ภายใต้เขตปลอดภัยของการเดินสาย
- 3) ศึกษาการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่ใต้ดินและแนวท่ออยู่ภายใต้เขตปลอดภัยของการเดินสาย เพื่อหาค่าความต้านทานของกราวด์ที่จะทำการต่อและตำแหน่งของท่อที่จะทำการต่อลงกราวด์
- 4) ศึกษาการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำโดยใช้กราฟมาตรฐานในการออกแบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบัน
- 5) จัดสร้างเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์โดยพัฒนาจากโปรแกรม MATLAB 5.3.1 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่ใต้ดินและแนวท่ออยู่ภายใต้เขตการเดินสายไฟฟ้า
- 6) สร้างโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่ใต้ดินและแนวท่ออยู่ภายใต้เขตเดินสายไฟฟ้าลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE โดยจัดทำเป็นโปรแกรมพัฒนาจากโปรแกรมภาษา VISUAL BASIC ซึ่งโปรแกรมที่จัดสร้างขึ้นเรียกว่าโปรแกรม AC mitigation
- 7) ทดสอบโปรแกรมโดยการนำค่า LEF เนื่องจากโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร และโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน อิมพีแดนซ์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อและค่าคงที่การแพร่ของคลื่นที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม AC mitigation เทียบกับกราฟที่ได้จากมาตรฐาน NACE
- 8) ทดสอบโปรแกรม AC Mitigation กับโครงสร้างที่มีการติดตั้งใช้งานจริงที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุดจังหวัดระยอง

1.7 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถอธิบายการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้

- 2 สามารถหาตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติได้
- 3 สามารถนำโปรแกรม AC mitigation ที่พัฒนาขึ้นมาหาขนาดของกราวด์ที่ต้องการติดตั้ง เพื่อลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำในกรณีแรงดันเหนี่ยวนำสูงกว่ามาตรฐาน NACE กำหนดได้
- 4 สามารถหาตำแหน่งในการวางแนวท่อนส่งก๊าซขนานกับแนวสายส่งที่มีการจัดวางตัวนำในลักษณะต่างๆ ให้ผลของแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลงได้
- 5 สามารถนำโปรแกรม AC mitigation ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติและช่วยในการวางแผนก่อนการเดินท่อนส่งก๊าซได้

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำ ที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

2.1 บทนำ

ในบทนี้นำเสนอวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยเริ่มต้นจากหลักการที่ใช้ในการวิเคราะห์ วิธีการวิเคราะห์ เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์รวมถึงการหาค่าพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ และการหาค่าสนามไฟฟ้าตามแนวยาว (Longitudinal Electric field: LEF) เนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยมีจุดประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นเทคนิคและสมการที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ

2.2 หลักการของแรงดันเหนี่ยวนำ

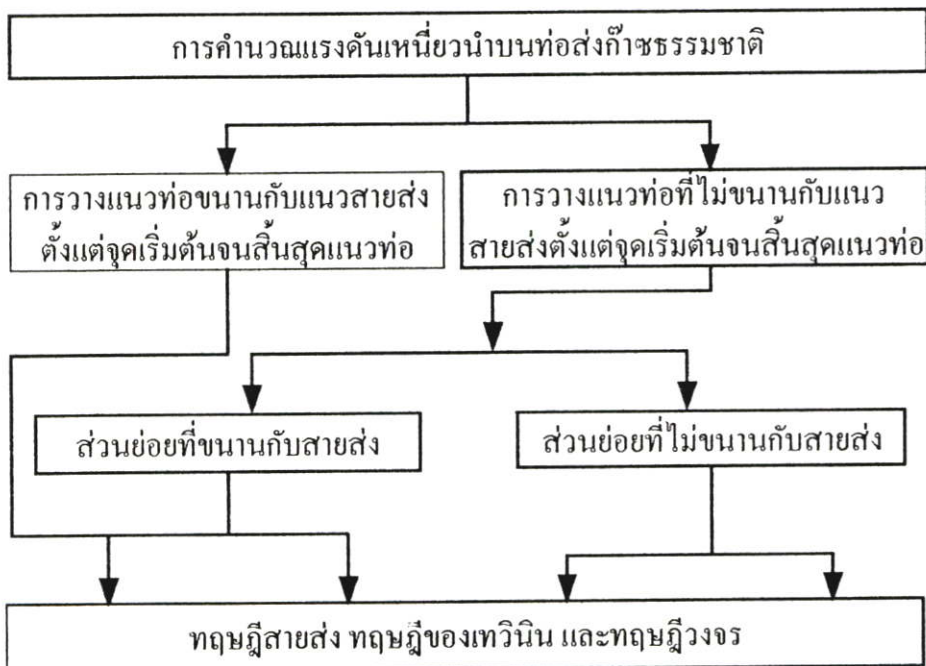
จากกฎของฟาราเดย์กล่าวไว้ว่า “สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดเป็นกระแสไฟไหลในวงจรปิดที่เหมาะสม” [1] จากกฎของฟาราเดย์สามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $emf = -d\Phi/dt$ ถ้าเส้นรอบวงปิดเป็นขดลวดตัวนำที่มีจำนวนรอบ N รอบ สามารถเขียนใหม่ได้เป็น $emf = -N d\Phi/dt$ เมื่อ Φ เป็นเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดในแต่ละขดและค่า emf เป็นศักย์ไฟฟ้าซึ่งเป็นปริมาณสเกลาร์มีหน่วยเป็นโวลต์ ดังนั้นเราสามารถกำหนดนิยามของ emf ได้จากอินทิกรัลเชิงเส้นของสนามไฟฟ้าได้ดังนี้ $emf = \oint \bar{E} \cdot d\bar{L}$ โดย \bar{E} คือความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m) และ $d\bar{L}$ เป็นความยาวของวงปิด (m.) ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กเนื่องจากสายส่งและความเข้มของสนามแม่เหล็กจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่ง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้นำเทคนิค $emf = \oint \bar{E} \cdot d\bar{L}$ ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำคือการพิจารณาผลกระทบเนื่องจากสนามแม่เหล็กในรูปของสนามไฟฟ้าตามแนวยาวแทนการสร้างแบบจำลองในรูปแบบของสนามแม่เหล็กโดยตรงเนื่องจากความยุ่งยากในการสร้างมากกว่าการสร้างแบบจำลองโดยใช้สนามไฟฟ้าและเทคนิคการวิเคราะห์ในรูปของสนามไฟฟ้านิยมใช้ในการคำนวณทางด้านอุตสาหกรรมแม่เหล็ก[2] โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากทฤษฎีของสายส่งรวมทั้งได้นำเอาวงจรเทียบเคียงเทวินินมาร่วมทำการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำด้วย

2.3 การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ

การวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากการรบกวนของสนามแม่เหล็กเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง อยู่ในรูปของ อินдукทีฟคัปปลิง (Inductive coupling) ในการวิเคราะห์สามารถทำได้โดยการใช้ทฤษฎี Distribution source[3] โดยการแบ่ง อินдукทีฟคัปปลิงออกเป็นส่วนๆตามลักษณะของท่อที่กระทำกับสายส่ง ซึ่งการรบกวนที่เกิดขึ้นตลอดแนวท่อนส่งก๊าซธรรมชาติและรอบๆพื้นดินเนื่องมาจากการ สูญเสียที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ ค่าคงที่การแพร่ของคลื่น(Wave propagation constant: γ)และอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อนส่งก๊าซ(Characteristic Impedance: Z_0) ผลของอินдукทีฟคัปปลิงจะเป็นฟังก์ชันของแรงดันที่กระจายเนื่องจากสายส่ง $E_x(s)$ คือสนามไฟฟ้าตามความยาวของท่อนส่งก๊าซ(Longitudinal Electric Field) จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าปัญหาของการเชื่อมต่อสามารถแบ่งเป็นกรณีๆ ตามทฤษฎี Distribution source สำหรับกรณีแรกจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างท่อนส่งก๊าซกับระบบสายส่งที่มีการเปลี่ยนแปลงโดยการพิจารณา 2 เงื่อนไขดังนี้

1. กรณีที่แนวท่อนขนานกับแนวสายส่งตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อ
2. กรณีที่แนวท่อไม่ขนานกับแนวสายส่งตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อ

ซึ่งสามารถแบ่งกรณีการพิจารณาได้ดังนี้

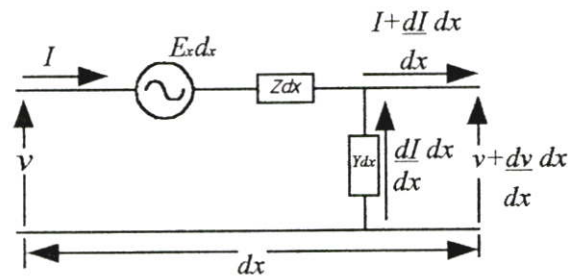


รูปที่ 2.1 ผังการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำโดยแบ่งตามลักษณะของ Distribution Source Analysis

โคอะแกรมการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำโดยการพิจารณาตามลักษณะของการวางท่อส่งกำลังกระทำกับสายส่งซึ่งเห็นได้ว่าในเส้นทางแรกคือลักษณะการวางท่อขนานกับแนวของสายส่งตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อ และเส้นทางที่ 2 คือกรณีที่แนวท่อไม่ขนานกับแนวสายส่งตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อ การพิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำโดยการแบ่งลักษณะของแนวท่อที่กระทำกับแนวสายส่งออกเป็น ส่วนย่อยตามลักษณะการกระทำแนวสายส่งซึ่งจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการกระทำกับแนวสายส่งจะเรียกจุดนี้ว่าจุดไม่ต่อเนื่อง(Discontinuity)เช่น จุดที่มีการหักเข้า หักออกจากแนวสายส่ง จุดที่มีการสลับสายส่ง(Transpost) และจุดที่มีการเปลี่ยนระยะระหว่างสายส่งเป็นต้น ในส่วนสุดท้ายของการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำทั้งเส้นทางแรกและเส้นทางที่ 2 โดยใช้ทฤษฎีโนดเข้ามาทำการวิเคราะห์

2.3.1 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำ

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นโดยการพิจารณาจากแรงดันที่เกิดขึ้นบนท่อเป็นแหล่งจ่ายย่อยและจำนวนของแหล่งจ่ายจะเพิ่มขึ้นตามความยาวของท่อซึ่งแสดงในรูปของ $E_x dx$ ซึ่งวงจรเทียบเคียงที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 โดยกำหนดให้ E_x คือสนามไฟฟ้าตามแนวยาวที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่ง E_x ที่แสดงในที่นี้ไม่ใช่สนามไฟฟ้าสถิตย์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดันจากสายส่งไฟฟ้า แต่ค่า E_x จะเหมือนกันกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าของสายส่งที่ถูกจำกัดแรงดันโดยค่าของอิมพีแดนซ์ $Z = R + j\omega L$ และค่าแอดมิตแตนซ์ $Y = G + j\omega C$ ต่อหน่วยความยาว



รูปที่ 2.2 วงจรเทียบเคียงท่อส่งกำลังธรรมชาติ[3]

กำหนดให้สัญญาณที่รับทวนเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ($e^{j\omega t}$) จากรูปที่ 2.2 ใช้ทฤษฎีของเคอร์ชอป (KVL) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสได้ดังนี้

$$-V + E_x dx + Z dx + V + \frac{dv}{dx} dx = 0 \quad (2.1)$$

$$V + \frac{dV}{dx} dx + \frac{dI dx}{Y dx dx} = 0 \quad (2.2)$$

นำสมการที่ (2.1) และ (2.2) มาเขียนใหม่ได้เป็น

$$E_x dx + I Z dx - dV = 0 \quad (2.3)$$

$$V + dV + \frac{dI}{Y dx} = 0 \quad (2.4)$$

จัดรูปสมการ (2.3)

$$\frac{dV}{dx} = E_x - I Z \quad (2.5)$$

$$I = \frac{E_x}{Z} - \frac{dV}{Z dx} \quad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.4) ถ้าวางแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์มีค่าน้อยมากสามารถหาค่ากระแสได้ดังนี้

$$\frac{dI}{dx} = -Y V \quad (2.7)$$

$$V = -\frac{1}{Y} \frac{dI}{dx} \quad (2.8)$$

นำสมการที่ (2.6) แทนลงในสมการที่ (2.7) เพื่อกำจัดเทอมของกระแสทิ้งไป สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการอนุพันธ์อันดับสองได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d\left(\frac{E_x}{Z} - \frac{dV}{Z dx}\right)}{dx} &= -Y V \\ \frac{dE_x}{Z dx} - \frac{d^2 V}{Z dx^2} &= -Y V \\ \frac{d^2 V}{Z dx^2} &= \frac{dE_x}{Z dx} + Y V \\ \frac{d^2 V}{dx^2} &= Z Y V + \frac{dE_x}{dx} \\ \frac{d^2 V}{dx^2} - Z Y V &= \frac{dE_x}{dx} \end{aligned} \quad (2.9)$$

แทนสมการที่ (2.8) ลงในสมการที่ (2.9)

$$\begin{aligned} \frac{d\left(-\frac{1}{Y} \frac{dI}{dx}\right)}{dx} &= E_x - Z \\ -\frac{1}{Y} \frac{d^2 I}{dx^2} &= E_x - Z \\ \frac{d^2 I}{dx^2} &= IYZ - YE_x \end{aligned} \quad (2.10)$$

กำหนดให้ γ เป็น ค่าคงที่ของการแพร่ของคลื่น ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์และแอดมิแตนซ์ของตัวกลาง ดังนั้นสามารถเขียนคำจำกัดความใหม่ โดยกำหนดให้ $\gamma = \sqrt{ZY}$ แทนลงในสมการที่ (2.9)

$$\frac{d^2 V}{dx^2} - \gamma^2 V = \frac{dE_x}{dx} \quad (2.11)$$

$$\frac{d^2 I}{dx^2} - \gamma^2 I = -YE_x \quad (2.12)$$

จะเห็นว่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับ 2 ในการแก้สมการดังกล่าว เพื่อหาแรงดันและกระแสที่เกิดขึ้น จากผลเฉลยของสมการอนุพันธ์อันดับสองของสมการที่ (2.11) และสมการที่ (2.12) สามารถหาได้ดังนี้

$$I(x) = Ae^{-\gamma x} + Be^{\gamma x} \quad (2.13)$$

$$V(x) = -Z_0 [Ae^{-\gamma x} - Be^{\gamma x}] \quad (2.14)$$

กำหนดให้

$$A = K_1 + P(x) \quad (2.15)$$

$$B = K_2 + Q(x) \quad (2.16)$$

$$P(x) = \frac{1}{2Z_0} \int_{x_1}^x e^{-\gamma s} E_x(s) ds \quad (2.17)$$

$$Q(x) = \frac{1}{2Z_0} \int_x^{x_2} e^{\gamma s} E_x(s) ds \quad (2.18)$$

$$K_1 = \rho_1 e^{-\gamma x_1} \frac{\rho_2 P(x_2) e^{-\gamma x_2} - Q(x_1) e^{\gamma x_2}}{e^{\gamma(x_2-x_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(x_2-x_1)}} \quad (2.19)$$

$$K_2 = \rho_2 e^{-\gamma x_2} \frac{\rho_1 Q(x_1) e^{\gamma x_1} - P(x_2) e^{-\gamma x_1}}{e^{\gamma(x_2-x_1)} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma(x_2-x_1)}} \quad (2.20)$$

กำหนดให้

$$\rho_1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}, \quad \rho_2 = \frac{Z_2 - Z_0}{Z_2 + Z_0}, \quad \gamma = \sqrt{YZ}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \frac{Z}{\gamma}$$

$V(x)$ คือ แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซ (Induce voltage on gas pipeline)

$I(x)$ คือ กระแสที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซ (Current on gas pipeline)

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อส่งก๊าซ

Z_1 คือ อิมพีแดนซ์ของจุดที่ $x = x_1$ (Terminal impedance at $x = x_1$)

Z_2 คือ อิมพีแดนซ์ของจุดที่ $x = x_2$ (Terminal impedance at $x = x_2$)

ρ_1 คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนที่จุด $x = x_1$ (Reflection coefficient at $x = x_1$)

ρ_2 คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนที่จุด $x = x_2$ (Reflection coefficient at $x = x_2$)

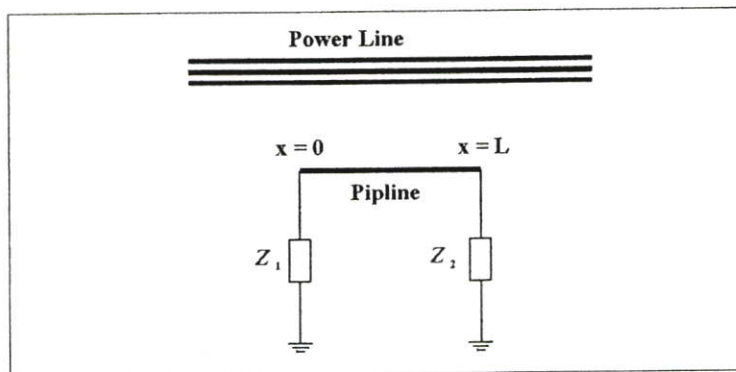
γ คือ ค่าคงที่การแพร่ของคลื่น

2.3.2 การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำกรณีท่อขนานกับสายส่งตลอดแนวท่อ

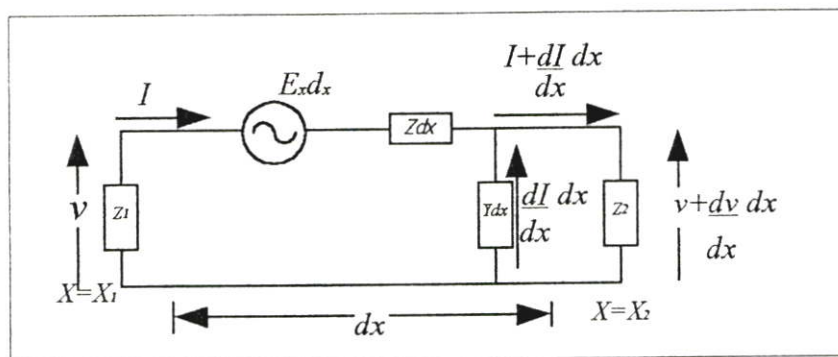
(Pipeline Parallel to Transmission Line)

จากรูปที่ 2.3 แสดงลักษณะของการวางแนวท่อกระทำกับแนวสายส่งของระบบไฟฟ้า 3 เฟส และวงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าของท่อส่งก๊าซสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.4 ในกรณีนี้สนามไฟฟ้าตามยาว $E_x(s)$ จะมีค่าคงที่ถ้าระยะห่างระหว่างแนวท่อกับแนวสายส่งคงที่ตลอดแนวท่อดังนั้นกำหนดให้ค่าสนามไฟฟ้าตามยาวมีค่าเท่ากับ E_0 และ ความยาวของท่อมีค่าเท่ากับ L

จากรูป 2.4 กำหนดให้ค่า $X = X_1$ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_1 เรียกว่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย และที่จุดต่อ $X = X_2$ มีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ Z_2 อิมพีแดนซ์ของโหลด ซึ่งเงื่อนไขของอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและอิมพีแดนซ์ของโหลดแสดงไว้ดังตารางที่ 2.1 จากตารางแสดงให้เห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและอิมพีแดนซ์ของโหลดขึ้นอยู่กับจุดต่อเป็นหลัก



รูปที่ 2.3 ลักษณะของท่อที่วางขนานกับสายส่ง



รูปที่ 2.4 วงจรเทียบเคียงทางไฟฟ้าของท่อส่งก๊าซ

ตารางที่ 2.1 เงื่อนไขในการหาค่า Z_1 และ Z_2

ลำดับที่	ลักษณะของการเชื่อมต่อ	การเลือกค่าอิมพีแดนซ์ของโหลด
1	Z_1 ต่อกาวด์ และ Z_2 ต่อกาวด์	$Z_1 = 0$ และ $Z_2 = 0$
2	Z_1 ต่อกาวด์ และ Z_2 ต่อดนวน	$Z_1 = 0$ และ $Z_2 = \infty$
3	Z_1 ต่อดนวน และ Z_2 ต่อกาวด์	$Z_1 = \infty$ และ $Z_2 = 0$
4	Z_1 ต่อดนวน และ Z_2 ต่อดนวน	$Z_1 = \infty$ และ $Z_2 = \infty$

จากสมการที่ (2.17) และ (2.18) เมื่อ $X_1 = 0, X_2 = L$ และค่า $E_x(s) = E_0$ สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$P(x) = \frac{1}{2Z_0} \int_0^x e^{-\gamma s} E_x(s) ds = \frac{E_0}{2\gamma Z_0} (e^{\gamma x} - 1) \tag{2.21}$$

$$Q(x) = \frac{1}{2Z_0} \int_x^{x_2} e^{\gamma s} E_x(s) ds = \frac{E_0}{2\gamma Z_0} (e^{-\gamma x} - e^{-\gamma L}) \quad (2.22)$$

นำสมการที่ (2.21) และ (2.22) แทนในสมการที่ (2.19) และ (2.20) ตามลำดับ

$$K_1 = \frac{\rho_1 E_0}{2\gamma Z_0} \left[\frac{\rho_2 (1 - e^{-\gamma L}) + 1 - e^{\gamma L}}{e^{\gamma L} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma L}} \right] \quad (2.23)$$

$$K_2 = \frac{\rho_2 E_0 e^{-\gamma L}}{2\gamma Z_0} \left[\gamma \frac{\rho_1 (1 - e^{-\gamma L}) + 1 - e^{\gamma L}}{e^{\gamma L} - \rho_1 \rho_2 e^{-\gamma L}} \right] \quad (2.24)$$

แทนค่า $Z_1, Z_2, K_1, K_2, P(x)$ และ $Q(x)$ ลงในสมการ (2.15) และ (2.16) ตามลำดับ นำค่า A และ B ที่ได้แทนลงในสมการที่ (2.17) และ (2.18) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังสมการที่ (2.25)

$$V(x) = \frac{E_0 \left\{ \begin{aligned} & [Z_2(Z_1 - Z_0) - Z_1(Z_2 + Z_0)] e^{\gamma L} e^{-\gamma x} \\ & - [Z_1(Z_2 - Z_0) - Z_2(Z_1 + Z_0)] e^{\gamma L} e^{\gamma(x-L)} \end{aligned} \right\}}{\gamma [(Z_1 + Z_0)(Z_2 + Z_0) e^{\gamma L} - (Z_1 - Z_0)(Z_2 - Z_0) e^{-\gamma L}]} \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.25) จะเห็นได้ว่าแรงดันที่เกิดขึ้นเป็นแรงดันที่จุดใดๆ บนท่อส่งก๊าซ ดังนั้นในการหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสิ้นสุดแนวท่อสามารถทำได้โดยแทนค่า $X=0$ หรือ $X=L$ รวมกับค่า Z_2 และ Z_1 ในสมการที่ (2.25) จากสมการที่ (2.25) เมื่อทำการแทนค่า $X=0$ ผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (2.26)

เมื่อ $X=0$

$$V(0) = V_{th} \cdot \frac{Z_1}{Z_1 + Z_{th}} \quad (2.26)$$

V_{th} คือ แรงดันเทียบเคียงเทวินิน

Z_{th} คือ อิมพีแดนซ์เทียบเคียงเทวินิน

Z_{th} คือค่า Input Impedance ของท่อส่งก๊าซ กำหนดให้ $Z_1 = \infty$ คือท่อลอยอยู่ที่อากาศ สามารถหาค่า

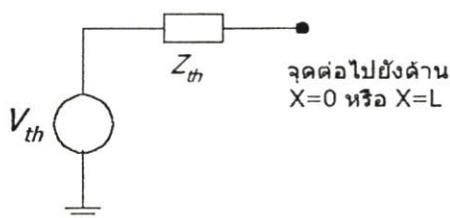
แรงดันเทียบเคียงเทวินิน ได้ดังสมการที่ (2.26) และค่าอิมพีแดนซ์เทียบเคียงเทวินิน (Z_{th}) ดังสมการที่ (2.27)

$$V_{th} = V(0) \Big|_{Z_1=\infty}$$

$$V_{th} = \frac{E_0}{\gamma} \frac{2Z_2 - (Z_2 + Z_0)e^{\gamma L} - (Z_2 - Z_0)e^{-\gamma L}}{(Z_2 + Z_0)e^{\gamma L} - (Z_2 - Z_0)e^{-\gamma L}} \quad (2.27)$$

$$Z_{th} = Z_0 \left[\frac{(Z_2 + Z_0)e^{\gamma L} - (Z_2 - Z_0)e^{-\gamma L}}{(Z_2 + Z_0)e^{\gamma L} + (Z_2 - Z_0)e^{-\gamma L}} \right] \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.27) และ (2.28) สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของวงจรเทียบเคียงเทวินินเพื่อในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าสิ่งที่สำคัญในหัวข้อนี้คือวงจรเทียบเคียงเทวินินและผลของค่า Z_2 และ Z_1 ที่จะนำมาประกอบการพิจารณาการแยกผลของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น เมื่อเป็นเช่นนั้นการวิเคราะห์ขึ้นอยู่กับลักษณะของแนวท่อเป็นหลักหรือความไม่ต่อเนื่องของสายส่ง สามารถแบ่งได้โดยใช้ทฤษฎีของเทวินินในแต่ละช่วงของท่อที่ไม่ต่อเนื่องหรือสนามที่เกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องซึ่งจะพิจารณาหลังจากหัวข้อนี้



รูปที่ 2.5 วงจรเทียบเคียงเทวินิน

2.3.3 การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำกรณีที่แนวท่อไม่ขนานกับแนวสายส่งตลอดแนวท่อ

เนื่องจากลักษณะของการวางแนวท่อที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น มีการหักเข้าหรือหักออกจากแนวสายส่งเป็นผลทำให้สนามไฟฟ้าตามยาวท่อมีการเปลี่ยนแปลงจากส่วนที่ผ่านมาระพิจารณาในกรณีที่สนามไฟฟ้าตามแนวยาวของท่อมีค่าคงที่สำหรับในหัวข้อนี้จะพิจารณาเมื่อสนามไฟฟ้าตามยาวเกิด

การเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าตามแนวยาวท่อเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้นกับความยาวท่อส่งก๊าซ (s) ดังสมการที่ (2.29)

$$E_x(s) = BS + C; \quad 0 \leq s \leq L \quad (2.29)$$

ในกรณีที่ท่อขนานกับสายส่งตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อ แสดงว่าสนามไฟฟ้าตามแนวยาวสม่ำเสมอ (Longitudinal Electric Field uniform) และมีค่าคงที่ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามแนวยาวไม่คงที่เริ่มต้นโดยการแทน $E_x(s)$ สมการที่ (2.29) ในสมการที่ (2.21) ถึงสมการที่ (2.24) จะได้ค่า $P(x)$ และ $Q(x)$ ผลที่ได้จากการแทนค่าดังกล่าวแทนลงในสมการเพื่อหาค่า K_1 และ K_2 แทนค่าลงในสมการเพื่อหาค่า $V(x)$

$$V(x) = Z_0 \cdot \left\{ \begin{array}{l} -\frac{B}{\gamma^2 Z_0} + \left[K_1 - \frac{1}{2\gamma Z_0} \left(\frac{-B}{\gamma} + C \right) \right] e^{-\gamma x} \\ - \left[K_2 - \frac{e^{-\gamma L}}{2\gamma Z_0} \left(BL + \frac{B}{\gamma} + C \right) \right] e^{\gamma x} \end{array} \right\} \quad (2.30)$$

สามารถหาค่า K_1 และ K_2 ได้จากสมการ

$$K_1 = \frac{\rho_1}{2\gamma Z_0} \left\{ \rho_2 \left[BL + \left(\frac{-B}{\gamma} + C \right) (1 - e^{-\gamma L}) \right] + \left[BL + \left(\frac{B}{\gamma} + C \right) (1 - e^{\gamma L}) \right] \right\} \quad (2.31)$$

$$K_2 = \frac{\rho_1 e^{-\gamma L}}{2\gamma Z_0} \left\{ \rho_1 \left[BL e^{-\gamma L} + \left(\frac{B}{\gamma} + C \right) (1 - e^{-\gamma L}) \right] + \left[-BL e^{\gamma L} + \left(-\frac{B}{\gamma} + C \right) (1 - e^{\gamma L}) \right] \right\} \quad (2.32)$$

จากสมการที่ (2.30) เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในกรณีที่ท่อไม่ขนานกับแนวสายส่งตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อ

2.3.4 การใช้ทฤษฎีโหนดในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำในกรณีที่สองที่ต่อไม่ขนานกับแนวสายส่ง ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อ

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซในกรณีที่แนวท่อส่งก๊าซไม่ขนานกับแนวของสายส่งตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อ จากปัญหาดังกล่าวสามารถทำการพิจารณาได้โดยใช้หลักการของวงจรเทียบเคียงเทวินินร่วมกับการใช้สมการของโหนดในการวิเคราะห์หาแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซ

จากรูปที่ 2.6a แสดงให้เห็นลักษณะความไม่ต่อเนื่องของท่อส่งก๊าซ ซึ่งเป็นเงื่อนไขในการแบ่งท่อออกเป็นส่วนๆ และจากจุดที่ไม่ต่อเนื่องสามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเคียงเทวินินได้ดังในรูปที่ 2.6(b) เพื่อใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดไม่ต่อเนื่อง โดยกำหนดให้ V_{thL} และ Z_{thL} เป็นแหล่งจ่ายแรงดันเทียบเคียงเทวินินและอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายจะเป็นส่วนที่อยู่ด้านซ้ายมือจากจุดที่ทำการพิจารณา V_{thR} และ Z_{thR} เป็นแหล่งจ่ายแรงดันเทียบเคียงเทวินินและอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายจะเป็นส่วนที่อยู่ด้านขวามือจากจุดที่พิจารณาและค่า Z_M คือค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดหาได้จาก

$$V(M) = \frac{\frac{V_{thL}}{Z_{thL}} + \frac{V_{thR}}{Z_{thR}}}{\frac{1}{Z_{thL}} + \frac{1}{Z_M} + \frac{1}{Z_{thR}}} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.33) แรงดันกำหนดให้ $V(M) = 0$ ได้ก็ต่อเมื่อ

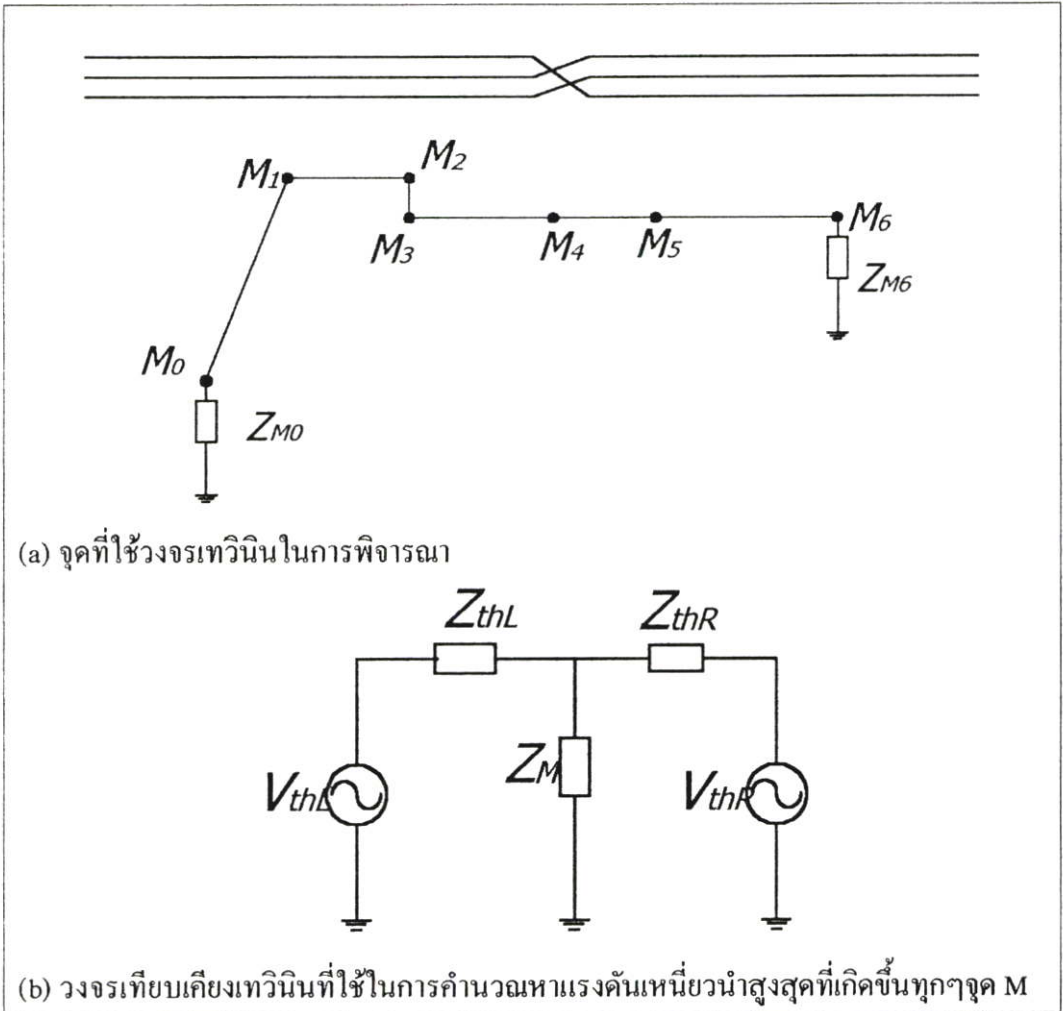
1. $Z_M = 0$ หรือ
2. $V_{thL}Z_{thR} = -V_{thR}Z_{thL}$

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นสูงสุดตรงจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. M_1 เป็นจุดที่เชื่อมต่อระหว่างท่อที่ขนานกับแนวสายส่งกับแนวท่อที่ไม่ขนานกับแนวสายส่ง
2. M_2 และ M_3 เป็นจุดที่เชื่อมต่อระหว่างแนวท่อที่ขนานกับแนวสายส่งกับแนวท่อที่ขนานกับแนวสายส่ง แต่ระยะห่างจากสายส่งไม่เท่ากัน
3. M_4 เป็นจุดที่มีการทรานโพลสายส่ง

- 4 M_5 เป็นจุดที่มีความแตกต่างของคุณสมบัติทางไฟฟ้าเช่นจุดที่มีค่าความต้านทานจำเพาะของดินสูงและค่าความต้านทานจำเพาะของดินต่ำ
- 5 M_6 เป็นจุดสิ้นสุดแนวท่อที่มีการเชื่อมต่อกับกราวด์หรือเชื่อมต่อกับฉนวน

จากจุด M_1, M_2, M_3 และ M_6 แสดงให้เห็นว่าเป็นจุดที่ท่อไม่ต่อเนื่องและจุดที่ M_4 เป็นจุดที่สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามแนวยาวไม่ต่อเนื่อง จุดที่ M_5 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อไม่ต่อเนื่องจากการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (2.33)



รูปที่ 2.6 การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อในกรณีที่แบ่งท่อออกเป็นหลายส่วน

2.4 การคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าตามแนวยาว (Longitudinal Electric Fields :LEF) ของระบบไฟฟ้าสามเฟสสมดุล

ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนท่อกำกับที่ฝังอยู่ใต้ดินภายในเขตเดินสายไฟฟ้า โดยที่แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าตามแนวยาว ที่เปลี่ยนแปลงตามกระแสของสายส่งเป็นหลัก

2.4.1 การหาค่า LEF เนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

ในการพิจารณาค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงที่เป็นปัจจัยในการทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนท่อกำกับที่ฝังอยู่ใต้ดิน สามารถพิจารณาได้จากอนุกรมของคาร์สัน

$$LEF = I_A Z_A + I_B Z_B + I_C Z_C + I_{s1} Z_{s1} + I_{s2} Z_{s2} \quad (2.34)$$

LEF คือสนามไฟฟ้าตามแนวยาว $\left(\frac{V/km}{A}\right)$

I_A, I_B และ I_C คือกระแสสายส่ง (A)

I_{s1} และ I_{s2} คือกระแสของสายป้องกันฟ้าผ่า (A)

Z_A, Z_B และ Z_C คือมิวชวลอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งในแต่ละเฟสกับจุดที่พิจารณา (Ω)

Z_{s1} และ Z_{s2} คือมิวชวลอิมพีแดนซ์ของสายป้องกันฟ้าผ่าแต่ละเฟสกับจุดที่พิจารณา (Ω)

ค่า LEF ที่คำนวณได้จะทำให้ค่าความถูกต้องที่ระยะระหว่างสายส่งถึงจุดที่พิจารณาไม่เกิน 150 เมตร [7] ซึ่งถือว่ามีความเพียงพอในการนำมาใช้ในการพิจารณาหาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับท่อกำกับที่ฝังอยู่ภายในเขตปลอดภัยของการเดินสาย ในกรณีที่ไม่คิดผลของกระแสสายป้องกันฟ้าผ่า

$$LEF = I_A Z_A + I_B Z_B + I_C Z_C \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.35) แสดงให้เห็นว่าค่า LEF ที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับค่าของกระแสในสายส่งและค่ามิวชวลอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งกับจุดที่ทำการพิจารณา ดังนั้นในการพิจารณาจะแยกการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือการพิจารณาทางด้านกระแสของสายส่งและการพิจารณาค่าของมิวชวลอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

2.4.1.1 ลำดับกระแส (Current Sequence)

ในการพิจารณาผลของกระแสในระบบส่งจ่ายสามเฟสที่มีมุมเฟสห่างกันอยู่ 120 องศา สามารถแบ่งกระแสของสายส่งในแต่ละเฟสที่ต้องการพิจารณาออกเป็นกระแสดังกล่าวประกอบย่อยๆ ตามหลักขององค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) ได้ดังสมการ (2.36)

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

กำหนดให้ $a = 1 \angle 120$ และ $1 + a + a^2 = 0$

I_0 คือ กระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current)

I_1 คือ กระแสลำดับบวก (Positive Sequence Current)

I_2 คือ กระแส ลำดับลบ (Negative Sequence Current)

2.4.1.2 การรั้งันมิวชวลิมพีแดนซ์ (Carson's Mutual Impedance)

ในการพิจารณาค่ามิวชวลิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับท่อดึงที่ภายนอกมีฉนวนหุ้มและมีตัวนำอยู่ภายใน สามารถประยุกต์ใช้สมการของการรั้งันได้ดังนี้

$$Z_i = \frac{\mu\omega}{8} + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{D_e}{D_i} \quad (2.37)$$

$$D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (m) ; f = \text{ความถี่ (Hz)}$$

$$\omega = 2\pi f ; \mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} ;$$

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega - m$)

i คือ A, B, and B

Z_i คือ มิวชวลิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับท่อดึง (Ω)

D_i คือ ระยะทางจากสายส่งถึงท่อดึง (m)

จากสมการที่ (2.37) แสดงให้เห็นว่าค่ามิวชวลิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งกับท่อดึง ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสายส่งกับท่อดึง ความถี่ไฟฟ้าของระบบส่งจ่าย และค่าความต้านทานจำเพาะของดินเป็นหลัก

2.4.1.3 ลำดับอิมพีแดนซ์(Impedance Sequence)

ในระบบส่งจ่ายโดยทั่วไปเป็นการส่งจ่ายแบบสามเฟส ดังนั้นในการคำนวณหาค่ามิชวลอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสของสายส่งที่กระทำกับจุดที่ต้องการพิจารณาจำเป็นต้องคำนึงถึงลำดับเฟสด้วยจาก สมการที่ (2.37) พิจารณาให้อยู่ในรูปของมิชวลอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสในแต่ละลำดับได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Z_0 คือ มิชวลอิมพีแดนซ์เนื่องจากกระแสลำดับศูนย์

Z_1 คือ มิชวลอิมพีแดนซ์เนื่องจากกระแสลำดับบวก

Z_2 คือ มิชวลอิมพีแดนซ์เนื่องจากกระแสลำดับลบ

จากสมการที่ (2.38) แสดงให้เห็นค่าความสัมพันธ์ของมิชวลอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสลำดับศูนย์, กระแสลำดับบวก และกระแสลำดับลบจากสมการ (2.37) และ (2.38) สามารถหาค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสของสายส่งในแต่ละลำดับได้ดังสมการที่ (2.39)

$$LEF = \begin{bmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

จากสมการที่ (2.39) สามารถเขียนความสัมพันธ์ของ LEF ที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปของลำดับต่างๆได้ดังนี้

$$LEF = I_0 Z_0 + I_1 Z_1 + I_2 Z_2 \quad (2.40)$$

สมการที่ (2.40) แสดงให้เห็นว่าค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าสามเฟสประกอบด้วยค่าของ LEF ในลำดับศูนย์ ลำดับบวก และลำดับลบเพื่อนำสมการดังกล่าวมาพิจารณาค่า LEF เมื่อเกิดสถานะสมดุลและไม่สมดุลขึ้นที่ระบบไฟฟ้า

2.4.1.4 กระแสสมดุล (Balance Phase Current)

จากสมการที่ (2.40) ในสถานะสมดุลค่าของ LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสลำดับศูนย์และ LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสลำดับลบมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากค่ากระแสลำดับลบ และค่าของกระแสลำดับศูนย์มีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นค่า LEF ที่เกิดขึ้นในกรณีกระแสสมดุลจะเกิดขึ้นเฉพาะ LEF เนื่องจากกระแสลำดับบวกเท่านั้น ซึ่งสามารถหาค่า LEF ได้ดังนี้

$$LEF = I_1 Z_1 \quad (2.41)$$

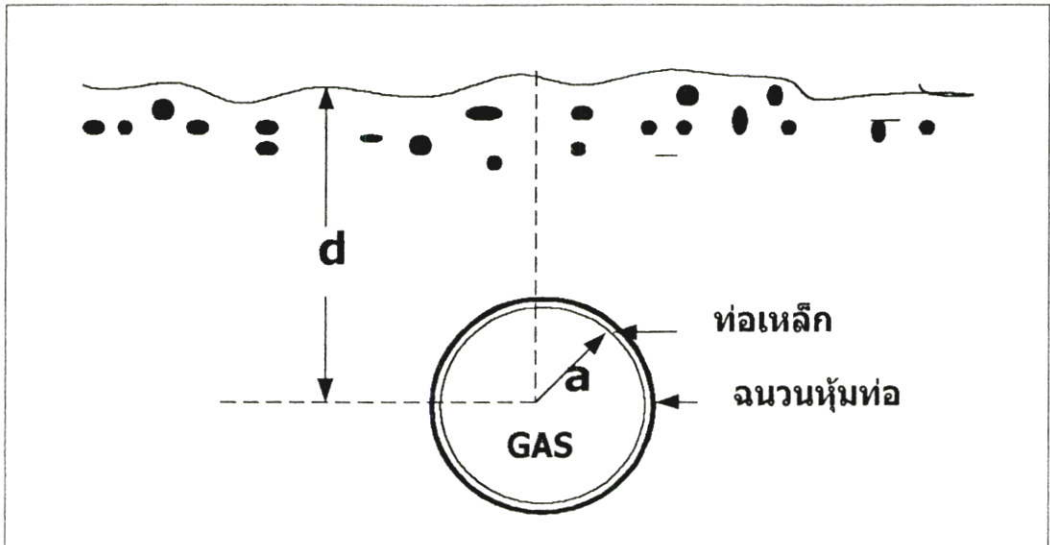
ในการพิจารณาค่าของ LEF ที่ระยะทางออกจากแนวสายส่งในแนวตั้งฉากพบว่าค่าของ $Z_A = Z_B = Z_C$ จะทำให้พจน์ขวาของสมการที่ (2.41) มีค่าเท่ากับศูนย์และทำให้ค่าของ LEF มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย

2.5 การสร้างแบบจำลองทางไฟฟ้าของท่อส่งก๊าซ(Pipelines Modeling)

ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นคือค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งก๊าซ ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งก๊าซขึ้นอยู่กับค่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ ความลึก ความหนาของท่อ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ค่าความต้านทานจำเพาะของเหล็ก ค่าพอมิลบิลิตีของท่อ ดังนั้นในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติพร้อมทั้งได้ทำการพิจารณาให้เห็นพารามิเตอร์หลักๆที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งก๊าซ

2.5.1 โครงสร้างของท่อส่งก๊าซ

โครงสร้างของท่อส่งก๊าซโดยทั่วไปแสดงได้ดังจากรูปที่ 2.7 ซึ่งโครงสร้างของท่อส่งก๊าซจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนคือ 1 ภายในท่อเป็นส่วนที่มีไว้สำหรับให้ก๊าซเคลื่อนที่ ส่วนที่ 2 เป็นผนังท่อดีไว้สำหรับใช้ในการควบคุมทิศทางการไหลของก๊าซซึ่งโดยทั่วไปผนังของท่อจะเป็นเหล็กเนื่องจากมีความทนทานต่อแรงอัดได้สูง และโครงสร้างสุดท้ายคือฉนวนที่ใช้ในการหุ้มท่อเป็นส่วนหนึ่งของระบบป้องกันสนิมโดยทั่วไปฉนวนของท่อจะทำมาจาก PE ซึ่งถือว่าเป็นฉนวนทางไฟฟ้า ซึ่งจากโครงสร้างของท่อส่งก๊าซเมื่อนำมาสร้างเป็นวงจรเทียบเคียงวงจรไฟฟ้าสามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

2.5.2 การคำนวณพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ

จากโครงสร้างของเสาส่งเราสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซโดยมีเงื่อนไขดังนี้

1. ที่ผิวของท่อชั้นที่เป็นโลหะไม่มีการต่อลงกราวด์
2. ผิวนอกสุดที่เป็นฉนวนของท่อสัมผัสกับดินซึ่งเปรียบเสมือนท่อถูกลงกราวด์
3. ไม่พิจารณาผลของระบบป้องกันสนิม

การหาค่าพารามิเตอร์ของท่อขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของการแพร่ของคลื่น ในการหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวสามารถทำได้โดยการใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาจากสมการ โดยพื้นฐาน[4]

$$\gamma = \sqrt{YZ} \quad (2.42)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (2.43)$$

γ คือ ค่าคงที่ของการแพร่ของคลื่น

Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อ

Y คือ ค่าแอดมิตแดนซ์ของท่อ

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อ

$$Y = Y_i + \frac{1}{\left(\frac{1}{2\pi\sigma_e} \ln \frac{1.85}{\sqrt{Dd}} \right)} \quad \text{mho/m} \quad (2.44)$$

$$Z = Z_i + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1.85}{\frac{D}{2}\sqrt{(\lambda^2 + \gamma^2)}} \quad \text{Ohm/m} \quad (2.45)$$

$$Y_i = \frac{8.595 \cdot 10^{-4} \cdot D}{R_c} \quad \text{mho/m} \quad (2.46)$$

สามารถหาอิมพีแดนซ์ภายในของท่อส่งก๊าซ (Internal impedance) ได้จาก[5]

$$Z_i = K \frac{(\Pi(\Gamma * b_1) * K1(\Gamma * a_1)) + (K0(\Gamma * b_1) * \Pi(\Gamma * a_1))}{(\Pi(\Gamma * b_1) * K1(\Gamma * a_1)) - (K1(\Gamma * b_1) * \Pi(\Gamma * a_1))} \quad \text{Ohm/m} \quad (2.47)$$

โดยกำหนดให้

$$K = j \frac{\omega\mu}{2\pi b_1 \Gamma}$$

$$\Gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma_s}$$

$$a_1 = D - (t/2)$$

$$b_1 = D + t$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m} \quad \text{และ} \quad \gamma^2 = j\omega\mu_0\sigma_e$$

μ_r คือ ค่ารีเลทีฟเพอมีบิลิตีของท่อส่งก๊าซ(Relative permeability)

ρ_s คือ ค่าความต้านทานจำเพาะท่อส่งก๊าซ(Pipeline Resistivity)

σ_e คือ ค่าความนำของดิน (Earth Conductivity)

Z_i คือ ค่าอิมพีแดนซ์ภายในของท่อส่งก๊าซ(Self Impedance)

Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์รวมของท่อส่งก๊าซ(Total Impedance)

Y คือ ค่าแอดมิแตนซ์ของท่อส่งก๊าซ(Total admittance)

Y_i คือ ค่าแอดมิแตนซ์ภายในของท่อส่งก๊าซ (Self admittance)

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่งก๊าซ(Pipeline Diameter)

2.6 บทสรุป

ในบทนี้ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูง กรณีที่ท่อเป็นท่อเหล็กและมีฉนวนหุ้ม ได้โดยการใช้ทฤษฎีสายส่ง ทฤษฎีเทวินิน และทฤษฎีวงจร จากสมการที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น พารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำคือ ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อ และค่าสนามไฟฟ้าตามแนวยาว ซึ่งในส่วนของพารามิเตอร์ของท่อขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของการแพร่ของคลื่น และอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อส่งก๊าซ ส่วนของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามแนวยาวที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสามารถหาได้โดยการใช้อนุกรมของคาร์สัน ค่าสนามไฟฟ้าตามแนวยาวที่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำเป็นผลมาจากกระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้า จากสมการพบว่าการคำนวณหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนมากดังนั้นเพื่อให้ง่ายจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

บทที่ 3

การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

3.1 บทนำ

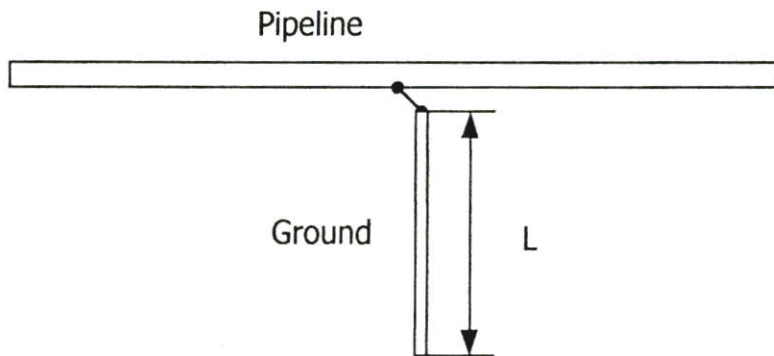
การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับชีวิตของผู้ทำงานติดตั้งและบำรุงรักษาท่อส่งก๊าซธรรมชาติ โดยหลักการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นคือการส่งผ่านไฟฟ้ากระแสสลับลงกราวด์และเทคนิคที่นิยมใช้คือการต่อกราวด์ให้กับท่อส่งก๊าซในการต่อท่อส่งก๊าซกับระบบกราวด์จำเป็นที่จะต้องผ่านอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างท่อกับกราวด์ โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ป้องกันไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงผ่านลงกราวด์แต่ยอมให้ไฟฟ้ากระแสสลับผ่านลงกราวด์ ซึ่งนิยมเรียกว่า DC Isolation/AC Coupling Device ในสภาวะการทำงานค่าความต้านทานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับมีค่าต่ำมากอยู่ในย่านไมโครโอห์มจากภาคผนวก ค. ดังนั้นในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์จะไม่คำนึงถึงผลค่าความต้านทานของ DC Isolation/AC Coupling Device ซึ่งในบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์และขนาดของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

3.2 การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซ

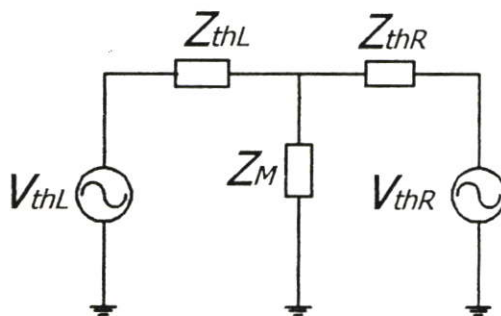
จุดที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดคือจุดที่ท่อส่งก๊าซไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นในการลดทอนแรงดันควรทำการต่อกราวด์ตรงจุดที่ท่อส่งก๊าซไม่ต่อเนื่อง ซึ่งในการเลือกลักษณะของกราวด์ที่จะนำมาใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างของแรงดันเหนี่ยวนำในขณะที่ทำการต่อกราวด์ต่อค่าของแรงดันเหนี่ยวนำก่อนทำการต่อกราวด์ ซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวเรียกว่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ(Voltage Mitigation Factor) โดยระบบกราวด์ที่นำมาพิจารณาในในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการแยกออกเป็น 2 ลักษณะคือกราวด์รูด(Ground rod) และ กราวด์ไวร์(Ground wire)ซึ่งกราวด์ทั้งชนิดจะมีความแตกต่างกันในลักษณะของการวางและค่าอิมพีแดนซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นดังนี้

3.2.1 กราวด์รูด (Groud rod)

การติดตั้งกราวด์รูดแสดงให้เห็นดังรูป 3.1 จากลักษณะของกราวด์รูดเหมาะสมที่จะติดตั้งในบริเวณที่สามารถทำการเจาะพื้นดินได้ง่าย และไม่เหมาะกับบริเวณพื้นดินที่มีหินจำนวนมากเช่นบริเวณเนินเขา จากลักษณะการติดตั้งกราวด์รูดสามารถเขียนเป็นวงจรเทียบเคียงเทวินินได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 กราวด์ร็อด(Ground Rod)



รูปที่ 3.2 วงจรเทียบเคียงเทวินินที่ใช้ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

จากรูปที่ 3.2 เป็นวงจรเทียบเคียงเทวินินที่ใช้ในการคำนวณลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ค่า Z_m คือค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอน คังคันแรงดันที่ตกคร่อม Z_m คือแรงดันที่ตกคร่อมกราวด์ จากวงจรจรงเห็นได้ว่าในกรณีที่มีอิมพีแดนซ์ของกราวด์มีค่าสูงและเข้าใกล้อินฟินิตี้ แรงดันที่ตกคร่อมกราวด์จะมีค่าสูงตามไปด้วย และในกรณีอิมพีแดนซ์ของกราวด์มีค่าเป็นศูนย์แรงดันที่ตกคร่อม Z_m จะมีค่าเป็นศูนย์จากทั้ง 2 กรณีที่กล่าวมาสามารถหาค่าอัตราส่วนของการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำได้ดังต่อไปนี้

3.2.1.1 อัตราส่วนการลดทอนแรงดัน

ในกรณีที่จุดที่ท่อส่งก๊าซไม่ต่อเนื่องเป็นผลมาจาก แนวท่อส่งก๊าซเกิดการหักเข้าหักออกจากแนวสายส่ง และ จุดที่มีการสลับสายเป็นต้น จากความไม่ต่อเนื่องดังกล่าวสามารถหาค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ 3.1

$$\frac{V_m}{V_0} = \frac{1}{1 + \frac{Z_0}{2 * Z_m}} \quad 3.1$$

ในกรณีที่จุดที่ไม่ต่อเนื่องของท่อเกิดจากมีฉนวนกั้นในการต่อท่อ(Insulator flange)

$$\frac{V_m}{V_0} = \frac{1}{1 + \frac{Z_0}{Z_m}} \quad 3.2$$

Z_m คือ อิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการลดทอน

Z_0 คือ อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อ

V_0 คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่ท่อขณะไม่ต่อกราวด์

V_m คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่ท่อขณะต่อกราวด์

กำหนดให้ $Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$ โดยค่า Z คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อและค่า Y คือ ค่าแอดมิตแตนซ์ของท่อจากสมการ(3.1)และ(3.2)จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซขึ้นอยู่กับลักษณะความไม่ต่อเนื่องของท่อส่งก๊าซ อิมพีแดนซ์ของกราวด์และอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อก๊าซ ในกรณีที่อัตราส่วนการลดทอนมีค่าเพิ่มขึ้นจนมีค่าเป็น 1 แสดงว่าไม่มีการลดทอนและในกรณีที่อัตราส่วนการลดทอนแรงดันมีค่าเป็น 0 แสดงว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อถูกลดทอนจนหมดซึ่งอัตราส่วนดังกล่าวแปรผันโดยตรงกับค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์รูดซึ่งสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์รูดได้ดังต่อไปนี้

3.2.1.2 อิมพีแดนซ์ของกราวด์รูด

ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์รูดโดยทั่วไปในการพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์รูดนิยมใช้พิจารณาในลักษณะไฟฟ้ากระแสตรงดังสมการที่ (3.3) ซึ่งอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการพิจารณาดังกล่าวไม่ถูกต้องมากนัก[6] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์โดยพิจารณาในลักษณะไฟฟ้ากระแสสลับ ดังสมการที่ (3.4-3.6) [6]

$$R_{rod} = \frac{0.159}{\sigma L} \left[\ln \frac{4L}{a} - 1 \right] \quad \text{โอห์ม} \quad (3.3)$$

$$Y_{rod} = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma + j\omega\epsilon)} \quad \text{1/เมตร} \quad (3.4)$$

$$Z_{0rod} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\sigma}} \left[(1+j) \ln \left(\frac{(1.12)}{a\sqrt{\omega\mu_0\sigma}} \right) + (1-j) \frac{\pi}{4} \right] \quad \text{โอห์ม} \quad (3.5)$$

$$Z_{rod} = Z_{0rod} \coth(Y_{rod}L) \cong \frac{Z_{0rod}}{Y_{rod}L} \quad \text{โอห์ม} \quad (3.6)$$

Y_{rod} คือ ค่าคงที่การแพร่ของคลื่น

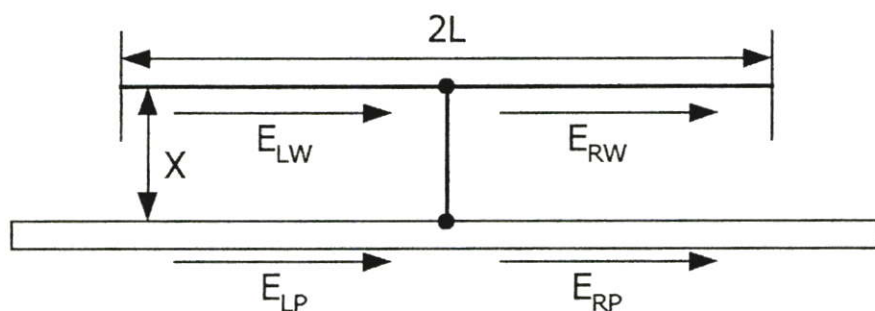
Z_{rod} คือ ค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์รูด

Z_{0rod} คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของกราวด์รูด

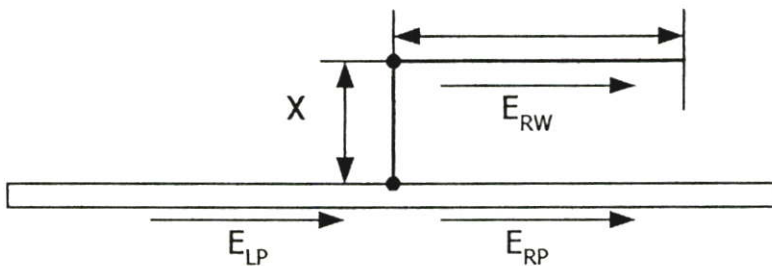
จากสมการที่ (3.4-3.6) เป็นสมการที่ใช้ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์รูดจะเห็นได้ว่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์รูดเป็นฟังก์ชันของความยาว รัศมีของกราวด์รูด และ ความถี่

3.2.2 กราวด์ไวร์ (Ground wire)

ลักษณะของกราวด์ไวร์ เป็นกราวด์ที่ใช้ฝังใกล้กับผิวของดินช่วยแก้ปัญหากรณีดินบริเวณที่ทำการติดตั้งกราวด์เชิงมากไม่สามารถทำการเจาะฝังกราวด์รูดได้ ในการเชื่อมต่อระหว่างกราวด์ไวร์แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือการเชื่อมต่อกราวด์ที่จุดกึ่งกลางของกราวด์ไวร์ กับท่อส่งก๊าซแสดงดังรูปที่ 3.3 และ การเชื่อมต่อที่ปลายของกราวด์ไวร์ แสดงดังรูปที่ 3.4



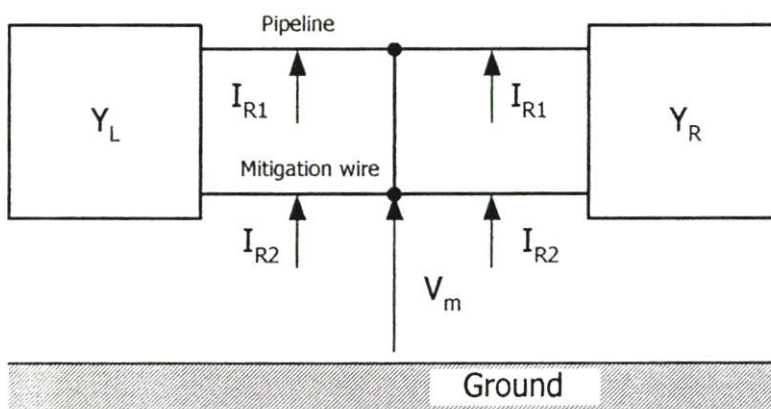
รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อกราวด์ไวร์แบบ Center connection ground wire



รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่อกราวด์ไวร์แบบ End connection ground wire

3.2.2.1 อัตราส่วนการลดทอนแรงดัน

จากรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นลักษณะของการต่อกราวด์ไวร์ให้กับท่อส่งก๊าซซึ่งวงจรเทียบเคียงที่ใช้ในการวิเคราะห์การต่อลงกราวด์ให้กับท่อส่งก๊าซได้แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 วงจรสมมูลที่ใช้ในการคำนวณแรงดันตกคร่อมกราวด์ไวร์

เห็นได้ว่าในการวิเคราะห์การลดทอนแรงดันเหนือยวน้ำใช้ทฤษฎีของนอตตัน ซึ่งจากวงจรสมมูลสามารถหาค่าแรงดันเมื่อต่อกราวด์ไวร์ ได้ดังนี้[4]

$$V_m = \frac{\sum_{n=1}^2 (I_{Ln} + I_{Rn})}{\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (Y_{Lij} + Y_{Rij})} \quad (3.7)$$

ซึ่งจากสมการที่ (3.7) แสดงให้เห็นว่าแรงดันที่ตกคร่อมกราวด์ไวร์ ขึ้นอยู่กับค่าของกระแสและค่าแอดมิแตนซ์ระหว่างท่อส่งก๊าซและกราวด์ไวร์ ซึ่งถ้าต้องการหาอัตราส่วนของแรงดันเหนี่ยวนำในขณะที่ทำการต่อกราวด์กับแรงดันเหนี่ยวนำก่อนทำการต่อกราวด์ในขณะที่ไม่ได้ทำการต่อกราวด์สามารถหาได้จากสมการที่ (3.8)

$$\frac{V_m}{V_o} = \frac{1 + \frac{\Delta Z_P (LEF_{Rw} - LEF_{Lw})}{Z_w (LEF_{Lp} - LEF_{Rp})}}{1 + \delta \left(\frac{Z_P Y_w}{Z_w Y_P} \right)} \quad (3.8)$$

ในกรณีการเชื่อมต่อกราวด์ไวร์ที่จุดเริ่มต้นหรือจุดสิ้นสุดของกราวด์ไวร์ดังรูปที่ 3.4 สามารถหาอัตราส่วนของการลดทอนได้จากสมการที่ (3.9)

$$\frac{V_m}{V_o} = \frac{1 + \frac{\Delta Z_P (LEF_{Rw})}{Z_w (LEF_{Lp} - LEF_{Rp})}}{1 + \frac{\delta}{2} \left(\frac{Z_P Y_w}{Z_w Y_P} \right)} \quad (3.9)$$

กำหนดให้

$$\delta = \frac{(1 - e^{-2Lyw})}{(1 + e^{-2Lyw})}$$

$$\Delta = (\delta + 1)e^{-L^*yw}$$

จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับค่า LEF ที่ กราวด์ไวร์ และค่า LEF ที่ท่อส่งก๊าซ ค่าอิมพีแดนซ์ ค่าคงที่การแพร่ของคลื่นและความยาวของกราวด์ไวร์ ในกรณีที่ความยาวของกราวด์ไวร์สั้นมากและไม่มีผลกระทบจากสนามแม่เหล็กจากสายส่งสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{V_m}{V_o} = \frac{1}{1 + \delta \frac{Z_{Op}}{Z_{Ow}}} \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.8) สามารถจัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (3.11)

$$\frac{V_m}{V_o} = \frac{\frac{Z_w}{Z_p} + \Delta \frac{(ELF_{Rw} - ELF_{Lw})}{(ELF_{Lp} - ELF_{Rp})}}{\frac{Z_w}{Z_p} + \delta \left(\frac{Y_w}{Y_p} \right)} \quad (3.11)$$

กำหนดให้

$$ELF_w = ELF_{Rw} - ELF_{Lw}$$

$$ELF_p = ELF_{Rp} - ELF_{Lp}$$

จากสมการที่ (3.11) เมื่อกราวด์ไวร์ มีความยาวมากๆ จะทำให้ค่า $\delta \rightarrow 1$ และ $\Delta \rightarrow -1$ จากสมการที่ (3.11) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (3.12)

$$\frac{V_m}{V_o} = \frac{\frac{Z_w}{Z_p} + \frac{LEF_w}{LEF_p}}{\frac{Z_w}{Z_p} + \frac{Y_w}{Y_p}} \quad (3.12)$$

3.2.2.2 อัตราส่วนของ LEF

จากสมการที่ (3.12) เนื่องจากค่า LEF ที่เกิดขึ้นพิจารณาเฉพาะขนาดเท่านั้นดังนั้นการกำจัดเทอมที่เป็นจำนวนจริงของอัตราส่วนอัตราส่วนของค่า LEF ของท่อและกราวด์ไวร์มีค่าเป็นลบและมีค่าเท่ากับส่วนจริงของอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์ต่ออิมพีแดนซ์ของท่อแสดงดังสมการ (3.13)

$$-\frac{LEF_w}{LEF_p} = \operatorname{Re} \left(\frac{Z_w}{Z_p} \right) \quad (3.13)$$

$\operatorname{Re} \left(\frac{Z_w}{Z_p} \right)$ คือ ส่วนจริงของอัตราส่วน $\frac{Z_w}{Z_p}$ กำหนดให้ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อและค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์มีค่าเท่ากับ $Z_w = R_w + jX_w$ และ $Z_p = R_p + jX_p$ จากสมการที่ (3.13) สามารถเขียนได้เป็น

$$-\frac{LEF_w}{LEF_p} = \frac{R_w R_p + X_w X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ (3.14) เป็นสมการที่ใช้ในการหาค่าอัตราส่วนของ LEF (LEF_w/LEF_p) ซึ่งอัตราส่วนนี้

จะเป็นตัวกำหนดตำแหน่งในการวางสายกราวด์ว่าควรจะอยู่จุดใดที่จะทำให้อัตราส่วนของ LEF เป็นไปตามความต้องการ

3.2.2.3 การหาค่ารัศมีที่เหมาะสม

จากสมการที่ (3.12) เมื่อกำหนดให้ค่า $-\frac{LEF_w}{LEF_p} = \text{Re}\left(\frac{Z_w}{Z_p}\right)$ ดังนั้นสมการที่เหลือจะเป็นสมการที่ (3.15)

$$\frac{V_m}{V_o} = \frac{\text{Im}\left(\frac{Z_w}{Z_p}\right)}{\frac{Z_w}{Z_p} + \frac{Y_w}{Y_p}} \quad (3.15)$$

จากสมการที่ (3.15) เห็นได้ว่าเมื่อต้องการให้อัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ (V_m/V_o) มีค่าเท่ากับศูนย์ได้โดยกำหนดให้ส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ (Imaginary part) ของอัตราส่วน $\text{Im}(Z_w/Z_p)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นในเมื่อค่า $Z_w = R_w + jX_w$ และ $Z_p = R_p + jX_p$ จากสมการที่ 3.11 สามารถหาค่าอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ในส่วนจินตภาพได้ดังนี้

$$\text{Im}\left(\frac{Z_w}{Z_p}\right) = \frac{X_w R_p - R_w X_p}{R_p^2 + X_p^2} \quad (3.16)$$

จากสมการที่ (3.16) สามารถทำให้ค่า $\text{Im}(Z_w/Z_p)$ มีค่าเท่ากับศูนย์ได้โดยกำหนดให้ค่า $X_w R_p$ เท่ากับ $R_w X_p$ จากสมการนี้ได้ถูกนำมาใช้เป็นเงื่อนไขในการหาค่ารัศมีที่เหมาะสมได้

3.2.2.4 การหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์

ในการหาขนาดของสายกราวด์มีความจำเป็นมากในการออกแบบลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ซึ่งในการหาค่าอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์ได้ทำการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คืออิมพีแดนซ์ภายในกราวด์-ไวร์ (selfe Impedance) และ อิมพีแดนซ์ภายนอกของกราวด์ไวร์ (Mutual Impedance) ดังสมการที่ (3.17)

$$Z_w = Z_{iw} + Z_{gw} \quad (3.17)$$

สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ภายในของกราวด์ได้ดังนี้

$$Z_{iw} = \frac{1}{\pi\sigma_w a^2} \left[1 + \frac{1}{48} \left(\frac{a}{\delta_w} \right)^4 \right] + j \frac{\omega\mu}{8\pi} \quad (3.18)$$

a คือ รัศมีของสายกราวด์

$\delta_w = 1/\sqrt{\pi\sigma_w f\mu}$ คือ conductor skin depth

σ_w คือ ค่าความนำจำเพาะของท่อ

$\omega = 2\pi f$ คือ ความเร็วเชิงมุม

จากสมการที่ (3.18) จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ภายในของกราวด์ไวร์ขึ้นอยู่กับรัศมีของกราวด์ไวร์ ความถี่ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของกราวด์ไวร์และค่าความนำของวัสดุที่นำมาทำกราวด์ อิมพีแดนซ์ภายนอกสามารถหาได้จากสมการที่ (3.19)

$$Z_{gw} = \frac{\omega\mu}{8} + j \frac{\omega}{2\pi} \ln \frac{0.794\delta_s}{a} \quad (3.19)$$

a คือ รัศมีของสายกราวด์

$\delta_w = 1/\sqrt{\pi\sigma_s f\mu}$ คือ conductor skin depth

σ_s คือ ค่าความนำจำเพาะของดิน

$\omega = 2\pi f$ คือ ความเร็วเชิงมุม

จากสมการที่ (3.19) จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ภายนอกของกราวด์ไวร์ขึ้นอยู่กับรัศมีของสายกราวด์ไวร์ ความถี่ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของกราวด์ไวร์ และ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ในบริเวณนั้น

3.3 สรุป

ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติจุดที่ก่อให้เกิดแรงดันสูงคือจุดท่อไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นในการต่อกราวด์ควรต่อกราวด์ที่จุดที่ท่อไม่ต่อเนื่องนั้น การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำสิ่งแรกที่จะทำการคำนึงถึงคืออัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำและอิมพีแดนซ์ของกราวด์ซึ่งอิมพีแดนซ์ของกราวด์จะขึ้นอยู่กับชนิดของกราวด์ที่เลือกใช้และลักษณะการวางกราวด์ โดยทั่วไปการเลือกกราวด์ใช้งานจำเป็นต้องพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมเป็นหลัก จากการหาค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์แสดงให้เห็นว่า อิมพีแดนซ์ของกราวด์รูดเป็นฟังก์ชันของความยาว รัศมีของกราวด์รูด และ ความถี่ และอิมพีแดนซ์ของกราวด์ไวร์รัศมีของสายกราวด์ไวร์ ความถี่ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของกราวด์ไวร์ ค่าความนำของวัสดุที่นำมาทำกราวด์ไวร์ และ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินในบริเวณนั้น

โปรแกรมคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

4.1 บทนำ

ในปัจจุบันการทำนายแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสามารถทำได้โดยการใช้กราฟที่ได้จากต่างประเทศ ซึ่งการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำด้วยกราฟจำเป็นต้องอาศัยวิศวกรที่มีความรู้และความชำนาญเฉพาะด้าน ซึ่งภายในประเทศยังขาดแคลนผู้ที่มีความรู้ความชำนาญด้านการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำอยู่มาก ซึ่งปัญหาดังกล่าวในต่างประเทศ นำโดยสถาบัน EPRI (Electric Power Research Institute) และ A.G.A. (American Gas Association) ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นมาทำการทดแทน โปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนามาจากการร่วมมือของสถาบันทั้ง 2 มีราคาที่สูงมากเนื่องจากใช้เฉพาะงาน ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ทั้งในกรณีที่แนวท่อนานกับแนวสายส่งและกรณีที่แนวท่อดำเนินการวางแนวท่อกับแนวสายส่งเพื่อนำค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณมาพิจารณาถึงการออกแบบการวางแนวท่อกับแนวสายส่งเพื่อทำการลดทอนผลกระทบที่เกิดขึ้นให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE โดยโปรแกรมที่จัดสร้างขึ้นพัฒนาจากภาษาวิซวลเบสิกเวอร์ชัน 6 (VISUAL BASIC Version 6) และใช้ชื่อว่า AC mitigation ในการป้อนข้อมูลสามารถทำได้โดยง่ายสำหรับผู้เริ่มต้นในการใช้โปรแกรมเนื่องจากมีส่วนช่วยเหลือในการป้อนข้อมูลและมีคู่มือการใช้โปรแกรมไว้ให้ด้วย เพื่อความถูกต้องของโปรแกรมได้ทำการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำเทียบกับการคำนวณโดยใช้กราฟมาตรฐาน ซึ่งส่วนประกอบและการทำงานของโปรแกรมจะได้นำเสนอต่อไป

4.2 วัตถุประสงค์ของโปรแกรม

1. เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
2. เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการหาขนาดของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
3. เพื่อความสะดวกในการคำนวณและการลดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซ
4. เพื่อลดการนำเข้าโปรแกรมที่ได้จากต่างประเทศ

4.3 ส่วนประกอบของโปรแกรม

ส่วนประกอบของโปรแกรม AC mitigation ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักคือส่วนที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำและส่วนที่ใช้ในการคำนวณระบบกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำซึ่งส่วนประกอบในแต่ละส่วนประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังต่อไปนี้

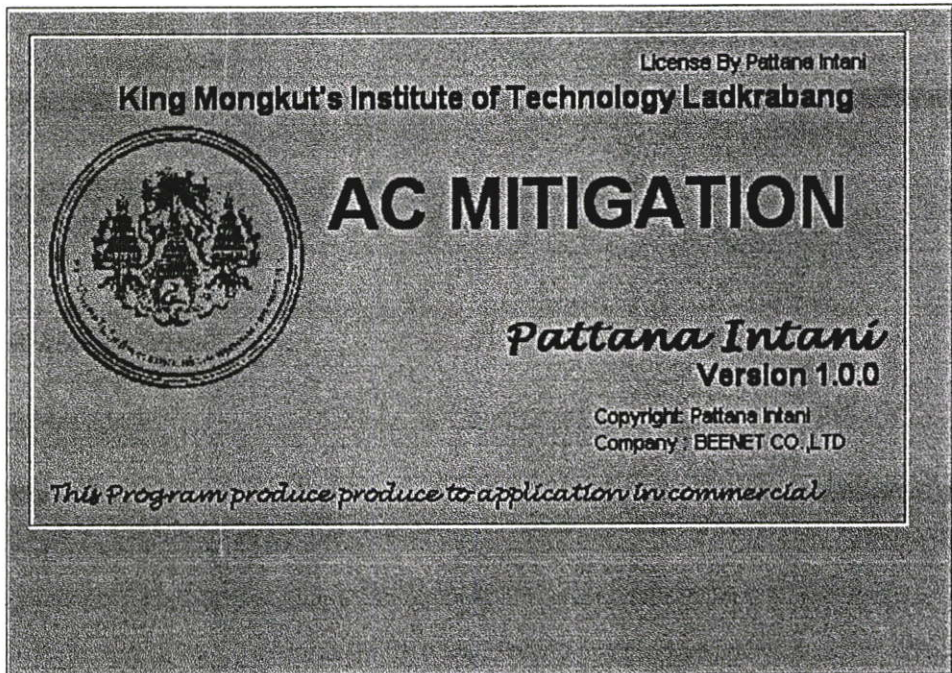
4.3.1 ส่วนการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ

ส่วนประกอบที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำสามารถแยกออกเป็นส่วนย่อยๆได้ดังนี้

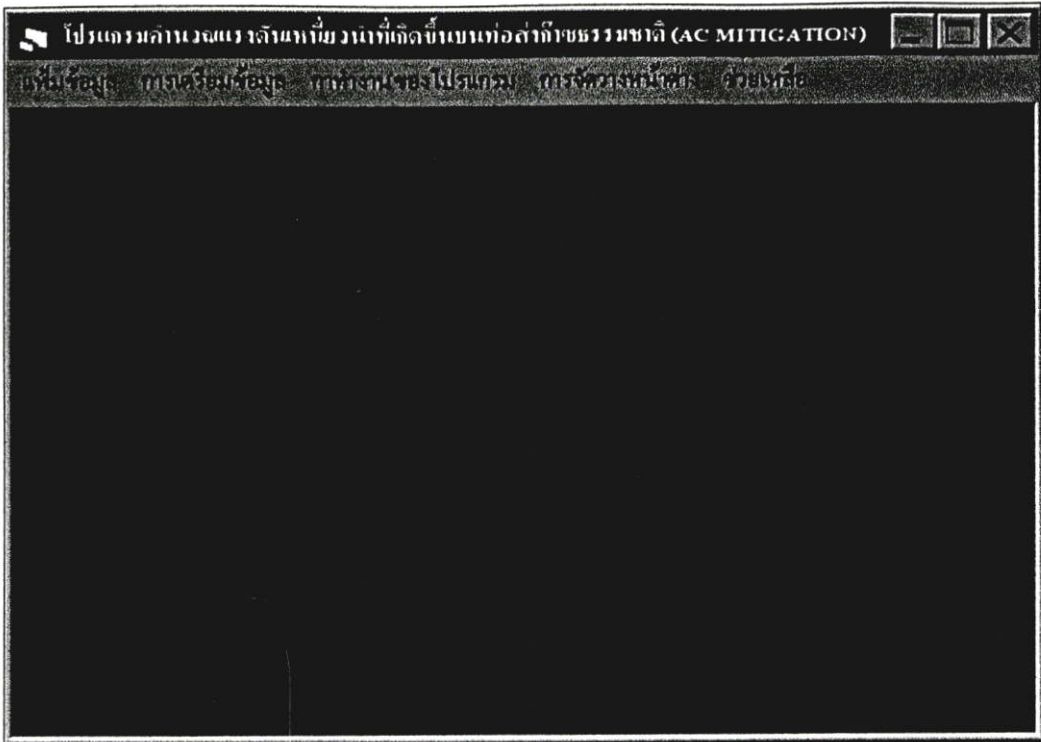
- 1) ส่วนหน้าต่างหลักของโปรแกรม(Main Program)
- 2) ส่วนของข้อมูลอินพุต (Input Data)
- 3) ส่วนของการแสดงผล (Output Data)

4.3.1.1 ส่วนหน้าต่างหลักของโปรแกรม (Main Program)

หน้าต่างเริ่มต้นก่อนเข้าสู่หน้าต่างหลักแสดงดังรูปที่ 4.1 เมื่อเข้าสู่หน้าต่างหลักของโปรแกรม AC Mitigation ประกอบไปด้วย 5 เมนูหลัก ซึ่งลักษณะของหน้าต่างหลักของโปรแกรม AC Mitigation แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 หน้าต่างเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรม AC mitigation



รูปที่ 4.2 หน้าต่างหลักของ โปรแกรม AC Mitigation

ตารางที่ 4.1 หน้าทีของเมนูย่อยในหน้าต่างหลักของ โปรแกรม AC Mitigation

เมนู	หน้าที่
เพิ่มข้อมูล	เป็นเมนูหลักที่ประกอบไปด้วย 3 เมนูย่อยที่ใช้ในการกระทำเกี่ยวกับข้อมูล เช่น จัดเก็บข้อมูล, เปิดเพิ่มข้อมูลและการออกจากโปรแกรม
การเตรียมข้อมูล	เป็นเมนูหลักที่ประกอบไปด้วย 2 เมนูย่อยที่ใช้ทำการแสดงหน้าต่างในการรับข้อมูลของท่อส่งก๊าซและข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ
การทำงานของโปรแกรม	เป็นเมนูหลักที่ประกอบไปด้วย 2 เมนูย่อยคือเมนูคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำและเมนูคำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ
จัดหน้าต่าง	เป็นเมนูหลักที่ประกอบไปด้วย 3 เมนูย่อยคือเมนูการจัดหน้าต่างที่ทำการเปิดขึ้นมา โดยลักษณะการจัดหน้าต่างมีดังนี้ การจัดหน้าต่างแบบซ้อนทับ การจัดหน้าต่างในแนวตั้ง และการจัดหน้าต่างในแนวนอน
ช่วยเหลือ	เป็นเมนูที่ใช้ในการอธิบายการทำงานของโปรแกรมและเวอร์ชันของโปรแกรม โดยมี 2 เมนูย่อยคือเมนูช่วยในการทำงานของโปรแกรม และเมนูเวอร์ชันของโปรแกรม

4.3.1.2 ข้อมูลอินพุต(Input Data)

ข้อมูลที่ต้องจัดเตรียมไว้สำหรับป้อนให้กับ โปรแกรม AC Mitigation ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ซึ่งข้อมูลที่ต้องการในแต่ละส่วนประกอบด้วย

4.3.1.2.1 พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า

พารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งได้ทำการจำแนกตามลักษณะโครงสร้างของเสาส่งเป็น 5 โครงสร้างดังนี้

- 1.1 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน
- 1.2 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม
- 1.3 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร
- 1.4 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร
- 1.5 เมา โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร

ซึ่งลักษณะของข้อมูลหลักๆของระบบไฟฟ้าที่ต้องการในแต่ละ โครงสร้างเสาส่งจะเหมือนกันแสดงในรูปที่ 4.3 ประกอบไปด้วยข้อมูลดังต่อไปนี้

โปรแกรมคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ (AC MITIGATION) - โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนว...

เพิ่มข้อมูล การเตรียมข้อมูล การทำงานของโปรแกรม การจัดวางหน้าตา รายละเอียด

กรณีสองสายส่ง

กระแสของสายส่งแต่ละเฟส 1000 แอมแปร์ A

ความดันของระบบไฟฟ้า 50 กิโลโวลต์

ข้อมูลอื่นๆ

ความรักร่องท่อเฉลี่ย 1 เมตร C

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 10 โอห์ม-เมตร

ปุ่มเลือก D

ปุ่มถัดไป

ตำแหน่งของตัวนำ

	X	Y	เมตร
ตำแหน่งตัวนำเฟส A	-10.65	32.5	เมตร
ตำแหน่งตัวนำเฟส B	0	32.5	เมตร
ตำแหน่งตัวนำเฟส C	10.65	32.5	เมตร

ข้อมูลเสริม

ข้อมูลช่วยในการป้อนข้อมูล E

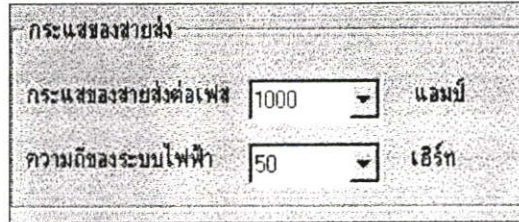
โครงสร้างเสาส่ง

Diagram showing a tower structure with conductors A, B, and C, tower height h , and ground level (Earth) with a Right-of-Way (ROW) boundary. Labels include OHG.1, OHG.2, and ROW.

รูปที่ 4.3 หน้าต่างรับข้อมูลระบบไฟฟ้า

A เป็นส่วนกระแสของสายส่ง

ส่วนกระแสของสายส่งข้อมูลที่ต้องการในส่วนนี้ได้ทำการจำแนกออกเป็น 2 ส่วนคือ ขนาดของกระแสของสายส่งต่อเฟสและความถี่ของกระแสที่ใช้ในการส่งจ่าย ในการป้อนกระแสต่อเฟสหมายความว่าถ้าในการส่งจ่ายมี n วงจร ให้นำผลรวมของกระแสเฟสใดเฟสหนึ่งทั้งหมด n วงจรป้อนในส่วนกระแสของสายส่งต่อเฟสและความถี่ต้องอยู่ในช่วง 50 และ 60 เฮิร์ต เท่านั้น แสดงดังรูปที่ 4.4

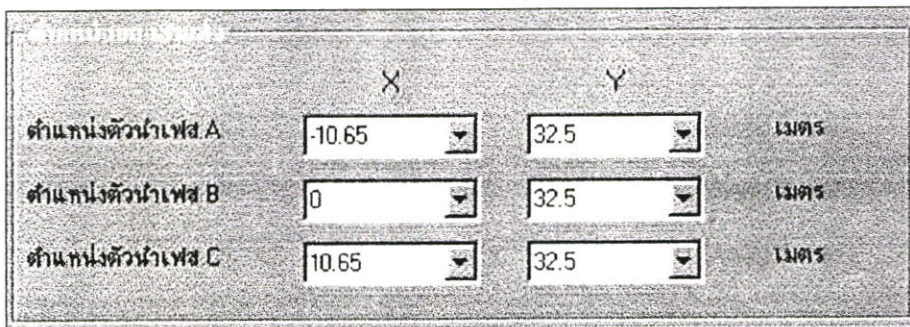


กระแสของสายส่ง	
กระแสของสายส่งต่อเฟส	1000 แอมป์
ความถี่ของระบบไฟฟ้า	50 เฮิร์ต

รูปที่ 4.4 ส่วนกระแสของสายส่ง

B เป็นส่วนตำแหน่งของสายส่ง

ในส่วนนี้เป็นส่วนที่รับข้อมูลตำแหน่งของสายส่งโดยจำแนกออกเป็นเฟส A, B และ C โดยกำหนดให้ตำแหน่งเฟส A อยู่ด้านซ้ายมีอนับจากจุดกึ่งกลางของเสาส่ง เฟส B อยู่ที่จุดกึ่งกลางของเสาส่งและเฟส C อยู่ด้านขวามีอนับจากจุดกึ่งกลางของเสา ดังนั้นในการป้อนข้อมูลให้กับตำแหน่งของตัวนำเฟส A ในทิศทาง X ควรมีค่าเป็นลบ(-5) ตำแหน่งของตัวนำเฟส B มีค่าเป็นศูนย์ (0) เนื่องจากอยู่ที่จุดกึ่งกลางของเสาส่ง และตำแหน่งของตัวนำเฟส C ควรมีค่าเป็นบวก(5) ส่วนในทิศทาง Y คือความสูงของเสาส่งโดยเฉลี่ย ในกรณีเสาส่งชนิดนี้จะมีความสูงที่เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5

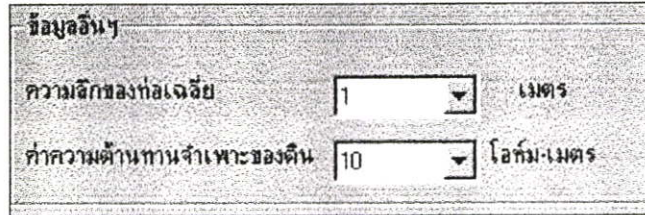


	X	Y	
ตำแหน่งตัวนำเฟส A	-10.65 เมตร	32.5 เมตร	เมตร
ตำแหน่งตัวนำเฟส B	0 เมตร	32.5 เมตร	เมตร
ตำแหน่งตัวนำเฟส C	10.65 เมตร	32.5 เมตร	เมตร

รูปที่ 4.5 ส่วนตำแหน่งของสายส่ง

C เป็นส่วนของข้อมูลอื่นๆ

ในส่วนข้อมูลอื่นๆนี้ ได้ทำการแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือความลึกเฉลี่ยและความต้านทานจำเพาะของดิน ในการกรป้อนข้อมูลในส่วนของความลึกเฉลี่ยเนื่องจากความลึกของท่อที่ฝังลงในพื้นดิน โดยปกติจะไม่เท่ากันดังนั้นจำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยก่อนทำการป้อนข้อมูล ในส่วนของความต้านทานจำเพาะของดินจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ๆทำการฝังท่อโดยทั่วไปจะไม่เท่ากันดังนั้นจำเป็นต้องหาค่าเฉลี่ยก่อนการป้อนข้อมูล ดังรูปที่ 4.6






รูปที่ 4.6 ส่วนข้อมูลอื่นๆ

D เป็นส่วนการทำงาน

รูปที่ 4.7 เป็นรูปที่แสดงส่วนการทำงานของหน้าต่างรับข้อมูลของเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนส่วนการทำงานจะประกอบไปด้วย 3 ปุ่มหลัก โดยในแต่ละปุ่มมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

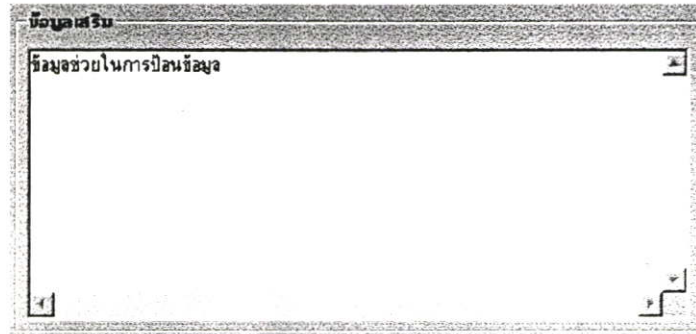


รูปที่ 4.7 ส่วนการทำงาน

- | | |
|---|--|
|  | เป็นปุ่มที่ใช้ในการยกเลิกการทำงานของหน้าต่างนี้ ข้อมูลที่ป้อนใหม่จะถูกรีเซ็ต และหน้าต่างนี้จะหายไป |
|  | เป็นปุ่มที่ใช้ในการประมวลผลในการคำนวณหาค่า LEF |
|  | เป็นปุ่มที่ใช้ทำหน้าที่ แสดงกราฟ LEF ที่ได้จากการประมวลผล |

E ส่วนข้อมูลเสริม

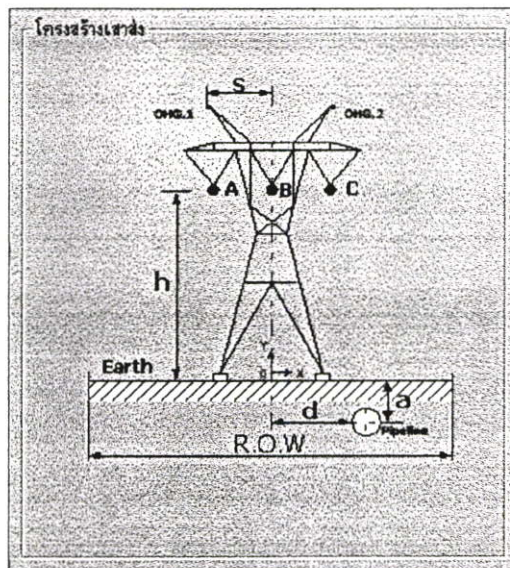
ส่วนข้อมูลเสริมนี้เป็นส่วนที่อธิบายการป้อนข้อมูลในแต่ละส่วนและเป็นส่วนที่ให้คำแนะนำในการป้อนข้อมูลเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นในขบวนการป้อนข้อมูลนั่นเอง ซึ่งลักษณะของการอธิบายแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 หน้าต่างข้อมูลเสริม

F เป็นส่วนแสดงโครงสร้างของเสาส่ง

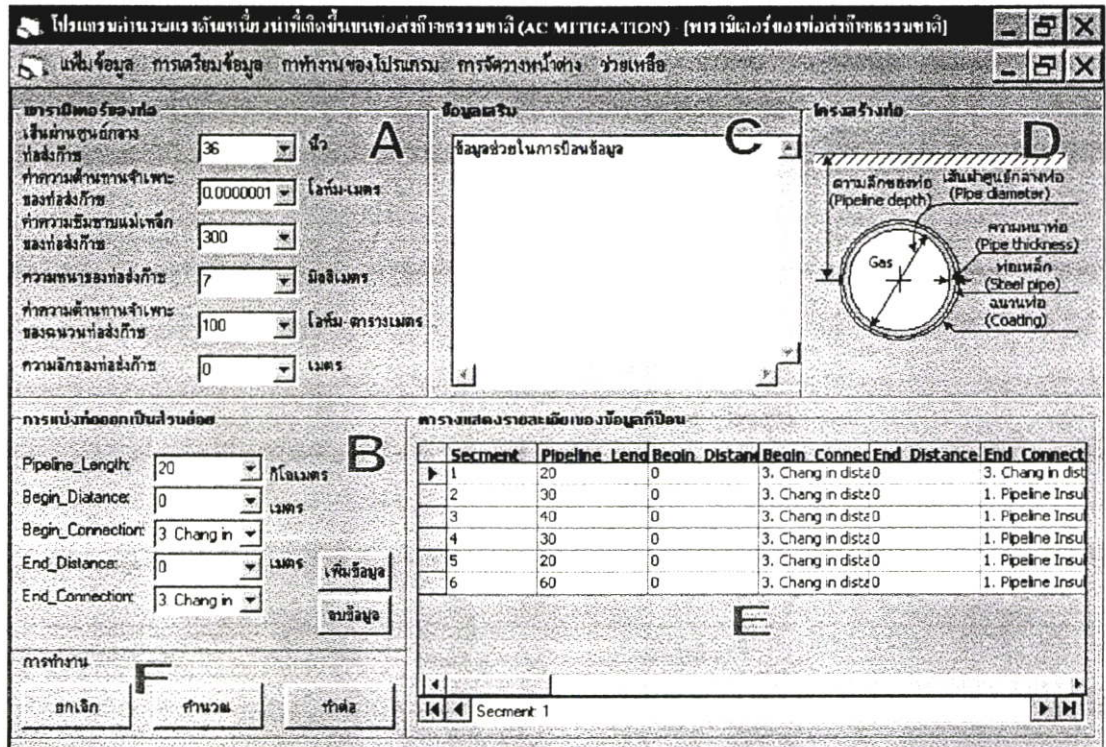
เป็นส่วนที่แสดงโครงสร้างของเสาส่งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการเลือกชนิดของเสาส่งนั่นเองในการเลือกชนิดของเสาส่งที่ใช้ในการคำนวณสิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงคือจำนวนวงจรที่ใช้ในการส่งจ่ายและลักษณะโครงสร้างเสาส่ง ซึ่งโครงสร้างของเสาส่งที่มีการจัดวางค้ำไว้ในแนวนอนแสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ส่วน โครงสร้างเสาส่ง

4.3.1.2.2 พารามิเตอร์ท่อส่งก๊าซ

ทำหน้าที่แสดงหน้าต่างที่ใช้ในการรับข้อมูลของท่อส่งก๊าซโดยแบ่งเป็นส่วนต่างๆดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 หน้าต่างรับข้อมูลของท่อส่งก๊าซของ โปรแกรม AC Mitigation

A เป็นส่วนพารามิเตอร์ของท่อ

ในส่วนพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซได้ทำการจำแนกความต้องการของข้อมูลออกเป็น 6 ลักษณะดังแสดงดังรูปที่ 4.11

พารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ	
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อส่งก๊าซ	36 นิ้ว
ค่าความต้านทานจำเพาะของท่อส่งก๊าซ	0.0000001 โหลท-เมตร
ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของท่อส่งก๊าซ	300
ความหนาของท่อส่งก๊าซ	7 มิลลิเมตร
ค่าความต้านทานจำเพาะของฉนวนท่อส่งก๊าซ	100 โหลท-ตารางเมตร
ความลึกของท่อส่งก๊าซ	1 เมตร

รูปที่ 4.11 ส่วนพารามิเตอร์ของท่อ

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่งก๊าซ	เป็นขนาดของท่อส่งก๊าซที่ใช้ในการติดตั้งมีหน่วยเป็นนิ้ว
ความต้านทานจำเพาะของท่อส่งก๊าซ	เป็นความต้านทานจำเพาะของโลหะที่นำมาทำเป็นท่อส่งก๊าซ โดยทั่วไปทำมาจากเหล็กคังนั้นความต้านทานจำเพาะอยู่ที่ $1.6 \cdot 10^{-7}$ - $1.7 \cdot 10^{-7}$ โอห์ม-เมตร
ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของท่อส่งก๊าซ	เป็นความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของท่อโลหะที่นำมาทำเป็นท่อส่งก๊าซ โดยทั่วไปทำมาจากเหล็กที่มีค่าอยู่ประมาณ 250-300
ความหนาของท่อส่งก๊าซ	เป็นความหนาของท่อที่เป็นโลหะ ปกติอยู่ที่ 2.5-25 มิลลิเมตร
ความต้านทานจำเพาะของฉนวนท่อส่งก๊าซ	เป็นค่าความต้านทานจำเพาะของฉนวนที่นำมาพันรอบท่อเพื่อป้องกันไม่ให้ท่อเป็นสนิม โดยทั่วไปจะมีค่าตั้งแต่ 10-10,000 กิโลโอห์ม-ตารางเมตร
ควมสึก โดยเฉลี่ยของท่อส่งก๊าซ	เป็นความสึกของท่อ โดยเฉลี่ยเนื่องจากการฝังท่อส่งก๊าซ ในแต่ละช่วงจะไม่เท่ากันคังนั้นจึงต้องใช้ค่าเฉลี่ย

B เป็นส่วนการแบ่งท่อออกเป็นส่วนย่อย

ในส่วนนี้เป็นส่วนที่ต้องทำการพิจารณาท่อเป็นส่วนย่อยโดยในแต่ละส่วนจะประกอบไปด้วย 5 ข้อมูลที่ต้องทำการพิจารณา ซึ่งแสดงคังรูปที่ 4.12 ข้อมูลที่ต้องการในแต่ละบล็อก

การแบ่งท่อออกเป็นส่วนย่อย

Pipeline_Length: 10 กิโลเมตร

Begin_Distance: 0 เมตร

Begin_Connection: 3. Chang in

End_Distance: 0 เมตร

End_Connection: 3. Chang in

เพิ่มข้อมูล

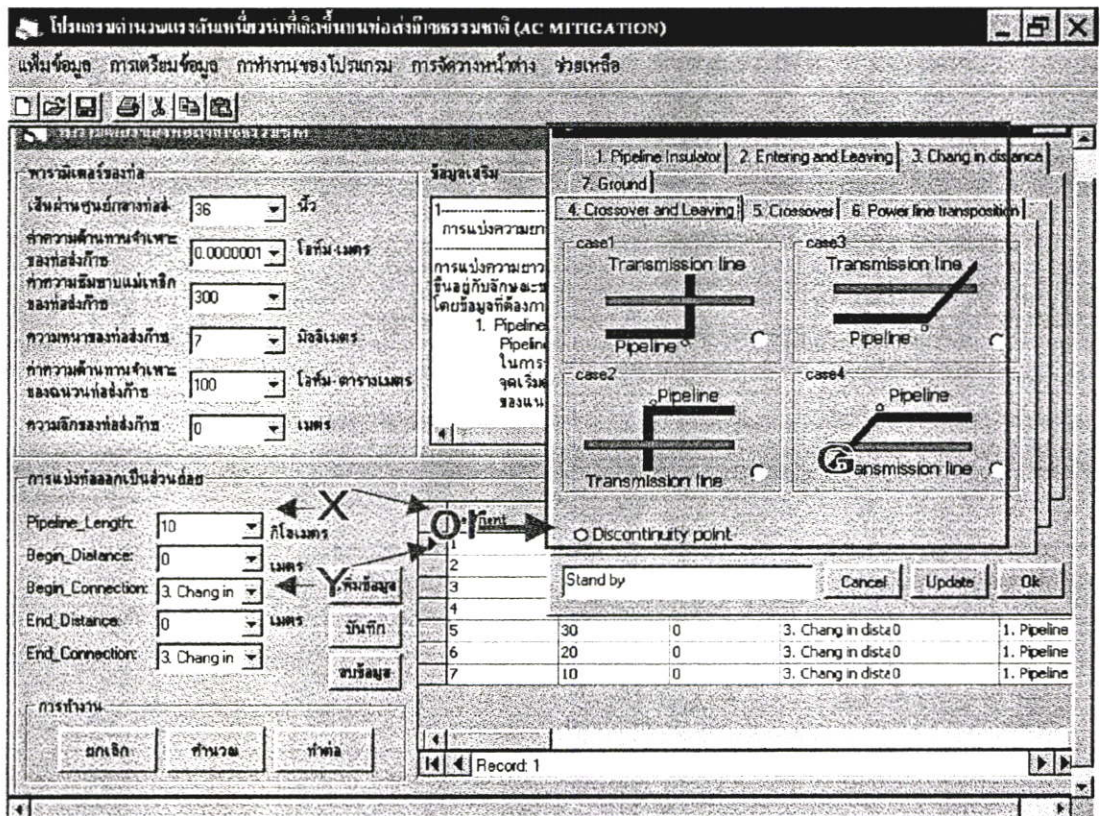
ลบข้อมูล

รูปที่ 4.12 ส่วนการแบ่งท่อออกเป็นส่วนย่อย

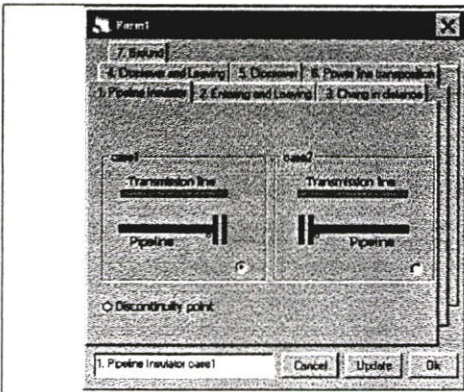
Pipeline_Length	เป็นความยาวของท่อส่งก๊าซในส่วนย่อยนั้นๆ มีหน่วยเป็น กิโลเมตร
Begin_Distance	เป็นระยะทางนับจากจุดกึ่งกลางของเสาส่งถึงท่อส่งก๊าซที่จุดเริ่มต้นของส่วนย่อยนั้นๆ ถ้าแนวท่ออยู่ด้านซ้ายมีระยะทางที่ป้อนต้องมีค่าเป็น “ลบ” อยู่ด้านขวามือเป็น “บวก” และอยู่ตรงกลางเสาส่งมีค่าเป็น “ศูนย์” มีหน่วยเป็นเมตร

- Begin_Connection** เป็นลักษณะของความไม่ต่อเนื่องของท่อที่จุดเริ่มต้น โดยในส่วนนี้ได้ทำการแบ่งความไม่ต่อเนื่องออกเป็น 7 กรณีดังจะกล่าวต่อไป
- End_Distance** เป็นระยะทางนับจากจุดกึ่งกลางของเสาส่งถึงท่อส่งก๊าซที่จุดสิ้นสุดของส่วนย่อยนั้นๆ ถ้าแนวท่ออยู่ด้านซ้ายมีระยะทางที่ป้อนต้องมีค่าเป็น “ลบ” อยู่ด้านขวามือเป็น “บวก” และอยู่ตรงกลางเสาส่งมีค่าเป็น “ศูนย์” มีหน่วยเป็น เมตร
- End_Connection** เป็นลักษณะของความไม่ต่อเนื่องของท่อที่จุดสิ้นสุด โดยในส่วนนี้ได้ทำการแบ่งความไม่ต่อเนื่องออกเป็น 7 กรณีดังจะกล่าวต่อไป

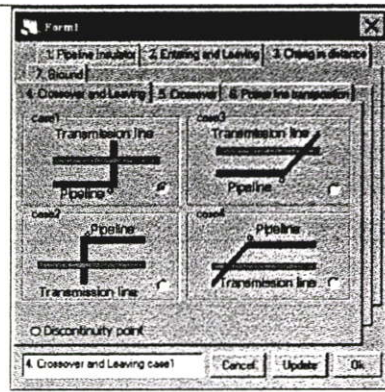
เมื่อทำการคลิกที่บล็อก **Begin_Connection** หรือ **End_Connection** จะพบว่าจะมีหน้าต่างเงื่อนไขของความไม่ต่อเนื่องขึ้นมาดังรูปที่ 4.13 โดยเงื่อนไขของความไม่ต่อเนื่องแสดงดังรูปที่ 4.14 เงื่อนไขของความไม่ต่อเนื่องมีดังนี้ Pipeline Insulation, Enter ans Leaving, Chang in Distance, Crossover and Leaving, Crossover, Power line Transposition, Ground



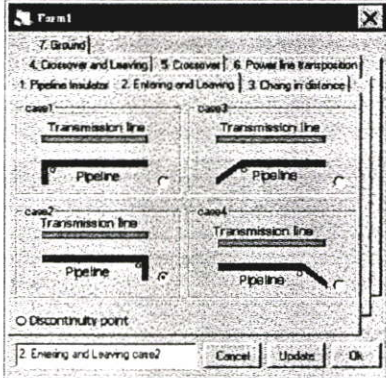
รูปที่ 4.13 หน้าต่างการเลือกเงื่อนไขการวางท่อ



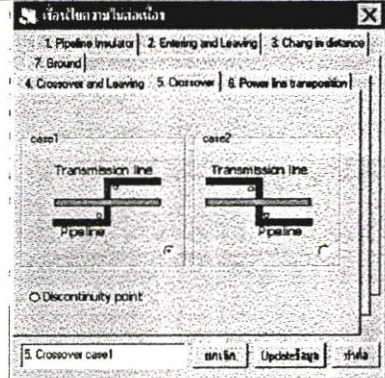
(ก) Pipeline Insulation



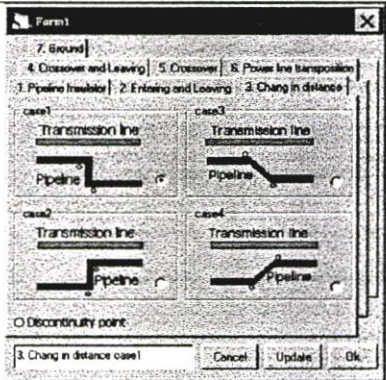
(ง) Crossover and Leaving



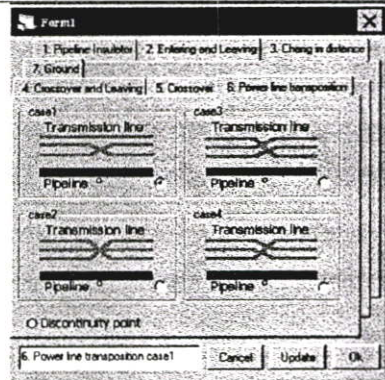
(ข) Enter and Leaving



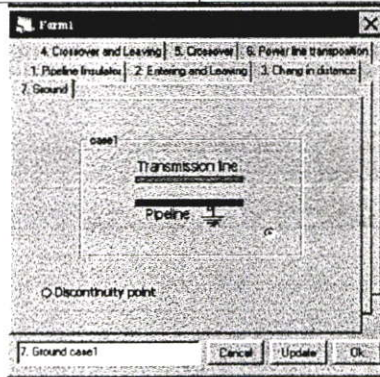
(จ) Crossover



(ค) Change in Distance



(ฉ) Power line Transposition



(ช) Ground

รูปที่ 4.14 เส้นไขความไม่ต่อเนื่องของท่อส่งก๊าซ

1. Pipeline Insulation

ความไม่ต่อเนื่องในกรณีนี้เป็นผลเนื่องมาจากการต่อเชื่อมระหว่างท่อโดยการใช้นวนเป็นตัวเชื่อม หรือในกรณีที่โผล่จากพื้นดิน จะมีนวนเป็นตัวกั้นระหว่างท่อที่อยู่เหนือดินและท่อที่อยู่ใต้ดินเพื่อป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่าที่ต่อบนดินส่งผลกระทบต่อท่อที่อยู่ใต้ดินลักษณะของการวางแนวท่อแสดงดังรูปที่ 4.14 (ก)

2. Enter and Leaving

เป็นจุดที่ท่อมีการหักเข้าแนวสายส่งหรือจุดที่ท่อมีการหักออกจากแนวสายส่งลักษณะของการวางแนวท่อแสดงดังรูปที่ 4.14 (ข)

3. Chang in Distance

เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างแนวท่อกับแนวสายส่งภายใต้เขตปลอดภัยของการเดินสายลักษณะของการวางแนวท่อแสดงดังรูปที่ 4.14 (ค)

4. Crossover and Leaving

เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนทิศทางของแนวท่อกับด้านใดด้านหนึ่งจากแนวสายส่งไปยังอีกด้านหนึ่งของแนวสายส่งและแนวท่อต้องอยู่นอกเขตการเดินสายไฟฟ้าลักษณะการวางแนวท่อแสดงดังรูปที่ 4.14 (ง)

5. Crossover

เป็นจุดที่มีการเปลี่ยนทิศทางของแนวท่อกับด้านใดด้านหนึ่งจากแนวสายส่งไปยังอีกด้านหนึ่งของแนวสายส่งแต่แนวท่อยังอยู่ภายใต้เขตเดินสายไฟฟ้าของสายส่ง ลักษณะของแนวท่อแสดงดังรูปที่ 4.14 (จ)

6. Power line Transposition

เป็นจุดที่มีการสลับสายส่งเพื่อทำให้เกิดการสมดุลของกระแสในแต่ละเฟสลักษณะของการสลับสายส่งแสดงดังรูปที่ 4.14 (ฉ)

7. Ground

เป็นจุดที่ท่อมีการต่อกราวด์เพื่อทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำลักษณะของการต่อกราวด์กับท่อแสดงดังรูปที่ 4.14 (ซ)

C เป็นส่วนตารางแสดงรายละเอียด

ในส่วนนี้เป็นตารางแสดงรายละเอียดของส่วนย่อยที่ได้จากการป้อนข้อมูลในส่วน “การแบ่งท่อออกเป็นส่วนย่อย” เพื่อเป็นส่วนที่ใช้ในการตรวจสอบข้อผิดพลาดในการป้อนข้อมูลหากพบข้อผิดพลาดสามารถแก้ไขได้โดยการเลื่อนลูกศรไปที่แถวที่ต้องการแก้ไขโดยการใส่ คาร์ตา-คอนโทรล (data control) อยู่ด้านล่างของตาราง และในการแก้ไขต้องทำการแก้ไขในส่วน “การแบ่งท่อออกเป็นส่วนย่อย” ซึ่งตารางแสดงรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4.15

ตารางแสดงรายละเอียดของข้อมูลท่อน

Segment	Pipeline Leng	Begin Distance	Begin Connect	End Distance	End Connect
1	20	0	3. Chang in dista	0	3. Chang in dist
2	30	0	3. Chang in dista	0	1. Pipeline Insu
3	40	0	3. Chang in dista	0	1. Pipeline Insu
4	30	0	3. Chang in dista	0	1. Pipeline Insu
5	20	0	3. Chang in dista	0	1. Pipeline Insu
6	60	0	3. Chang in dista	0	1. Pipeline Insu

Segment: 1

รูปที่ 4.15 ตารางรายละเอียดส่วนย่อยของท่อส่งก๊าซ

D เป็นส่วนการทำงาน

ในส่วนการทำงานได้ทำการแบ่งออกเป็น 3 ส่วนแสดงดังรูปที่ 4.16 โดยแต่ละปุ่มมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

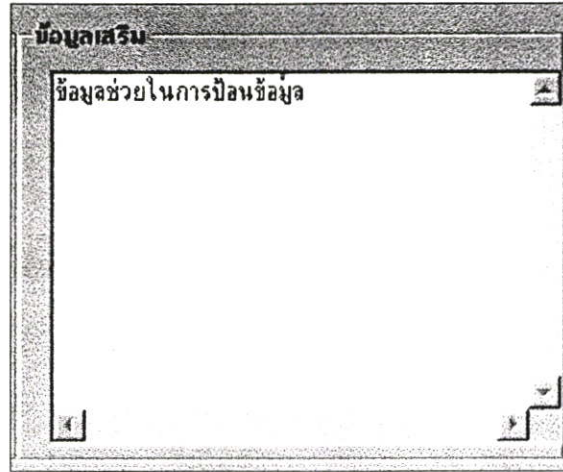


รูปที่ 4.16 ส่วนของการทำงาน

- ยกเลิก** เป็นปุ่มที่ใช้ในการยกเลิกการทำงานของหน้าต่างนี้ข้อมูลที่ป้อนใหม่จะถูกรีเซ็ต และหน้าต่างนี้จะหายไป
- คำนวณ** เป็นปุ่มที่ใช้ในการประมวลผลในการคำนวณหาแรงดันเหนือขวนาที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซ
- ทำต่อ** เป็นปุ่มที่ใช้ทำหน้าที่ ใช้ในการแสดงกราฟแรงดันเหนือขวนาที่เกิดขึ้นที่ดันและปลายของส่วนย่อย

E ส่วนข้อมูลเสริม

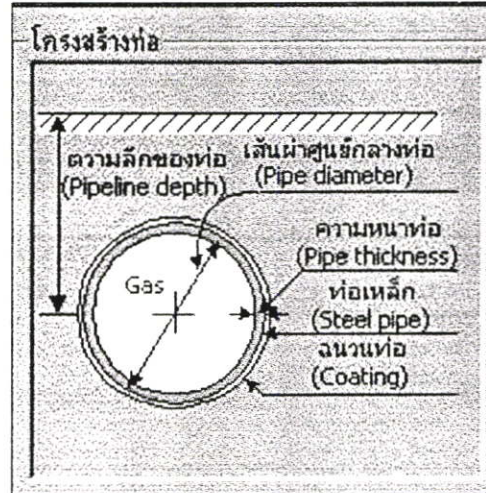
ส่วนข้อมูลเสริมนี้เป็นส่วนที่แนะนำการป้อนข้อมูลในแต่ละส่วนและเป็นส่วนที่ให้คำแนะนำในการป้อนข้อมูลเพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดขึ้นในขบวนการป้อนข้อมูลนั่นเอง ซึ่งลักษณะของการอธิบายแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ส่วนข้อมูลเสริม

F เป็นส่วนแสดงโครงสร้างของท่อส่งก๊าซ

เป็นส่วนที่แสดง โครงสร้างของเสาส่งเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการป้อนข้อมูลในแต่ละส่วนของท่อส่งก๊าซแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 โครงสร้างของท่อส่งก๊าซ

4.3.1.3 ส่วนของการแสดงผล (Output Data)

ส่วนการแสดงผลได้ทำการแบ่งออกเป็น 2 โหมดคือการแสดงผลใน โหมดกราฟและการแสดงผลในโหมดข้อความ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 4.21 และ 4.23 ซึ่งได้ทำการแบ่งส่วนการแสดงผลออกเป็น ส่วนต่างดังนี้

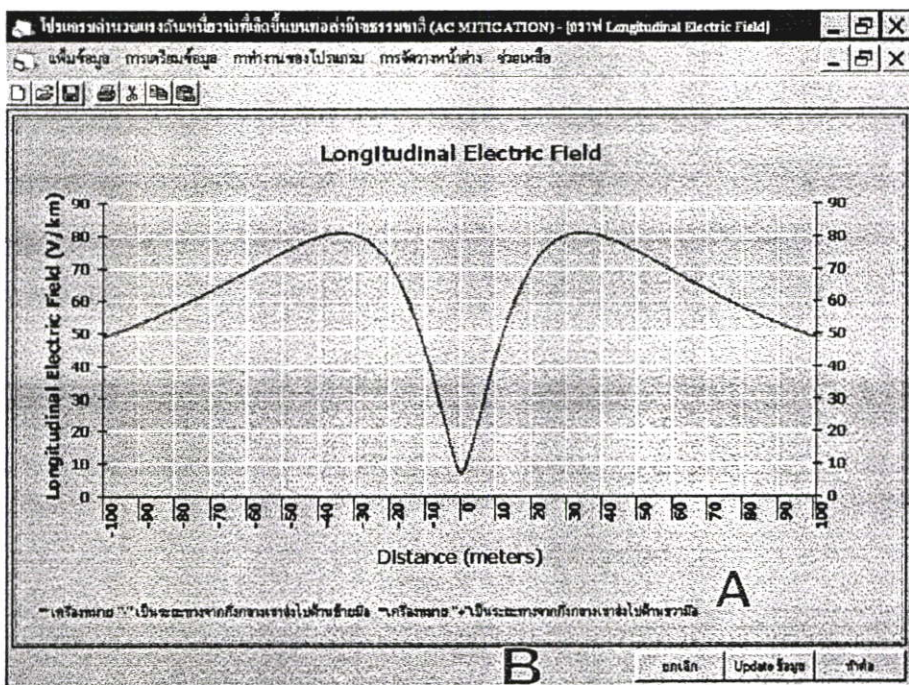
- 1 กราฟ LEF
- 2 กราฟแรงดันเหนี่ยวนำ
- 3 ข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซที่ได้จากการคำนวณ

4.3.1.3.1 กราฟ LEF

จากกราฟรูปที่ 4.19 แสดงค่า LEF ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม AC mitigation ซึ่งลักษณะของกราฟจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างเสาส่ง โดยหน้าต่างแสดงกราฟ LEF ได้ทำการแบ่งออกเป็นสองย่อย 2 ส่วนดังนี้

A เป็นส่วนกราฟแสดงผล

การแสดงผลของกราฟกำหนดให้แกน X เป็นระยะทางและแกน Y เป็นค่า LEF ซึ่งระยะทางที่เป็นลบคือระยะทางไปทางด้านซ้ายมือจากจุดกึ่งกลางของเสาส่งและจะมีค่าเป็นบวกเมื่อนับจากจุดกึ่งกลางของเสาส่งไปทางด้านขวามือ



รูปที่ 4.19 หน้าต่างกราฟ LEF

B เป็นส่วนการทำงาน

ส่วนของการทำงานได้ทำการแยกการทำงานออกเป็น 3 ส่วน คือ ยกเลิก, Update ข้อมูลและทำต่อ ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งการทำงานในแต่ละส่วนเป็นดังนี้



รูปที่ 4.20 ส่วนการทำงาน



ปุ่มนี้ทำหน้าที่ยกเลิกการทำงานของหน้าต่างที่แสดงกราฟ LEF เมื่อทำการกดปุ่มนี้แล้วหน้าต่างที่แสดงกราฟ LEF จะหายไป



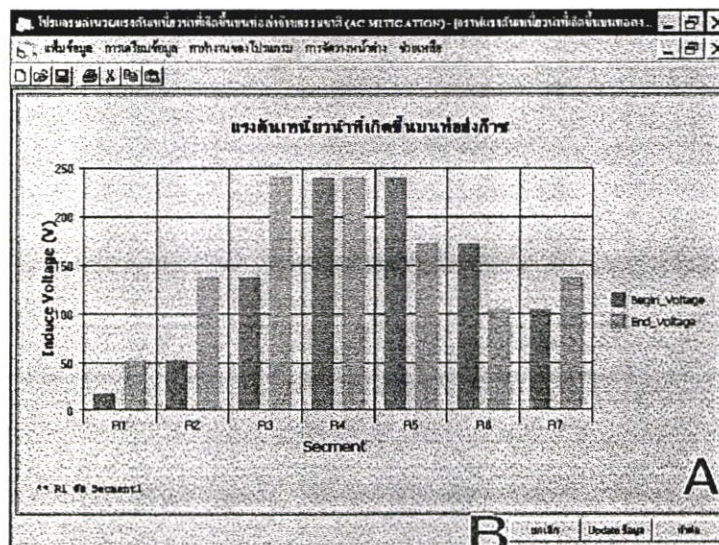
ปุ่มนี้ทำหน้าที่ปรับปรุงข้อมูลให้ตรงกับข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของเสาส่งหรือขนาดของกระแสของสายส่ง เมื่อทำการกดปุ่มคำนวณ ต่อจากนั้นกดปุ่มทำต่อในหน้าต่าง เสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน ปรากฏว่ากราฟ LEF ไม่เปลี่ยนแปลงให้ทำการกดปุ่ม Update ข้อมูล กราฟ LEF ก็จะเปลี่ยนตามข้อมูลใหม่



ปุ่มนี้ทำหน้าที่แสดงหน้าต่าง ข้อมูลของท่อดึงก๊าซ

4.3.1.3.2 กราฟแรงดันเหนี่ยวนำ

เมื่อทำการเลือกเมนู “การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ” จะทำหน้าที่เหมือนกับการกดปุ่ม “ทำต่อ” ของหน้าต่างข้อมูลของท่อดึงก๊าซ ผลที่ได้จากการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำจะอยู่ในรูปแบบกราฟแท่งดังรูปที่ 4.21 แสดงแรงดันเหนี่ยวนำที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของท่อในแต่ละส่วน ซึ่งเป็นจุดที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุด



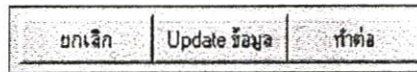
รูปที่ 4.21 หน้าต่างกราฟแรงดันเหนี่ยวนำ

A เป็นส่วนกราฟแสดงผล

สำหรับส่วนกราฟแสดงผลแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อ โดยกำหนดให้แกน X ส่วนย่อย(Segment)ที่ได้จากการแบ่งตามลักษณะการเชื่อมต่อท่อ และแกน Y คือแรงดันเหนี่ยวนำ สีทึบเป็นแรงดันที่จุดเริ่มต้น(Begin_Voltage)และสีบางแสดงแรงดันเหนี่ยวนำที่จุดสิ้นสุดแนวท่อ(End_Voltage)

B เป็นส่วนการทำงาน

ส่วนของการทำงานได้ทำการแยกการทำงานออกเป็น 3 ส่วน คือ ขกเลิก Update ข้อมูล และ ทำต่อ ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งการทำงานในแต่ละส่วนเป็นดังนี้



รูปที่ 4.22 ส่วนการทำงานของหน้าต่างแสดงแรงดันเหนี่ยวนำ

ยกเลิก	ปุ่มนี้ทำหน้าที่ยกเลิกการทำงานของหน้าต่างที่แสดงกราฟแรงดันเหนี่ยวนำ เมื่อทำการกดปุ่มนี้แล้วหน้าต่างที่แสดงกราฟ แรงดันเหนี่ยวนำจะหายไป
Update ข้อมูล	ปุ่มนี้ทำหน้าที่ปรับปรุงข้อมูลให้ตรงกับข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลเมื่อมีการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำอีกครั้ง
ทำต่อ	ปุ่มนี้ทำหน้าที่แสดงหน้าต่าง แรงดันเหนี่ยวนำในรูปของข้อมูลแทนกราฟ

ถ้ามีการกดปุ่ม “ทำต่อ” ผลที่ได้แสดงดังรูป 4.23 เป็นการแสดงแรงดันเหนี่ยวนำในแต่ละส่วนย่อยเช่นเดียวกัน พร้อมทั้งแสดงค่าพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซที่ได้จากการคำนวณด้วย โดยในแต่ละส่วนจะมีความหมายดังนี้

4.3.1.3.3 ข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซที่ได้จากการคำนวณ

สำหรับหน้าต่างแสดงข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซที่ได้จากการคำนวณจะแสดงอยู่ในรูปของข้อความแทนกราฟ โดยหน้าต่างการแสดงผลข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซแสดงดังรูปที่ 4.23 ซึ่งในแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

Segment	Pipeline length	Begin Distance	Begin Connection	End Distance	End Connection	Begin Voltage	End Voltage
1	20	200	3. Chang in distanc	200	3. Chang in distanc	96.03008	19.22983

A

Parameter for the calculation

	ส่วนจริง	ส่วนจินตภาพ	หน่วย
Pipeline Impedance			โหมม/กิโลเมตร
Pipeline Admittance			โหมม/กิโลเมตร
Characteristic Impedance			โหมม
Propagation Constant			1/กิโลเมตร

การคำนวณ

เลือก Update ข้อมูล การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำโดยใช้กรวดรอล การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำโดยใช้กรวดไวร์

B

กราฟแสดงแรงดันเหนี่ยวนำ

ข้อมูลช่วยในการป้อนข้อมูล

C

D

รูปที่ 4.23 หน้าต่างแรงดันเหนี่ยวนำและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซที่ได้จากการคำนวณ

A เป็นส่วนของตารางแสดงแรงดันเหนี่ยวนำ

ซึ่งจะประกอบไปด้วยข้อมูลรายละเอียดของพารามิเตอร์ในแต่ละส่วนของท่อส่งก๊าซและแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณในโหมมข้อความ ดังรูปที่ 4.24

Segment	Pipeline length	Begin Distance	Begin Connection	End Distance	End Connection	Begin Voltage	End Voltage
1	20	200	3. Chang in distanc	200	3. Chang in distanc	96.03008	19.22983

D

รูปที่ 4.24 ส่วนของตารางแสดงแรงดันเหนี่ยวนำ

B เป็นส่วนแสดงพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ

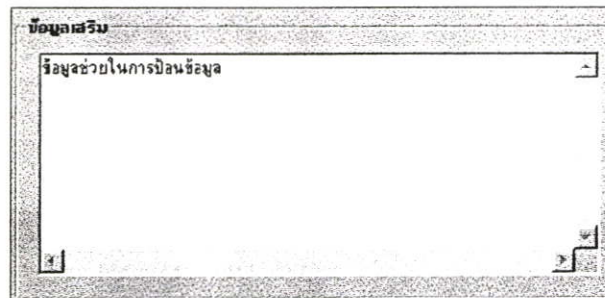
ในส่วนนี้จะแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งก๊าซ แอดมิแตนซ์ของท่อส่งก๊าซ อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อส่งก๊าซและค่าคงที่การแพร่ของคลื่น ของท่อส่งก๊าซที่ได้จากการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4.25

พารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณ			
	ส่วนจริง	ส่วนจินตภาพ	
Pipeline Impedance			โอห์ม/กิโลเมตร
Pipeline Admittance			โอห์ม/กิโลเมตร
Characteristic Impedance			โอห์ม
Propagation Constant			1/กิโลเมตร

รูปที่ 4.25 ส่วนแสดงพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ

C เป็นส่วนของข้อมูลเสริม

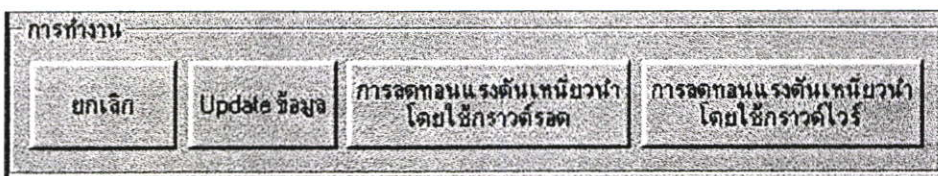
เป็นส่วนที่อธิบายเกี่ยวกับ ส่วนที่แสดงพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซและตารางที่แสดงแรงดันเหนือขาน้ำ หน้าต่างข้อมูลเสริมแสดงดังรูปที่ 4.26



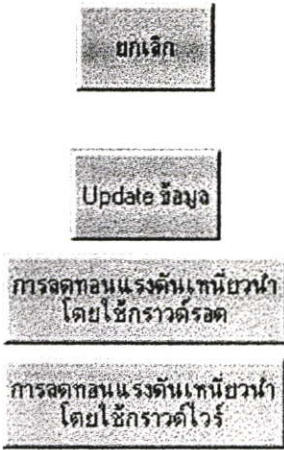
รูปที่ 4.26 ส่วนของข้อมูลเสริม

D เป็นส่วนการทำงาน

รูปที่ 4.27 เป็นรูปที่แสดงส่วนการทำงานของหน้าต่างแสดงข้อมูลแรงดันเหนือขาน้ำและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซที่ได้จากการคำนวณได้ทำการแบ่งส่วนการทำงานออกเป็น 4 ปุ่มหลัก โดยในแต่ละปุ่มมีหน้าที่ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.27 ส่วนการทำงาน



เป็นปุ่มที่ใช้ในการยกเลิกการทำงานของหน้าต่างแสดงข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซที่ได้จากการคำนวณเมื่อคำนวณนี้หน้าต่างแสดงผลจะหายไป

เป็นปุ่มที่ใช้ในการปรับปรุงข้อมูลให้ตรงกับความเป็นจริงเมื่อการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำครั้งใหม่

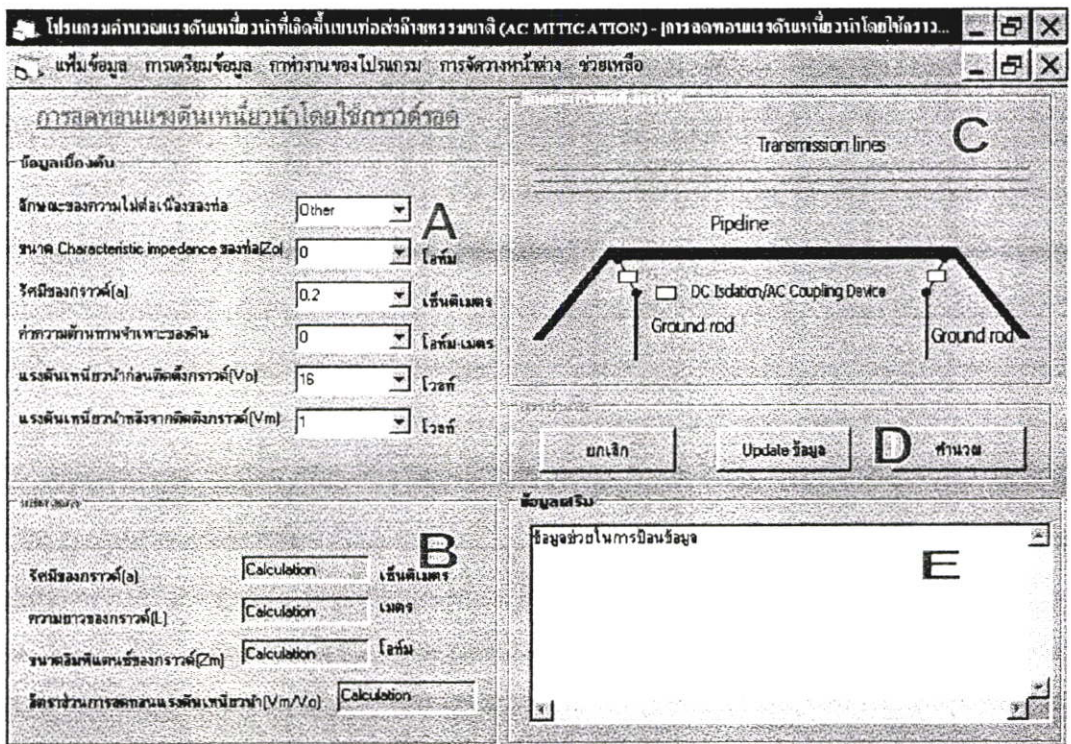
เป็นปุ่มที่ใช้ในการแสดงหน้าต่างที่ใช้ในการคำนวณหากราวด์รูด

เป็นปุ่มที่ใช้ในการแสดงหน้าต่างที่ใช้ในการคำนวณหากราวด์ไวร์

4.3.2 ส่วนคำนวณระบบกราวด์

ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์ที่จะนำมาติดตั้งเพื่อทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้ทำการจำแนกระบบกราวด์ออกเป็น 2 ระบบ คือ กราวด์รูดและกราวด์ไวร์ โดยความต้องการข้อมูลเบื้องต้นของระบบกราวด์ทั้งสองแบ่งได้ดังนี้

4.3.2.1 กราวด์รูด



รูปที่ 4.28 หน้าต่างที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

หน้าตาที่ใช้ในการคำนวณอิมพีแดนซ์ของกราวด์รูดแสดงดังรูปที่ 4.28 ได้ทำการแบ่งส่วนประกอบหน้าตาออกเป็น 5 ส่วน โดยในแต่ละส่วนจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

A เป็นส่วนข้อมูลเบื้องต้น

ในส่วนของข้อมูลเบื้องต้นเป็นส่วนที่รับข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์รูดซึ่งความต้องการของข้อมูลในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 4.29 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ข้อมูลเบื้องต้น	
ลักษณะของความไม่ต่อเนื่องของท่อ	[Other] ▼
ขนาด Characteristic impedance ของท่อ $ Z_0 $	[0] ▼ โหลทึม
รัศมีของกราวด์ (a)	[0.2] ▼ เซนติเมตร
ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	[0] ▼ โหลทึม-เมตร
แรงดันเหนี่ยวนำก่อนติดตั้งกราวด์ (Vo)	[16] ▼ โวลท์
แรงดันเหนี่ยวนำหลังจากติดตั้งกราวด์ (Vm)	[1] ▼ โวลท์

รูปที่ 4.29 ส่วนข้อมูลเบื้องต้นของกราวด์รูด

ลักษณะของความไม่ต่อเนื่องของท่อ	บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลลักษณะของจุดที่ไม่ต่อเนื่องเป็นผลมาจาก มีการเชื่อมต่อท่อ โดยใช้ฉนวนหรือจุดไม่ต่อเนื่องเป็นผลมาจากกรณีอื่นๆ ดังนั้นในส่วนนี้จะถูกกำหนดเงื่อนไขไว้ 2 กรณีคือ “Insulator” และ “Other”
ขนาด Characteristic impedance $ Z_0 $ ของท่อ	บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูล ขนาด Characteristic impedance ของท่อส่งก๊าซ
รัศมีของกราวด์รูด	บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลเป็นรัศมีของกราวด์รูดที่จะทำการฝังเพื่อทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ
ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลค่าความต้านทานจำเพาะของพื้นดินบริเวณที่ต้องการทำการติดตั้งกราวด์รูด
แรงดันเหนี่ยวนำก่อนการติดตั้งกราวด์	บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำก่อนการติดตั้งกราวด์คือแรงดันเหนี่ยวนำก่อนทำการลดทอน
แรงดันเหนี่ยวนำหลังการติดตั้งกราวด์	บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำที่ต้องการให้คงอยู่เมื่อทำการติดตั้งกราวด์แล้วคือแรงดันเหนี่ยวนำหลังการลดทอนจะต้องไม่เกิน 15 โวลต์ตามมาตรฐาน NACE กำหนด

B เป็นส่วนแสดงผล

ในส่วนนี้เป็นส่วนที่แสดงข้อมูลที่ได้จากการคำนวณหาขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำโดยผลที่ได้จะแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.30 ประกอบไปด้วยความยาวรัศมี ค่าอิมพีแดนซ์ และ อัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ของกราวด์รูดที่จะนำมาติดตั้ง

Label	Button	Unit
รัศมีของกราวด์(a)	Calculation	เซ็นติเมตร
ความยาวของกราวด์(L)	Calculation	เมตร
ขนาดอิมพีแดนซ์ของกราวด์(Zm)	Calculation	โอห์ม
อัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ(Vm/Vo)	Calculation	

รูปที่ 4.30 ส่วนแสดงผล

C เป็นส่วนของข้อมูลเสริม

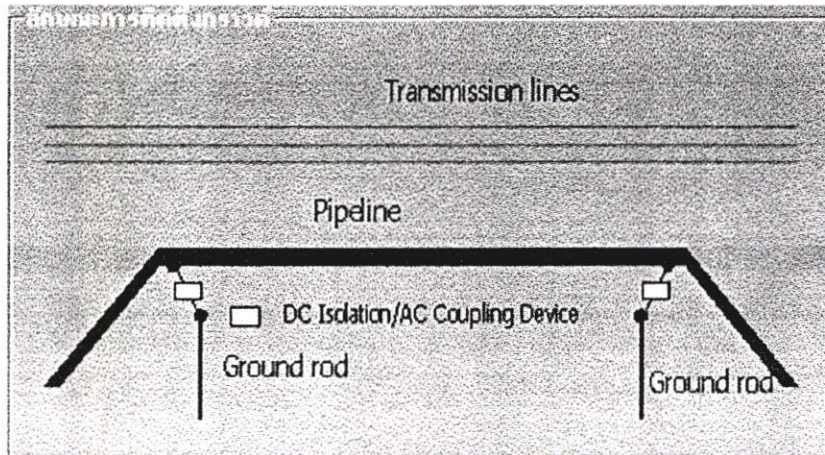
ในส่วนข้อมูลเสริมเป็นส่วนที่ใช้ในการอธิบายรายละเอียดของข้อมูลที่ต้องการป้อนในแต่ละบล็อกในส่วน “ข้อมูลเบื้องต้น” ลักษณะของส่วนข้อมูลเสริมแสดงดังรูปที่ 4.31

รูปที่ 4.31 ส่วนข้อมูลเสริม

D เป็นส่วนลักษณะการติดตั้งกราวด์รูด

ส่วนลักษณะการติดตั้งกราวด์รูดเป็นส่วนที่ใช้ในการแสดงลักษณะการติดตั้งกราวด์รูดเมื่อต้องการทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ซึ่งในการติดตั้งกราวด์รูดจะต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์

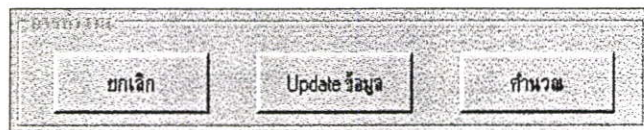
ที่ทำหน้าที่ป้องกันไฟฟ้ากระแสตรงของระบบป้องกันสนิมไหลลงกราวด์ด้วยที่นิยมใช้กันทั่วไป เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเรียกว่า DC decouple การติดตั้งแสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 ส่วนลักษณะการติดตั้งกราวด์รูด

E ส่วนการทำงาน

เป็นส่วนที่ใช้ในการประมวลผล ขกเลิกการทำงานและส่วนปรับปรุงข้อมูล โดยฟังก์ชันการทำงานแบ่งออกได้ดังรูปที่ 4.33



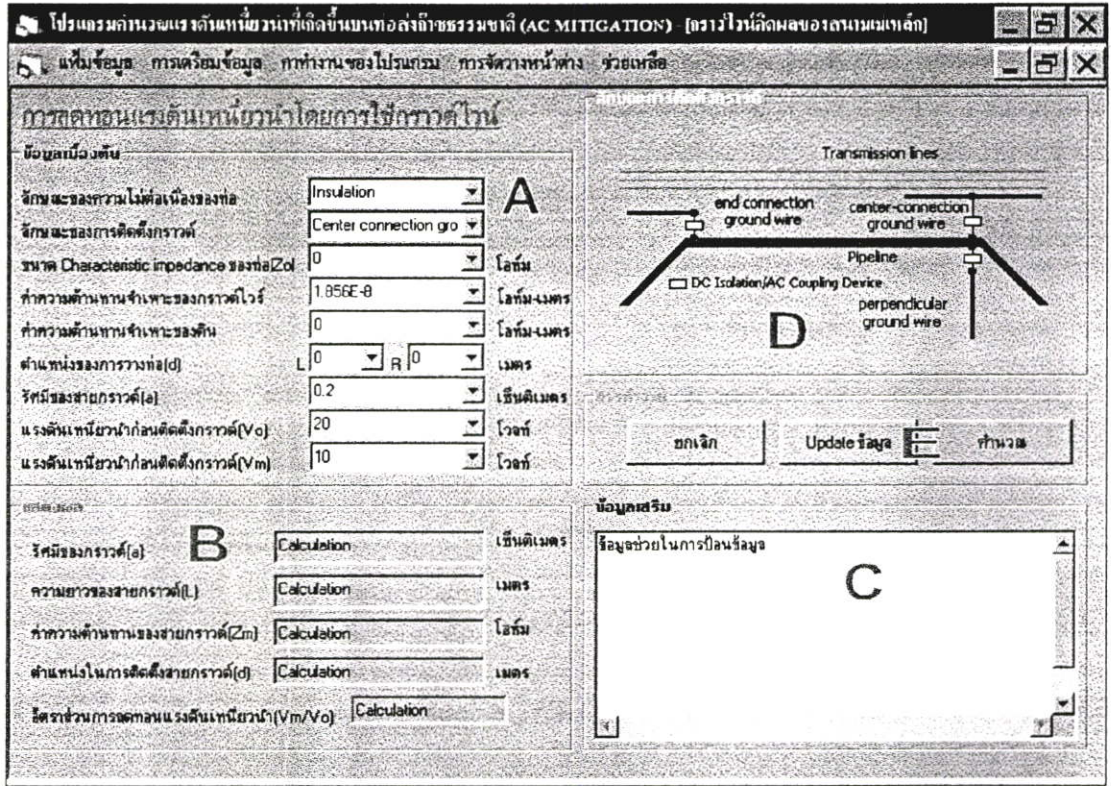
รูปที่ 4.33 ส่วนการทำงาน

โดยแยกการทำงานเป็นดังนี้

- | | |
|---------------|---|
| ยกเลิก | เป็นปุ่มยกเลิกการทำงานของหน้าต่าง “กราวด์รูด” เมื่อทำการกดปุ่มนี้ หน้าต่าง “การคำนวณอิมพีแดนซ์ของกราวด์รูด” จะหายไป |
| Update ข้อมูล | เป็นปุ่มปรับปรุงข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งก๊าซ หรือค่าความต้านทานจำเพาะของดิน |
| คำนวณ | เป็นปุ่มที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดและค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์รูดที่จะใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ |

4.3.2.2 กราวด์ไวร์

หน้าต่างที่ใช้ในการคำนวณอิมพีแดนซ์ของกราวด์ไวร์แสดงดังรูปที่ 4.34 ได้ทำการแบ่งส่วนประกอบหน้าต่างออกเป็น 5 ส่วน โดยในแต่ละส่วนจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.34 หน้าต่างที่ใช้ในการคำนวณอิมพีแดนซ์ของกราวด์ไวร์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

A เป็นส่วนข้อมูลเบื้องต้น

ในส่วนของข้อมูลพื้นฐานเป็นส่วนที่รับข้อมูลเบื้องต้นที่ใช้ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ ส่วนประกอบของหน้าต่างนี้ประกอบไปด้วยข้อมูลดังแสดงในรูป 4.34 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ลักษณะของความไม่ต่อเนื่องของ
ท่อ

บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลลักษณะของจุดที่ไม่ต่อเนื่องเป็นผลมาจาก มีการเชื่อมต่อท่อโดยใช้ฉนวนหรือจุดไม่ต่อเนื่องเป็นผลมาจากกรณีอื่น ๆ ดังนั้นในส่วนนี้จะถูกกำหนดเงื่อนไขไว้ 2 กรณีคือ “Insulator” และ “Other”

ขนาด Characteristic impedance
 $|Z_0|$ ของท่อ

บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูล ขนาดอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของ ท่อ
ส่งกำลัง

รัศมีของกราวด์ไวร์

บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลรัศมีของกราวด์ไวร์ที่จะนำมาคิดตั้ง

ลักษณะการติดตั้งกราวด์

บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลลักษณะของการติดตั้งกราวด์ไว้ โดยเงื่อนไขในการต่อถูกกำหนดไว้ 3 ลักษณะคือ การต่อกราวด์แบบ End connection ground wire, Begin connection ground wire และ Perpendicular connection ground wire

ค่าความต้านทานจำเพาะของสายกราวด์

บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลค่าความต้านทานจำเพาะของสายกราวด์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่นำมาทำเป็นสายกราวด์ ซึ่งในส่วนนี้ได้กำหนดวัสดุที่นำมาทำเป็นสายกราวด์ โดยมีค่าความต้านทานจำเพาะ 1.856×10^{-8} , 3.0582×10^{-8} และ 21.384×10^{-8}

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลค่าความต้านทานจำเพาะของดิน บริเวณที่ต้องการทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

ตำแหน่งของการวางท่อ

บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลตำแหน่งในการวางท่อที่ต้องการทำการลดทอน

แรงดันเหนี่ยวนำก่อนทำการลดทอน

บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำที่ก่อนทำการลดทอนคือแรงดันเหนี่ยวนำก่อนที่จะทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

แรงดันเหนี่ยวนำหลังการลดทอน

บล็อกนี้ทำหน้าที่รับข้อมูลแรงดันเหนี่ยวนำที่ต้องการให้คงอยู่เมื่อทำการลดทอนคือแรงดันเหนี่ยวนำหลังการลดทอนจะต้องไม่เกิน 15 โวลต์ตามมาตรฐาน NACE กำหนด

ข้อมูลเบื้องต้น	
ลักษณะของความไม่ต่อเนื่องของท่อ	Insulation
ลักษณะของการติดตั้งกราวด์	End connection
ขนาด Characteristic impedance ของท่อ Z_0	2 โหล่ม
ค่าความต้านทานจำเพาะของสายกราวด์	0 โหล่ม-เมตร
ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	10 โหล่ม-เมตร
ตำแหน่งของการวางท่อ(d)	0 เมตร
รัศมีของสายกราวด์(a)	0.2 เซ็นติเมตร
แรงดันเหนี่ยวนำก่อนติดตั้งกราวด์(V_0)	20 โวลท์
แรงดันเหนี่ยวนำก่อนติดตั้งกราวด์(V_m)	0 โวลท์

รูปที่ 4.35 ส่วนข้อมูลเบื้องต้น

B เป็นส่วนอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการลดทอน

ในส่วนนี้เป็นส่วนที่แสดงข้อมูลที่ได้จากการคำนวณหาขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำโดยผลที่ได้จะแสดงรายละเอียดดังรูปที่ 4.36

แสดงผล		
รัศมีของกราวด์(a)	Calculation	เซ็นติเมตร
ความยาวของสายกราวด์(L)	Calculation	เมตร
ค่าความต้านทานของสายกราวด์(Zm)	Calculation	โอห์ม
ตำแหน่งในการติดตั้งสายกราวด์(d)	Calculation	เมตร
อัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ(Vm/Vo)	Calculation	

รูปที่ 4.36 ส่วนค่าอิมพีแดนซ์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

C เป็นส่วนของข้อมูลเสริม

ในส่วนข้อมูลเสริมเป็นส่วนที่ใช้ในการอธิบายรายละเอียดของข้อมูลที่ต้องการป้อนในแต่ละบล็อกในส่วน “ข้อมูลเบื้องต้น” ลักษณะของคำอธิบายแสดงดังรูปที่ 4.37

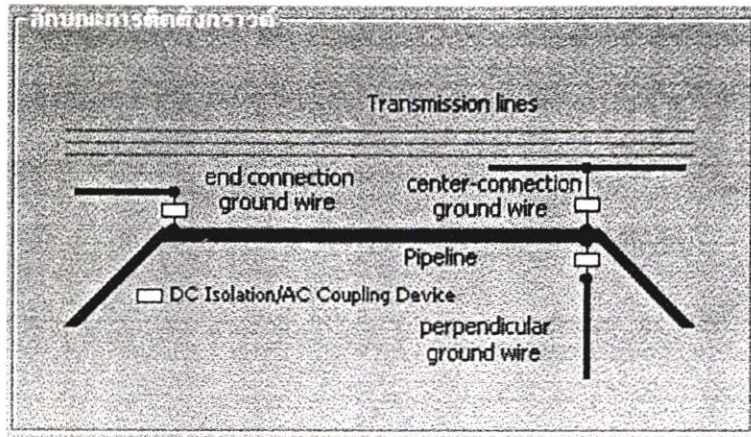
ข้อมูลเสริม

ข้อมูลช่วยในการป้อนข้อมูล

รูปที่ 4.37 ส่วนข้อมูลเสริม

D เป็นส่วนลักษณะการติดตั้งกราวด์ไว้

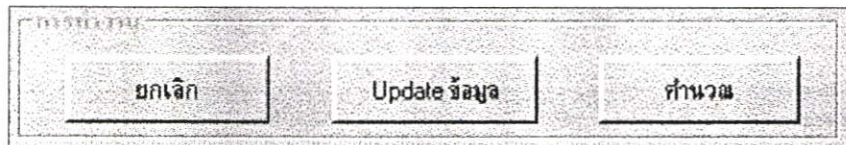
ส่วนลักษณะการติดตั้งกราวด์ไว้เป็นส่วนที่ใช้ในการแสดงลักษณะการติดตั้งกราวด์ไว้ดังรูปที่ 4.38 โดยการติดตั้งกราวด์ไว้ถูกแบ่งออกตามลักษณะการติดตั้งเป็น 3 ลักษณะ ซึ่งแต่ละลักษณะจะต้องทำการต่อผ่านอุปกรณ์ DC Isolation/AC Coupling Device เพื่อส่งผ่านไฟฟ้ากระแสสลับลงกราวด์และป้องกันไฟฟ้ากระแสตรงของระบบป้องกันสนิมไม่ให้ผ่านลงกราวด์



รูปที่ 4.38 ลักษณะการติดตั้งกราวด์ไวร์

E ส่วนการทำงาน

เป็นส่วนที่ใช้ในการประมวลผลและเลือกลักษณะของกราวด์ที่จะทำการติดตั้งโดยฟังก์ชันการทำงานแบ่งออกได้ดังรูปที่ 4.39 โดยแยกการทำงานเป็นดังนี้



รูปที่ 4.39 ส่วนการทำงาน

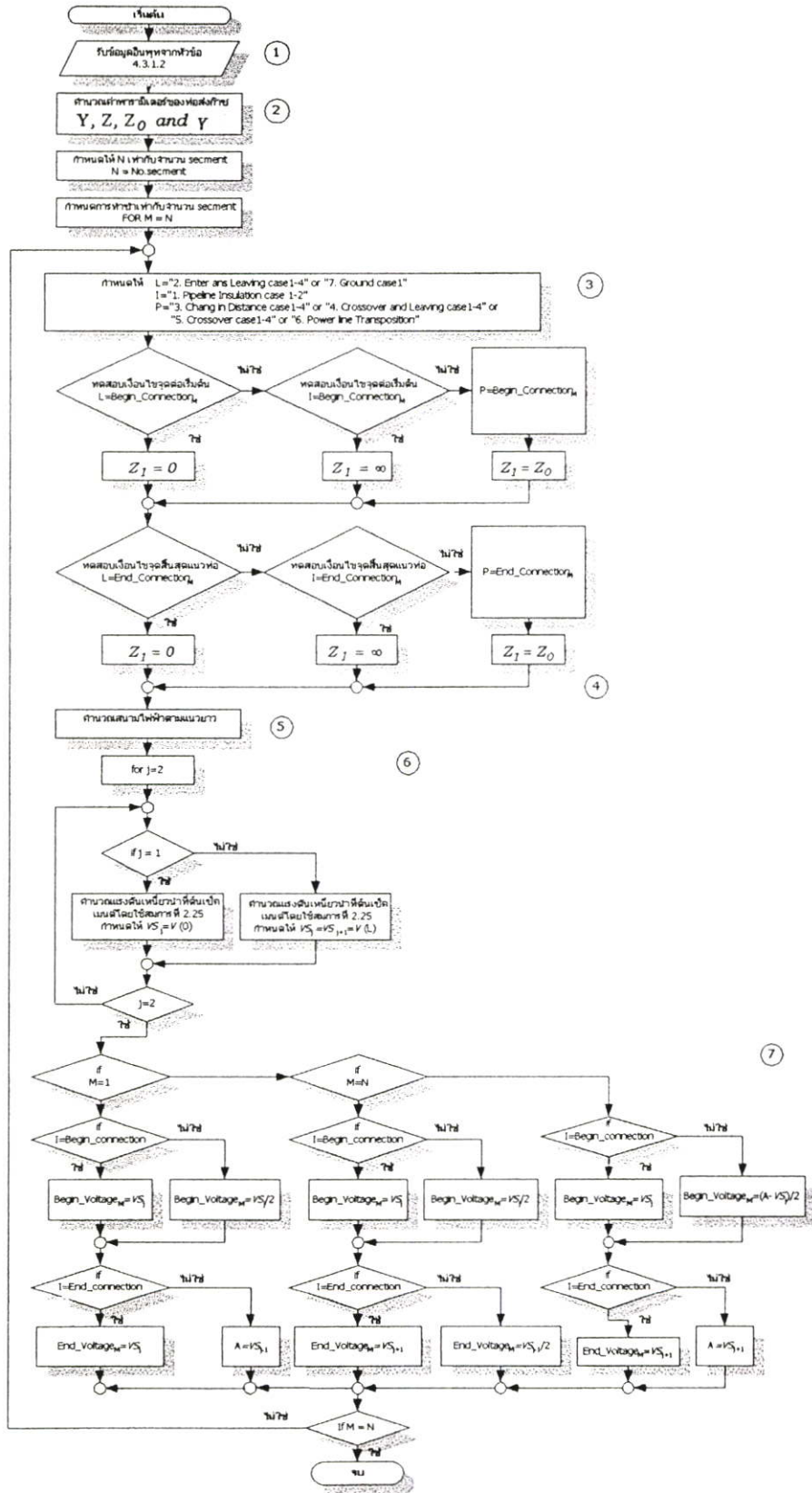
ยกเลิก	เป็นปุ่มยกเลิกการทำงานของหน้าต่าง “กราวด์ไวร์” เมื่อทำการกดปุ่มนี้ หน้าต่าง “การคำนวณอิมพีแดนซ์ของกราวด์ไวร์” จะหายไป
Update ข้อมูล	เป็นปุ่มปรับปรุงข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งก๊าซหรือค่าความต้านทานจำเพาะของคุณ
คำนวณ	เป็นปุ่มที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดและค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ไวร์ที่จะใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

4.4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม AC mitigation

สำหรับส่วนของโปรแกรม AC mitigation ที่ได้นำเสนอไปข้างต้นได้ทำการแบ่งได้ทำการแบ่งการทำงานของโปรแกรมออกเป็น 2 ส่วนหลักๆคือส่วนที่ใช้ในการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำและส่วนที่ใช้ในการคำนวณหาขนาดของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำเพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE ซึ่งในหัวข้อนี้ได้จะนำเสนอขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม AC mitigation ในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

4.4.1 ขั้นตอนการคำนวณแรงดันคั้นเหนี่ยวมา

ส่วนที่ใช้ในการคำนวณหาแรงคั้นเหนี่ยวมา โดยมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4.40

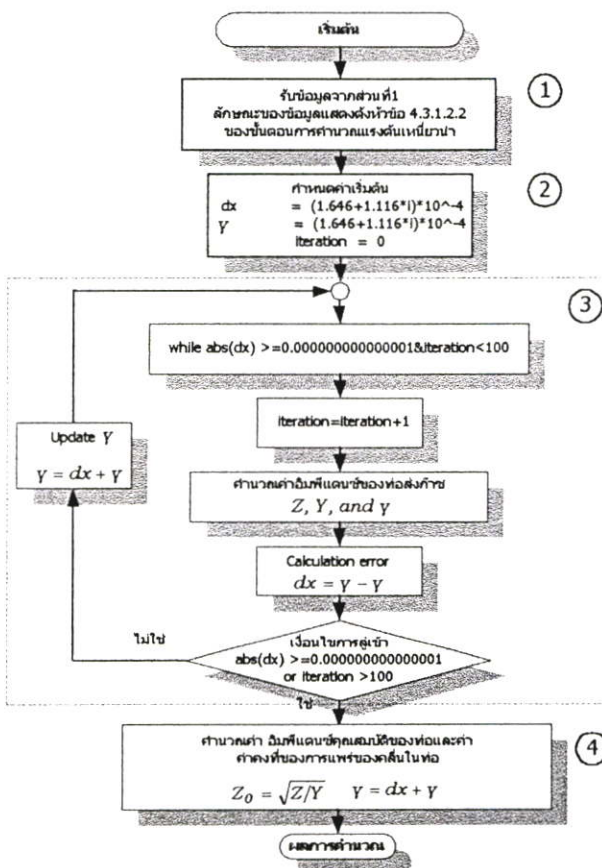


รูปที่ 4.40 ขั้นตอนการคำนวณแรงคั้นเหนี่ยวมาบนท่อส่งก๊าซของโปรแกรม AC mitigation

โดยเริ่มจากการรับข้อมูลตามหัวข้อที่ 4.3.1.2 เมื่อรับข้อมูลเสร็จสิ้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ ซึ่งประกอบไปด้วยค่า อิมพีแดนซ์ แอคติแวนซ์ และ ค่าคงที่การแพร่ของคลื่น ขั้นตอนการคำนวณแสดงดังรูปที่ 4.40 ต่อจากการคำนวณพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ เป็นการกำหนดค่าตัวแปร N เพื่อทำการเก็บจำนวนเซ็กเมนต์ทั้งหมดไว้ ต่อจากนั้นทำการกำหนดจำนวนรอบของการคำนวณให้มีค่าเท่ากับจำนวนของเซ็กเมนต์ ขั้นตอนต่อไปของการทำงานคือเข้ามาสู่การเลือกเงื่อนไขของอิมพีแดนซ์แหล่งจ่าย (Z_1) และอิมพีแดนซ์ของโหลด (Z_2) ในขั้นตอนที่ 3 และขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนที่ 5 เป็นการคำนวณค่า LEF โดยขั้นตอนการคำนวณ LEF แสดงดังรูปที่ 4.41 ขั้นตอนต่อมาเป็นขั้นตอนที่ 6 เป็นขั้นตอนการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อ ขั้นตอนการประมวลผลขั้นที่ 7 เป็นการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่จุดไม่ต่อเนื่องโดยทำการคำนวณต้องครบทุกเซ็กเมนต์ถ้าครบแล้วถือว่าคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำเสร็จสิ้น โดยแรงดันเหนี่ยวนำจะถูกเก็บอยู่ในรูปตัวแปร V_M กำหนดให้ M เป็นจำนวนเซ็กเมนต์โดยแรงดันที่จุดไม่ต่อเนื่องจะมีค่ามากกว่าจำนวนเซ็กเมนต์อยู่หนึ่งค่า

4.4.1.1 ขั้นตอนการคำนวณพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

ส่วนที่ใช้ในการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 4.41

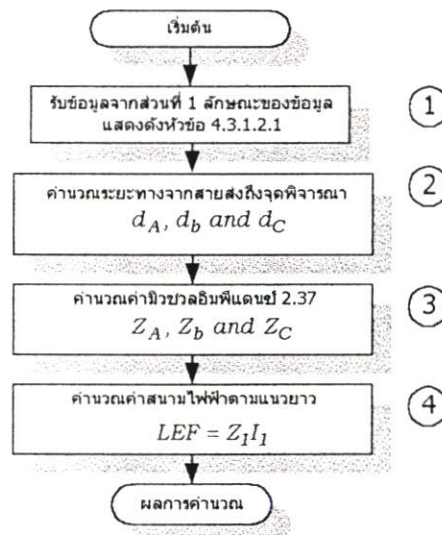


รูปที่ 4.41 ขั้นตอนการคำนวณพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ

เริ่มต้นจากการรับข้อมูลจากส่วนที่ 1 คือรับข้อมูลจากหัวข้อที่ 4.3.1.2.2 ขั้นตอนที่ 2 เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับค่าคงที่การแพร่ของคลื่น (γ) และค่าเริ่มต้นให้กับ dx ขั้นตอนต่อมาขั้นตอนที่ 3 เป็นขั้นตอนในการหาค่าคงที่ของการแพร่เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าอิมพีแดนซ์ แอดมิแตนซ์ และใช้ในการหาค่า อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อนส่งกำลังขั้นตอนที่ 4 ถือว่าเสร็จสิ้นการคำนวณพารามิเตอร์ของท่อนส่งกำลัง

4.4.1.2 ขั้นตอนการคำนวณค่าสนามไฟฟ้าตามแนวยาว:LEF

ขั้นตอนการคำนวณค่า LEF เนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแสดงดังรูปที่ 4.42 เริ่มต้นจากส่วนที่ 1 ของขั้นตอนการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำโดยลักษณะของข้อมูลดังหัวข้อ 4.3.1.2.1 จากนั้นขั้นตอนที่ 2 ทำการคำนวณระยะทางจากแนวสายส่งเฟส A, B และ C ถึงแนวท่อนส่งกำลังที่ทำการศึกษาต่อมาขั้นที่ 3 เป็นขั้นตอนคำนวณค่ามิวชวลอิมพีแดนซ์ดังสมการที่(2.37) และขั้นตอนสุดท้ายคือคำนวณค่า LEF โดยคิดผลเฉพาะ LEF ลำดับบวก(Positive Sequence)เท่านั้น



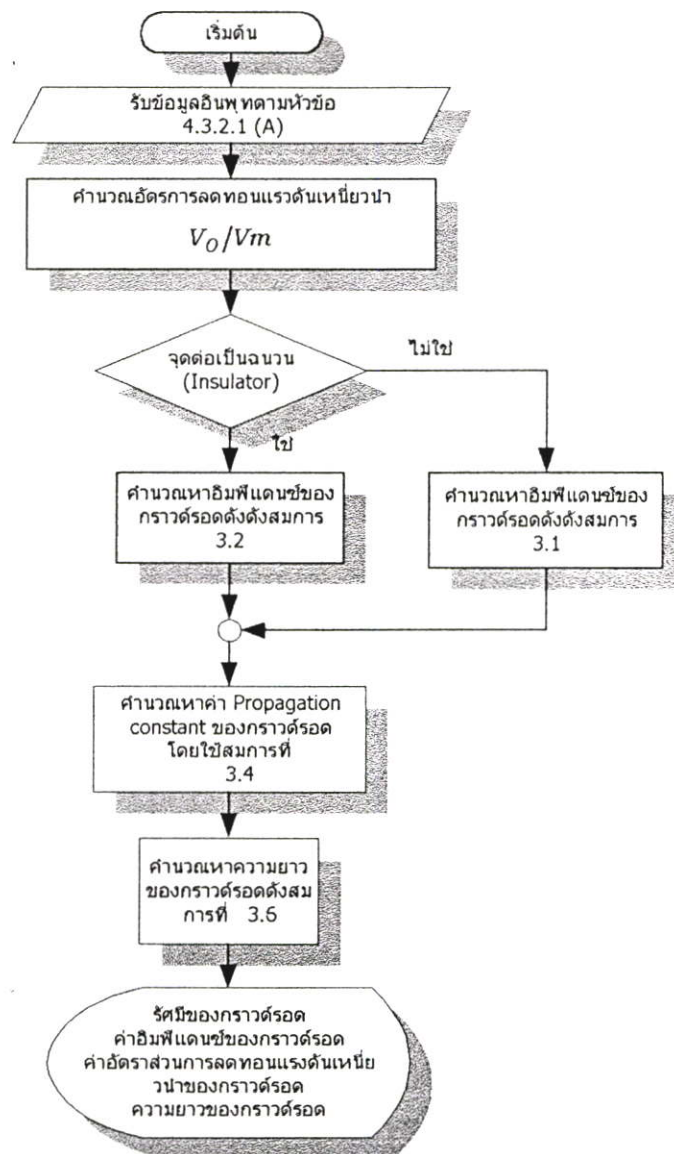
รูปที่ 4.42 ขั้นตอนการคำนวณค่า LEF

4.4.2 ขั้นตอนการคำนวณกราวด์

ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ที่ใช้ในโปรแกรม AC mitigation ได้ทำการแบ่งขั้นตอนการคำนวณออกเป็น 2 ลักษณะคือการคำนวณหาขนาดของกราวด์รูดและการคำนวณหาขนาดของกราวด์ไวร์ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.4.2.1 ขั้นตอนการคำนวณกราวด์รูด

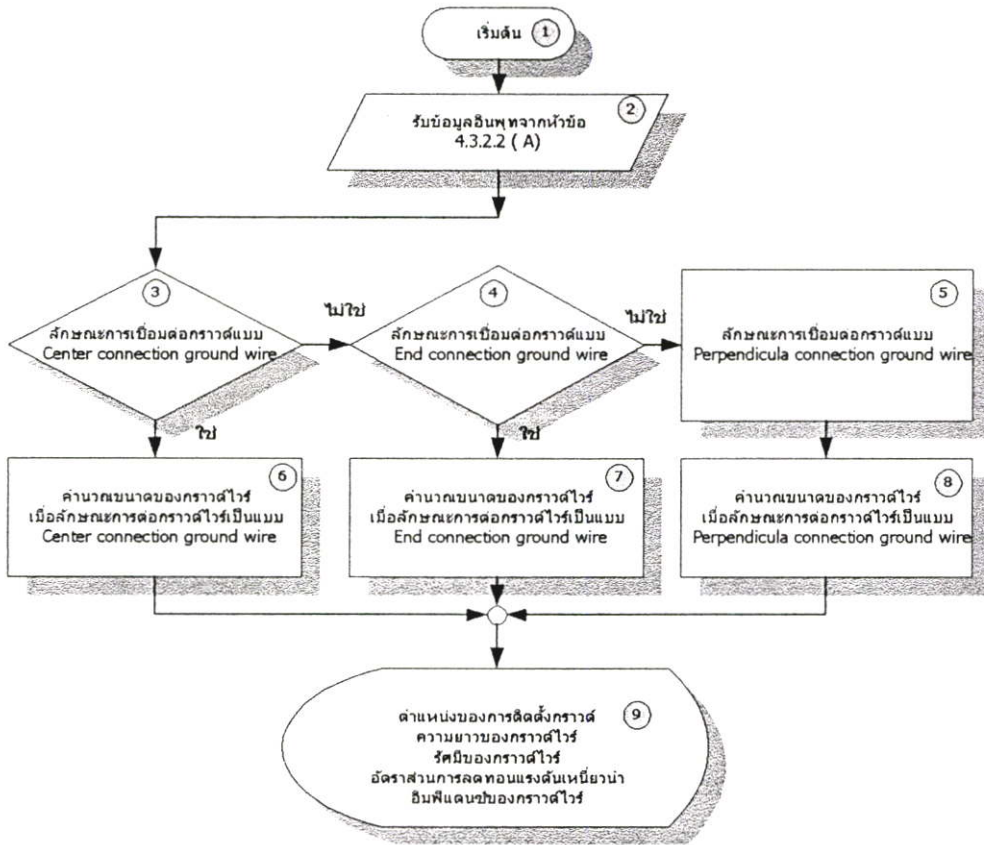
ขั้นตอนการคำนวณกราวด์รูดเริ่มต้นจากการรับข้อมูลตามหัวข้อ 4.3.2.1(A) ขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณหาค่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำต่อไปทำการทดสอบว่าจุดที่ต้องการลดทอนเชื่อมต่อกับฉนวนหรือไม่ถ้ามีการเชื่อมต่อกับฉนวนในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ใช้สมการที่(3.2)และถ้าจุดที่ต้องการลดทอนกราวด์ไม่ได้เชื่อมต่อกับฉนวนให้คำนวณหาอิมพีแดนซ์ของกราวด์โดยใช้สมการที่(3.1)เมื่อทำการเลือกเงื่อนไขเรียบร้อยแล้วให้ทำการคำนวณค่าคงที่ของการแพร่ของคลื่นโดยใช้สมการ (3.4) และหาขนาดความยาวของกราวด์รูดโดยใช้สมการที่ (3.6) ผลที่ได้จากการคำนวณจะแสดงให้เห็นถึงค่ารัศมีของท่อส่งก๊าซและค่าความยาวของกราวด์ไวร์อัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.43 แสดงการคำนวณหาขนาดของกราวด์รูดที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

4.4.2.2 ขั้นตอนการคำนวณกราวด์ไวร์

จากการคำนวณหาขนาดของกราวด์ร็อคต่อไปจะนำเสนอขั้นตอนการหาขนาดของกราวด์ไวร์ที่จะนำมาติดตั้งโดยลักษณะของกราวด์ไวร์ได้ทำการแยกออกเป็น 3 กรณีโดยขั้นตอนการคำนวณขนาดของกราวด์ไวร์มีขั้นตอนดังรูปที่ 4.44

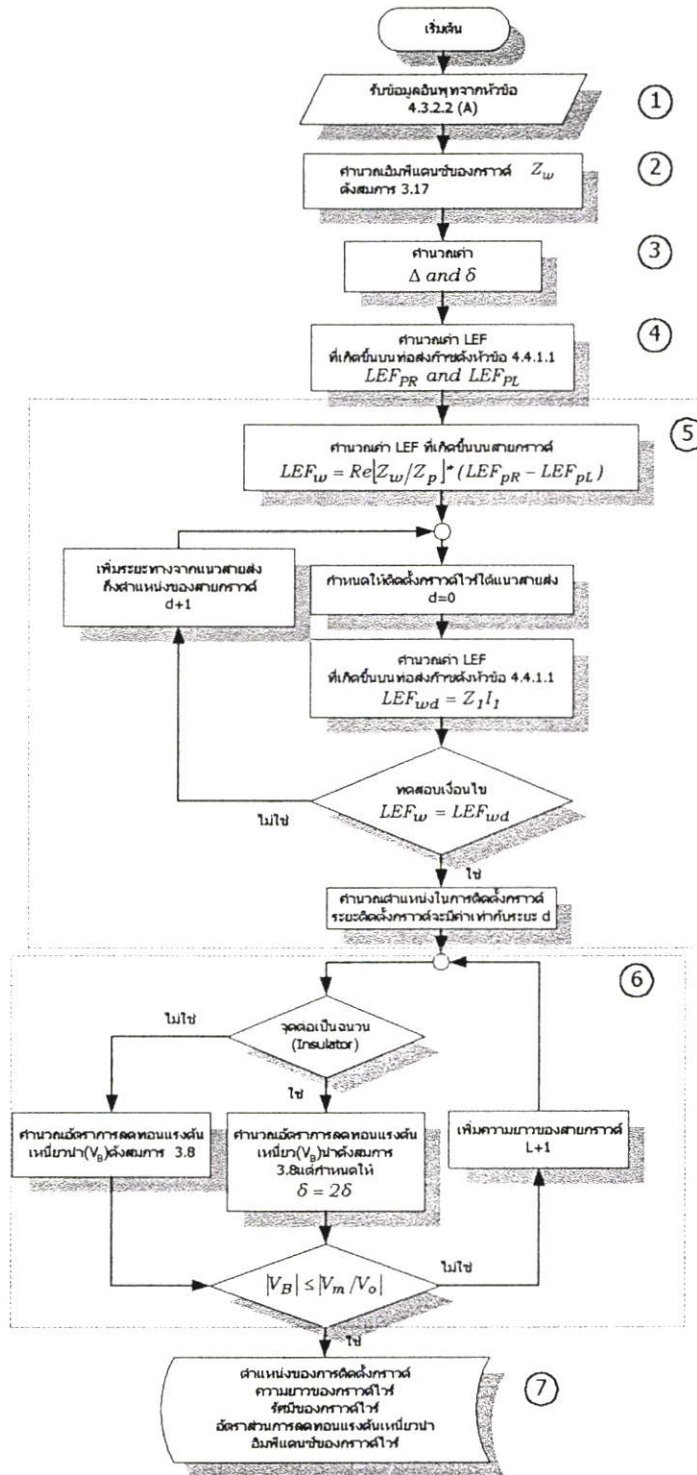


รูปที่ 4.44 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของกราวด์ไวร์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

โดยเริ่มจากการรับข้อมูลเบื้องต้นจากหัวข้อ 4.3.2.2(A) จากนั้นทำการทดสอบเงื่อนไขลักษณะของการเชื่อมต่อกราวด์ไวร์ว่าเป็นแบบ Center connection ground wire หรือ End connection ground wire หรือลักษณะของกราวด์แบบ Perpendicular ground wire เมื่อทำการเลือกลักษณะของกราวด์แล้วขั้นตอนต่อไปคือการคำนวณขนาดของกราวด์ตามชนิดที่ทำการเลือก โดยขั้นตอนการคำนวณกราวด์ Center connection ground wire แสดงดังรูปที่ 4.45 ขั้นตอนการคำนวณกราวด์ชนิด End connection ground wire แสดงดังรูปที่ 4.47 และขั้นตอนการคำนวณกราวด์ไวร์แบบ Perpendicular ground wire แสดงดังรูปที่ 4.46 เมื่อทำการคำนวณเสร็จผลที่ได้จะแสดงค่าของ ตำแหน่งของการติดตั้งกราวด์ ความยาวของกราวด์ไวร์ รัศมีของกราวด์ไวร์ อัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ และ อิมพีแดนซ์ของกราวด์ไวร์ ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการทำงาน

4.4.2.2.1 ขั้นตอนการคำนวณขนาด Center connection ground wire

ขั้นตอนการคำนวณขนาดของกราวด์ไวร์ ซึ่งลักษณะการติดตั้งกราวด์เป็นแบบ Center connection ground wire แสดงดังรูปที่ 4.45

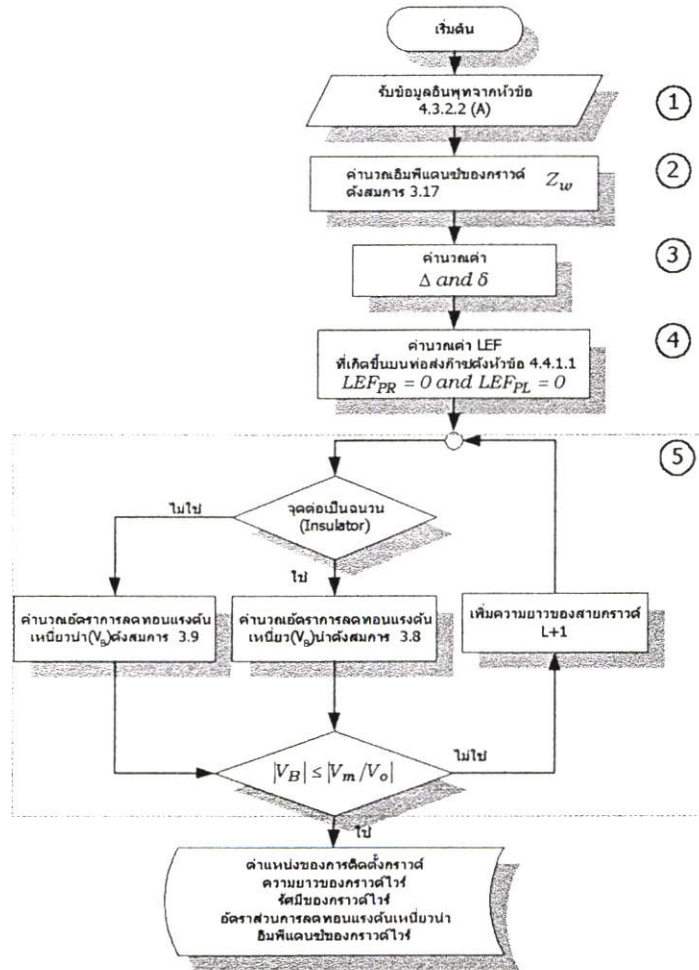


รูปที่ 4.45 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของกราวด์ไวร์กรณีการติดตั้งกราวด์แบบ Center connection ground wire

โดยเริ่มต้นจากรับข้อมูลตามหัวข้อ 4.3.2.2(A) ขั้นตอนที่ 2 คือการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ไวร์ดังสมการที่ (3.17) ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า Δ และ δ ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า LEF ที่เกิดขึ้นบนทอส่งก๊าซด้านซ้ายและขวามือจากจุดที่ต้องการต่อกราวด์โดยมีขั้นตอนหัวข้อ 4.4.1.1 ขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนการคำนวณหาตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งสายกราวด์โดยระยะที่จะติดตั้งกราวด์คือระยะ d และขั้นตอนที่ 6 เป็นขั้นตอนการคำนวณหาความยาวของกราวด์ไวร์ที่จะใช้ในการติดตั้งซึ่งความยาวของกราวด์ไวร์คือระยะ L จากนั้นขั้นตอนสุดท้ายคือขั้นตอนที่ 7 แสดงผลออกทางจอภาพ

4.4.2.2.3 ขั้นตอนการคำนวณขนาด Perpendicular connection ground wire

ขั้นตอนการคำนวณขนาดของกราวด์ไวร์ ซึ่งลักษณะการติดตั้งกราวด์เป็นแบบ Perpendicular connection ground wire แสดงดังรูปที่ 4.46

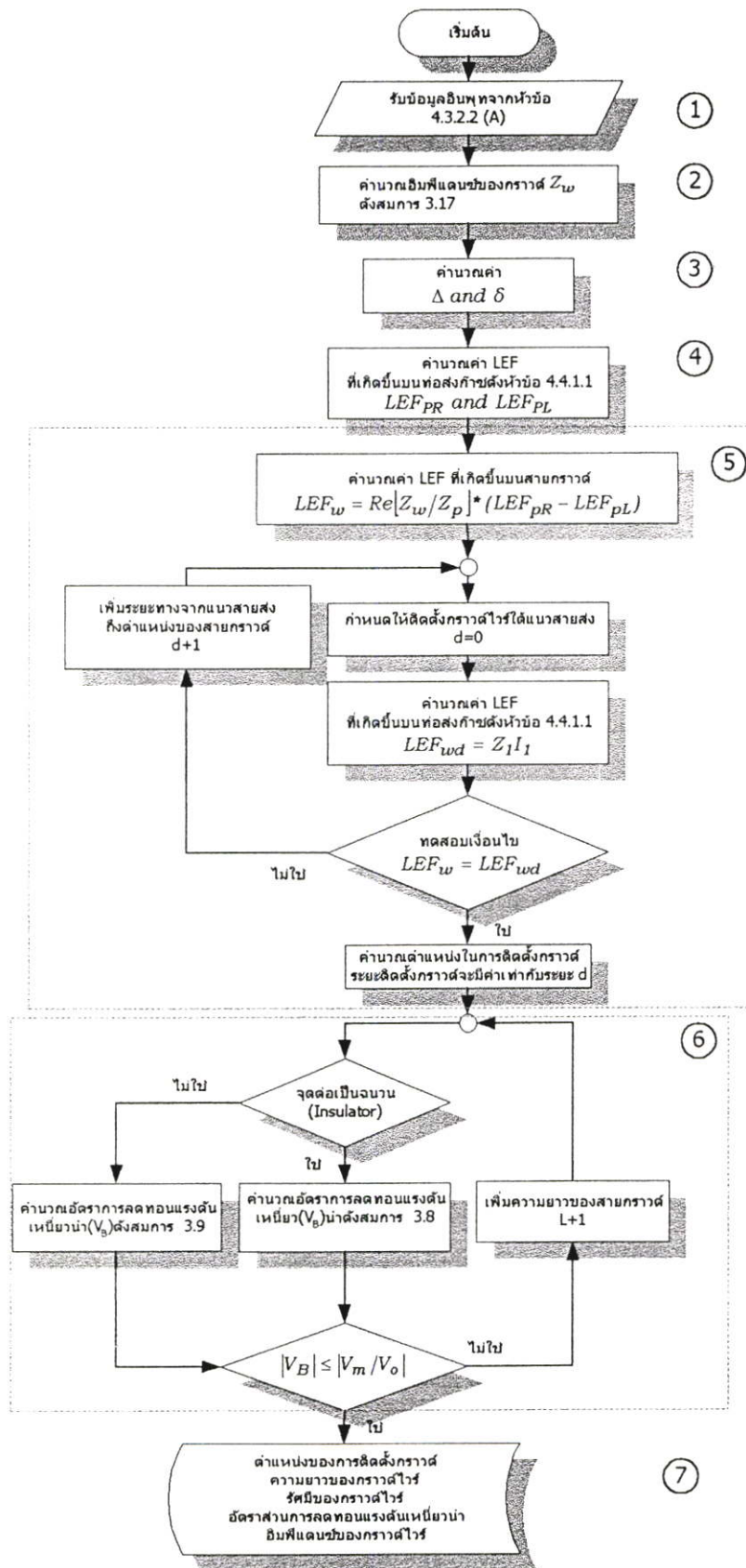


รูปที่ 4.46 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของกราวด์ไวร์กรณีการติดตั้งกราวด์แบบ Perpendicular ground wire

โดยเริ่มต้นจากรับข้อมูลตามหัวข้อ 4.3.2.2(A) ขั้นตอนที่ 2 คือการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ไวร์ดังสมการที่ (3.17) ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า Δ และ δ ขั้นตอนที่ 4 กำหนดให้ LEF ที่เกิดขึ้นบนกราวด์ไวร์มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากลักษณะการวางกราวด์ตั้งฉากกับแนวสายส่งและวางขนานกับแนวเส้นแรงแม่เหล็กทำให้กราวด์ไวร์ชนิดนี้ไม่เกิดผลของสนามแม่เหล็กและขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนการคำนวณหาความยาวของกราวด์ไวร์ที่จะใช้ในการติดตั้งซึ่งความยาวของสายกราวด์คือ L จากนั้นขั้นตอนสุดท้ายคือขั้นตอนที่ 6 เป็นขั้นตอนแสดงผลออกทางจอภาพ

4.4.2.2.2 ขั้นตอนการคำนวณขนาด End connection ground wire

ขั้นตอนการคำนวณขนาดของกราวด์ไวร์ซึ่งลักษณะการติดตั้งกราวด์เป็นแบบ End connection ground wire แสดงดังรูปที่ 4.47 โดยเริ่มต้นจากรับข้อมูลตามหัวข้อ 4.3.2.2(A) ขั้นตอนที่ 2 คือการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ไวร์ดังสมการที่ (3.17) ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่า Δ และ δ ขั้นตอนที่ 4 คำนวณค่า LEF ที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซด้านซ้ายและขวามือจากจุดที่ต้องการต่อกราวด์โดยมีขั้นตอนหัวข้อ 4.4.1.1 ขั้นตอนที่ 5 เป็นขั้นตอนการคำนวณหาตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งสายกราวด์โดยระยะที่จะติดตั้งกราวด์คือระยะ d และขั้นตอนที่ 6 เป็นขั้นตอนการคำนวณหาความยาวของกราวด์ไวร์ที่จะใช้ในการติดตั้งซึ่งความยาวของกราวด์ไวร์คือระยะ L จากนั้นขั้นตอนสุดท้ายคือขั้นตอนที่ 7 เป็นขั้นตอนแสดงผลออกทางจอภาพ



รูปที่ 4.47 ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดของกราวด์ไว้รักรณีการติดตั้งกราวด์แบบ End connection ground wire

4.5 เงื่อนไขของการใช้โปรแกรม

ในการใช้โปรแกรม AC mitigation ในการคำนวณหาขนาดของแรงดันเหนี่ยวนำและการคำนวณหาขนาดของกราวด์ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE โดยเงื่อนไขของการคำนวณประกอบไปด้วย

- 1) ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติจะไม่คำนึงถึงแอมโวนของระบบป้องกันการสนิม
- 2) ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากมิชวลจากท่อส่งก๊าซที่อยู่ใกล้เคียง
- 3) ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากมิชวลจากสายส่งที่อยู่ใกล้เคียง
- 4) ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากมิชวลจากสายป้องกันฟ้าผ่าที่อยู่ใกล้เคียง
- 5) ใช้คำนวณแรงดันเหนี่ยวนำเฉพาะสถานะคงตัวเท่านั้น
- 6) ใช้คำนวณแรงดันเหนี่ยวนำเฉพาะท่อส่งก๊าซที่อยู่ใต้ดินเท่านั้น

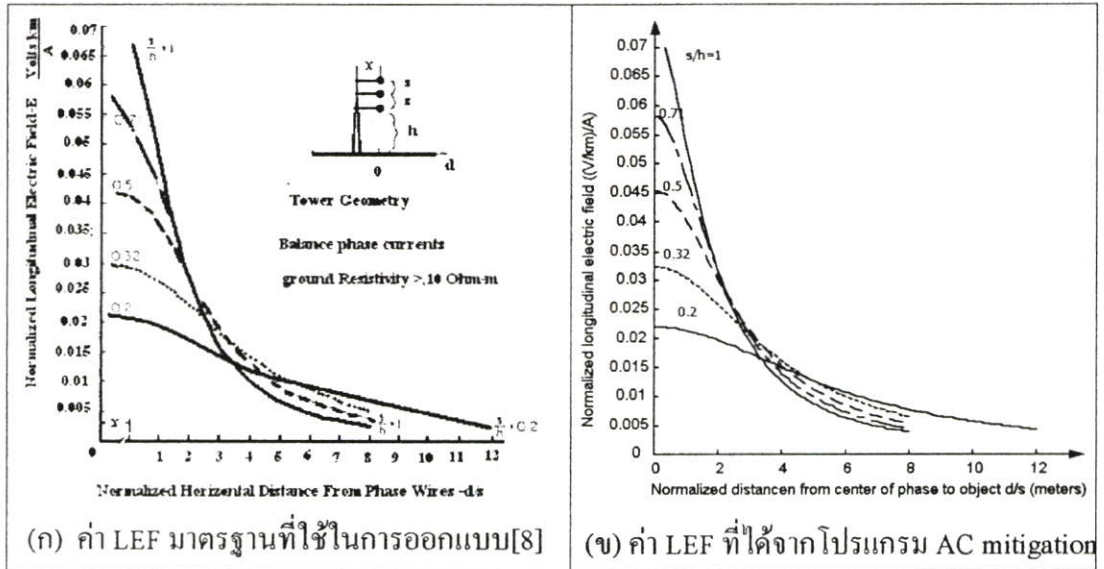
4.6 ทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ในการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม AC mitigation ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบกราฟผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม AC mitigation กับกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ ซึ่งการเปรียบเทียบได้แบ่งออกเป็นส่วนๆดังนี้

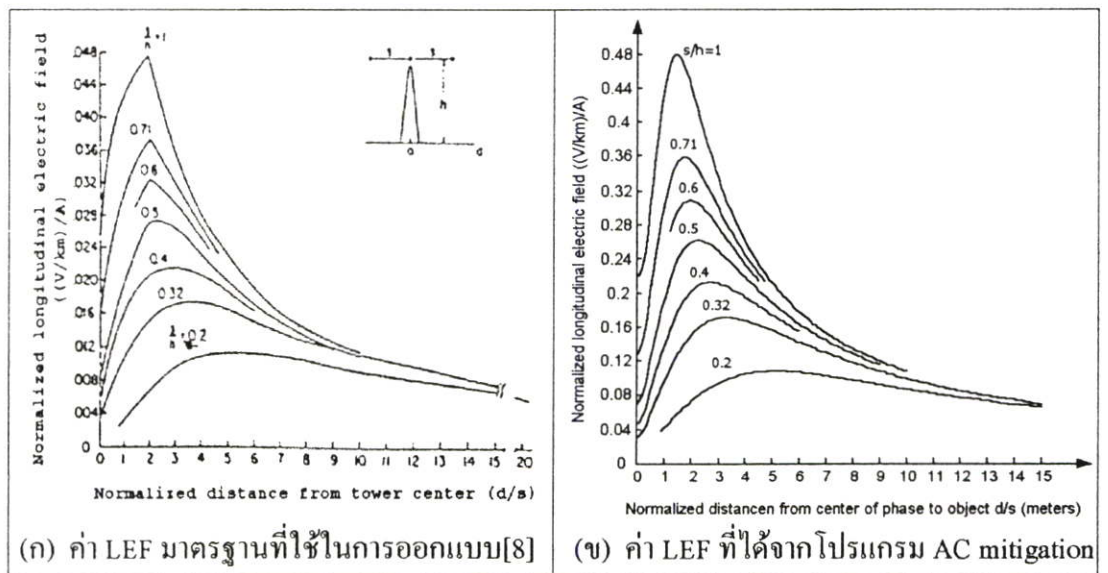
- 1 การเปรียบเทียบค่า LEF ที่ได้จากโปรแกรม AC Mitigation กับกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบสำหรับ โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนและโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง
- 2 การเปรียบเทียบค่า Propagation Constant ที่ได้จากโปรแกรม AC Mitigation กับกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ
- 3 การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อที่ได้จากโปรแกรม AC Mitigation กับกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ
- 4 การเปรียบเทียบค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากโปรแกรม AC Mitigation กับค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กราฟมาตรฐาน
- 5 นำโปรแกรม AC mitigation มาทำการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำกับโครงสร้างที่มีการติดตั้งใช้งาน

4.6.1 การเปรียบเทียบค่า LEF ที่ได้จากโปรแกรม AC Mitigation กับกราฟมาตรฐาน

ในการเปรียบเทียบค่า LEF ที่ได้จากโปรแกรม AC mitigation กับกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ ได้ทำเปรียบเทียบค่า LEF กับขณะโครงสร้างเสาที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน และโครงสร้างเสาซึ่งมีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.48 และ 4.49

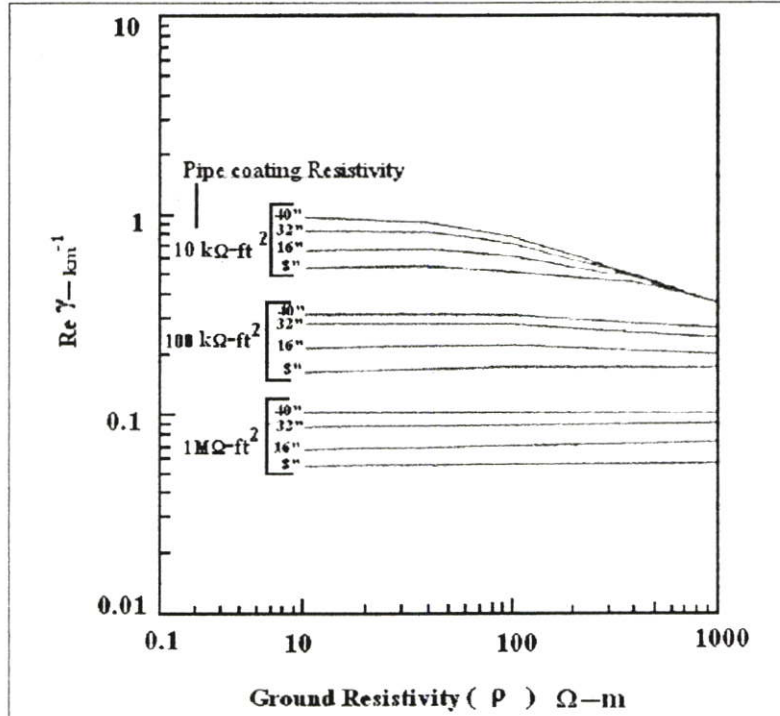


รูปที่ 4.48 ค่า LEF มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบกับค่า LEF ที่ได้จากโปรแกรม AC mitigation เมื่อโครงสร้างเสาซึ่งมีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

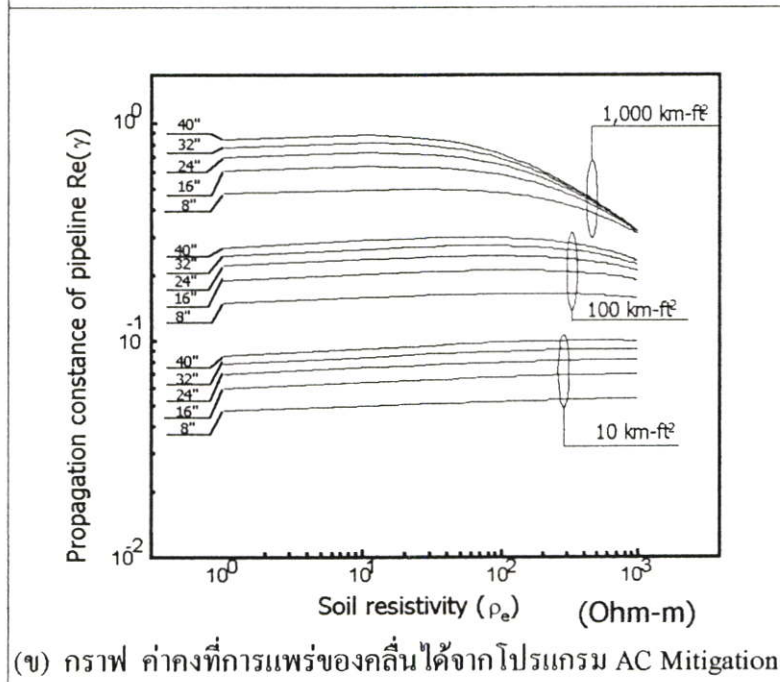


รูปที่ 4.49 ค่า LEF มาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบกับค่า LEF ที่ได้จากโปรแกรม AC mitigation เมื่อโครงสร้างเสาซึ่งมีการจัดวางตัวนำในแนวนอน

4.6.2 การเปรียบเทียบค่าค่าคงที่การแพร่ของคลื่นที่ได้จากโปรแกรม AC Mitigation กับกราฟมาตรฐาน



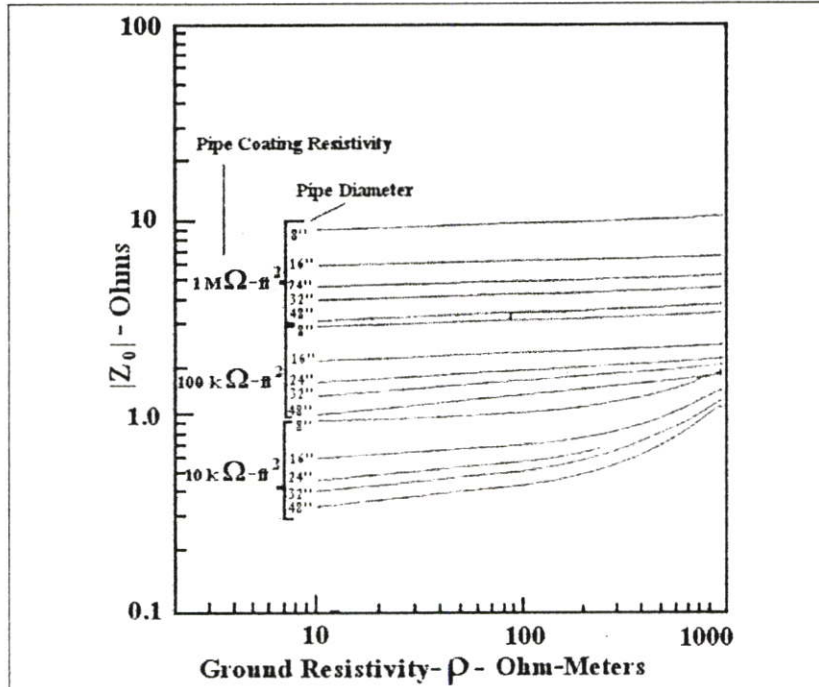
(ก) กราฟ ค่าคงที่การแพร่ของคลื่นที่ใช้ในการออกแบบ[8]



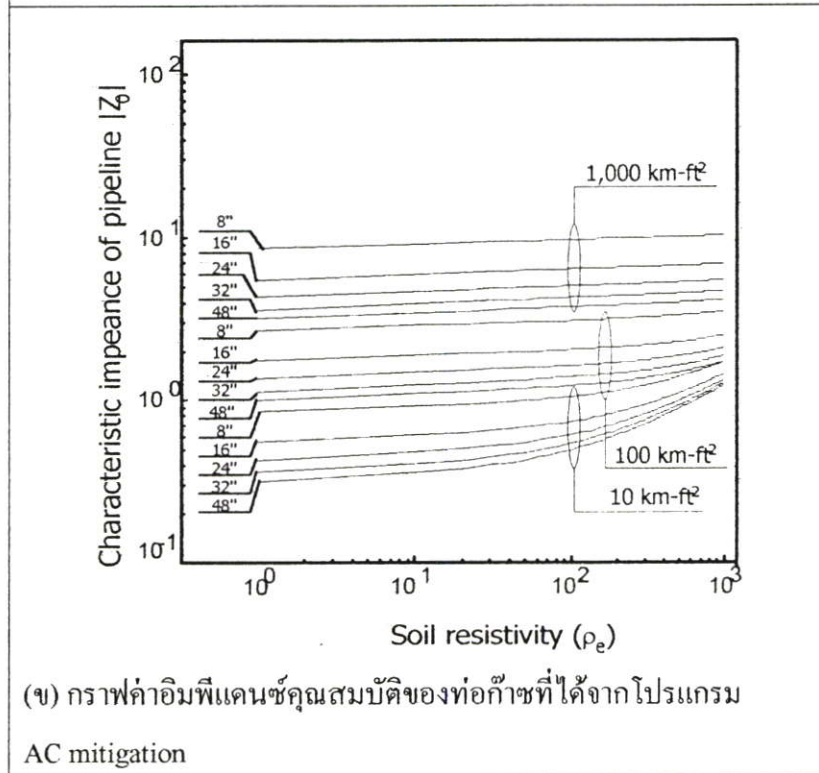
(ข) กราฟ ค่าคงที่การแพร่ของคลื่นที่ได้จากโปรแกรม AC Mitigation

รูปที่ 4.50 ค่า Pipeline propagation constant ที่ใช้ในการออกแบบ และ ได้จากโปรแกรม AC Mitigation

4.6.3 การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อส่งก๊าซที่ได้จากโปรแกรม AC Mitigation กับกราฟมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบ



(ก) กราฟค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อส่งก๊าซที่ใช้ในการออกแบบ[8]



(ข) กราฟค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อส่งก๊าซที่ได้จากโปรแกรม AC mitigation

รูปที่ 4.51 ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อส่งก๊าซที่ใช้ในการออกแบบและที่ได้จาก โปรแกรม AC Mitigation

4.6.4 การเปรียบเทียบการคำนวณโดยใช้กราฟกับการคำนวณโดยใช้โปรแกรม

AC mitigation

ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจะใช้กราฟซึ่งได้จากมาตรฐานของ NACE ซึ่งในการออกแบบจำเป็นต้องอาศัยประสบการณ์มากในการอ่านกราฟเพื่อที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ดังนั้นในการลดความยุ่งยากในการคำนวณลง ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ทำการจัดสร้างโปรแกรมขึ้นมาเพื่อให้การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซ ในการออกแบบไม่จำเป็นต้องอาศัยผู้ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญด้านนั้นเป็นพิเศษ และเพื่อความถูกต้องของโปรแกรมที่ได้จัดสร้างขึ้น ได้นำโปรแกรมที่ได้จัดสร้างขึ้นคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซเปรียบเทียบกับกราฟที่ใช้ในการออกแบบในปัจจุบัน ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นดังตัวอย่างที่ 1 โดยแบบจำลองที่ได้นำเสนอในการเปรียบเทียบการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำดังกล่าวได้มาจากอ้างอิงหมายเลข[8] ซึ่งเป็นตัวอย่างที่ใช้ในการคำนวณจากมาตรฐาน NACE โดยกำหนดให้พารามิเตอร์ดังนี้

4.6.4.1 แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ

ตัวอย่างที่ 1 ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูง ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ของเสาส่งดังตารางที่ 4.1 และลักษณะโครงสร้างของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงแสดงดังรูปที่ 4.9 และพารามิเตอร์ของท่อนส่งก๊าซแสดงดังตารางที่ 4.2 ลักษณะการวางท่อนขนานกับสายส่งตลอดแนวท่อ

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลระบบไฟฟ้า

พารามิเตอร์	รายละเอียด	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
เสาส่งไฟฟ้า แรงสูง	กระแสต่อเฟส	I_A, I_B และ I_C	1,000	A
	ระยะระหว่างเฟส	S	9.6	m
	กระแสของสายป้องกันฟ้าผ่า	I_{s1} และ I_{s2}	0	A
	ความสูงเฉลี่ยจากพื้นดินถึงตัวนำ	h	18	m
	ความถี่	f	50	H_z
โครงสร้างเสาส่งมีการจัดวางตัวนำในแนวนอน				

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลของท่อส่งก๊าซ

พารามิเตอร์	รายละเอียด	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ท่อส่งก๊าซ ธรรมชาติ	ความต้านทานฉนวนท่อ	R_c	63	$k\Omega - m^2$
	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	ρ_e	400	$\Omega - m$
	เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของท่อ	D	36	<i>inch</i>
	ความยาวท่อ	L	20	<i>km</i>
	ระยะระหว่างสายส่งและท่อ	d	60	<i>m</i>
	ความหนาของท่อ	t	3	<i>mm</i>
	ความลึก	a	1	<i>m</i>
	โพลดิมพีแดนซ์	Z_2	$2.672 + 2.356i$	Ω
	อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย	Z_1	$2.672 + 2.356i$	Ω
	เพอร์มิบิลิตีสัมพัทธ์ของท่อเหล็ก	μ_r	300	-
	ความต้านทานจำเพาะของท่อเหล็ก	ρ_s	1.7×10^{-9}	$\Omega - m$

4.6.4.2 วิธีการคำนวณจากกราฟ

จากพารามิเตอร์ที่ได้นำมาพิจารณาได้มาจาก[8] ดังรูปที่ ผ.4.1 ซึ่งลักษณะการวางท่อนานกับแนวสายส่งตลอดแนวความยาวท่อเฉพาะส่วนย่อยนี้ ในกาคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำได้ โดยมีขั้นตอนดังนี้

การคำนวณหาสนามไฟฟ้าตามแนวยาว จากรูป ผ.4.1

$$\text{อัตราส่วนรูปทรงของเสาส่ง } s/h = 9.6/18 = 0.533$$

$$\text{อัตราส่วน } d/s = 60/9.6 = 6.25$$

$$\text{จากภาคผนวก ก ได้ค่า LEF} = 0.017 \text{ V/km - A}$$

$$\text{คังนั้นกระแส 1,000 A ได้ค่า LEF} = 17 \text{ V/km}$$

ค่าคงที่ของการแพร่ของคลื่นในท่อ

จากการทำ Iteration จากรูป ผ.4.4 สามารถหาค่าใน Pipelines Propagation Constant ในเทอมที่เป็นจำนวนจริงได้ดังนี้

$$R_{ey} = 0.105 \text{ km}^{-1}$$

แรงดันขณะเปิดวงจร(Open Circuit Voltage)

จากพารามิเตอร์ของท่อสามารถหาค่าความยาววิกฤต(L_c) และอัตราส่วนความยาวท่อที่ขนานกับแนวสายส่งต่อความยาววิกฤต(L/L_c) ได้ดังนี้

$$L_c = 2/R_{ey} = 2/0.105 = 19 \text{ km}$$

$$L/L_c = 20/19 = 1.05$$

$$\text{หรือ } L = 1.05 L_c$$

จากภาคผนวก กรูที่ ผ.4.5 เราสามารถหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำขณะที่ทำการเปิดวงจรได้จาก

$$V_{oc} = (I)V_m = V_m$$

ดังนั้นในกรณีที่ท่อวางขนานกับแนวสายส่งตลอดแนวท่อ 20 km สามารถหาแรงดันเหนี่ยวนำเปิดวงจรได้จาก

$$V_m = \frac{E}{\sqrt{2}R_eY} = \frac{17}{\sqrt{2}(0.105)} = 114.5 \text{ V}$$

ดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับที่ต้นและปลายท่อสามารถหาได้ดังนี้ จากรูปที่ ผ.4.6

$$V = \frac{114.5}{2} = 57.25 \text{ V}$$

4.6.4.3 ผลจากการคำนวณโดยการใช้โปรแกรม

จากการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำโดยใช้กราฟได้แรงดันเหนี่ยวนำโดยใช้กราฟ มีค่าเท่ากับ 57.25 โวลต์ แรงดันเหนี่ยวนำที่คำนวณได้เป็นแรงดันที่ต้นและปลายของท่อ จากข้อมูลของท่อและข้อมูลของระบบไฟฟ้าเมื่อต้องการให้โปรแกรม AC Mitigation ทำการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจำเป็นต้องจัดเตรียมข้อมูล ตามตารางที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.3 แรงดันเหนี่ยวนำที่คำนวณได้มีค่า 57.165 โวลต์

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลที่ได้จากโปรแกรม AC mitigation

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
อิมพีแดนซ์	Z	$0.067 + 0.539i$	Ω/km
ค่าแอดมิแตนซ์	Y	$0.043 + 0.000138i$	S/km
Characteristic Impedance	Z_0	$2.672 + 2.356i$	Ω
Propagation Constant	γ	$0.114 + 0.101i$	$1/km$
Longitudinal Electric Field	ELF	16.749	V/km
แรงดันเหนี่ยวนำ	V	57.165	V

จะเห็นได้ว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าความผิดพลาดซึ่งสามารถหาค่าผิดพลาดเมื่อเทียบกับการออกแบบโดยใช้กราฟมาตรฐานได้ดังนี้

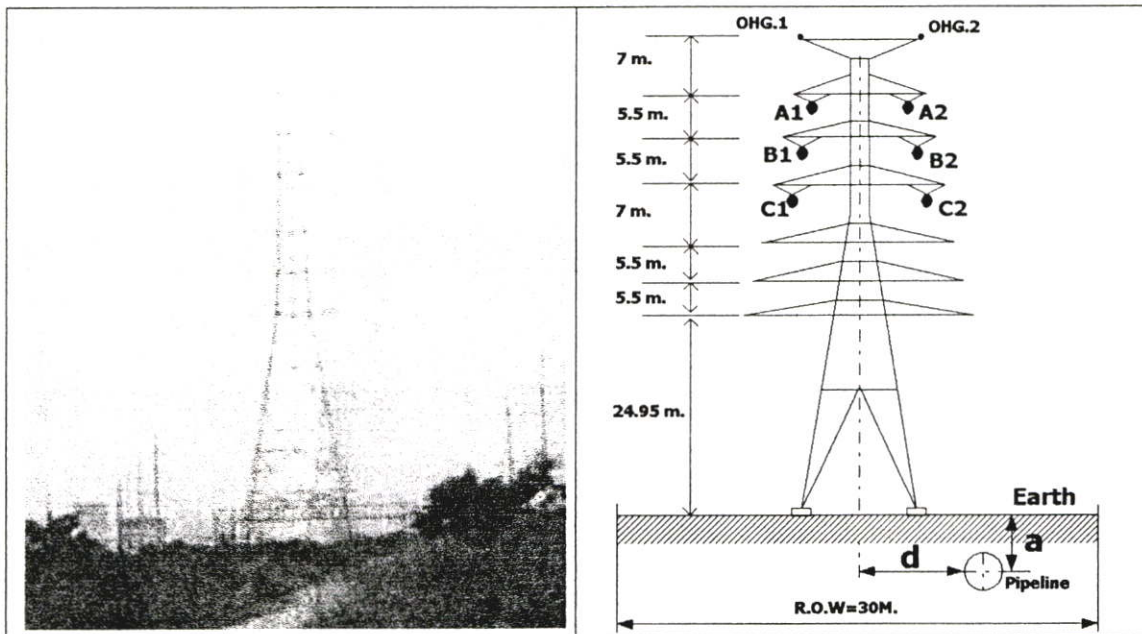
ค่าความผิดพลาด

$$\begin{aligned} \% \text{ Error} &= \left(\frac{\text{Calculation by Graph} - \text{Calculation by Program}}{\text{Calculation by Graph}} \right) \times 100 \\ &= \left(\frac{57.25 - 57.165}{57.25} \right) \times 100 \\ &= 0.148 \% \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นโดยการใช้โปรแกรม AC Mitigation ที่ได้จัดทำขึ้นได้แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นอยู่ที่ 0.148% ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าเราสามารถนำโปรแกรมที่ได้มาทำการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซได้ซึ่งจะได้นำเสนอในหัวข้อต่อไป

4.7 การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำกับโครงสร้างจริง

จากสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำเมื่อนำมาใช้พิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดที่ต่อเนื่อง โดยใช้พารามิเตอร์ของระบบจริงที่มีการติดตั้งที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ที่จังหวัดระยอง โดยมีการจัดวางแนวท่อกับสายส่งดังรูปที่ 4.53 และ ลักษณะโครงสร้างเสา-ส่ง มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร แต่มีการใช้งาน 2 วงจรบน โดยสายส่งสูง 47.5 เมตร ระยะระหว่างตัวนำเฉลี่ย 5.5 เมตร กระแสในสายส่ง 753 แอมป์ต่อเฟส



รูปที่ 4.52 ลักษณะของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV

ตารางที่ 4.4 ตารางพารามิเตอร์ของสายส่ง

พารามิเตอร์	รายละเอียด	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
เสาส่งไฟฟ้าแรงสูง	ระยะระหว่างค้ำนำ	S	5.5	m
	ความสูงของเสาส่ง	h	47.5	m
	กระแสต่อเฟส	$I_A, I_B \text{ and } I_C$	753	A
	ความถี่	f	50	H_z

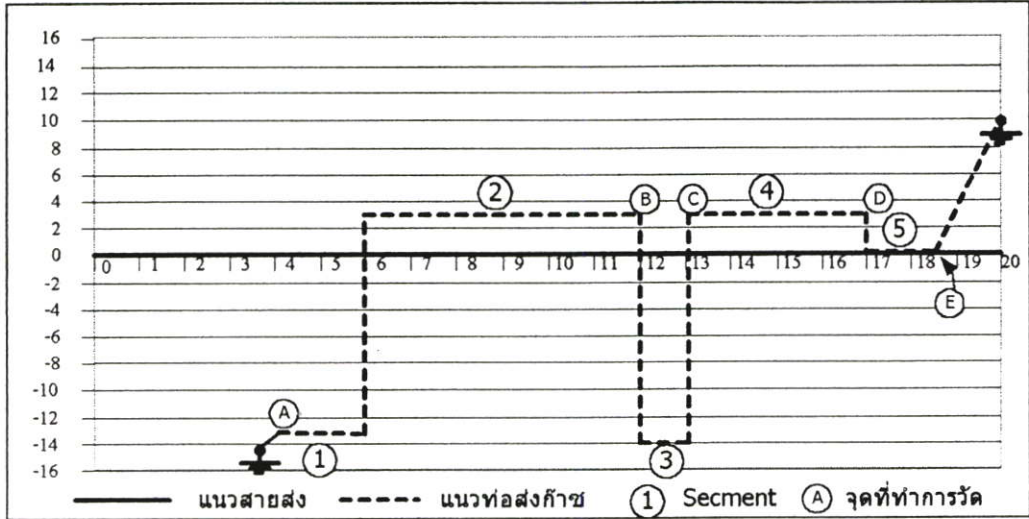
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลของท่อส่งก๊าซ

ท่อส่งก๊าซ ธรรมชาติ	เพอร์มิบิลิตีสัมพัทธ์ของท่อเหล็ก	μ_r	300	-
	ความต้านทานจำเพาะของท่อเหล็ก	ρ_s	1.7×10^{-7}	$\Omega - m$
	ความหนาของท่อ	t	7	mm
	ความลึกของท่อ	a	2	m
	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	ρ_e	20	$\Omega - m$
	ความต้านทานจำเพาะของฉนวน	R_c	100	$k\Omega - m^2$
	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ	D	36	$inch$

ตารางที่ 4.6 การแบ่งส่วนย่อยในการคำนวณ

Segment	ความยาวท่อ (km)	ระยะจากแนวสายส่งถึงแนวท่อที่จุดเริ่มต้นแนวท่อ (m)	ลักษณะความไม่ต่อเนื่องที่จุดเริ่มต้นแนวท่อ	ระยะจากแนวสายส่งถึงแนวท่อที่จุดสิ้นสุดแนวท่อ (m)	ลักษณะความไม่ต่อเนื่องที่จุดสิ้นสุดแนวท่อ
1	.3	-12.3	3. Chang in distance case1	-12.3	5. Crossover case1
2	1.8	2.8	5. Crossover case1	2.8	5. Crossover case2
3	.3	-14	5. Crossover case2	-14	5. Crossover case1
4	1.2	3	5. Crossover case1	3	3. Chang in distance case3
5	.45	0	3. Chang in distance case1	0	2. Enter and leaving case3

จากข้อมูลต้นเริ่มทำการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงเริ่มต้นโดยลักษณะโครงสร้างเสาส่งแสดงดังรูปที่ 4.52 ในการเลือกระบบส่งจ่ายที่ใช้ในการคำนวณเนื่องลักษณะโครงสร้างของเสาส่งเป็นแบบที่มีการจัดวางค้ำนำในแนวตั้ง 4 วงจรแต่ทำการส่งจ่ายแบบ 2 วงจร ดังนั้นในการเลือกระบบส่งจ่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงต้องเลือกระบบส่งจ่ายเป็นแบบการจัดวางค้ำนำ 2 วงจร



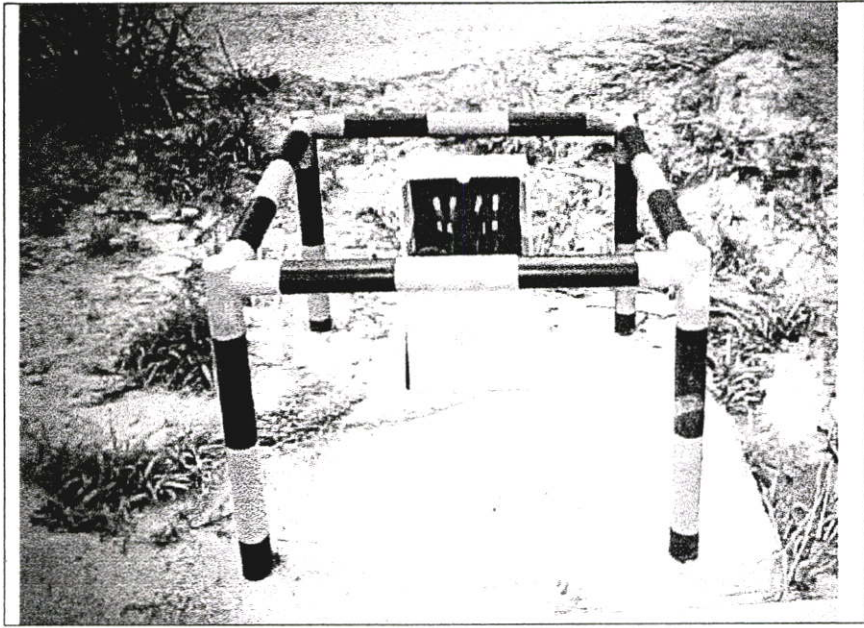
รูปที่ 4.53 ลักษณะแนวทอกระทำกับแนวสายส่ง

4.7.1 การวัดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

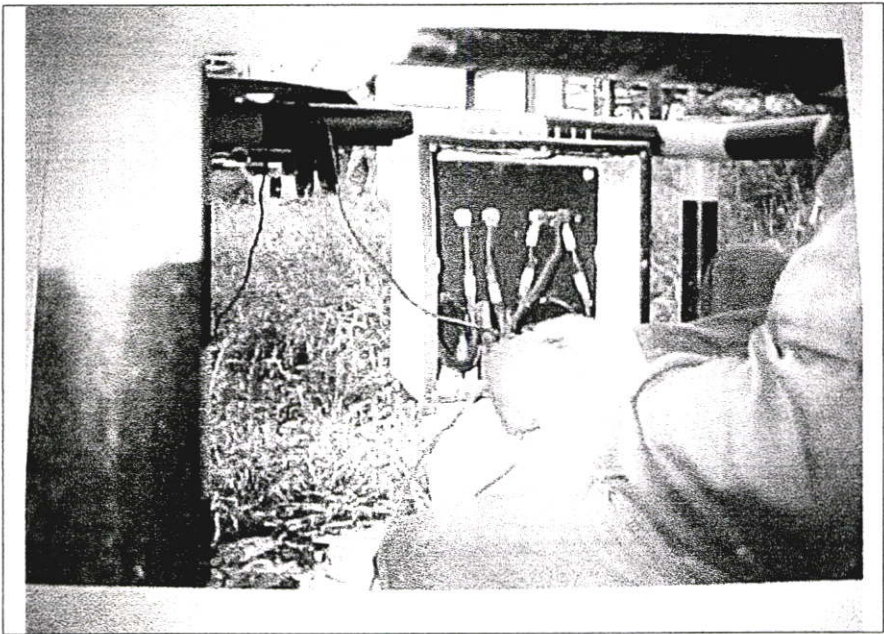
การวัดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติสามารถทำการวัดโดยวัดจากผิวของท่อส่งก๊าซเทียบกราวด์โดยจุดที่ทำเป็นกราวด์อ้างอิงต้องห่างจากแนวสายส่งไปในแนวตั้งฉาก ต้องไม่น้อยกว่า 20 เมตร แลควมลึกในการฝังกราวด์รูดต้องไม่น้อยกว่า 30 เซ็นติเมตร ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE โดยเครื่องมือวัดประกอบด้วยคิดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter) ที่ใช้ในการวัดคือ Fluke Digital Multimeter series 75 แสดงรายละเอียดของพิกัดเครื่องวัดดังรูปที่ 4.54

Function	Ranges and Resolution	Accuracy
VDC	320.0 mV, 3.200V, 32.00V, 320.0V, 600V	$\pm(0.3\%+11)$
VAC	320.0 mV, 3.200V, 32.00V, 320.0V, 600V	$\pm(12\%+2)$
ADC	32.00 mA, 320.0 mA	$\pm(11.5\%+2)$
AAC	32.00 mA, 320.0 mA	$\pm(2.5\%+2)$
Resistance	320.00, 3.200 kohm, 32.00 kohm,	$\pm(0.5\%+1)$
Frequency (V input)	99.99 Hz, 999.9 Hz, 9.999 kHz, 20.00 kHz	N/A

รูปที่ 4.54 มัลติมิเตอร์



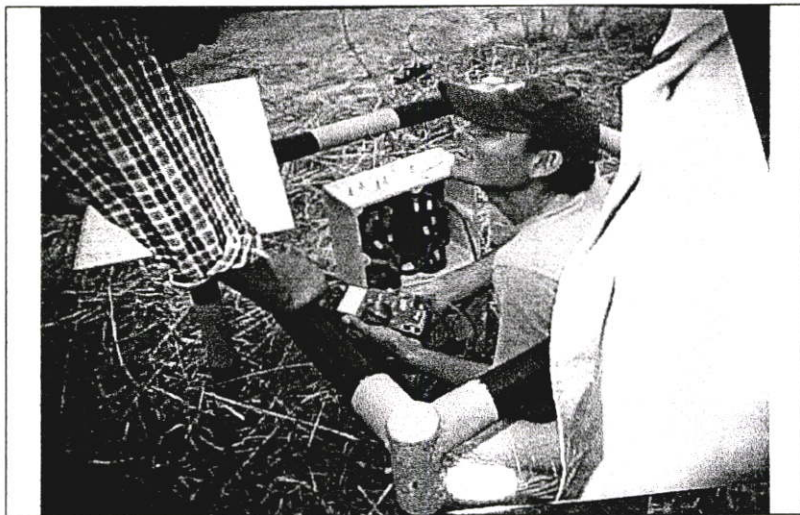
รูปที่ 4.55 ลักษณะของตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดันเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.56 การต่อเชื่อมกับจุดที่ต้องการตรวจวัดแรงดันเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.57 การติดตั้งกราวด์รูดที่ใช้วัดแรงดันเหนี่ยวนำ



รูปที่ 4.58 การวัดค่าแรงดันเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 4.7 ผลการวัดแรงดันเหนี่ยวนำ

ตำแหน่ง ที่ทำการตรวจวัด	แรงดันเหนี่ยวนำ (Volts)			
	กำลังไฟฟ้า 60 MW.	กำลังไฟฟ้า 120 MW.	กำลังไฟฟ้า 210 MW.	กำลังไฟฟ้า 300 MW.
A	0.13	0.671	0.725	0.885
B	0.825	1.472	2.213	0.949
C	0.523	0.552	0.826	0.568
D	0.525	0.634	0.994	1.815
E	0.288	0.935	0.966	0.966

4.7.2 การคำนวณโดยใช้โปรแกรม AC mitigation

จากข้อมูลทางด้านข้างคั่นเริ่มทำการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูง เริ่มคั่นจากสาป้อนข้อมูลของระบบไฟฟ้าแสดงดังกราฟรูปที่ 4.59 ในการเลือกระบบส่งจ่ายที่ใช้ในการคำนวณเนื่องลักษณะโครงสร้างของเสาส่งเป็นแบบที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจรแต่ทำการส่งจ่ายแบบ 2 วงจร ดังนั้นในการเลือกระบบส่งจ่ายที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงต้องเลือกลักษณะโครงสร้างของเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจรแสดงดังรูปที่ 4.59

The screenshot shows the 'โปรแกรมคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อลำสายธรรมชาติ (AC MITIGATION) - (โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง)' software. The main window contains several input sections:

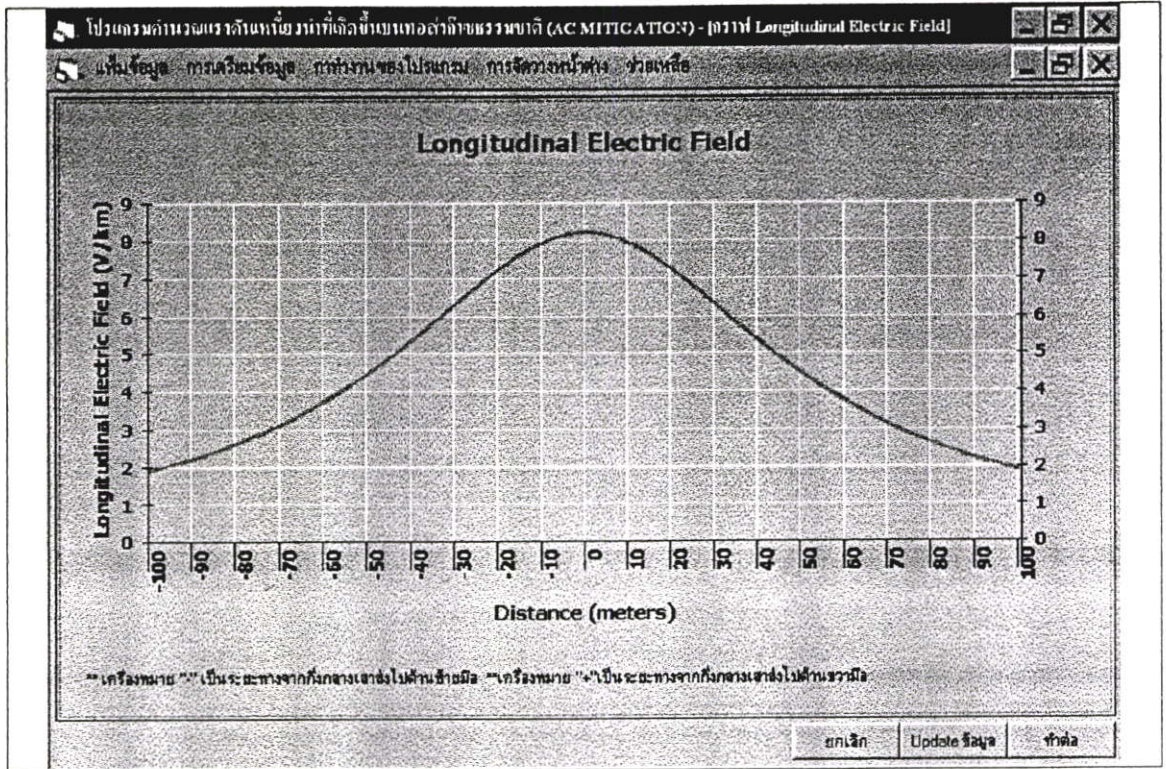
- รายละเอียดสายส่ง (Line Details):**
 - ระยะระหว่างสายส่งต่อเฟส (Phase-to-phase spacing): 753 เมตร (meters)
 - ความถี่ของระบบไฟฟ้า (System frequency): 50 เฮิรตซ์ (Hz)
- ข้อมูลอื่นๆ (Other Data):**
 - ความถี่ของท่อเฉลี่ย (Average pipe frequency): 2 เมตร (meters)
 - ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity): 20 โอห์ม-เมตร (ohm-meters)
- ตำแหน่งตัวนำเฟส (Conductor Positions):**

เฟส (Phase)	X (meters)	Y (meters)
ตำแหน่งตัวนำเฟส A	2.9	58.5
ตำแหน่งตัวนำเฟส B	-2.943	53
ตำแหน่งตัวนำเฟส C	-2.95	47.5
ตำแหน่งตัวนำเฟส A	2.9	58.5
ตำแหน่งตัวนำเฟส B'	2.943	53
ตำแหน่งตัวนำเฟส C'	2.95	47.5
- ข้อมูลเสา (Tower Data):**
 - จำนวนกระแสของสายส่ง (Number of line currents): 2

A diagram on the right illustrates the tower structure with two circuits (Circuit 1 and Circuit 2) and conductors labeled A, B, C and A', B', C'. The tower height is denoted as 'h' and the distance from the tower center to the conductor is 'd'. The ground is labeled 'Earth' and 'R.O.W' (Right of Way).

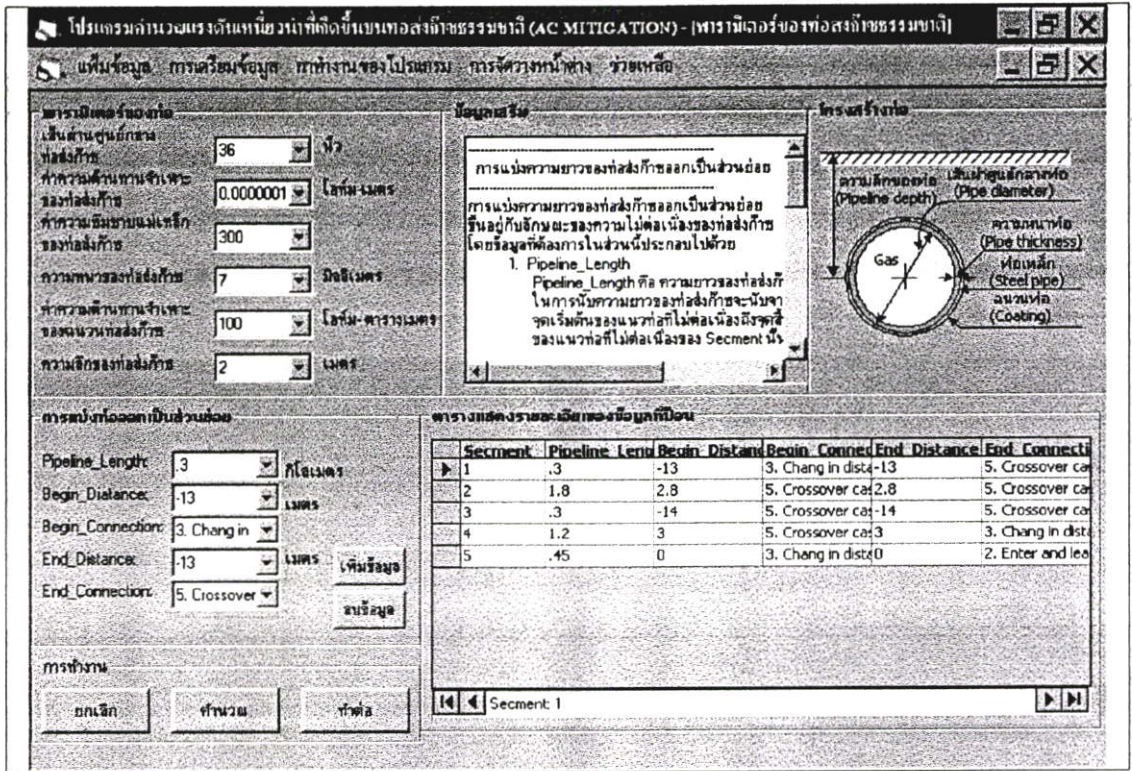
A dialog box titled 'ถ้าเห็นการประมวลผล' (If you see the processing) is displayed in the center, with the message 'การประมวลผลเสร็จเรียบร้อยแล้ว' (Processing completed) and an 'OK' button.

รูปที่ 4.59 หน้าต่างป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบไฟฟ้า

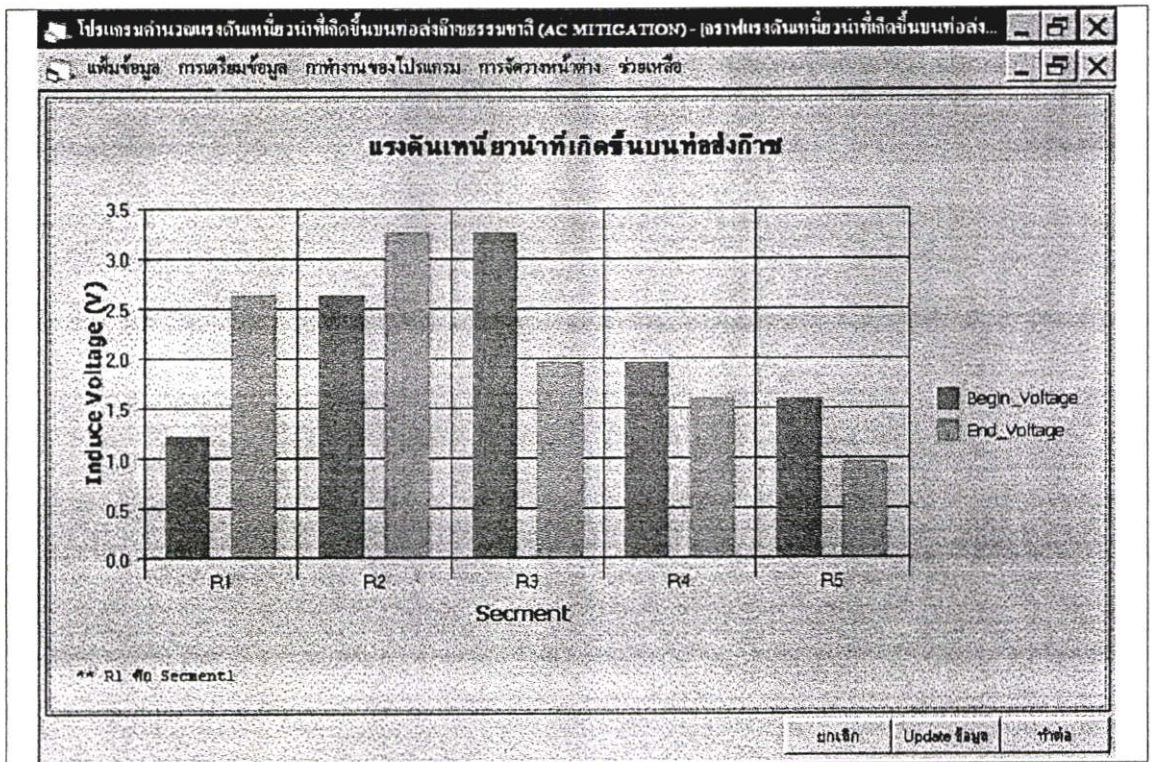


รูปที่ 4.60 หน้าต่างแสดงกราฟ LEF ที่ได้จากการคำนวณ

รูปที่ 4.61 หน้าต่างป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ของเสาไฟฟ้า



รูปที่ 4.62 เสร็จสิ้นการป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซ



รูปที่ 4.63 แรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบกราฟฟิกส์เมื่อทำการส่งจ่ายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 300 MW.

จากรูปที่ 4.63 แสดงแรงดันเหนี่ยวาน่าที่เกิดขึ้นที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของแนวท่อในแต่ละส่วนย่อย(Segment) ซึ่ง ส่วนย่อยที่ 1 จะถูกแสดงโดย R1 และ ส่วนย่อยที่ 2 แสดงในรูป R2 ซึ่งจะเห็นว่าแรงดันที่จุดสิ้นสุดของส่วนย่อยที่ 1 จะมีค่าเท่ากับจุดเริ่มต้นของส่วนย่อยที่ 2 เนื่องจากเป็นจุดเดียวกันนั่นเอง และในการคิดแรงดันเหนี่ยวาน่าที่เกิดขึ้นในส่วนย่อยของท่อที่วางตั้งจากกันแนวสายส่งถือว่าไม่มีแรงดันเป็น 0 โวลต์เนื่องแนวท่อวางขนานกับแนวเส้นแรงแม่เหล็ก

โปรแกรมคำนวณแรงดันเหนี่ยวาน่าที่เกิดขึ้นบนท่อกำลังแรงสูง (AC MITIGATION) (สำหรับเหนี่ยวาน่าที่เกิดขึ้นเอง)

ส่วนย่อย กว้างของท่อ กว้างของโปรสตรก การวัดเหนี่ยวาน่า ความถี่

Segment	Pipeline length	Begin Distance	Begin Connection	End Distance	End Connection	Begin Voltage	End Voltage
1	3	13	3 Chang in distance case1	13	5 Crossover case1	1.22	2.634
2	1.8	2.8	5 Crossover case1	2.8	5 Crossover case1	2.634	3.253
3	3	14	5 Crossover case1	14	5 Crossover case1	3.253	1.968
4	1.2	3	5 Crossover case1	3	3 Chang in distance case3	1.968	1.602
5	45	0	3 Chang in distance case1	0	2 Enter and leaving case3	1.602	0.67

Segment 1

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

	ส่วนฟรี	ส่วนในคอก	หน่วย/ค่า
Pipeline Impedance	6.66226553229552E-02	42.3602592496195	โอห์ม/ไมล์เมตร
Pipeline Admittance	3.118516650502041	2.19027764943627	ไมล์/ไมล์เมตร
Characteristic Impedance	8915673	7616916	โวลต์
Propagation Constant	2776698	737730133886415	1/ไมล์เมตร

การแสดงผลแรงดันเหนี่ยวาน่า

Begin Voltage คือ
แรงดันเหนี่ยวาน่าที่จุดเริ่มต้นของส่วนย่อยที่ 1
ที่จุดเริ่มต้นของส่วนย่อยที่ 1 (segment)

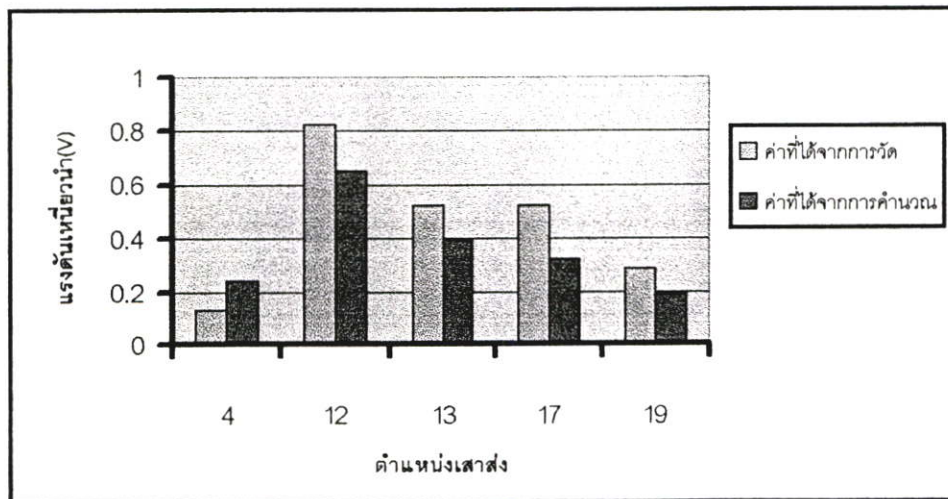
End Voltage คือ
แรงดันเหนี่ยวาน่าที่จุดสิ้นสุดของส่วนย่อยที่ 1
จุดสิ้นสุดของส่วนย่อยที่ 1 (segment)

แรงดันเหนี่ยวาน่าสูงสุด
แรงดันเหนี่ยวาน่าที่จุดสิ้นสุดของส่วนย่อยที่ 1 (segment) 15 โวลต์

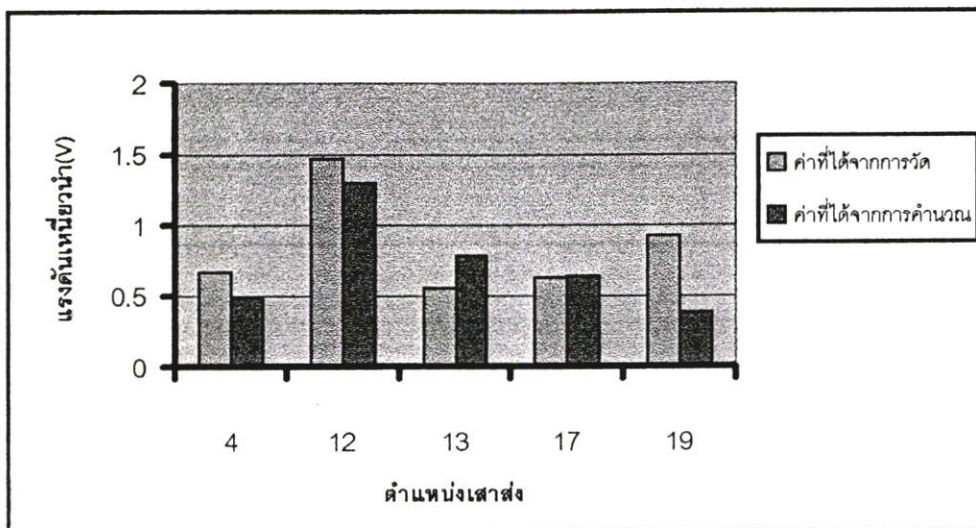
การคำนวณ

ยกเลิก Update Data การคำนวณแรงดันเหนี่ยวาน่าโดยใช้การแทรก การคำนวณแรงดันเหนี่ยวาน่าโดยใช้การคำนวณ

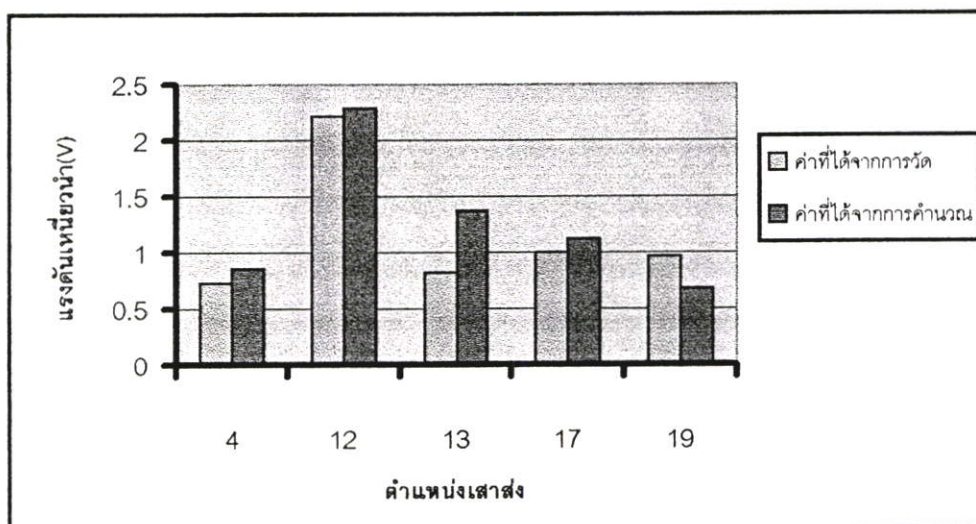
รูปที่ 4.64 แรงดันเหนี่ยวาน่าที่ได้จากการคำนวณในรูปแบบข้อความ



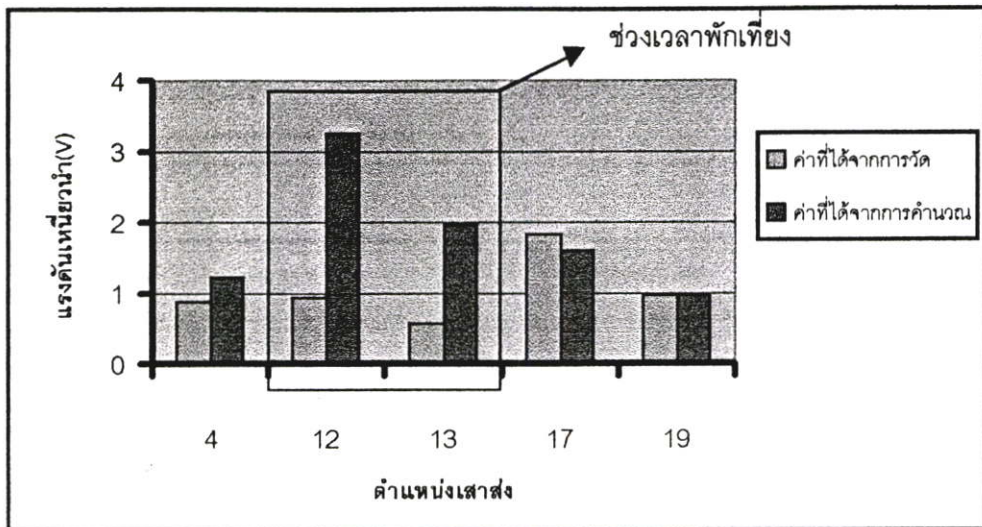
รูปที่ 4.65 แรงดันเหนี่ยวาน่าที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 60 MW



รูปที่ 4.66 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 120 MW



รูปที่ 4.67 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 210 MW



รูปที่ 4.68 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซที่พิกัดกำลังไฟฟ้า 300 MW

จากการทดสอบโปรแกรมกับโครงสร้างเสาส่งที่มีการติดตั้งใช้งานจริงพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเมื่อพิกัดการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ที่ 60, 120, 210 และ 300 MW แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นต่ำกว่ามาตรฐาน NACE กำหนดดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำในระบบนี้ เมื่อทำการส่งจ่ายในกรณี 60, 120 และ 210 MW พบว่าแรงดันเหนี่ยวนำมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันกับค่าที่ได้จากโปรแกรม AC mitigation คือเมื่อพิกัดการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามากขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่ามากขึ้นตาม แต่ในจุดที่น่าสังเกตคือเสาส่งต้นที่ 4 แรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าที่คำนวณเนื่องมาจากระยะห่างจากเสาส่งต้นที่ 4 ไปทางซ้ายมือประมาณ 50 เมตรจะมีการต่อท่อลงกราวด์อยู่แล้วดังนั้นที่เสาส่งต้นที่ 4 จึงได้รับผลกระทบคือแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดจะมีค่าน้อยกว่าการคำนวณมาก และจุดที่น่าสังเกตอีกกรณีหนึ่งคือเมื่อทำการส่งจ่ายที่ 300 MW พบว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการตรวจวัดที่เสาส่งต้นที่ 12 และ 13 มีค่าน้อยกว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกรณีทำการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่พิกัด 120 MW และ 210 MW อันเป็นผลมาจากการตรวจวัดได้ทำการตรวจวัดในช่วงพักเที่ยงซึ่งในช่วงนี้ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าลดลงดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำเสาส่งที่ 12 และ 13 มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการส่งจ่ายที่ 120 และ 210 MW เมื่อนำค่าที่ตรวจวัดได้เทียบกับค่าที่ได้จากโปรแกรม AC mitigation พบว่ามีค่าความผิดพลาดสูงมากอย่างไรก็ตามแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าน้อยกว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ได้จากการคำนวณซึ่งเป็นผลดีเมื่อมองในแง่ของการออกแบบป้องกันแรงดันเหนี่ยวนำ

4.8 สรุป

จากการนำเสนอโปรแกรม AC mitigation และขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมแสดงให้เห็นว่าการทำงานของโปรแกรมถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือส่วนที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อก๊าซและส่วนที่ใช้ในการคำนวณขนาดของกราวด์ที่จะนำมาต่อเข้ากับท่อก๊าซเพื่อควบคุมแรงดันเหนี่ยวนำให้เป็นไปตามมาตรฐานของ NACE พร้อมทั้งแสดงขั้นตอนการทำงานของในแต่ละส่วนจากโปรแกรม AC mitigation ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นเมื่อนำมาคำนวณเปรียบเทียบกับค่าคำนวณที่ได้จากการาฟมาตรฐานในการออกแบบพบว่าค่าความผิดพลาดของโปรแกรม AC mitigation เมื่อเทียบกับการคำนวณโดยใช้กราฟ 0.148 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำโปรแกรม AC mitigation มาทำการวิเคราะห์กับลักษณะโครงสร้างของท่อส่งก๊าซที่มีการใช้งานพบว่าค่าที่ได้จากโปรแกรม AC mitigation กับค่าที่ได้จากการวัดที่หน้างานมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันแต่ค่าที่ได้จะเกิดความผิดพลาดขึ้นเป็นผลมาจากไม่สามารถทำการควบคุมกำลังในการส่งจ่ายได้และไม่สามารถหลีกเลี่ยงสายส่งที่อยู่บริเวณใกล้เคียงได้ ซึ่งปัญหาดังกล่าวอาจทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่ได้จากการตรวจวัดมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นได้

บทที่ 5

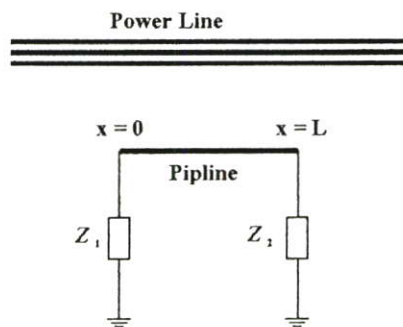
การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

5.1 บทนำ

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเป็นผลเนื่องมาจากแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่ใต้พื้นดินวางขนานกับแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงซึ่งอยู่ภายในเขตการเดินสายไฟฟ้า เนื่องจากหลีกเลี่ยงปัญหาการทำลายทรัพย์สินธรรมชาติ หรือปัญหาด้านการเวนคืนที่ดินและความต้องการที่จะใช้พื้นดินให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ซึ่งในบทนี้ได้ทำการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเสาส่งมีการเปลี่ยนแปลงและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซมีการเปลี่ยนแปลง โดยการวิเคราะห์แสดงให้เห็นถึงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของการวางแนวท่อเมื่อพารามิเตอร์ของเสาส่งและพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซมีการเปลี่ยนแปลง ผลที่ได้สามารถนำมาใช้เป็นส่วนช่วยพิจารณาในการวางแนวท่อส่งก๊าซต่อไป

5.2 การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติกรณีท่อวางขนานกับแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซในกรณีที่แนวท่อขนานกับแนวสายส่งได้ทำการแบ่งการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำออกเป็น 2 กรณีคือ กรณีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเสาส่ง และ กรณีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของท่อ ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำข้อมูลเบื้องต้นของท่อส่งก๊าซที่นำมาใช้ประกอบการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 5.1 และลักษณะของท่อกระทำกับแนวสายส่งแสดงดังรูป 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลของท่อส่งก๊าซ

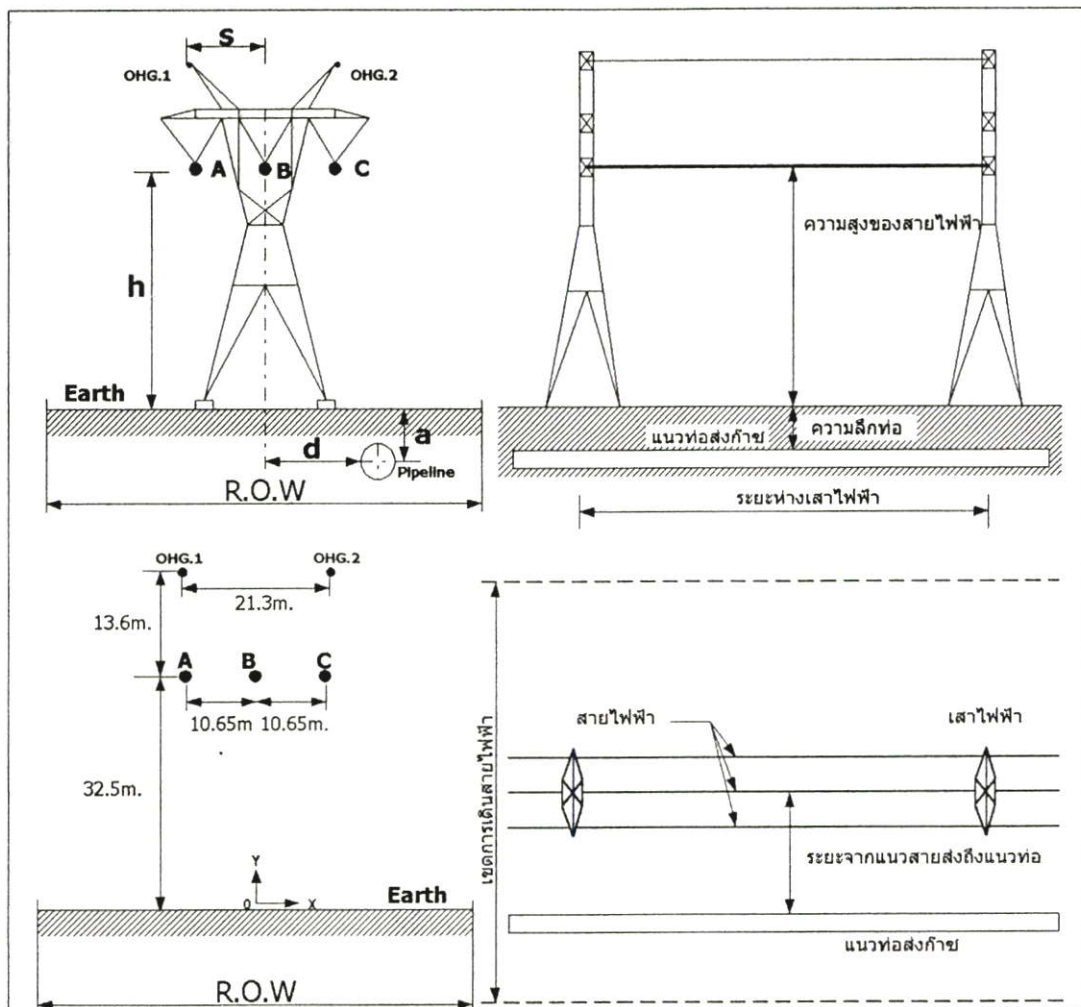
ท่อส่งก๊าซ ธรรมชาติ	ความยาวท่อ	L	10	km
	ความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของท่อก๊าซ	μ_r	300	-
	ความต้านทานจำเพาะของท่อก๊าซ	ρ_s	1.7×10^{-7}	$\Omega - m$
	ความหนาของท่อก๊าซ	t	7	mm
	ความลึกของท่อก๊าซ	a	1	m
	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	ρ_e	100	$\Omega - m$
	ความต้านทานจำเพาะของฉนวน	R_c	100	$k\Omega - m^2$
	ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ	D	36	inch

5.2.1 กรณีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเสาส่ง

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำเมื่อโครงสร้างเสาส่งมีการเปลี่ยนแปลง ได้ทำการแบ่งโครงสร้างของเสาส่งตามลักษณะการจัดวางตัวนำเป็น โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม โครงสร้างเสาส่งในแนวตั้ง 2 วงจร และ โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร เงื่อนไขในการเลือกโครงสร้างของเสาส่งทั้ง 5 ชนิดมาทำการวิเคราะห์เนื่องจากเป็นเสาส่งที่มีใช้ภายในประเทศเป็นส่วนใหญ่ โดยค่าความสูงของโครงสร้างเสาส่งที่นำมาวิเคราะห์จะใช้ความสูงของเสาส่งที่ติดตั้งจริง และกระแสที่ใช้ในการส่งจ่ายของแต่ละระบบกำหนดให้มีขนาดเท่ากันคือ 1,000 แอมแปร์ต่อเฟส โดยกำหนดให้เป็นกระแสสูงสุดที่ใช้ในการส่งจ่าย

5.2.1.1 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนแสดงดังรูปที่ 5.2 และข้อมูลของเสาส่งแสดงดังตารางที่ 5.3 ซึ่งเสาส่งที่นำมาวิเคราะห์เป็นเสาส่งที่ใช้ในการส่งจ่ายในระบบพิกัดแรงดัน 500 กิโลโวลต์ ในการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซ แรงเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อ ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการส่งจ่าย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและความสูงของเสาส่ง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะห่างระหว่างตัวนำของสายส่ง



รูปที่ 5.2 ลักษณะโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนและการวางท่อที่ใช้ในการวิเคราะห์แรงดันเหนือขานำ

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน

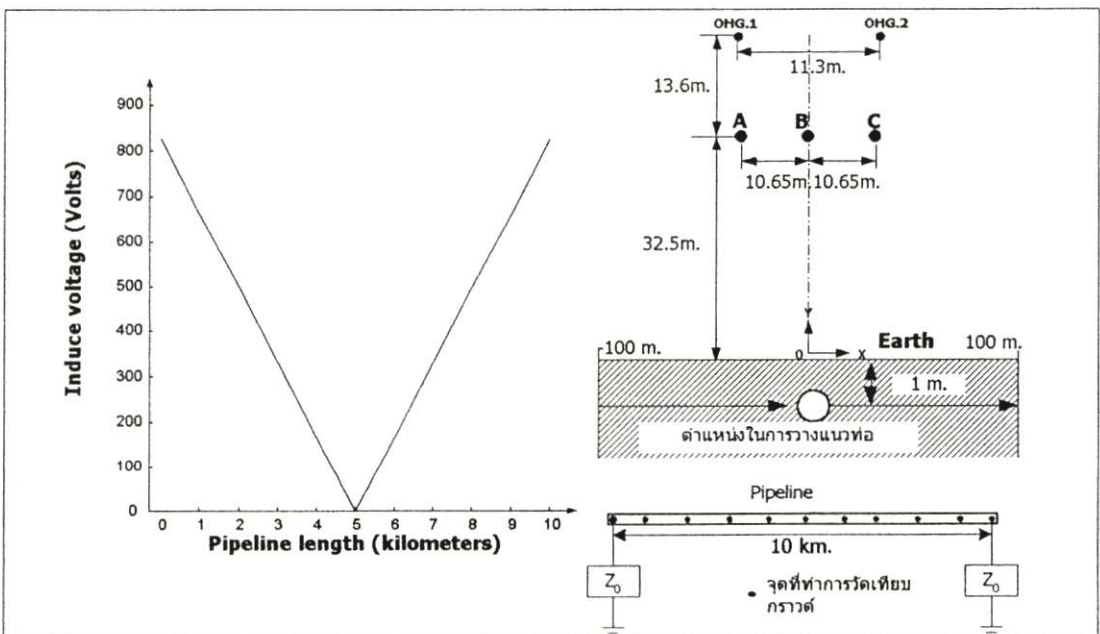
ลักษณะข้อมูล	เฟส	พิกัด		หน่วย
		X	Y	
ตำแหน่งสายตัวนำ				<i>m</i>
	A	-10.65	32.5	<i>m</i>
	B	0	32.5	<i>m</i>
	C	10.65	32.5	<i>m</i>
	OHWG.1	-10.65	46.1	<i>m</i>
	OHWG.2	10.65	46.1	<i>m</i>

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลโครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน (ต่อ)

ลักษณะข้อมูล	เฟส	พิกัด		หน่วย
กระแสไฟฟ้า ของสายส่ง	A	1,000	0°	A
	B	1,000	120°	A
	C	1,000	-120°	A
	OHWG.1	0	-	A
	OHWG.2	0	-	A
ความถี่	เฟส	ขนาด	มุม	หน่วย
	A, B, C	50	-	H_z
ความต้านทาน จำเพาะของดิน	100			$\Omega - m$

5.2.1.1.1 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

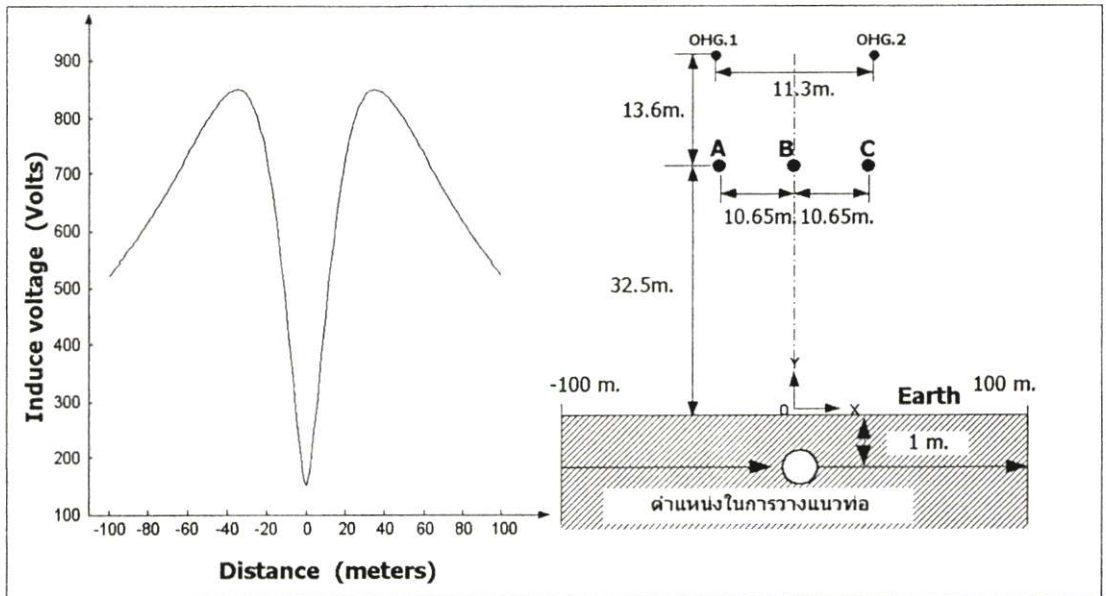
การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ตำแหน่งต่างๆทำได้โดยกำหนดให้ค่าความยาวคงที่เท่ากับ 10 กิโลเมตร และระยะระหว่างเสาสูงถึงแนวท่อ 35 เมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดแรงดันต่ำสุดและแรงดันสูงสุดอยู่ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อ ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แรงดันบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน

5.2.1.1.2 แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อดึงก๊าซ

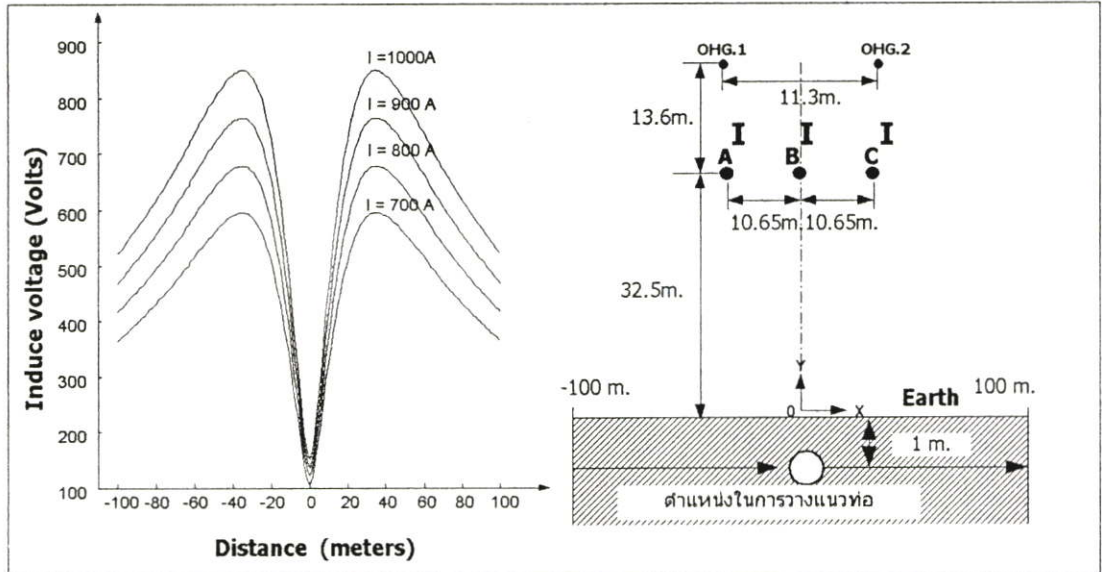
จากการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆของท่อที่มีความยาว 10 กิโลเมตร ทำให้ทราบว่าขนาดของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อดึงก๊าซมีค่าสูงสุดอยู่บริเวณจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อ ดังนั้นในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำต่อไปจะทำการวิเคราะห์แรงดัน ณ. จุดที่มีแรงดันสูงสุดเท่านั้น ในการพิจารณาค่าตำแหน่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดโดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวท่อดึงก๊าซห่างจากแนวสายส่งไปทางด้านซ้ายและด้านขวาผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.4 จากกราฟแสดงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อดึงก๊าซธรรมชาติที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดท่อแนวท่อพบว่าตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งในการวางท่อห่างออกจากแนวสายส่ง 35 เมตร และมีค่าเท่ากับ 849.77 โวลต์ ที่กระแส 1,000 แอมป์และความยาวท่อ 10 กิโลเมตร และตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำต่ำสุดคือกึ่งกลางของแนวสายส่ง ดังนั้นในการวางท่อดึงก๊าซกับระบบ 500 กิโลโวลต์ วงจรเคี้ยวที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน ควรหลีกเลี่ยงการวางแนวท่อดึงก๊าซในระยะจากจุดกึ่งกลางของเสาส่งไปทางด้านซ้ายหรือด้านขวา 35 เมตร แต่ถ้าจะวางแนวท่อขนานกับระบบสายส่งนี้ควรมีการวางแนวท่อภายใต้แนวสายส่งไฟฟ้า



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน

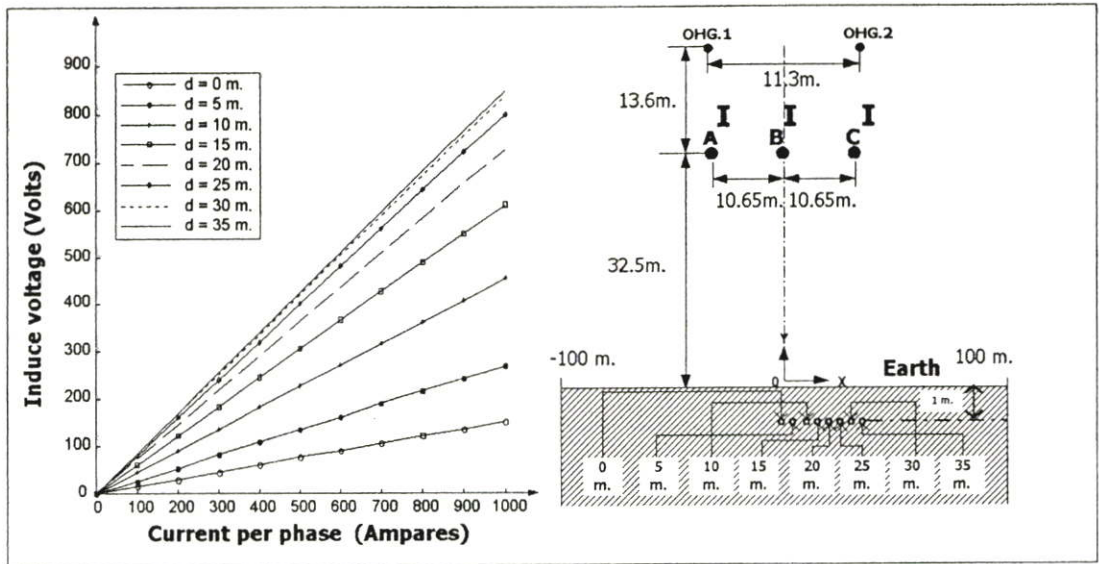
5.2.1.13 ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการส่งจ่าย

เมื่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้นหรือน้อยลงผลที่ตามมาคือกระแสที่ระบบไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงตามความต้องการนั้นด้วยเป็นผลทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อเมื่อกระแสของสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวในแนวนอน

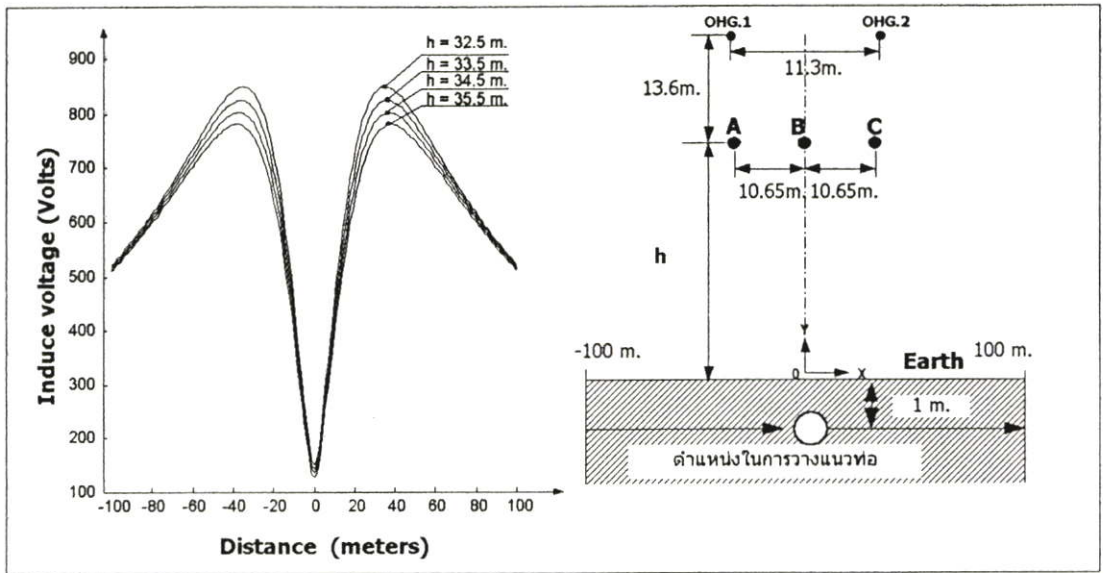
จากรูปที่ 5.5 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อที่ตำแหน่งในการวางท่อแตกต่างกันพบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าในสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสทุกๆตำแหน่งของการวางท่อ โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสกับแรงดันเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 5.6 พบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงกระแสของระบบส่งจ่ายมีความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นกับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซแต่เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการวางท่อไปคือที่ 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 เมตร อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสกับแรงดันเหนี่ยวนำมีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันออกไปซึ่งจุดที่มีแรงดันเหนี่ยวนำสูงจะทำให้อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสมีค่าสูงตามไปด้วย



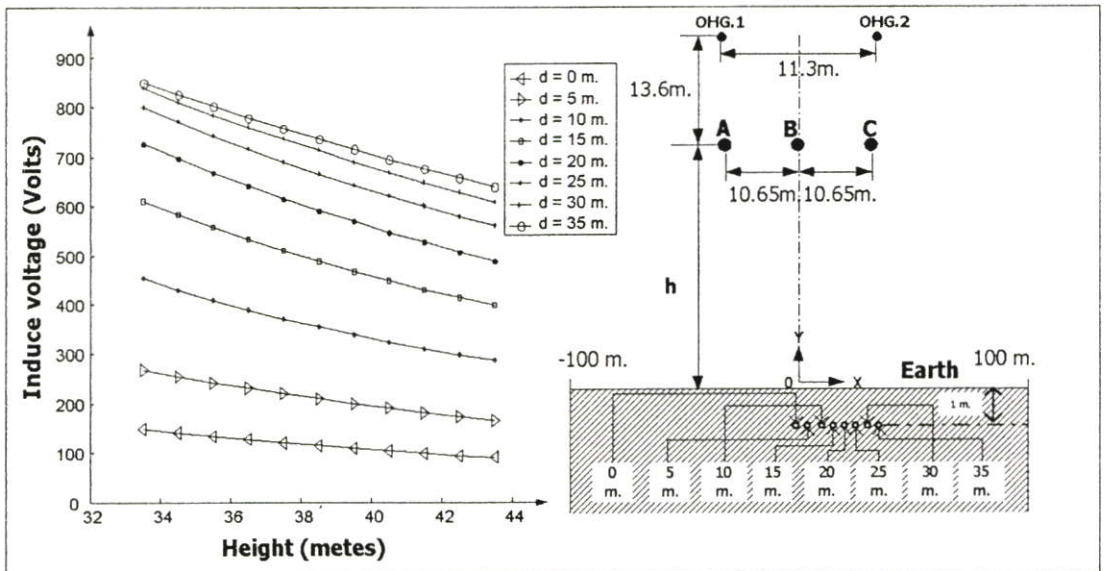
รูปที่ 5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสของสายส่งกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน

5.2.1.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและความสูงของเสาส่งไฟฟ้า

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของเสาส่งอันเนื่องมาจากแนวสายส่งอยู่ใกล้กับแหล่งชุมชนมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซที่ฝังอยู่ภายใต้แนวสายส่ง ในการศึกษาผลกระทบดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเพิ่มความสูงของเสาส่งจากเดิม 32.5 เมตร เป็น 33.5, 34.5 และ 35.5 เมตร พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในการวางแนวท่อซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.7 จากกราฟพบว่าเมื่อความสูงของเสาส่งมากขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งแสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งที่ตำแหน่งต่างกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน

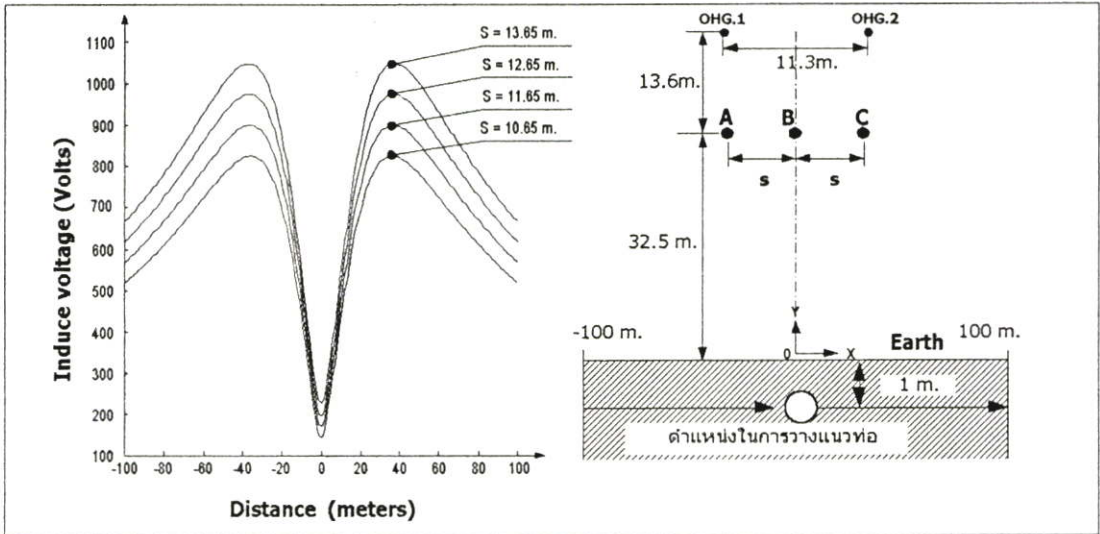


รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน

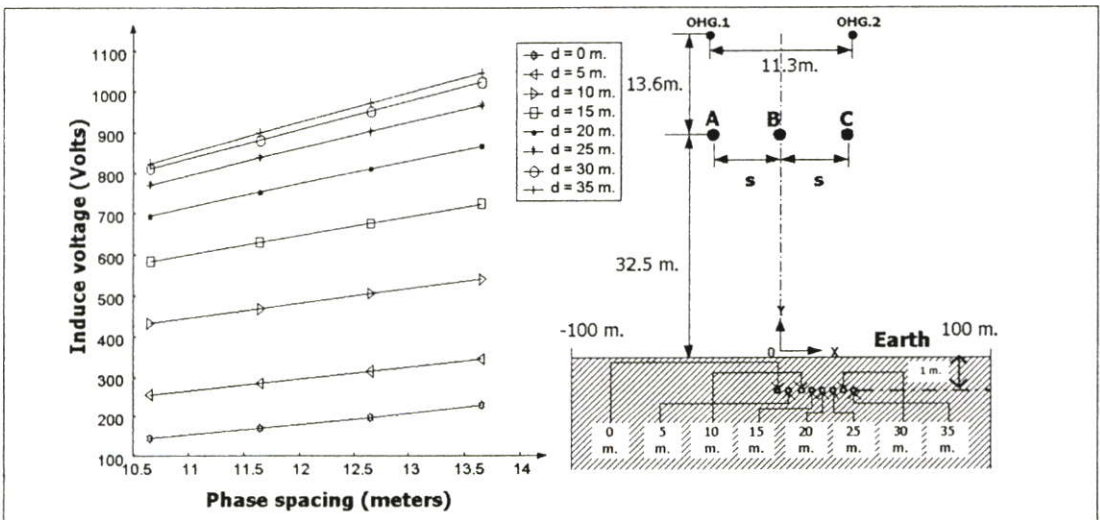
จากกราฟรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนั้น ในแต่ละตำแหน่งของการวางท่อนั้น ไม่เท่ากันคือตำแหน่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุด เมื่อทำการเพิ่มความสูงของเสาส่งอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำก็จะมีค่าสูงสุดเช่นกัน

5.2.1.1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะห่างระหว่าง ตัวนำของสายส่ง

การพิจารณาผลของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเมื่อระยะระหว่างเฟสของสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจาก 10.65, 11.65, 12.65 และ 13.65 พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวท่อผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.9 จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสที่แนวท่ออยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน

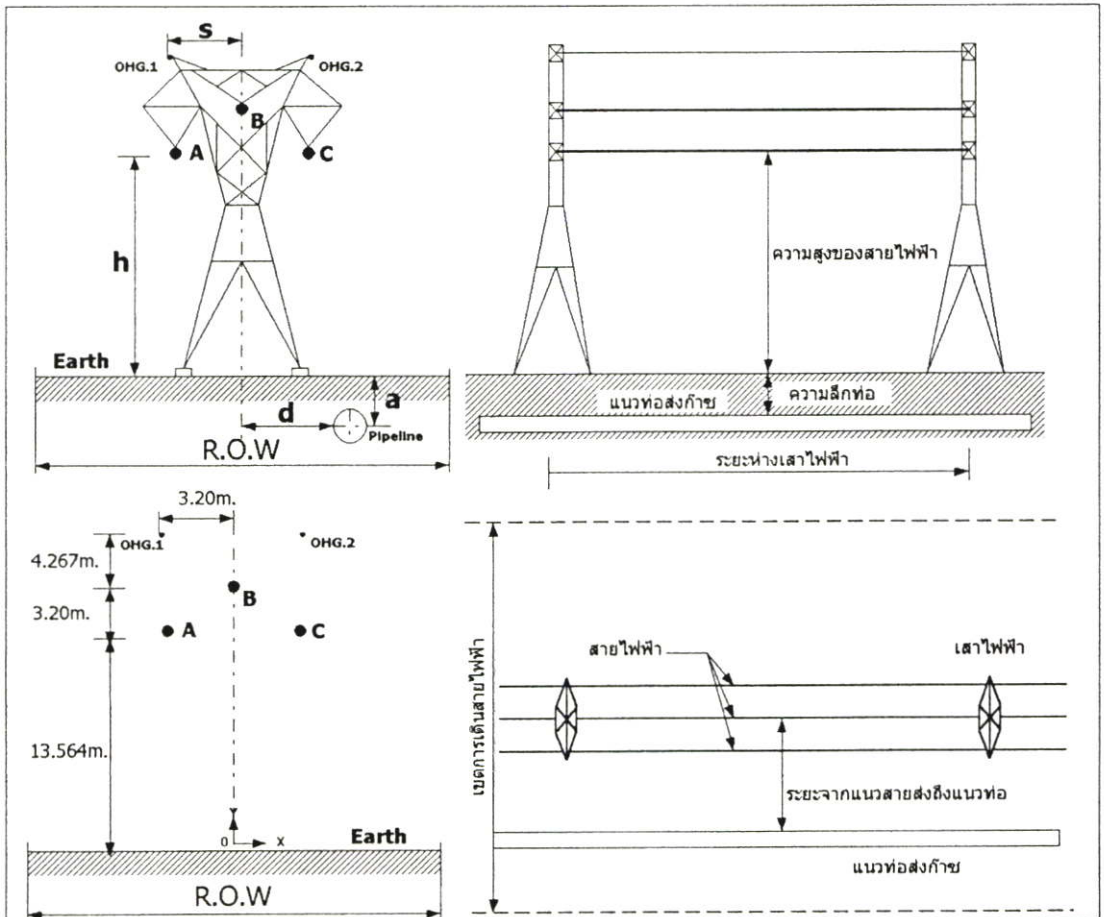


รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำเป็นในแนวนอน

ผลที่ได้จากการเพิ่มระยะระหว่างตัวนำทำให้ทราบว่าคุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงแรงดันในช่วงระยะระหว่างตัวนำเพิ่มขึ้นจากระยะระหว่างตัวนำเดิมแสดงดังรูปที่ 5.10

5.2.1.2 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 5.11 ซึ่งเสาส่งที่นำมาวิเคราะห์เป็นเสาส่งที่ใช้ในการส่งจ่ายในระบบพิกัดแรงดัน 500 กิโลโวลต์ ในการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซ แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อ ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการส่งจ่าย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและความสูงของเสาส่ง, ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะห่างระหว่างตัวนำของสายส่งไฟฟ้า



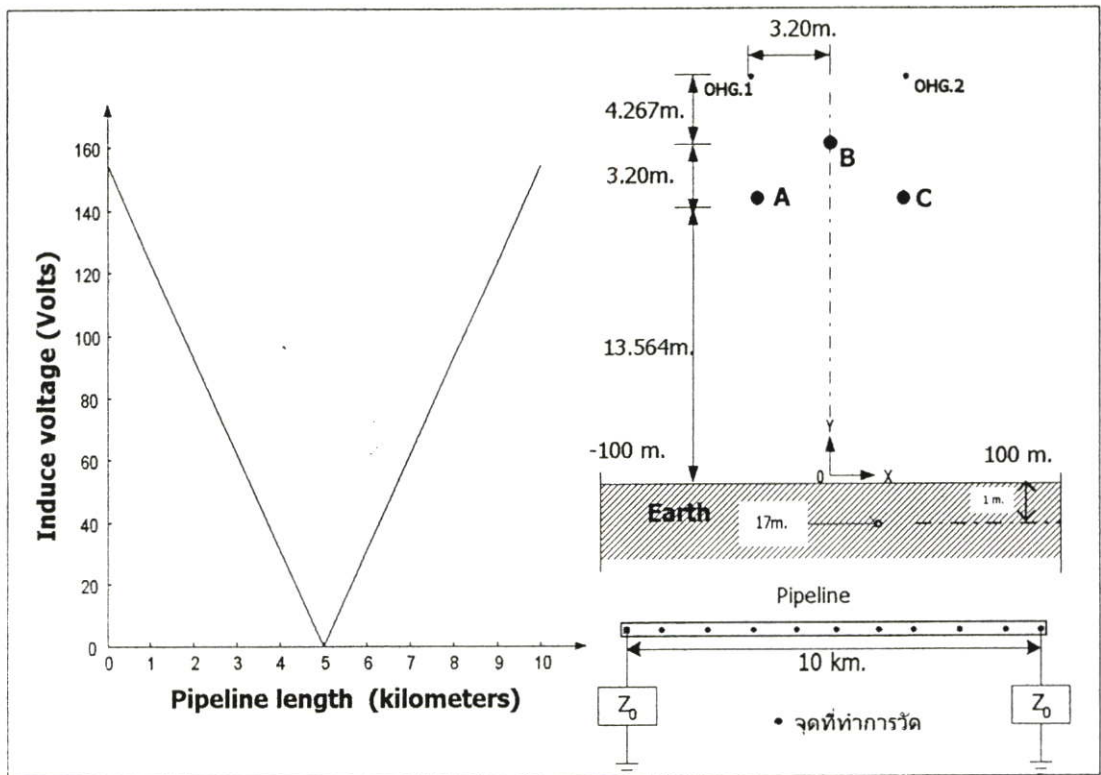
รูปที่ 5.11 ลักษณะ โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

ตารางที่ 5.3 ข้อมูล โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

ลักษณะข้อมูล	เฟส	พิกัด		หน่วย
		X	Y	
ตำแหน่งสายตัวนำ		X	Y	m
	A	-3.2	13.56	m
	B	0	16.76	m
	C	3.2	13.56	m
	OHWG.1	-1.4	21.027	m
	OHWG.2	1.4	21.027	m
กระแสไฟฟ้า ของสายส่ง	เฟส	ขนาด	มุม	หน่วย
	A	1,000	0°	A
	B	1,000	120°	A
	C	1,000	-120°	A
	OHWG.1	0	-	A
	OHWG.2	0	-	A
ความถี่	เฟส	ขนาด	มุม	หน่วย
	A, B, C	50	-	H_z
ความต้านทาน จำเพาะของดิน	100			$\Omega - m$

5.2.1.2.1 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อกำลังไฟฟ้า

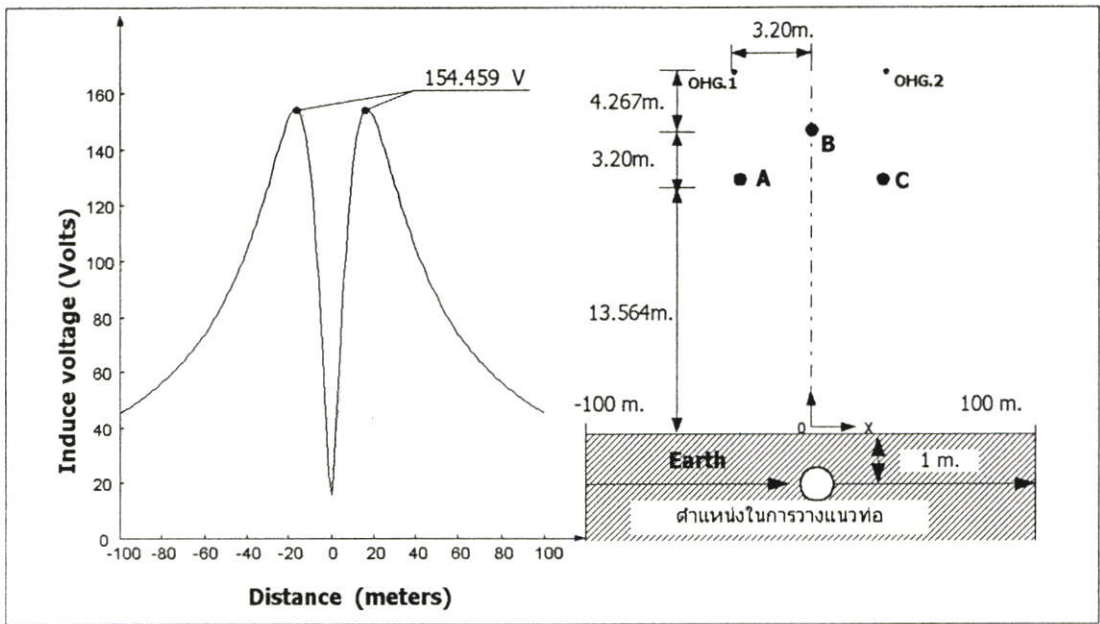
การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อกำลังไฟฟ้าที่จุดต่างๆทำได้โดยการวัดแรงดันบนท่อเทียบกับกราวด์เพื่อเป็นการหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆบนท่อกำลังไฟฟ้า โดยกำหนดให้ค่าความยาวของท่อคงที่เท่ากับ 10 กิโลเมตร และระยะระหว่างเสาส่งถึงแนวท่อ 17 เมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดแรงดันต่ำสุดและแรงดันสูงสุดอยู่ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อ ดังรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.12 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซกรณีโครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

5.2.1.2.2 แรงเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซ

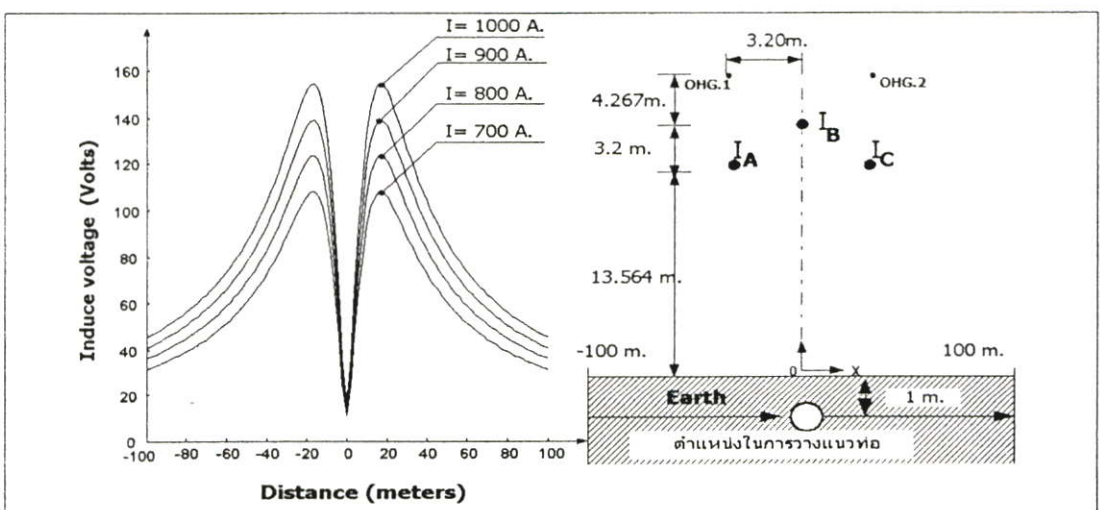
ในการพิจารณาค่าแห่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุด โดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวท่อส่งก๊าซห่างจากแนวสายส่งไปทางด้านซ้ายและด้านขวาผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.13 จากกราฟแสดงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อพบว่าตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งในการวางท่อห่างออกจากแนวสายส่ง 17 เมตร และแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดมีค่าเท่ากับ 154.459 โวลต์ ที่กระแส 1,000 แอมป์และความยาวท่อ 10 กิโลเมตร และตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำต่ำสุดคือกึ่งกลางของแนวสายส่ง ดังนั้นในการวางท่อส่งก๊าซกับระบบ 500 กิโลโวลต์ วงจรเดี่ยวที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม ควรหลีกเลี่ยงการวางแนวท่อส่งในตำแหน่ง -17 และ 17 เมตรจากแนวสายส่ง แต่ถ้าจะวางแนวท่อขนานกับระบบสายส่งนี้ควรมีการวางแนวท่อภายใต้สายส่งกึ่งกลางสายส่งไฟฟ้า



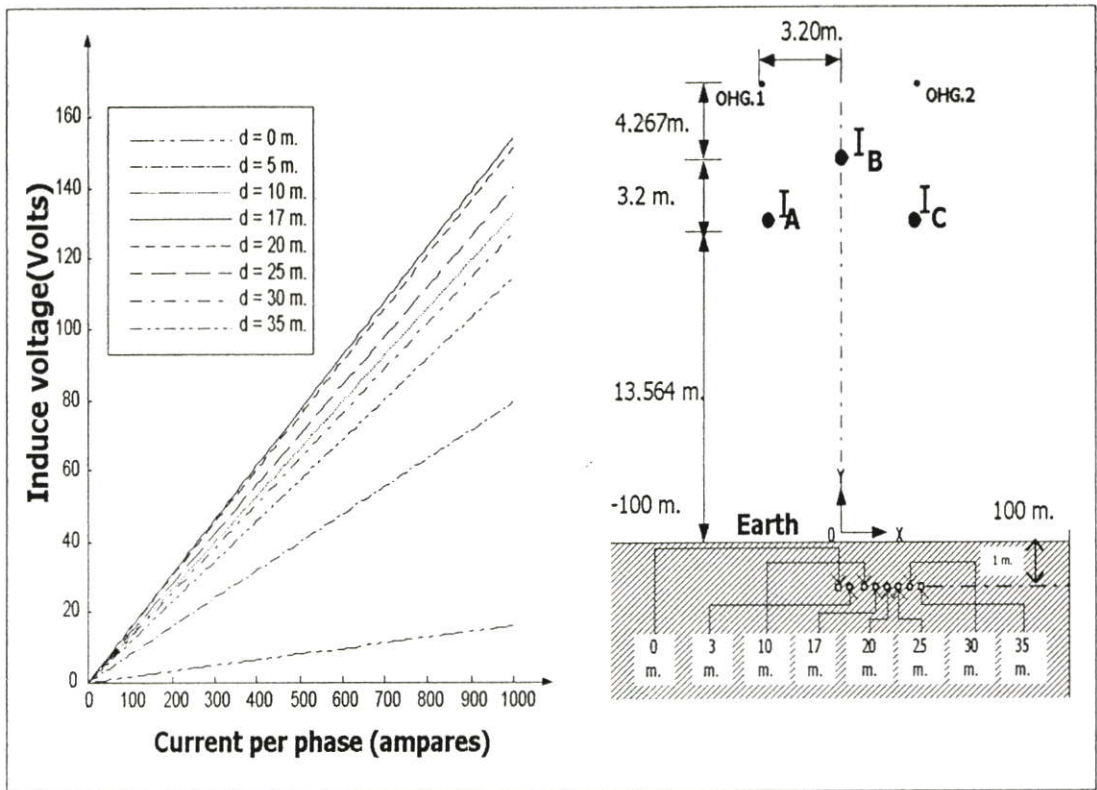
รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

5.2.1.2.3 ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการส่งจ่าย

เมื่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้นหรือน้อยลงผลที่ตามมาคือกระแสที่ระบบไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงตามความต้องการนั้นด้วยเป็นผลทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.14



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อเมื่อกระแสของสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

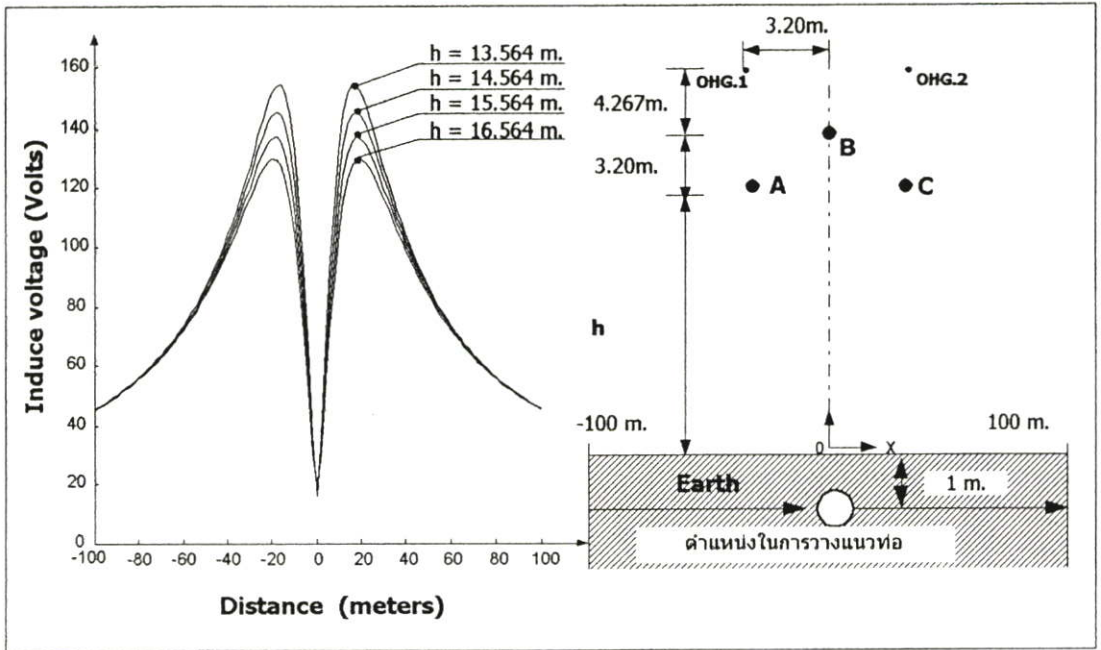


รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสของสายส่งกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

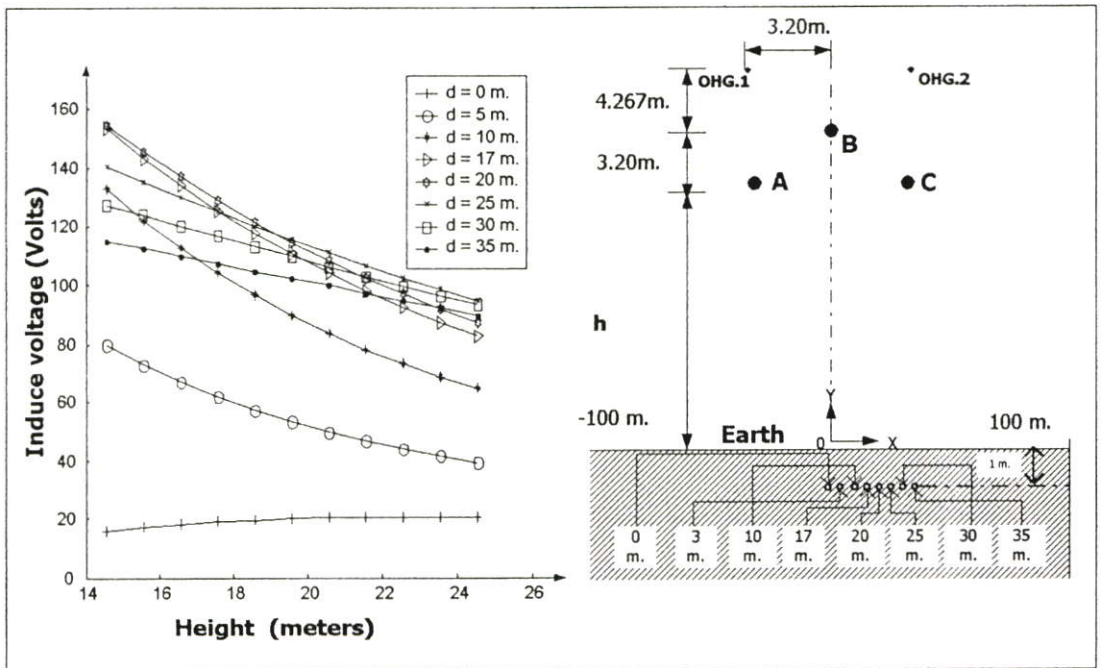
จากรูปที่ 5.14 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อที่ตำแหน่งในการวางท่อแตกต่างกันพบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าในสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสโดยอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสกับแรงดันเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 5.15

5.2.1.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและความสูงของเสาสูง

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความสูงของเสาสูงอันเนื่องมาจากแนวสายส่งอยู่ใกล้กับแหล่งชุมชนมากเกินไปจะส่งผลกระทบต่อแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซที่ฝังอยู่ภายใต้แนวสายส่งในการพิจารณาผลกระทบดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเพิ่มความสูงของเสาสูงจากเดิม 13.564 เมตร เป็น 14.564, 15.564 และ 16.564 เมตร พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในการวางแนวท่อซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.16 จากกราฟพบว่าเมื่อความสูงของเสาสูงมากขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาสูงแสดงดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งที่ตำแหน่งต่างๆกรณีเสา
ส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

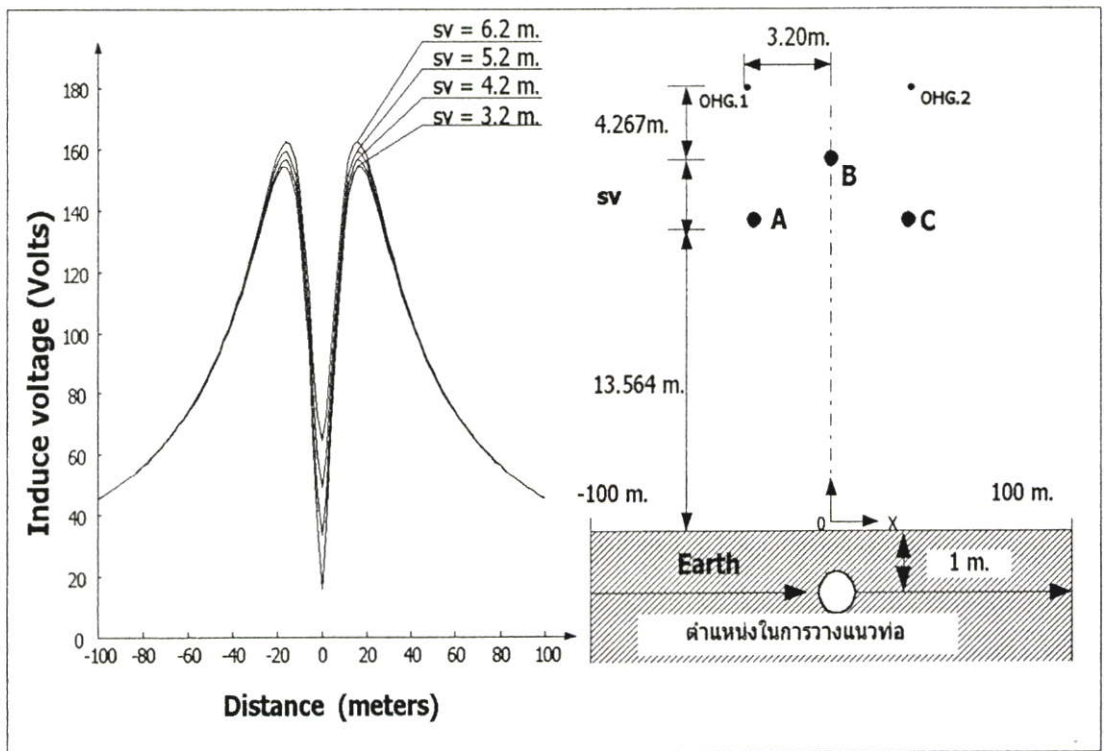


รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งกรณีเสาส่งที่มีการจัดวาง
ตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

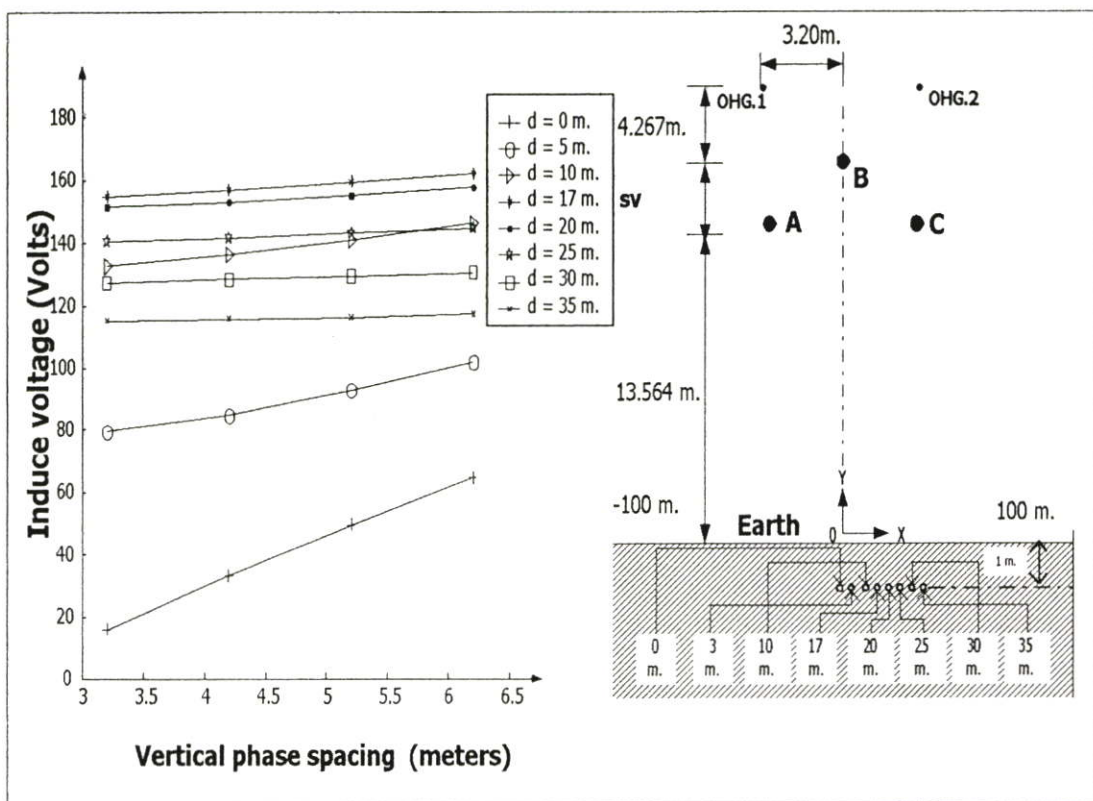
จากกราฟรูปที่ 5.17 แสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนั้นในแต่ละตำแหน่งของการวางท่อนั้น ไม่เท่ากันคือตำแหน่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดเมื่อทำการเพิ่มความสูงของเสาส่งอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำก็จะมีค่าสูง

5.2.1.2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและระยะห่างระหว่างตัวนำของสายส่ง

การพิจารณาผลของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเมื่อระยะระหว่างเฟสในแนวตั้งของสายส่งมีค่าเพิ่มขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจาก 3.2 เป็น 4.2, 5.2 และ 6.2 เมตร พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวท่อผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.18 จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นผลที่ได้จากการเพิ่มระยะระหว่างตัวนำทำให้ทราบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันในช่วงระยะระหว่างตัวนำเพิ่มขึ้นจากระยะระหว่างตัวนำเดิมแสดงดังรูปที่ 5.19



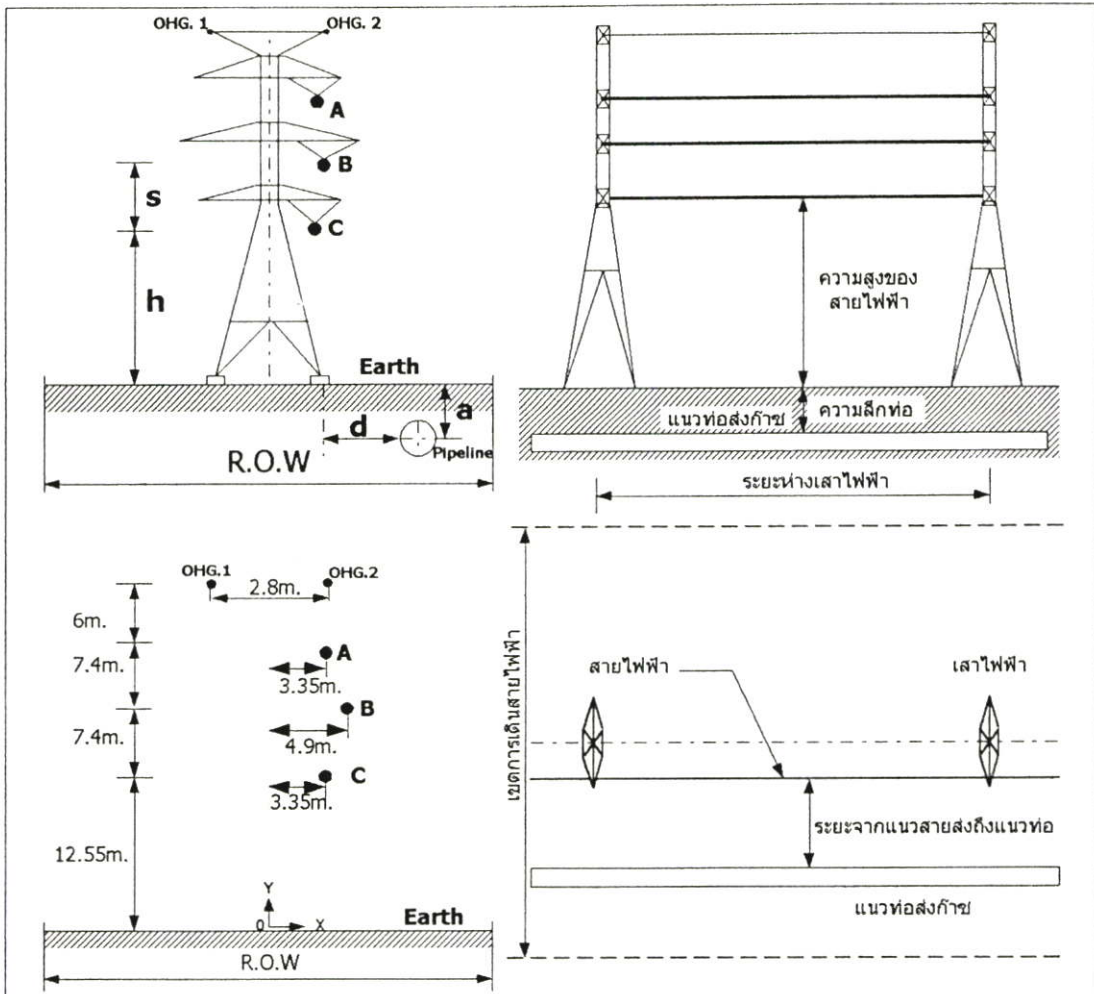
รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสที่แนวท่ออยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวตั้งกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

5.2.1.3 โครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจรดังรูปที่ 5.20 ซึ่งเสาสูงที่นำมาวิเคราะห์เป็นเสาสูงที่ใช้ในการส่งจ่ายในระบบพิกัดแรงดัน 230 กิโลโวลต์ และพารามิเตอร์ของเสาสูงแสดงดังตารางที่ 5.5 ในการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆบนท่อนส่งก๊าซ แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อนดิน ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการส่งจ่าย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและความสูงของเสาสูง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะห่างระหว่างตัวนำของสายส่ง ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวจะแสดงให้เห็นถึงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่างๆภายใต้แนวสายส่ง โดยการกำหนดให้ความยาวของท่อนส่งก๊าซมีค่าคงที่ 10 กิโลเมตร พร้อมทั้งการเปลี่ยนตำแหน่งของการวางแนวท่อนส่งก๊าซ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.20 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

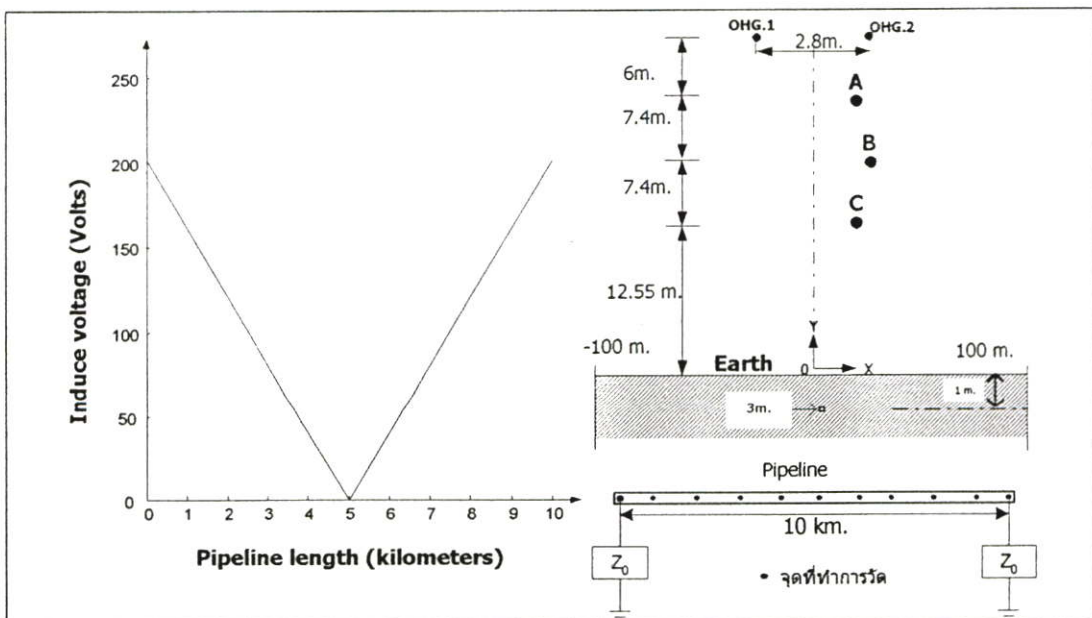
ลักษณะข้อมูล	เฟส	พิกัด		หน่วย
ตำแหน่งสายตัวนำ		X	Y	m
	A	3.35	27.35	m
	B	4.9	19.95	m
	C	3.35	12.55	m
	OHWG.1	-1.4	33.35	m
	OHWG.2	1.4	33.35	m

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร (ต่อ)

กระแสไฟฟ้าของสายส่ง	เฟส	ขนาด	มุม	หน่วย
	A	1,000	0°	A
	B	1,000	120°	A
	C	1,000	-120°	A
	OHWG.1	0	-	A
	OHWG.2	0	-	A
ความถี่	เฟส	ขนาด	มุม	หน่วย
	A, B, C	50	-	H_z
ความต้านทานจำเพาะของดิน	100			$\Omega - m$

5.2.1.3.1 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อก๊าซธรรมชาติ

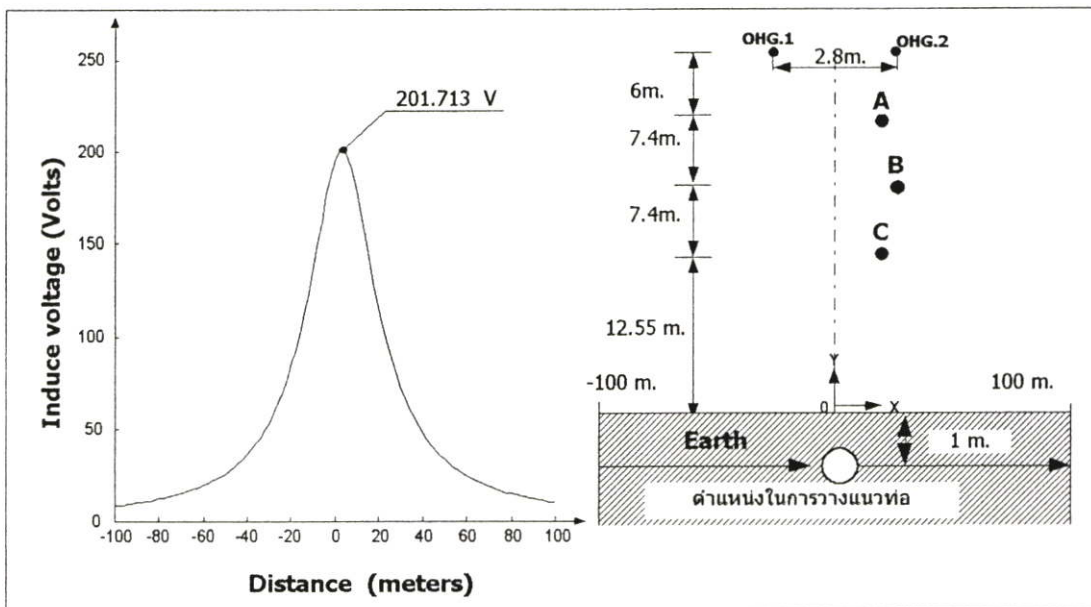
การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อก๊าซธรรมชาติที่จุดต่างๆทำได้โดยการวัดแรงดันบนท่อเทียบกับกราวด์เพื่อเป็นการหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดต่างบนท่อก๊าซโดยกำหนดให้ค่าความยาวคงที่เท่ากับ 10 กิโลเมตร และระยะระหว่างเสาส่งถึงแนวท่อ 3 เมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดแรงดันต่ำสุดและแรงดันสูงสุดอยู่ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อ แสดงดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 แรงดันบนท่อก๊าซธรรมชาติเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

5.2.1.3.2 แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อนดิน

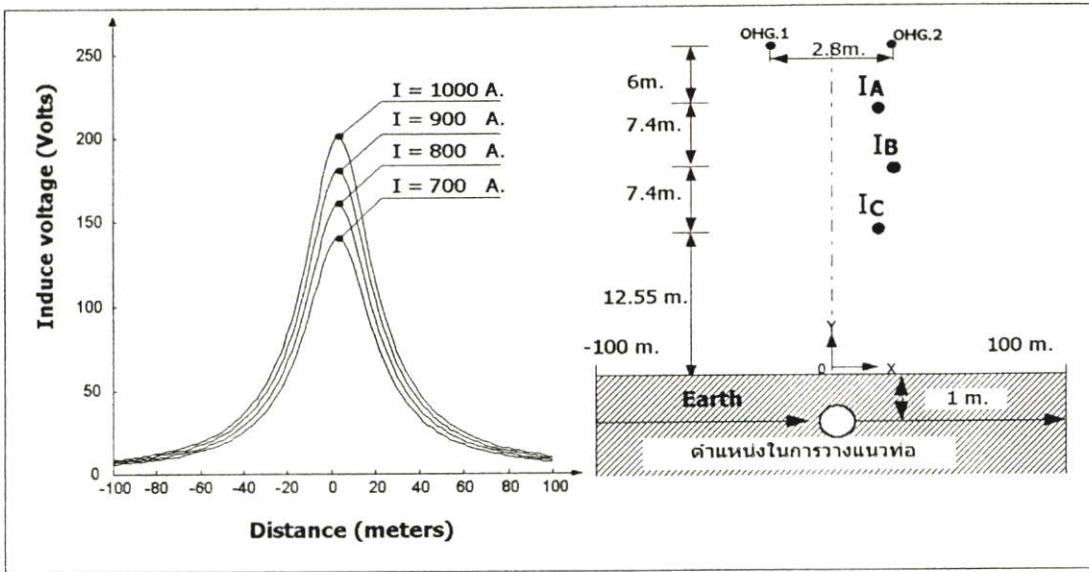
ในการพิจารณาหาตำแหน่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุด โดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวท่อส่งก๊าซห่างจากแนวสายส่งไปทางด้านซ้ายและด้านขวาผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.22 จากกราฟแสดงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดท่อส่งก๊าซธรรมชาติมีค่าสูงสุดอยู่ที่ ตำแหน่งการวางท่อห่างออกจากแนวสายส่ง 3 เมตร และมีค่าเท่ากับ 201.713 โวลต์ ที่กระแส 1000 แอมป์และความยาวท่อ 10 กิโลเมตร ดังนั้นในการวางท่อส่งก๊าซกับระบบ 500 กิโลโวลต์ วงจรเดียวที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง ควรหลีกเลี่ยงการวางแนวท่อส่งก๊าซที่ตำแหน่งใต้แนวสายส่งหรือ 3 เมตรนับจากจุดกึ่งกลางเสาส่ง แต่ถ้าจะวางแนวท่อนานกับระบบสายส่งนี้ควรมีการวางแนวท่อห่างจากแนวสายส่งไปทางด้านซ้ายหรือด้านขวาก็ได้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซลงได้



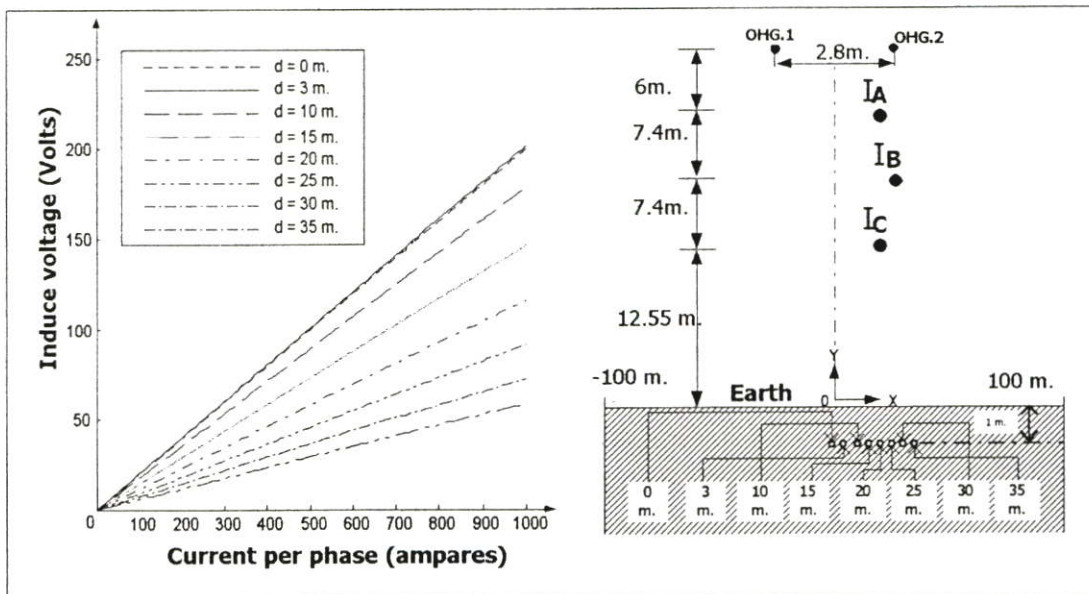
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

5.2.1.3.3 ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการส่งจ่าย

สำหรับโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร เมื่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้นหรือน้อยลงผลที่ตามมาคือกระแสที่ระบบไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงตามความต้องการนั้นด้วยเป็นผลทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อนี้
กระแสของสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

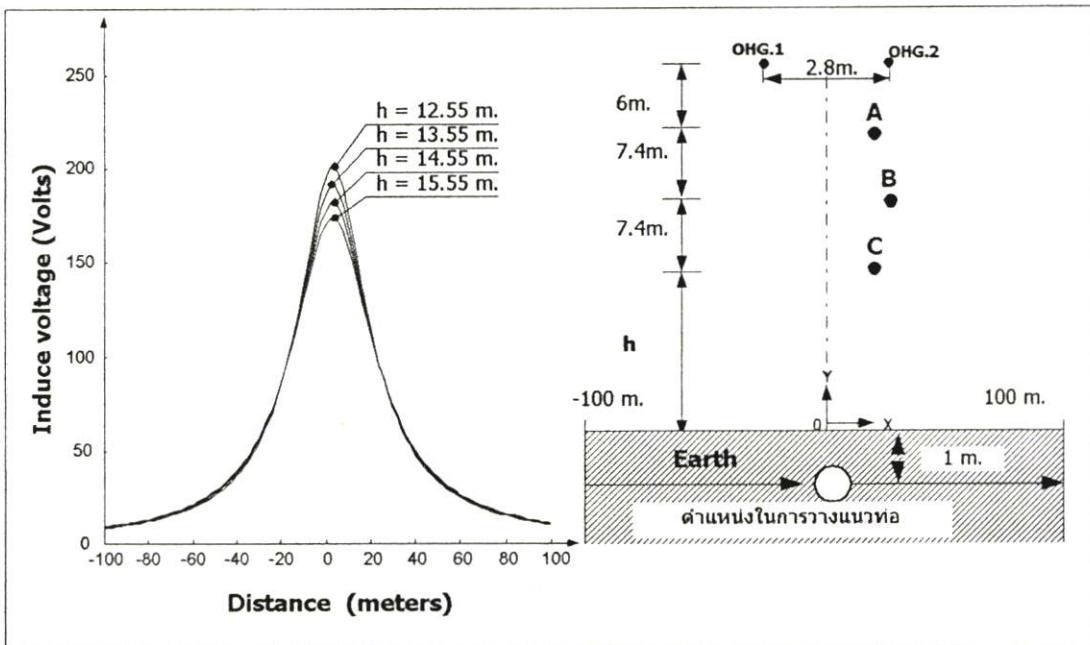


รูปที่ 5.24 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสของสายส่งกรณีเสาส่งที่มีการจัดวาง
ตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

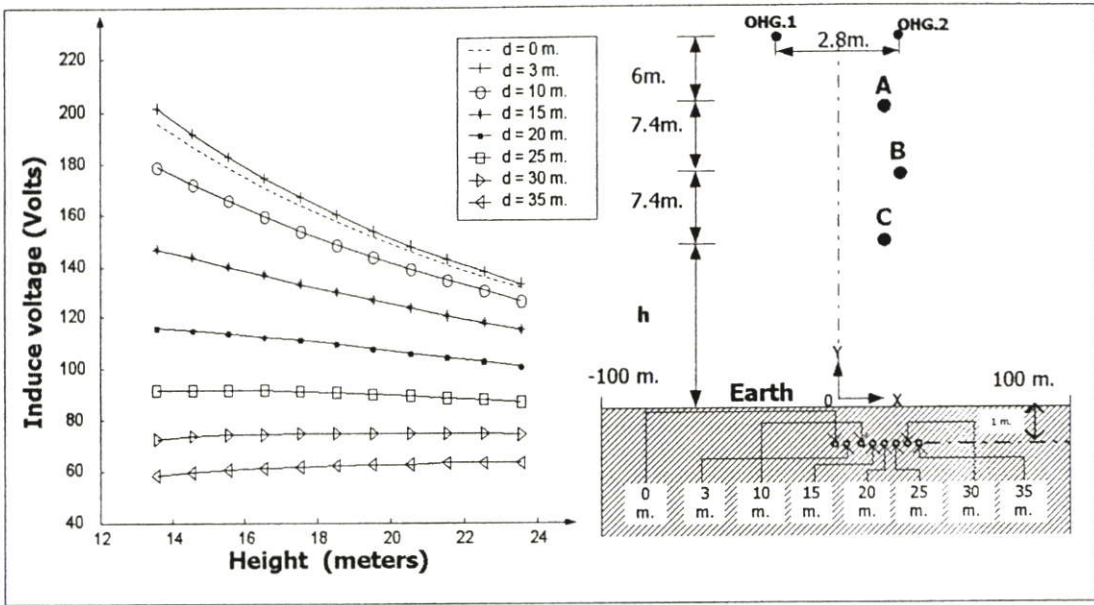
จากรูปที่ 5.24 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อที่ตำแหน่งในการวางท่อแตกต่างกันพบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าในสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสทุกๆตำแหน่งของการวางท่อโดยอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสกับแรงดันเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 5.24

5.2.1.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและความสูงของเสาส่งไฟฟ้า

ในการพิจารณาผลกระทบเมื่อความสูงของเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจรสามารถทำได้โดยการเพิ่มความสูงของเสาส่งจากเดิม 12.55 เมตร เป็น 13.55, 14.55 และ 15.55 เมตร พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในการวางแนวท่อซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.25 จากกราฟพบว่าเมื่อความสูงของเสาส่งมากขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งแสดงดังรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งที่ตำแหน่งต่างๆกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

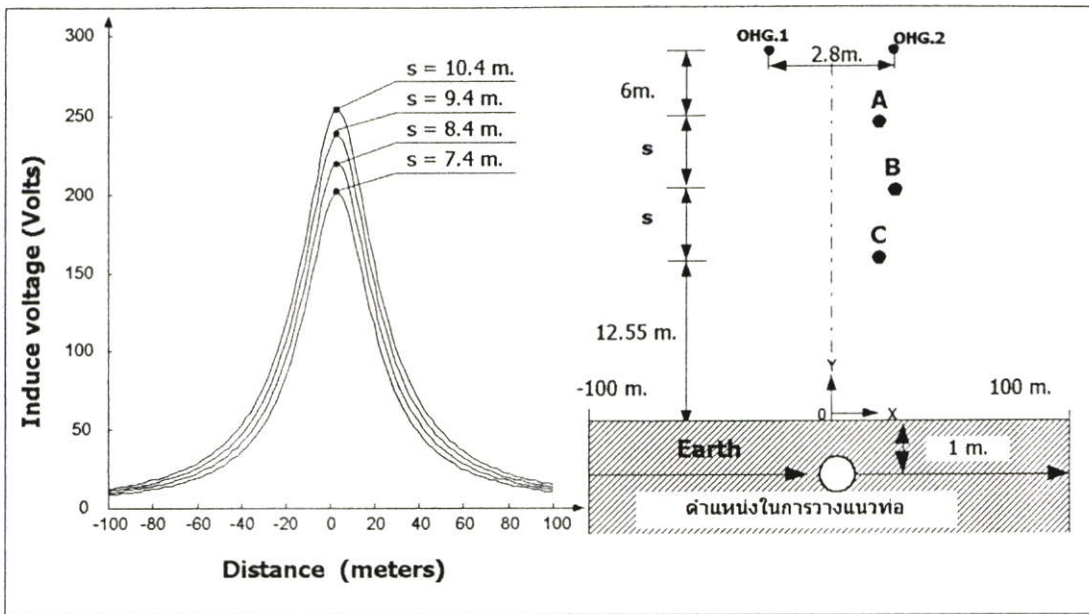


รูปที่ 5.26 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

จากกราฟรูปที่ 5.26 แสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนั้นในแต่ละตำแหน่งของการวางท่อนั้นไม่เท่ากันคือตำแหน่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดเมื่อทำการเพิ่มความสูงของเสาส่งอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำก็จะมีค่าสูง

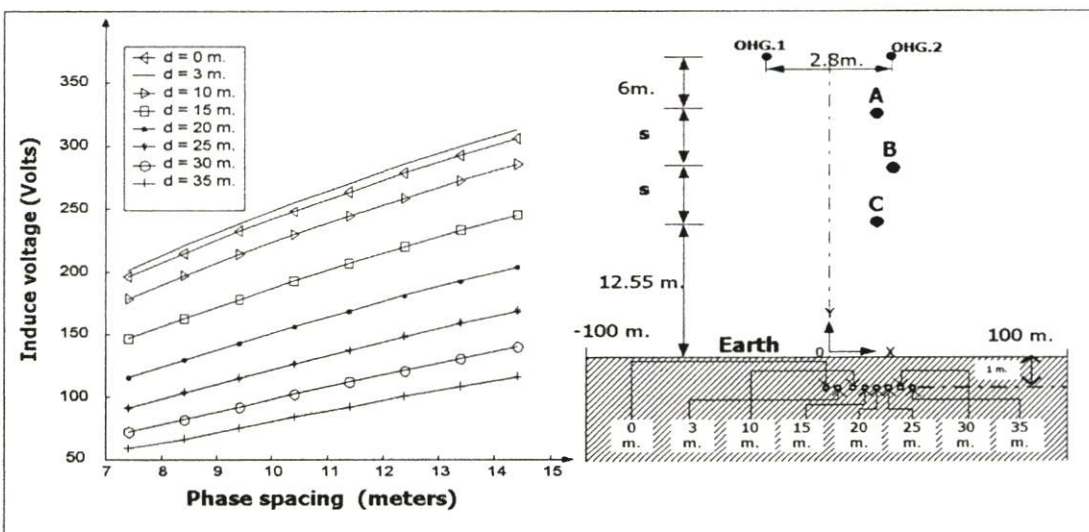
5.2.1.3.5 ผลกระทบของแรงดันเหนี่ยวนำกับการเพิ่มระยะระหว่างเฟส

การพิจารณาผลของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเมื่อระยะระหว่างเฟสของสายส่งมีค่าเปลี่ยนแปลงสามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจากเดิม 7.4 เป็น 8.4, 9.4 และ 10.4 เมตร พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวท่อผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.27 จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสที่แนวท่ออยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

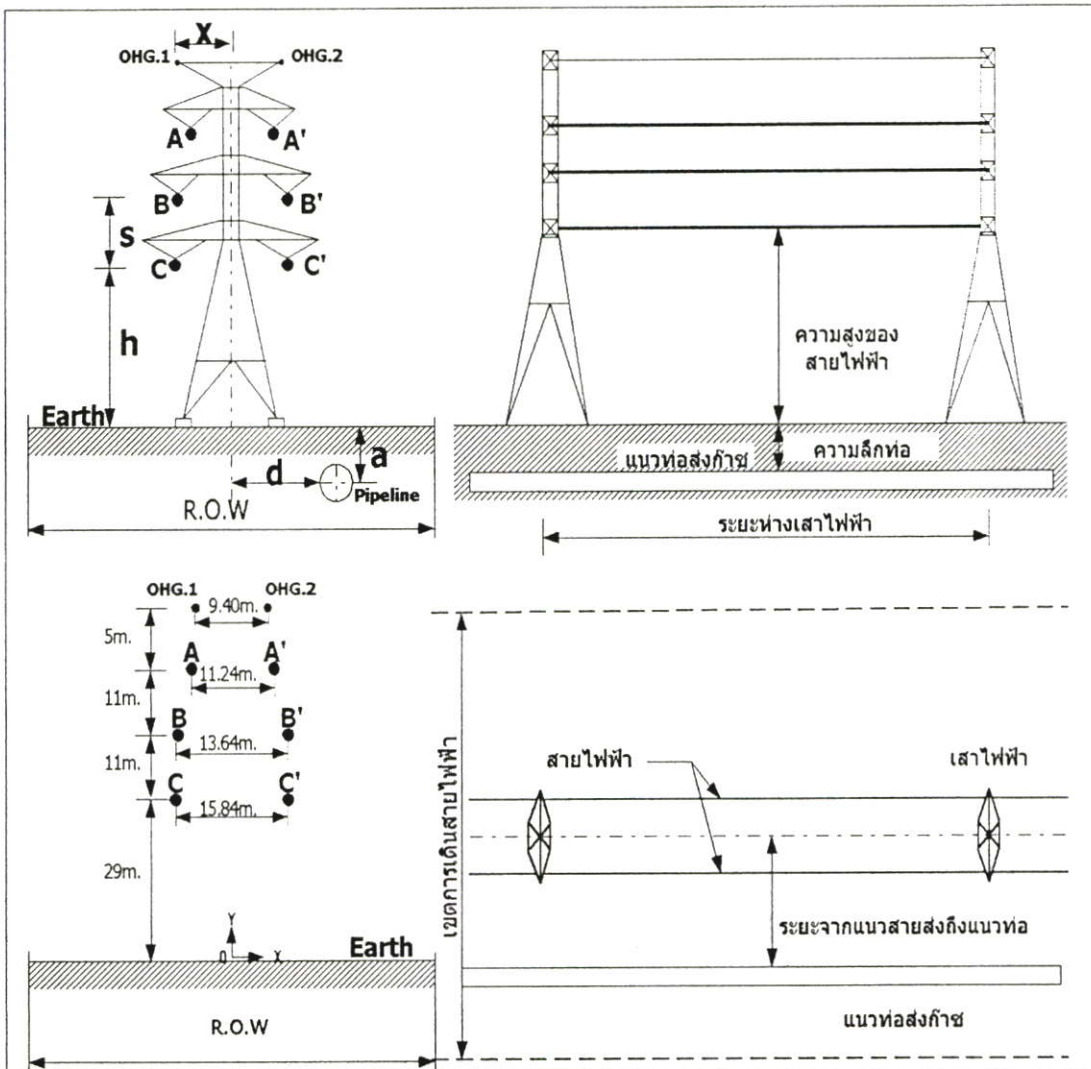
ผลที่ได้จากการเพิ่มระยะระหว่างตัวนำทำให้ทราบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันในช่วงระยะระหว่างตัวนำเพิ่มขึ้นจากระยะระหว่างตัวนำเดิมแสดงดังรูปที่ 5.28



รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำเป็นในแนวตั้ง 1 วงจร

5.2.1.4 โครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซเนื่องจากโครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจรดังรูปที่ 5.29 ซึ่งเสาสูงที่นำมาวิเคราะห์เป็นเสาสูงที่ใช้ในการส่งจ่ายในระบบพิกัดแรงดัน 500 กิโลโวลต์ ในการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซ แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อ ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการส่งจ่าย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและความสูงของเสาสูง ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะห่างระหว่างตัวนำของสายส่ง



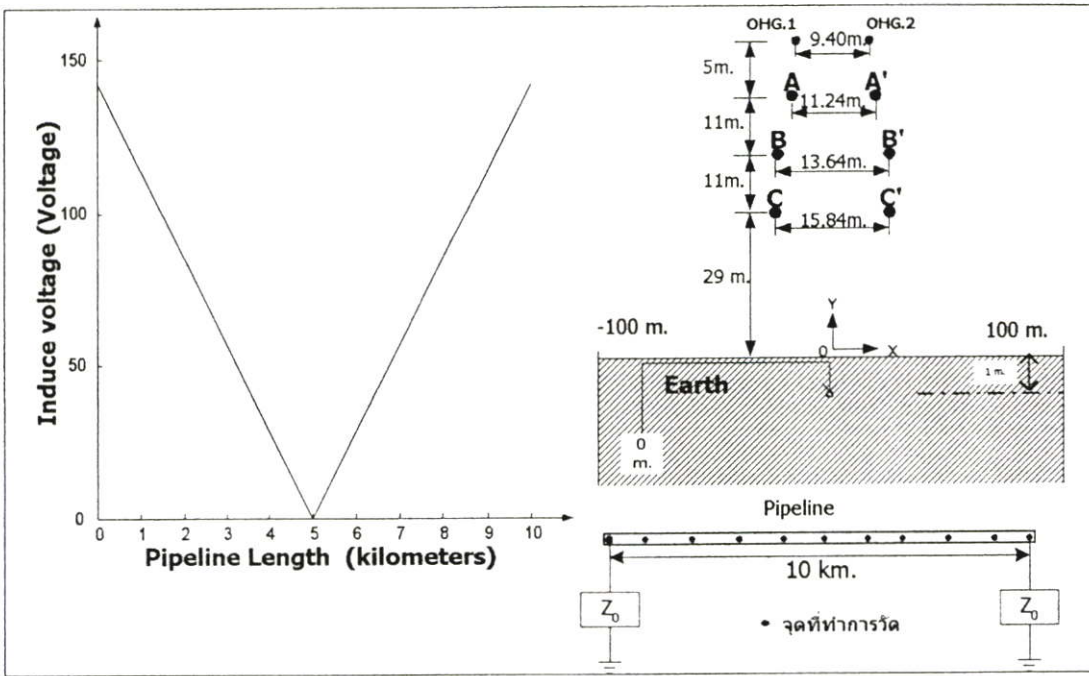
รูปที่ 5.29 โครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร

ลักษณะข้อมูล	เฟส	พิกัด		หน่วย
		X	Y	
ตำแหน่งสายตัวนำ	A	5.62	51	m
	B	6.82	40	m
	C	7.92	29	m
	A'	-5.62	51	m
	B'	-6.82	40	m
	C'	-7.92	29	m
	OHWG.1	-4.7	56	m
	OHWG.2	4.7	56	m
	กระแสไฟฟ้าของ สายส่ง	เฟส	ขนาด	มุม
A และ A'		500	0°	A
B และ B'		500	120°	A
C และ C'		500	-120°	A
OHWG.1		0	-	A
OHWG.2		0	-	A
ความถี่	เฟส	ขนาด	มุม	หน่วย
	A', B', C' A1, B1, C1,	50	-	H_z
ความต้านทาน จำเพาะของดิน	100			$\Omega - m$

5.2.1.4.1 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ

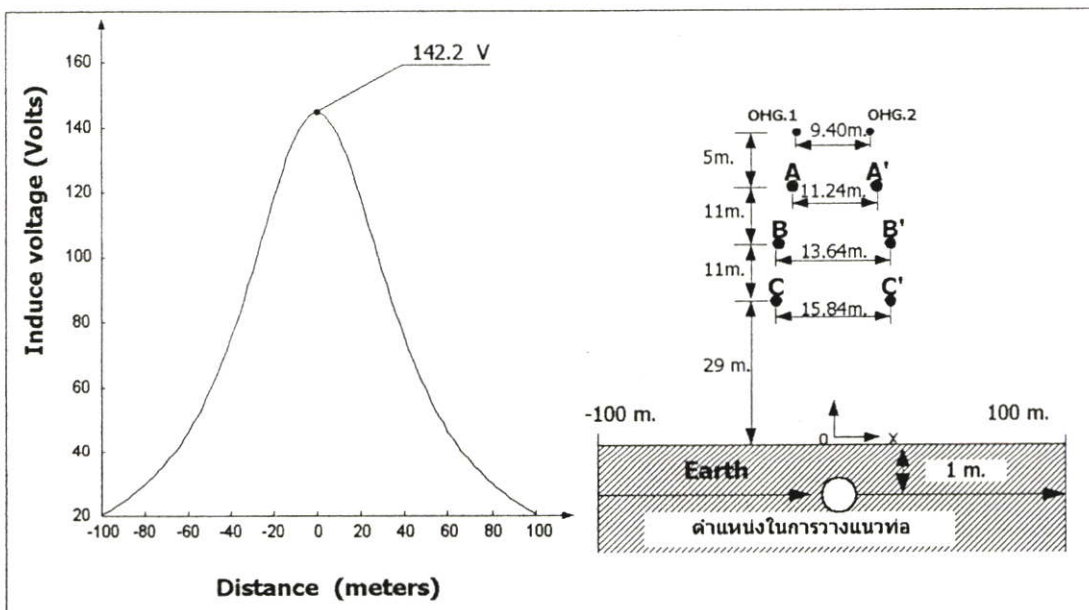
การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติที่จุดต่างๆทำได้โดยกำหนดให้ค่าความยาวคงที่เท่ากับ 10 กิโลเมตร และระยะระหว่างเสาส่งถึงแนวท่อ 17 เมตร ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดแรงดันต่ำสุดและแรงดันสูงสุดอยู่ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อ แสดงดังรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 แรงดันบนท่อส่งก๊าซกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร

5.2.1.4.2 แรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อตัน

ในการพิจารณาค่าแห่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดโดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวท่อส่งก๊าซผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.31

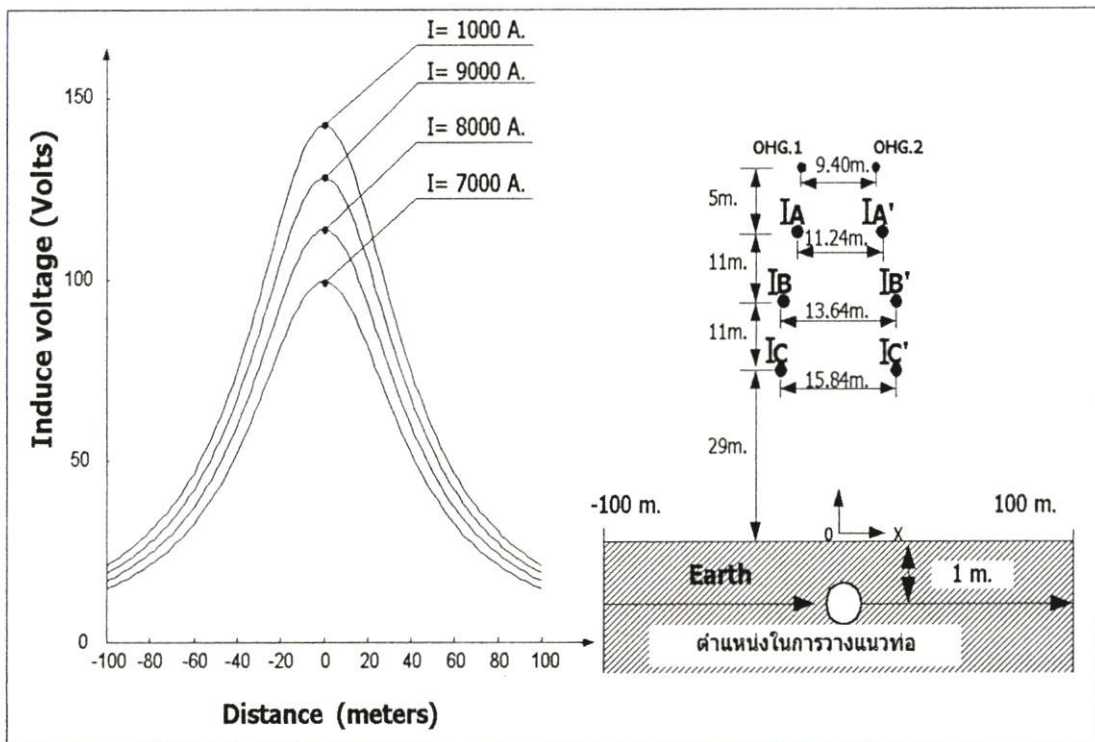


รูปที่ 5.31 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร

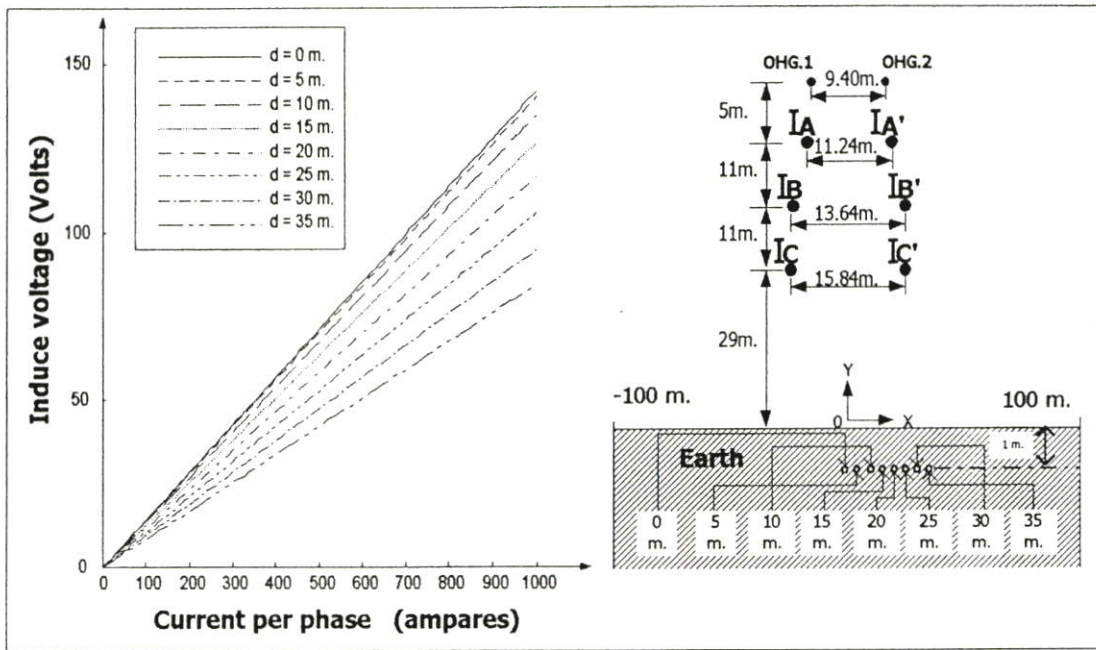
จากกราฟแสดงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด ท่อส่งก๊าซธรรมชาติมีค่าสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่งในการวางท่อใต้แนวสายส่ง และมีค่าเท่ากับ 142.2 โวลต์ ที่กระแส 1000 แอมป์และความยาวท่อ 10 กิโลเมตร ดังนั้นในการวางท่อส่งก๊าซกับระบบ 500 กิโลโวลต์ ที่โครงสร้างเสาส่งมีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร ควรหลีกเลี่ยงการวางแนวท่อส่งก๊าซใต้แนวสายส่ง แต่ถ้าจะวางแนวท่อนานกับระบบสายส่งนี้ควรมีการวางแนวท่อห่างจากแนวสายส่งไปทางด้านซ้ายหรือด้านขวาก็ได้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซลงได้

5.2.1.4.3 ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการส่งจ่าย

เมื่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้นหรือน้อยลงผลที่ตามมาคือกระแสที่ระบบไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงตามความต้องการนั้นด้วยเป็นผลทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อเมื่อกระแสของสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร

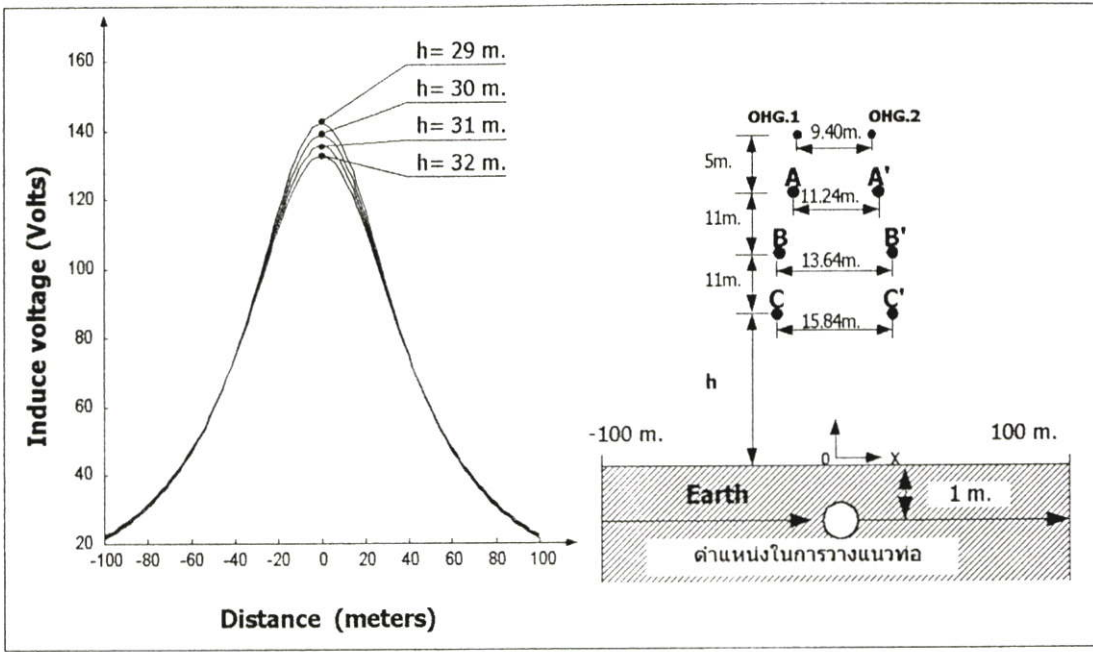


รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสของสายส่งกรณีเสาสูงที่มีการจัดวาง
ตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร

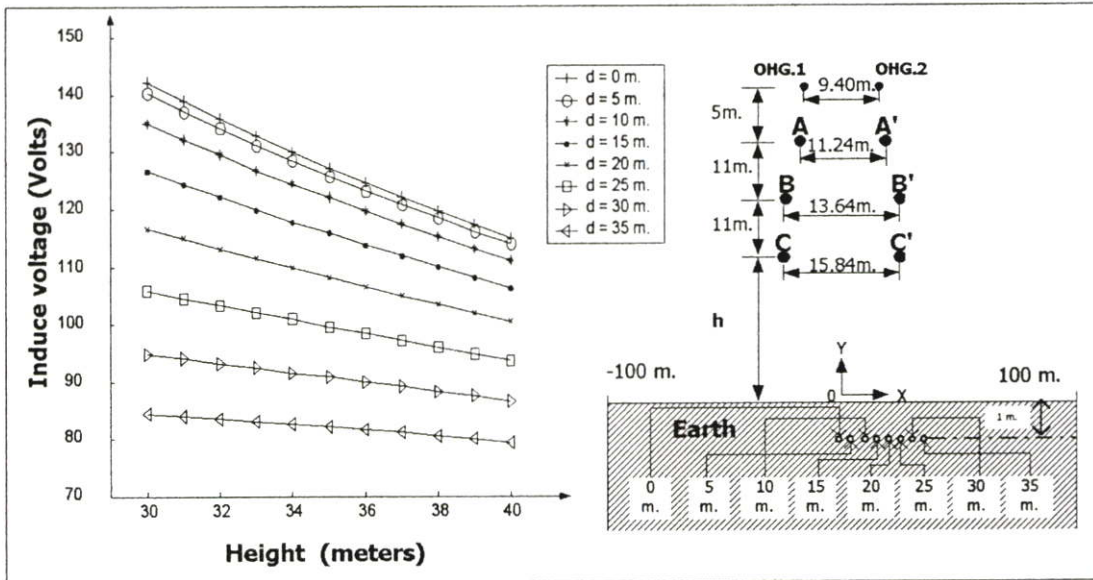
จากรูปที่ 5.32 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบน
ท่อที่ตำแหน่งในการวางท่อแตกต่างกันพบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าในสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น
แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสทุกๆตำแหน่งของการวางท่อโดย
อัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสกับแรงดันเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 5.33

5.2.1.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสา ส่งไฟฟ้า

ในการพิจารณาผลกระทบดังกล่าวสามารถทำได้โดยการเพิ่มความสูงของเสาส่งจากเดิม 29
เมตร เป็น 30, 31 และ 32 เมตร พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในการวางแนวท่อซึ่งผลที่ได้
แสดงดังรูปที่ 5.34 จากกราฟพบว่าเมื่อความสูงของเสาส่งมากขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงซึ่ง
อัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งแสดงดังรูปที่ 5.35



รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งที่ตำแหน่งต่างกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร

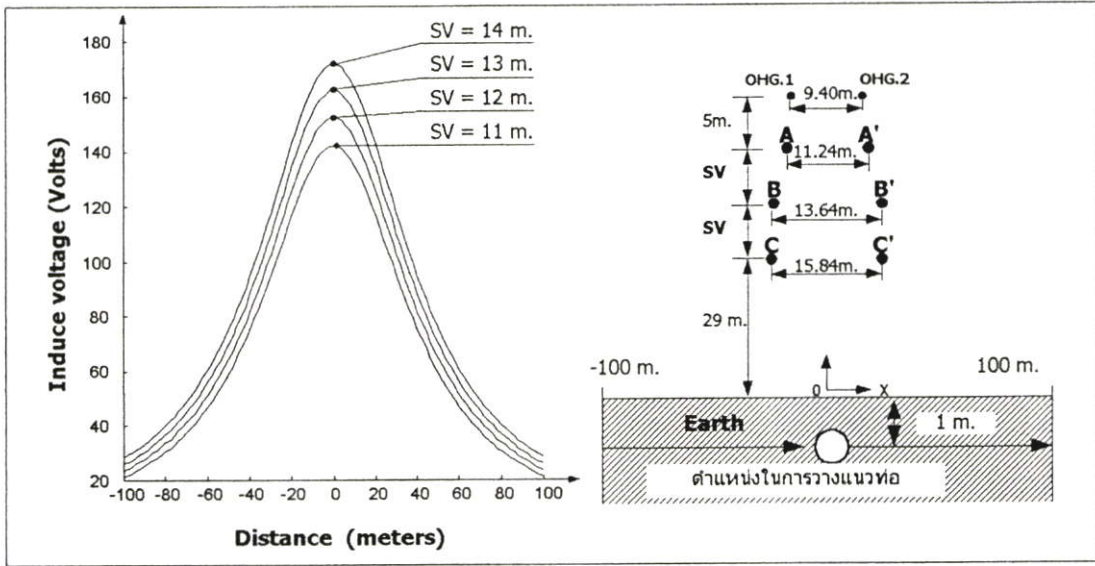


รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร

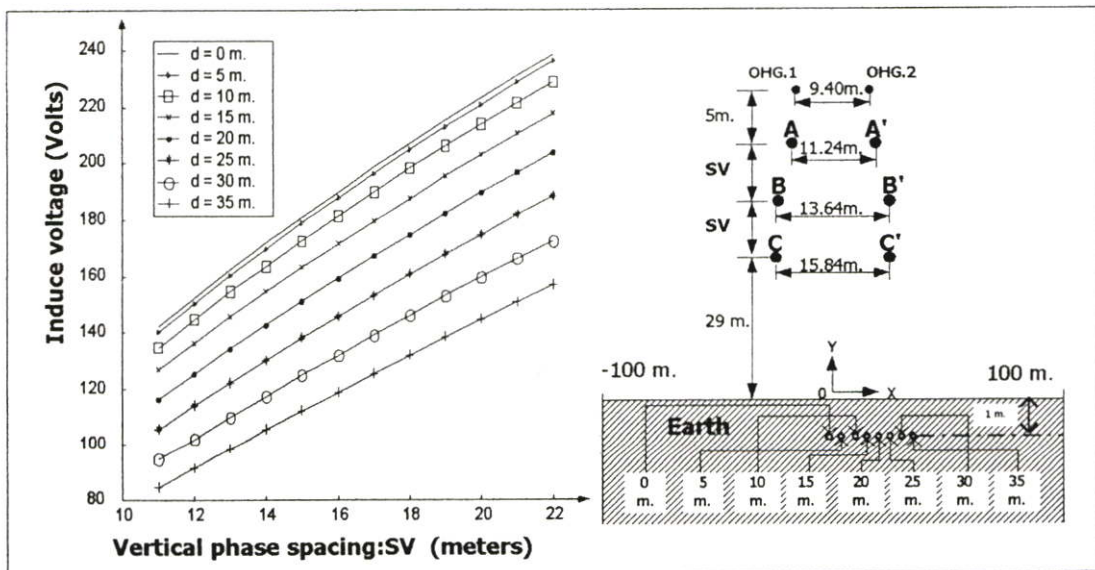
จากกราฟรูปที่ 5.35 แสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนั้นในแต่ละตำแหน่งของการวางท่อนั้นไม่เท่ากันคือตำแหน่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดเมื่อทำการเพิ่มความสูงของเสาส่งอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำก็จะมีค่าสูง

5.2.1.4.5 ผลกระทบของแรงดันเหนี่ยวนำกับการเพิ่มระยะเฟส

ในการพิจารณาระยะระหว่างตัวนำเปลี่ยนแปลงได้กำหนดให้ระยะตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง 2 ทิศทางคือการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้ง(SV)โดยการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจากเดิม 11 เมตรเป็น 12 , 13 และ 14 เมตร

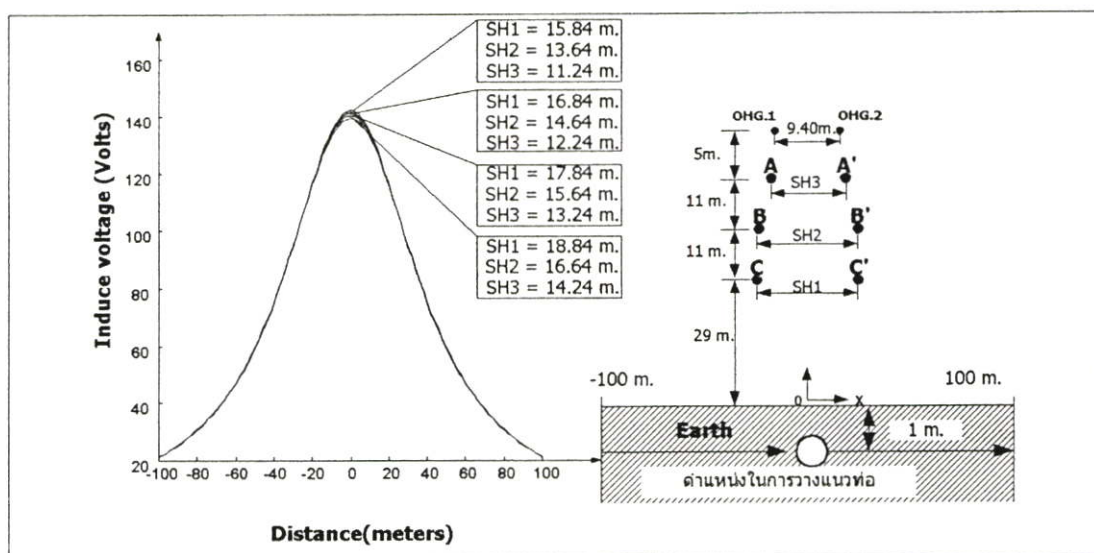


รูปที่ 5.36 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวตั้งที่แนวท่ออยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร

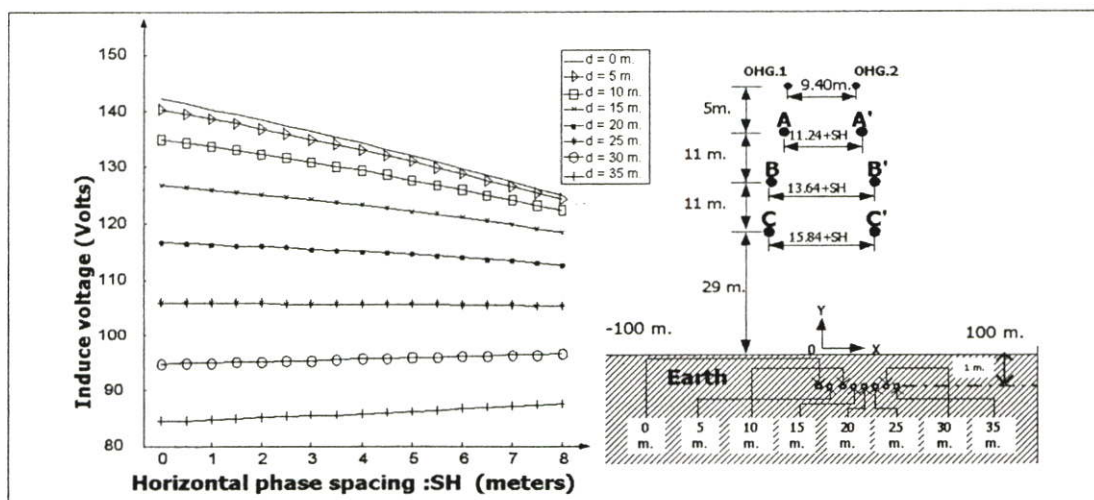


รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวตั้งกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร

และการเปลี่ยนแปลงในแนวนอน(SH) จากระยะห่างเดิม SH1= 15.84, SH2=13.64และ SH3=11.24 เมตร เป็น SH1= 16.84, SH2=14.64และ SH3=12.24 , SH1= 17.84, SH2=15.64และ SH3=13.24 และ SH1= 18.84, SH2=16.64และ SH3=14.24 พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวท่อ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.36 และรูปที่ 5.37 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นผลที่ได้จากการเพิ่มระยะระหว่างตัวนำทำให้ทราบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันในช่วงระยะระหว่างเฟสในแนวดิ่งเพิ่มขึ้นจากระยะระหว่างตัวนำเดิมแสดงดังรูปที่ 5.38และ5.39



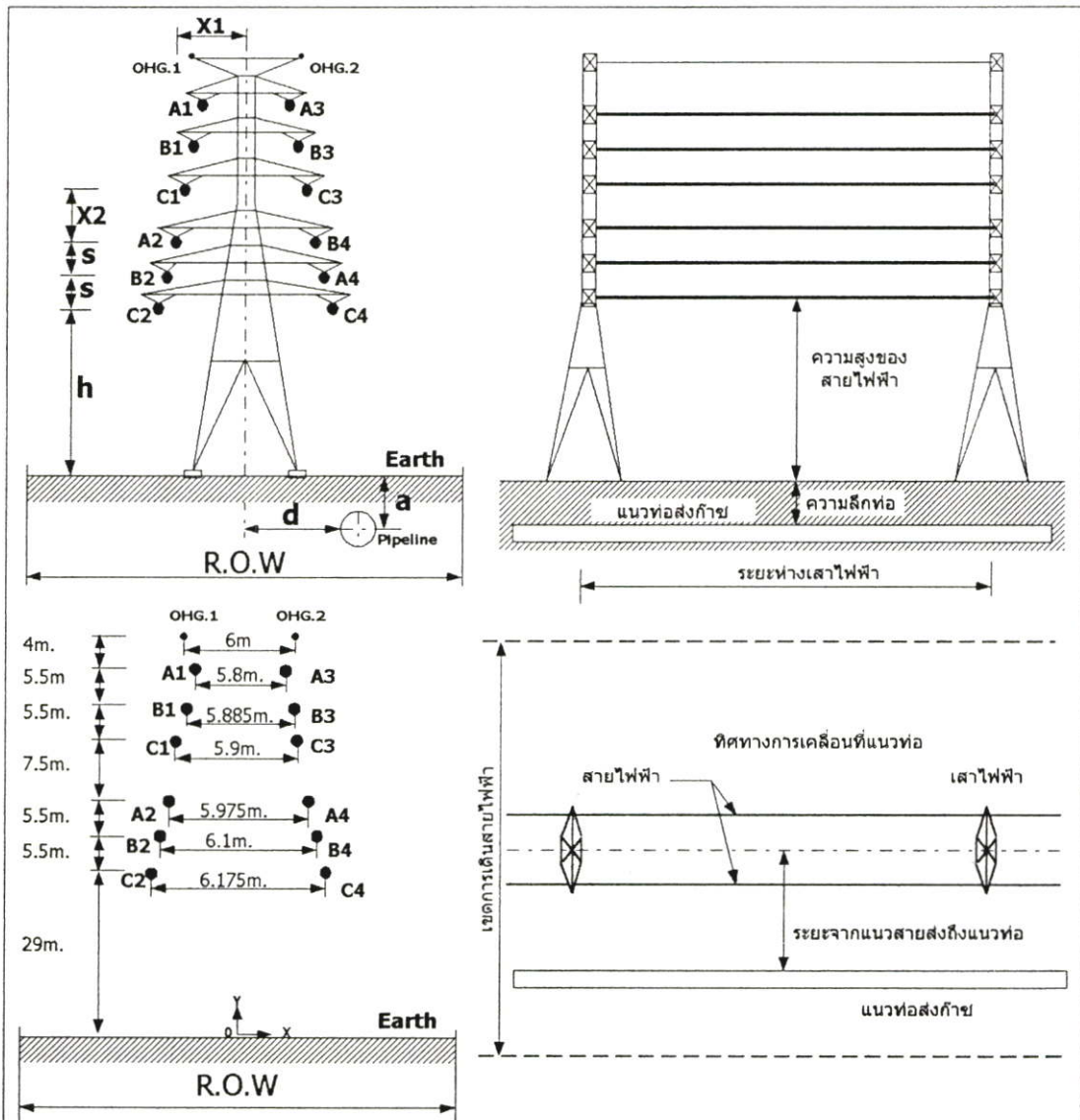
รูปที่ 5.38 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวนอนที่แนวท่ออยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวดิ่ง 2 วงจร



รูปที่ 5.39 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวนอนกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวดิ่ง 2 วงจร

5.2.1.5 โครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวในแนวตั้ง 4 วงจร

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซเนื่องจากลักษณะโครงสร้างของเสาสูงที่มีการจัดวางตัวในแนวตั้ง 4 วงจร ดังรูปที่ 5.40 ซึ่งเสาสูงที่นำมาวิเคราะห์เป็นเสาสูงที่ใช้ในการส่งจ่ายในระบบพิกัดแรงดัน 230 กิโลโวลต์ ในการวิเคราะห์เริ่มต้นจากการหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดต่างๆบนท่อนส่งก๊าซ แรงเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อนดิน ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการส่งจ่าย ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและความสูงของเสาสูง ผลกระทบของแรงดันเหนี่ยวนำกับการเพิ่มระยะเฟส ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะห่างระหว่างวงจร



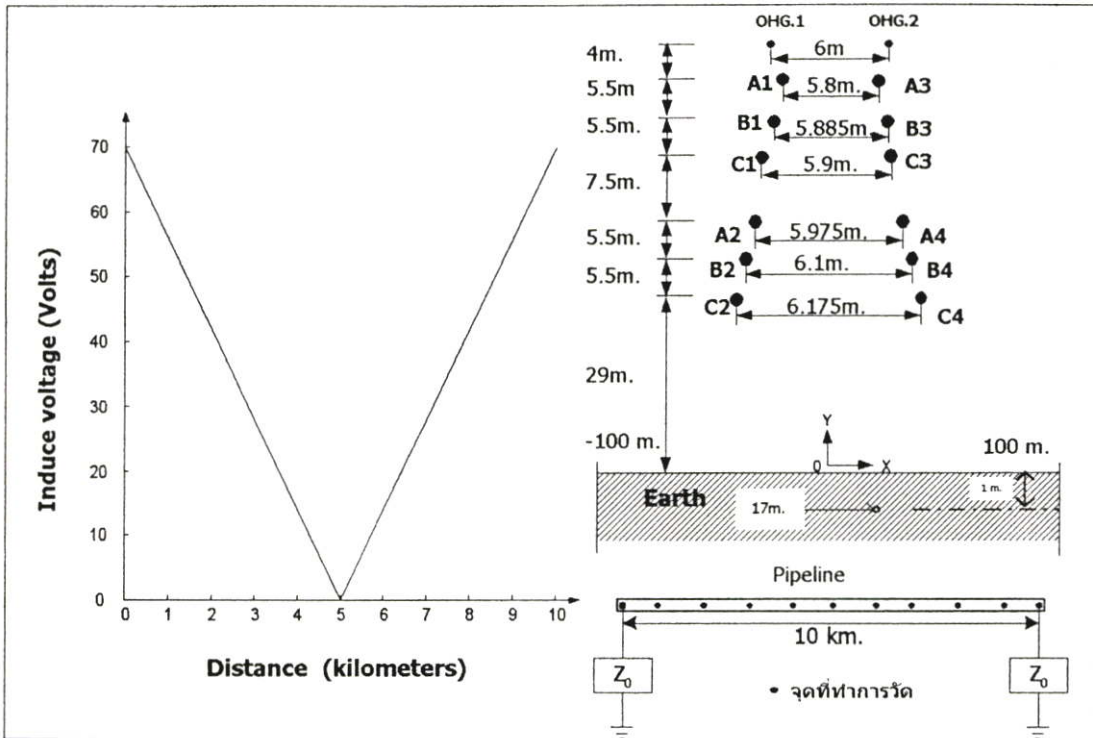
รูปที่ 5.40 โครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวในแนวตั้ง 4 วงจร

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลโครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร

ข้อมูล	เฟส	พิกัด		หน่วย	
		X	Y		
ตำแหน่งสายตัวนำ	A1	2.9	58.5	<i>m</i>	
	B1	2.943	53	<i>m</i>	
	C1	2.95	47.5	<i>m</i>	
	A2	2.988	40	<i>m</i>	
	B2	3.05	34.5	<i>m</i>	
	C2	3.088	29	<i>m</i>	
	A3	-2.9	58.5	<i>m</i>	
	B3	-2.943	53	<i>m</i>	
	C3	-2.95	47.5	<i>m</i>	
	A4	-2.988	40	<i>m</i>	
	B4	-3.05	34.5	<i>m</i>	
	C4	-3.088	29	<i>m</i>	
	OHWG.1	-3	62.5	<i>m</i>	
	OHWG.2	3	62.5	<i>m</i>	
		เฟส	ขนาด	มุม	หน่วย
	กระแสไฟฟ้าของสายส่ง	A1, A2, A3 และ A4	250	0°	A
		B1, B2, B3 และ B4	250	120°	A
C1, C2, C3 และ C4		250	-120°	A	
ความถี่	เฟส	ขนาด	มุม	หน่วย	
	A1, A2, A3 และ A4	50	-	H_z	
	B1, B2, B3 และ B4	50	-	H_z	
	C1, C2, C3 และ C4	50	-	H_z	
ความต้านทานจำเพาะของดิน	100			$\Omega - m$	

5.2.1.5.1 แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ

การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติที่จุดต่างๆทำได้โดยกำหนดให้ค่าความยาวคงที่เท่ากับ 10 กิโลเมตร ได้แนวสายส่ง ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดแรงดันเหนี่ยวนำต่ำสุดและแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดอยู่ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อนส่ง ดังรูปที่ 5.41

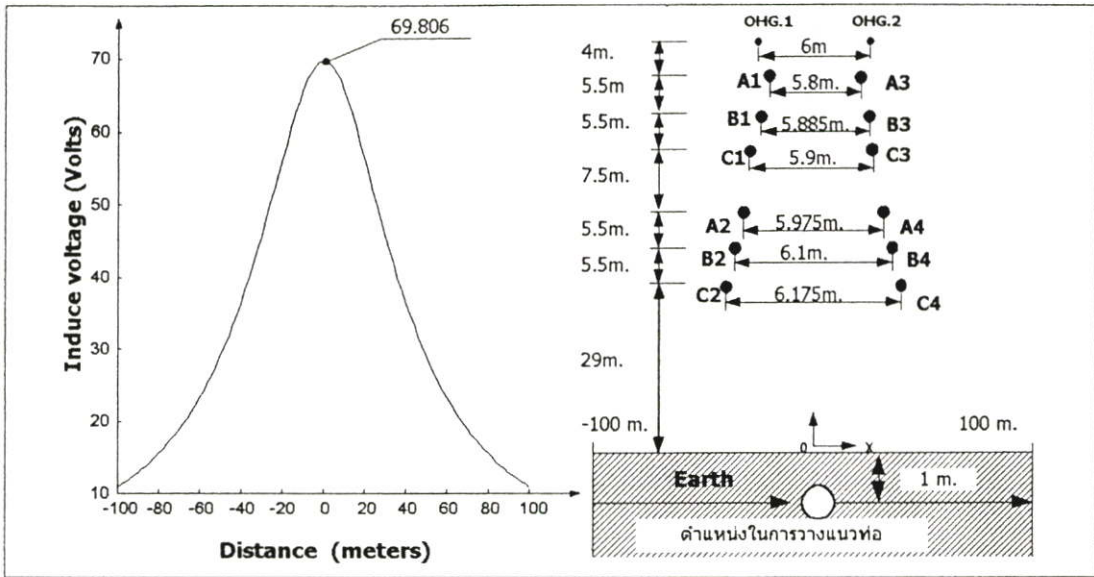


รูปที่ 5.41 แรงดันบนบนท่อส่งก๊าซกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร

จากรูปที่ 5.41 เมื่อทำการวางตำแหน่งของตัวนำไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางสายส่งซึ่งเป็นจุดที่แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดเมื่อทำการวัดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนจุดต่างๆบนท่อแสดงให้เห็นว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อ

5.2.1.5.2 แรงเหนี่ยวนำสูงสุดที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซ

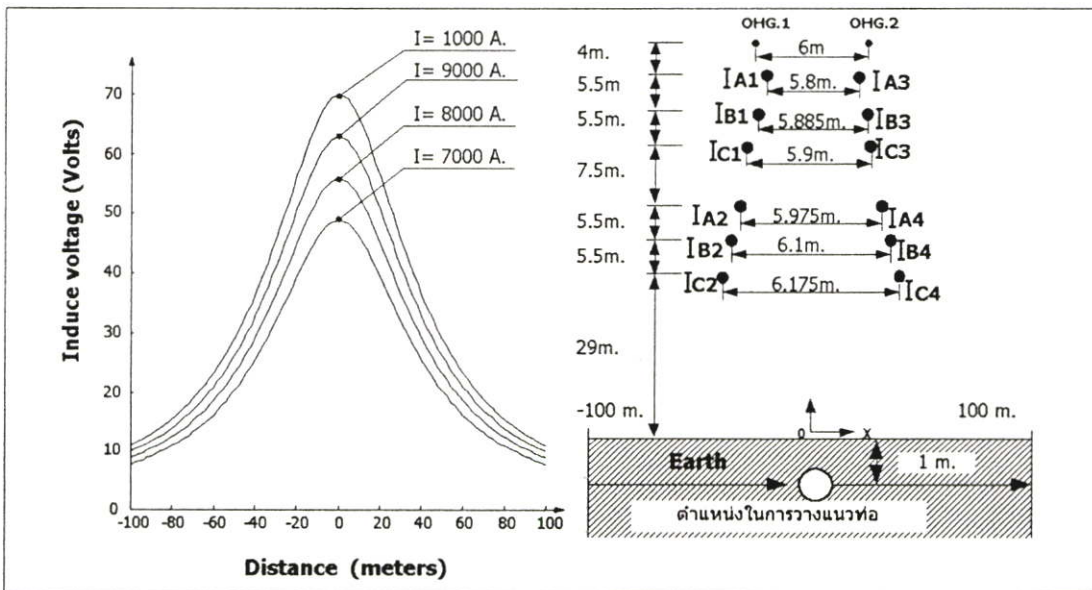
ในการพิจารณาหาตำแหน่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุด โดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวท่อส่งก๊าซผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.42 จากกราฟแสดงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดท่อส่งก๊าซพบว่าตำแหน่งในการวางท่อได้แนวสายส่งก่อให้เกิดแรงดันสูงสุด มีค่าเท่ากับ 69.806 โวลต์ ที่กระแส 1000 แอมป์และความยาวท่อ 10 กิโลเมตร ดังนั้นในการวางท่อส่งก๊าซกับระบบ 230 กิโลโวลต์ เมื่อลักษณะโครงสร้างเสาสูงมีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร ควรหลีกเลี่ยงการวางแนวท่อส่งก๊าซได้แนวสายส่ง แต่ถ้าจะวางแนวท่อนานกับระบบสายส่งนี้ควรมีการวางแนวท่อใกล้กับขอบของเขตการเดินสาย เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซลงได้



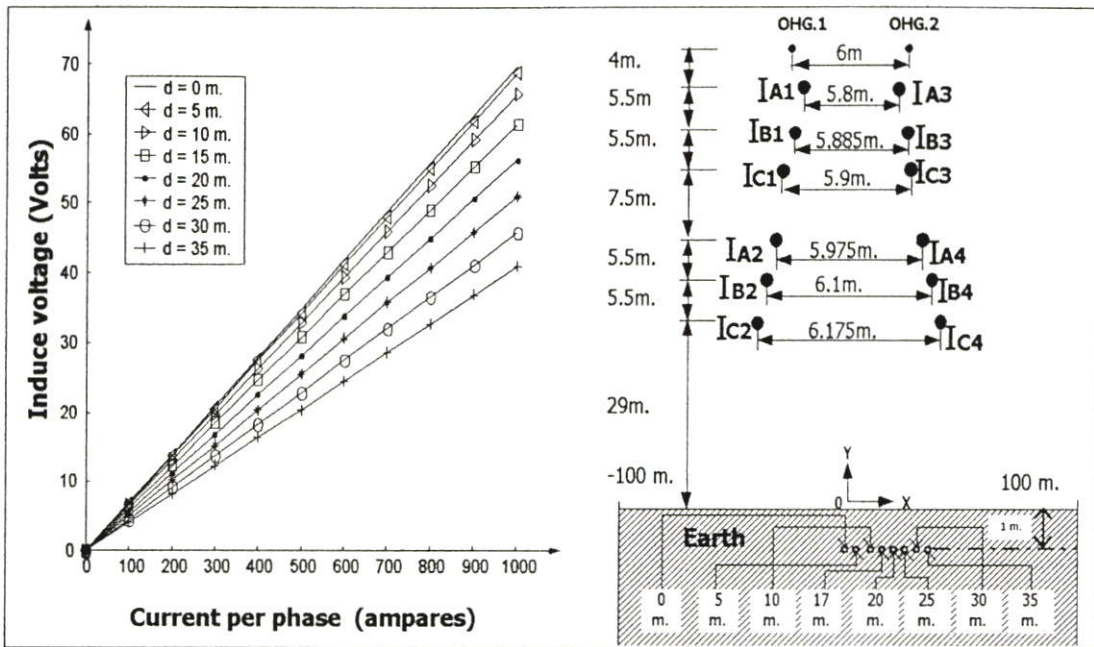
รูปที่ 5.42 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อนี่เสา
ส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร

5.2.1.5.3 ผลกระทบเมื่อระบบไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกำลังในการส่งจ่าย

เมื่อความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามีมากขึ้นหรือน้อยลงผลที่ตามมาคือกระแสที่ระบบไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงตามความต้องการนั้นด้วย เป็นผลทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่ง
ก็เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.43



รูปที่ 5.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะทางจากแนวสายส่งถึงแนวท่อนี่เสา
กระแสของสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร

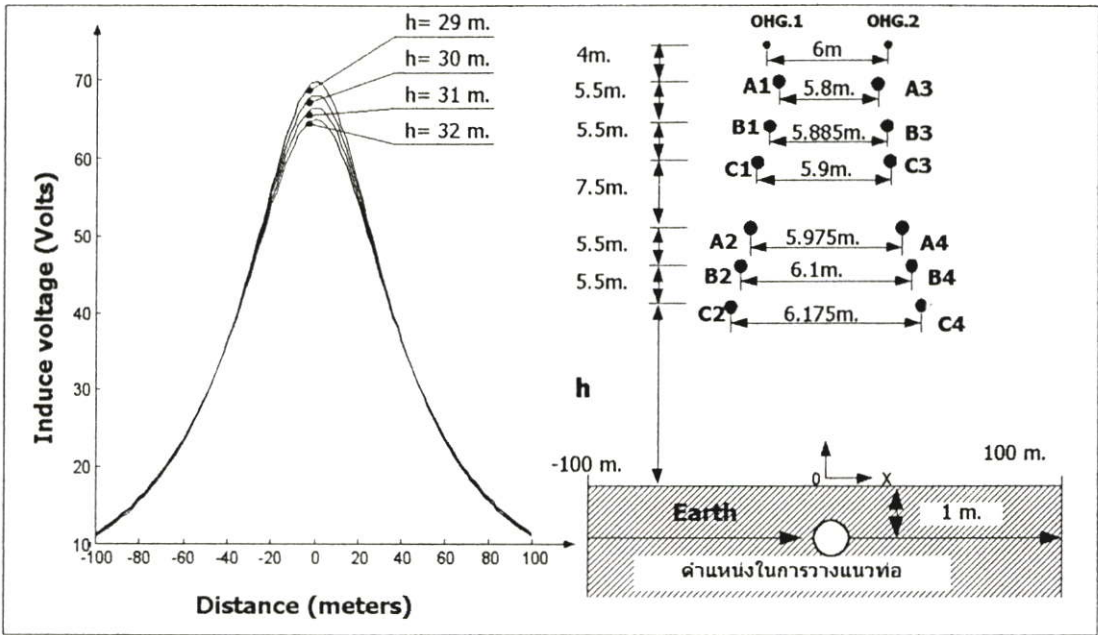


รูปที่ 5.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับกระแสของสายส่งกรณีเสาสูงที่มีการจัดวาง
คาน้ำในแนวตั้ง 4 วงจร

จากรูปที่ 5.43 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบน
ท่อที่ตำแหน่งในการวางท่อแตกต่างกันพบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าในสายส่งมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น
แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของกระแสทุกๆตำแหน่งของการวางท่อ โดย
อัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสกับแรงดันเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 5.44 จากกราฟแสดงให้
เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงระหว่างกระแสในสายส่งและแรงดันเหนี่ยวนำมีความเป็นเชิงเส้น และ
ตำแหน่งที่มีการเพิ่มแรงดันเหนี่ยวนำมากที่สุดคือตำแหน่งใต้แนวสายส่ง

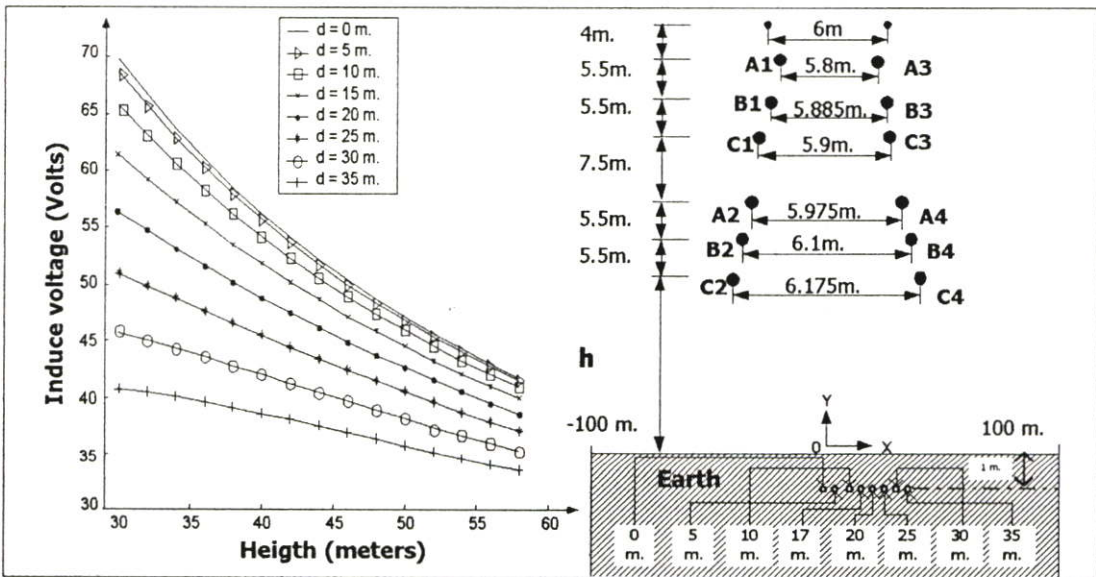
5.2.1.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำและความสูงของ เสาสูง

ในการพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับแรงดันเหนี่ยวนำเมื่อความสูงของเสาสูงเปลี่ยนแปลง
สามารถทำได้โดยการเพิ่มความสูงของเสาสูงจากเดิม 29 เมตร เป็น 30, 31 และ 32 เมตร พร้อมทั้ง
ทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในการวางแนวท่อซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.45 จากกราฟพบว่าเมื่อ
ความสูงของเสาสูงมากขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงระหว่างแรงดัน
เหนี่ยวนำกับความสูงของเสาสูงแสดงดังรูปที่ 5.46



รูปที่ 5.45 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งที่ตำแหน่งต่างๆกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร

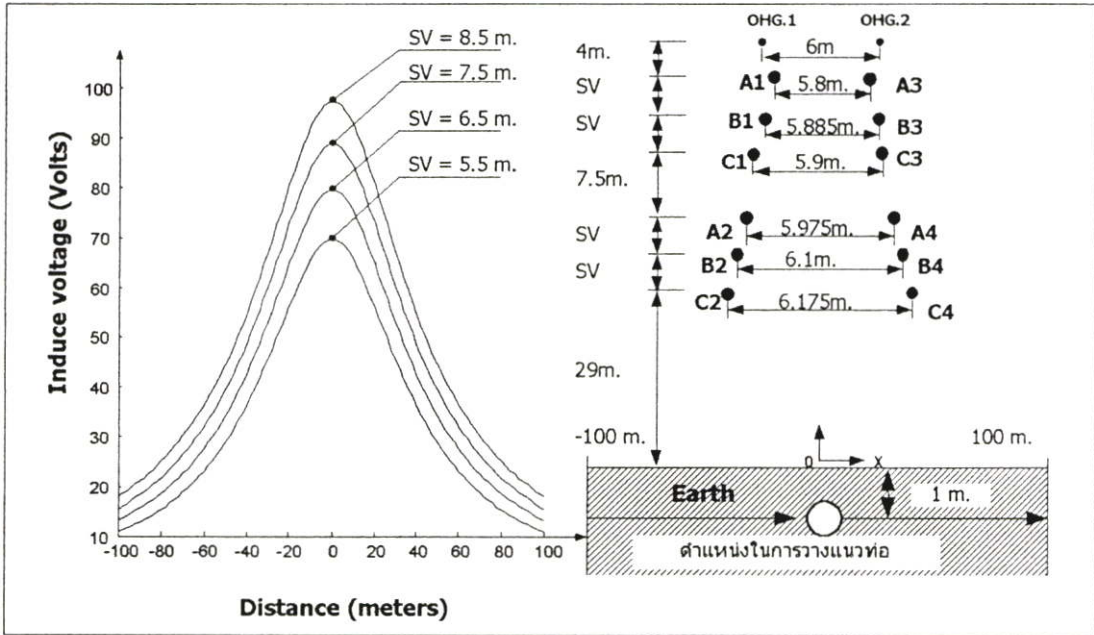
จากกราฟรูปที่ 5.45 แสดงให้เห็นว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนั้นในแต่ละตำแหน่งของการวางท่อนั้น ไม่เท่ากันคือตำแหน่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดเมื่อทำการเพิ่มความสูงของเสาส่งอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำก็จะมีค่าสูง



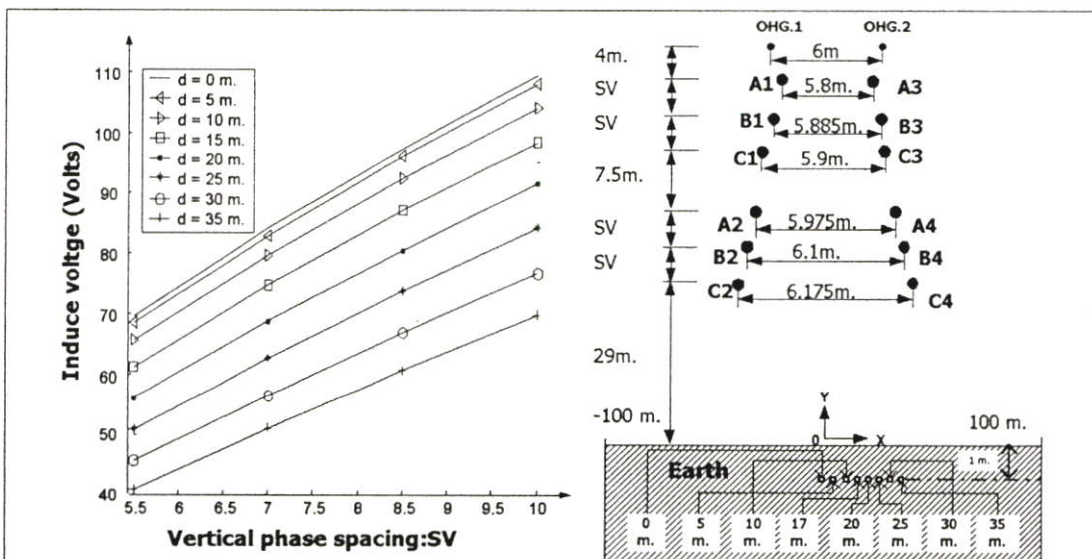
รูปที่ 5.46 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความสูงของเสาส่งกรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร

5.2.1.5.5 ผลกระทบของแรงดันเหนี่ยวนำกับการเพิ่มระยะเฟส

ในการพิจารณาผลกระทบระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสของสายส่งที่เปลี่ยนแปลงไป สามารถทำได้โดยกำหนดให้ระยะตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง 2 ทิศทาง คือการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้ง(SV) และการเปลี่ยนแปลงในแนวนอน(SH)

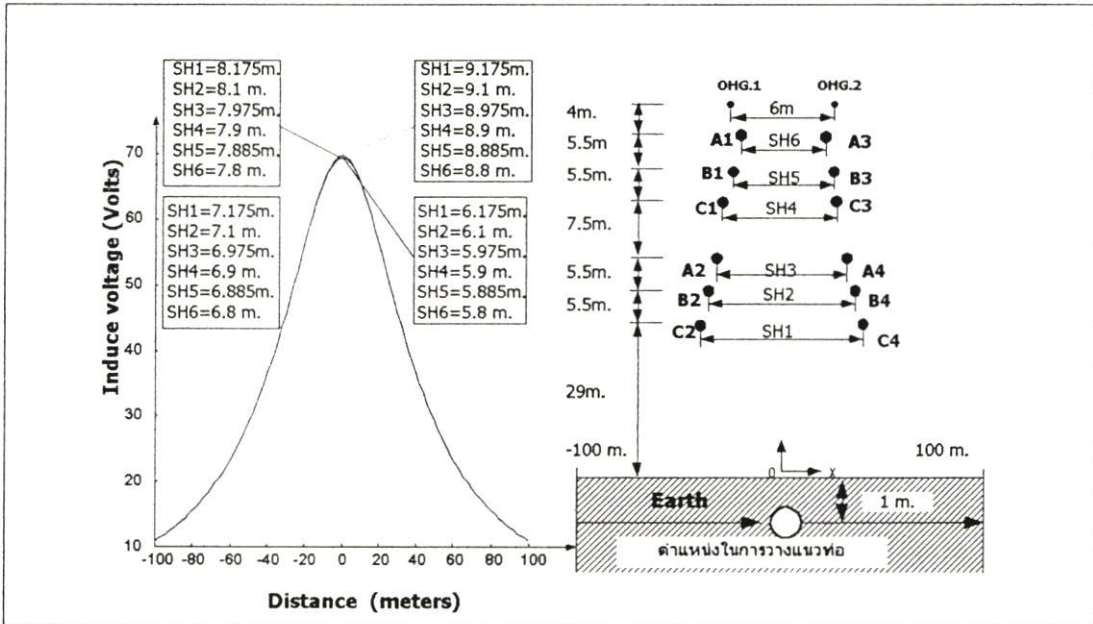


รูปที่ 5.47 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวตั้งที่แนวท่ออยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีสายส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร

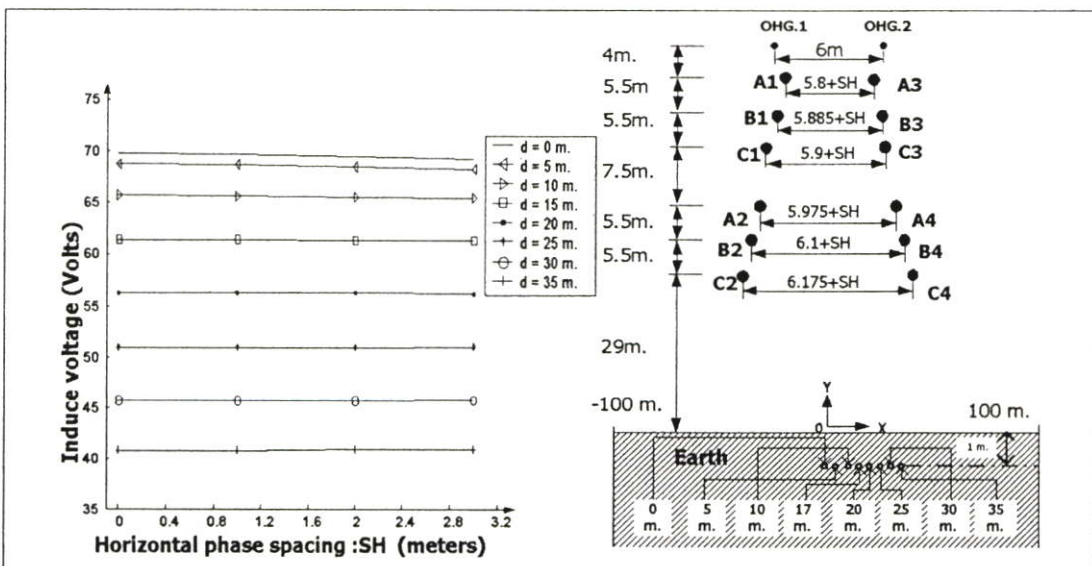


รูปที่ 5.48 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวตั้งกรณีสายส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นในแนวตั้ง 4 วงจร

จากระยะห่างพร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวท่อผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.47 และรูปที่ 5.49 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะระหว่างเฟสในแนวตั้งและในแนวนอน จะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งอัตราการเพิ่มของแรงดันเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 5.48 และ 5.50 จากกราฟทั้งสองแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันสูงสุดเมื่อทำการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจะทำให้อัตราการเพิ่มแรงดันเหนี่ยวนำสูงตามไปด้วย



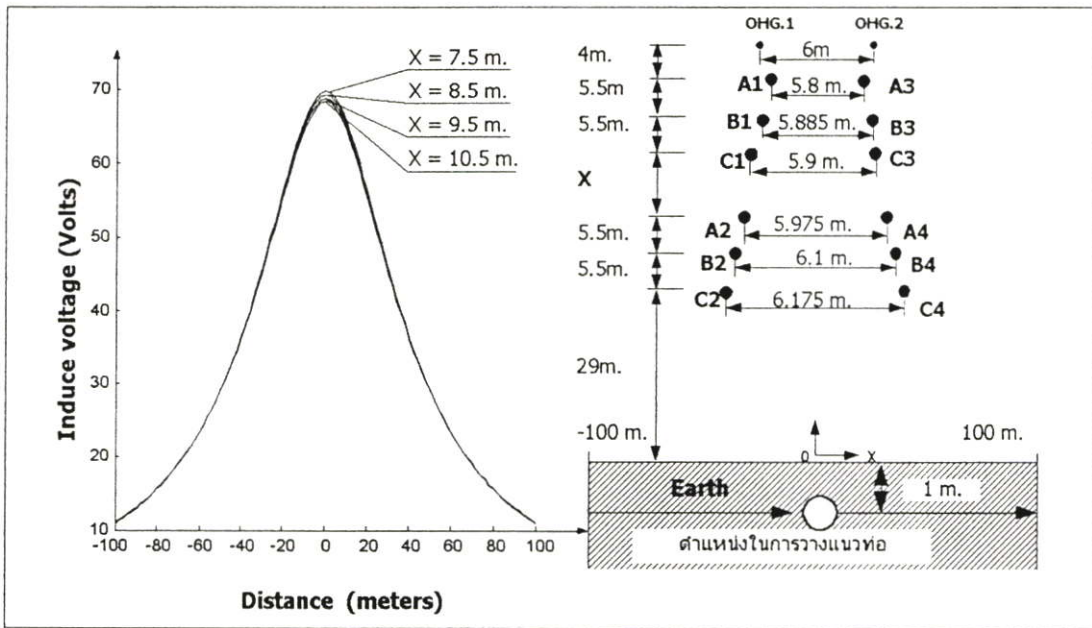
รูปที่ 5.49 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวนอนที่แนวท่ออยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร



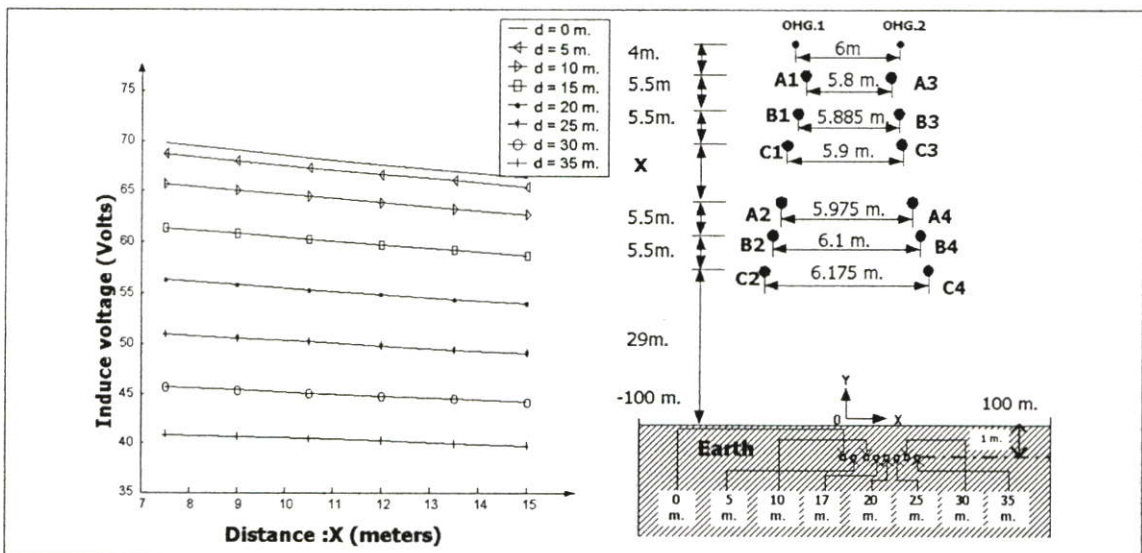
รูปที่ 5.50 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างเฟสในแนวนอนกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำเป็นในแนวตั้ง 4 วงจร

5.2.1.5.6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับการปรับระยะระหว่างวงจร

ในการพิจารณาระยะระหว่างตัวนำเปลี่ยนแปลงได้กำหนดให้ระยะตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงโดยการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจากเดิม 7.5 เมตรเป็น 8.5, 9.5 และ 10.5 เมตร พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแนวท่อผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.51



รูปที่ 5.51 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างวงจรที่แนวท่ออยู่ในตำแหน่งต่างๆ กรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร



รูปที่ 5.52 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับระยะระหว่างวงจรกรณีเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำเป็นในแนวตั้ง 4 วงจร

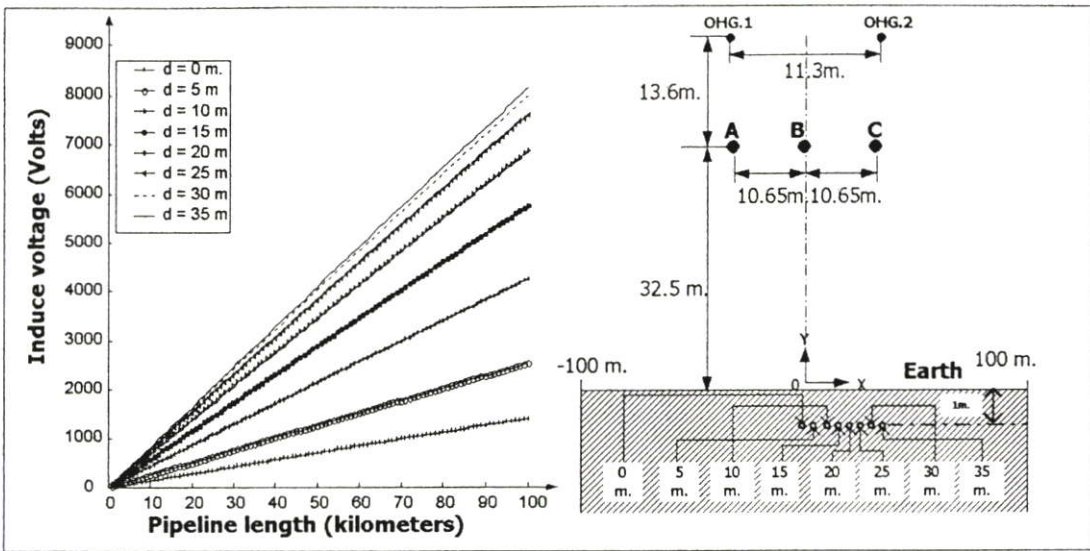
จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะระหว่างวงจรจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลง และอัตราการลดลงของแรงดันเหนี่ยวนำแสดงดังรูปที่ 5.52 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่ลดลงแต่ละตำแหน่งของการวางท่อจะไม่เท่ากัน ซึ่งตำแหน่งในการวางท่อที่มีการลดทอนมากที่สุดเมื่อเพิ่มระยะระหว่างวงจรคือตำแหน่งใต้แนวสายส่ง

5.2.2 ในกรณีที่พารามิเตอร์ของท่อมีการเปลี่ยนแปลง

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจากพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปเพื่อเป็นการทำนายแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นซึ่งในหัวข้อนี้ได้นำเอาระบบส่งจ่ายที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนมาทำการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกได้ดังนี้ การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำเนื่องจาก กรณีความยาวของท่อมีการเปลี่ยนแปลง กรณีความลึกของท่อมีการเปลี่ยนแปลง กรณีความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนแปลง กรณีความต้านทานจำเพาะฉนวนของท่อเปลี่ยนแปลง กรณีความหนาของท่อมีการเปลี่ยนแปลง กรณีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเปลี่ยนแปลง กรณีค่าความซึมซาบแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เมื่ออิมพีแดนซ์ของโหลดและอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีการเปลี่ยนแปลง

5.2.2.1 กรณีความยาวของท่อมีการเปลี่ยนแปลง

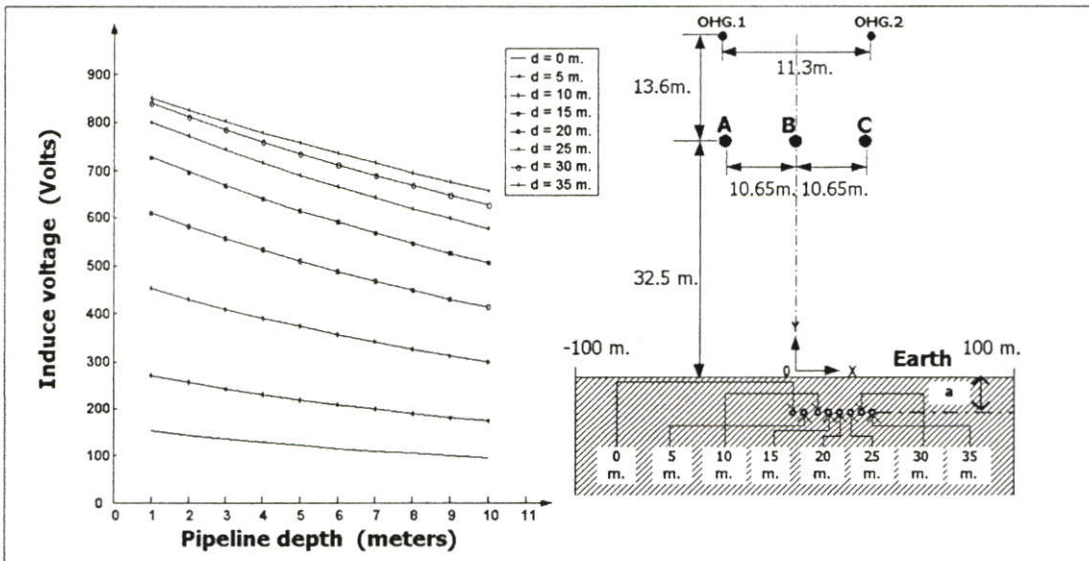
ในการพิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของท่อส่งก๊าซสามารถทำได้โดยการเพิ่มความยาวโดยเริ่มตั้งแต่ความยาว 1 เมตร ถึง 100 กิโลเมตร พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของการวางแนวท่อส่งก๊าซผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.53 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความยาวของท่อส่งก๊าซจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆตำแหน่งของการวางท่อและอัตราการเปลี่ยนแปลงในแต่ละตำแหน่งของการวางท่อและการเปลี่ยนแปลงแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเป็นเชิงเส้นกับความยาวของท่อพบว่าตำแหน่งในการวางท่อที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดอัตราการเพิ่มของแรงดันเหนี่ยวนำก็จะสูงขึ้นด้วย



รูปที่ 5.53 อัตราการเปลี่ยนแปลงความยาวท่อกับแรงดันเหนี่ยวนำ

5.2.2.2 กรณีความลึกของท่อมีการเปลี่ยนแปลง

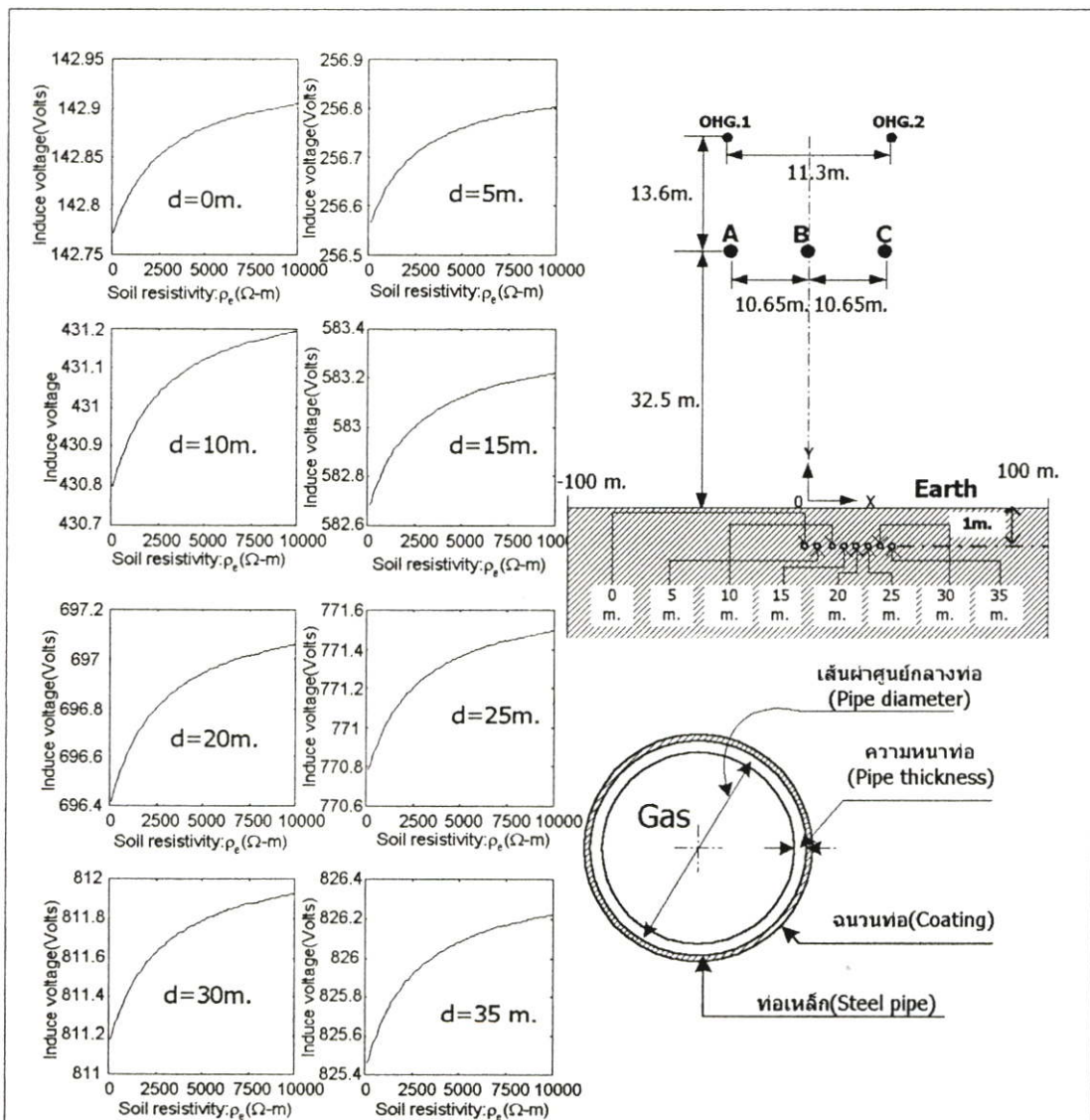
ในการพิจารณาผลของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเมื่อความลึกในการฝังท่อส่งก๊าซเพิ่มมากขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มความลึกของท่อจาก 1 เมตร ถึง 10 เมตร พร้อมทั้งทำการเปลี่ยนตำแหน่งในการวางแนวท่อผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.54 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าเมื่อความลึกของท่อมีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงและพบว่าตำแหน่งของท่อที่มีการลดลงของแรงดันเหนี่ยวนำมากที่สุดคือตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุด



รูปที่ 5.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความลึกของท่อ(a)

5.2.2.3 กรณีความต้านทานจำเพาะของดินเปลี่ยนแปลง

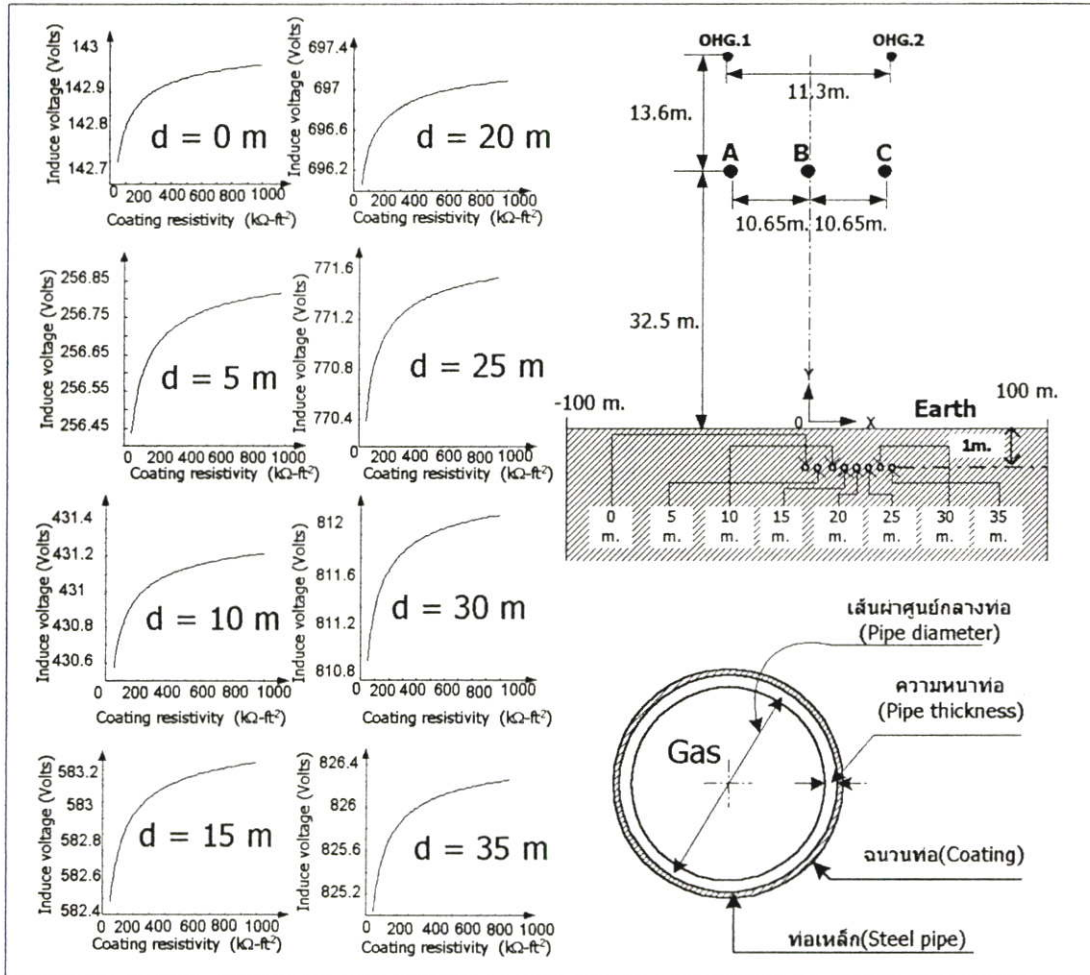
ในการติดตั้งท่อส่งก๊าซธรรมชาติในทางปฏิบัติแล้วค่าความต้านทานจำเพาะของดินในแต่ละพื้นที่ไม่เท่ากันดังนั้นในหัวข้อนี้ได้ทำการพิจารณาความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับค่าความต้านทานจำเพาะของดินผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.55 จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ตำแหน่งในการวางท่อใต้แนวสายส่งและห่างจากแนวสายส่ง 5, 10, 15, 20, 25, 30 และ 35 เมตร ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆตำแหน่งในการวางแนวท่อแต่แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก



รูปที่ 5.55 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ_e)

5.2.2.4 กรณีความต้านทานจำเพาะของท่อเปลี่ยนแปลง

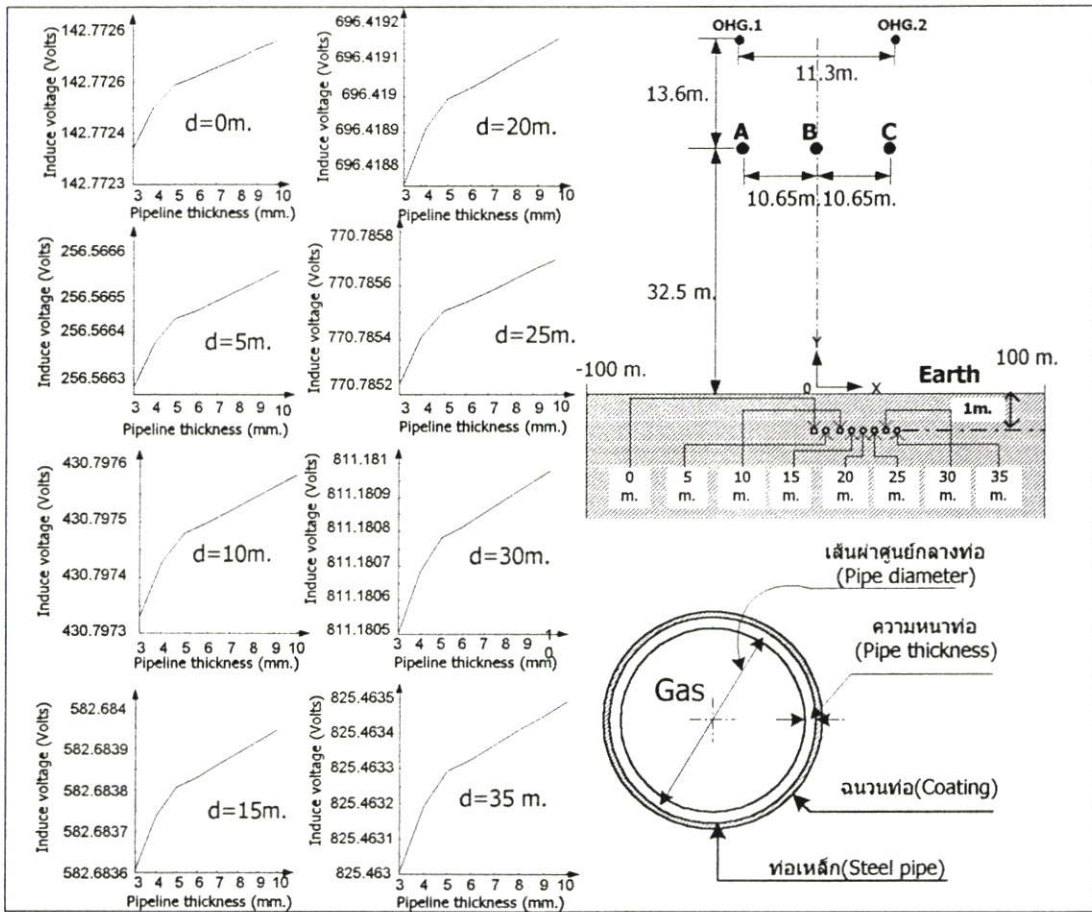
ในทางปฏิบัติได้มีการเปลี่ยนแปลงฉนวนที่ใช้ในการหุ้มท่อส่งก๊าซเนื่องจากการติดตั้งระบบป้องกันสนิม ดังนั้นในหัวข้อนี้ได้แสดงให้เห็นถึงผลกระทบต่อแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของฉนวนที่เปลี่ยนแปลงไปที่ได้อธิบายดังรูปที่ 5.56



รูปที่ 5.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความต้านทานจำเพาะของฉนวน (R_c)

5.2.2.5 กรณีที่ความหนาของท่อมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

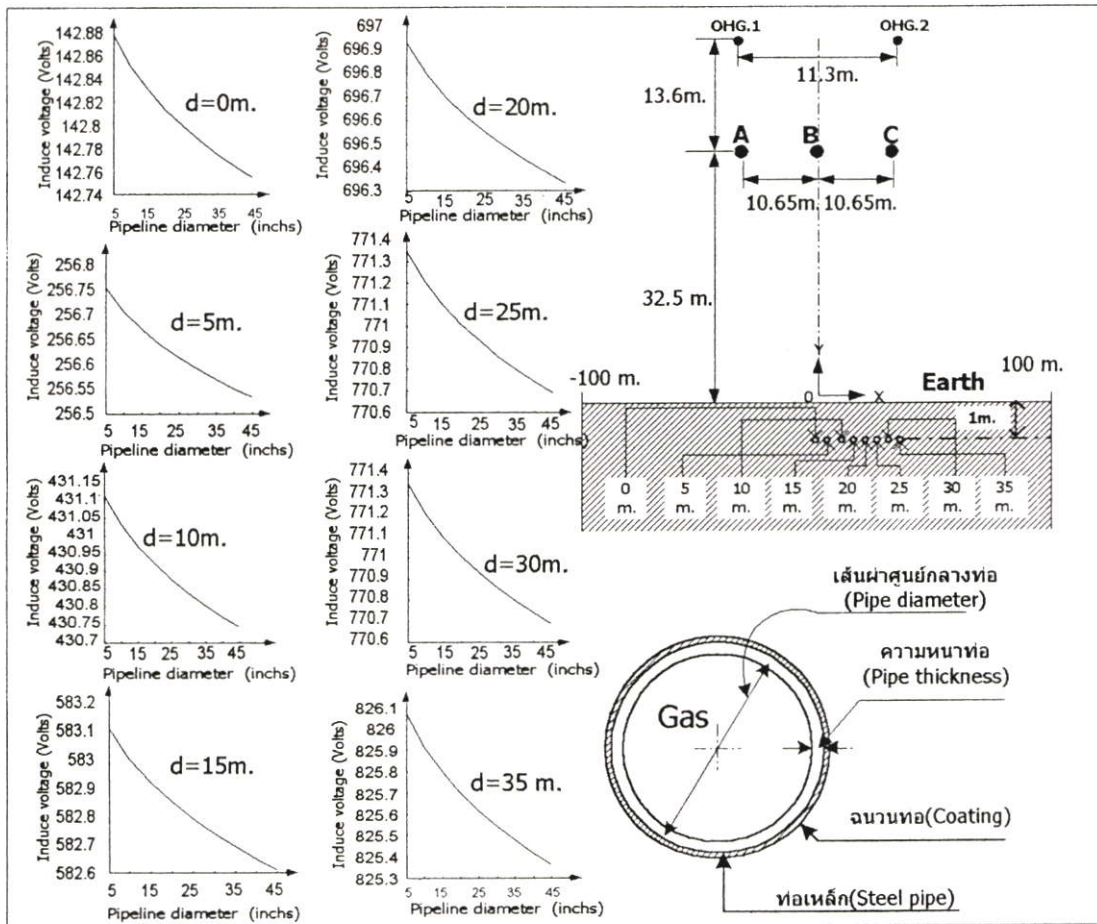
ในการส่งก๊าซไปสู่อุตสาหกรรมที่อยู่ห่างไกลจากโรงแยกก๊าซจำเป็นต้องเพิ่มแรงดันในการส่งก๊าซให้สูงขึ้นเพื่อให้ก๊าซไปถึงผู้ใช้ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มความหนาของท่อส่งก๊าซเพื่อให้มีความคงทนต่อแรงดันที่ใช้ในการส่งก๊าซ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะพิจารณาให้เห็นว่าเมื่อความหนาของท่อส่งก๊าซมีค่ามากขึ้นจะมีผลกระทบอย่างไรกับแรงดันเหนี่ยวนำซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยการเพิ่มความหนาของท่อจากเดิม 3 มิลลิเมตร ถึง 10 มิลลิเมตร ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.57 พบว่าเมื่อความหนาของท่อส่งก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามแต่การเพิ่มขึ้นของแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าน้อยมากซึ่งอาจกล่าวได้ว่าแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของท่อส่งก๊าซ



รูปที่ 5.57 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาท่อกับแรงดันเหนี่ยวนำ(t)

5.2.2.6 กรณีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีการเปลี่ยนแปลง

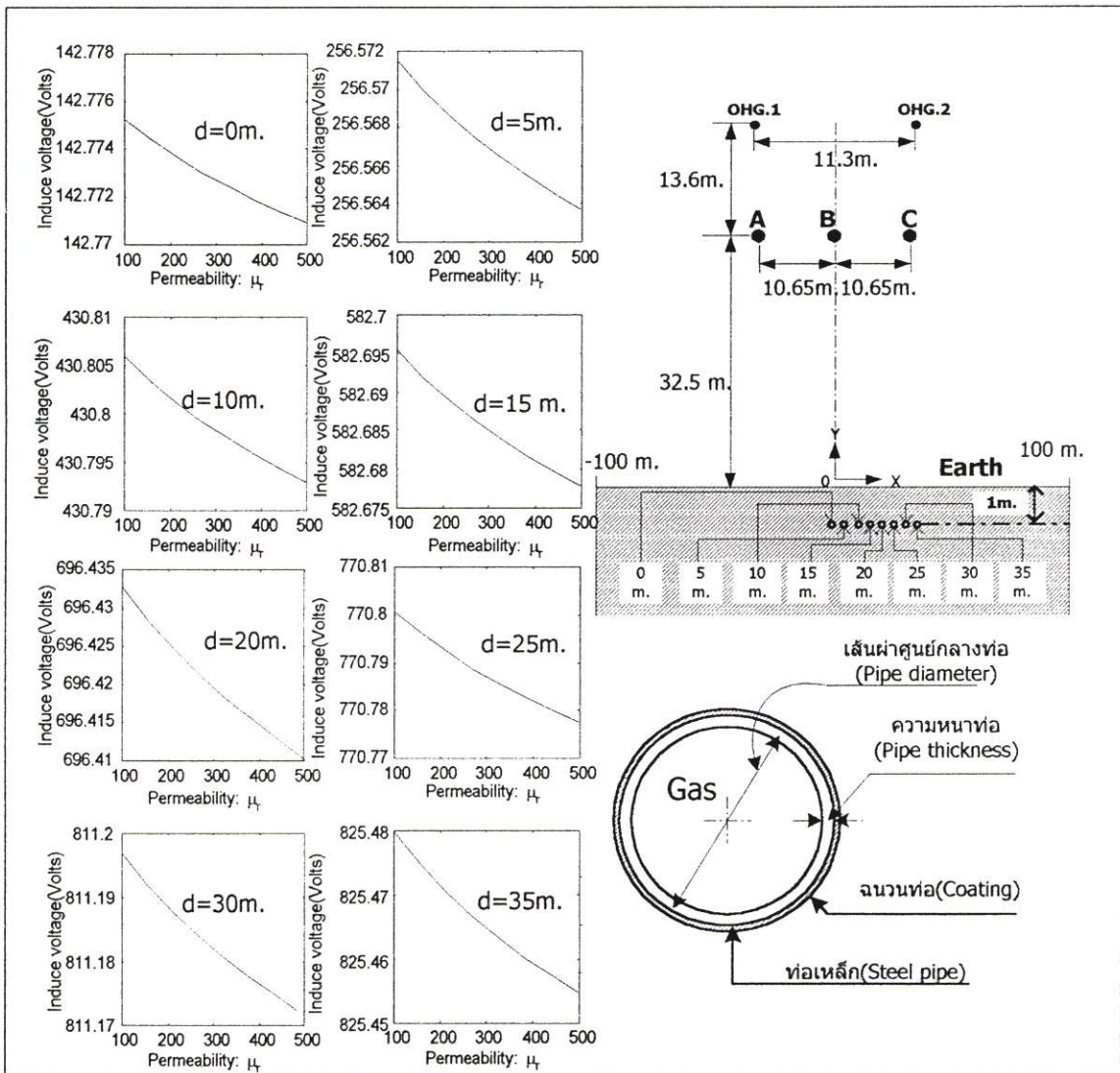
ในการส่งก๊าซไปสู่อุตสาหกรรมในแต่ละแห่งจะไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความต้องการของแต่ละอุตสาหกรรม เป็นผลให้ขนาดของท่อส่งก๊าซไม่เท่ากันดังนั้นในหัวข้อนี้จะพิจารณาให้เห็นว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีการเปลี่ยนแปลงไปจะมีผลกระทบต่ออย่างไรกับแรงดันเหนี่ยวนำซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้โดยเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อจาก 5 นิ้ว ถึง 45 นิ้ว ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.58 พบว่าเมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่งก๊าซมีค่าเพิ่มขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงแต่อัตราการลดลงของแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 5.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อส่งก๊าซ (D)

5.2.2.7 กรณีค่าความซึมซาบแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง

ในการพิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเมื่อค่าความซึมซาบแม่เหล็กของท่อมีค่าเปลี่ยนแปลง โดยปกติแล้วโลหะที่นำมาทำเป็นเหล็กซึ่งมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กอยู่ประมาณ 200-300 [4] ดังนั้นในการพิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำเมื่อค่าความซึมซาบแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงสามารถทำได้โดยกำหนดให้ ค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของท่อส่งก๊าซต่ำสุดที่ 100 และสูงสุดที่ 500 ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 5.59 พบว่าเมื่อความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของท่อส่งก๊าซมีค่าสูงขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลงแต่อัตราการลดลงของแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าน้อยมากอาจกล่าวได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่งก๊าซไม่มีผลกับแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซ



รูปที่ 5.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับความซึมซาบสัมพัทธ์ของท่อ (μ_r)

5.2.2.8 เมื่ออิมพีแดนซ์ของโหลดและอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีการเปลี่ยนแปลง

ในการพิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซเมื่ออิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและอิมพีแดนซ์ของโหลดมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายคือค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดเริ่มต้นของท่อส่งก๊าซและ ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดคือค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดสิ้นสุดของท่อส่งก๊าซ โดยทั่วไปจะเรียกว่าเป็น เทอร์มินอลอิมพีแดนซ์ (terminal Impedance) ดังนั้นในการพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและของโหลดจะขึ้นอยู่กับลักษณะการต่อของท่อที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อสามารถแยกได้ดังตารางที่ 5.8 และตำแหน่งในการวางแนวท่อ 35 เมตรจากแนวสายส่งผลกระทบที่เกิดขึ้นกับแรงดันเหนี่ยวนำเมื่อสภาวะโหลดเปลี่ยนแปลง ไปแสดงดังรูปที่ 5.60 ถึง 5.65

ตารางที่ 5.8 เงื่อนไขอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลด

เงื่อนไข	ลักษณะของการเชื่อมต่อ		ค่าอิมพีแดนซ์	
	จุดเริ่มต้น	จุดสิ้นสุด	แหล่งจ่าย	โหลด
1	ต่อกราวด์	ต่อกราวด์	$Z_1 = 0$	$Z_2 = 0$
2	ต่อท่อส่งก๊าซ	ต่อท่อส่งก๊าซ	$Z_1 = Z_0$	$Z_2 = Z_0$
3	ต่อฉนวน	ต่อฉนวน	$Z_1 = \infty$	$Z_2 = \infty$
4	ต่อกราวด์	ต่อท่อส่งก๊าซ	$Z_1 = 0$	$Z_2 = Z_0$
5	ต่อกราวด์	ต่อฉนวน	$Z_1 = 0$	$Z_2 = \infty$
6	ต่อท่อส่งก๊าซ	ต่อกราวด์	$Z_1 = Z_0$	$Z_2 = 0$
7	ต่อท่อส่งก๊าซ	ต่อฉนวน	$Z_1 = Z_0$	$Z_2 = \infty$
8	ต่อฉนวน	ต่อกราวด์	$Z_1 = \infty$	$Z_2 = 0$

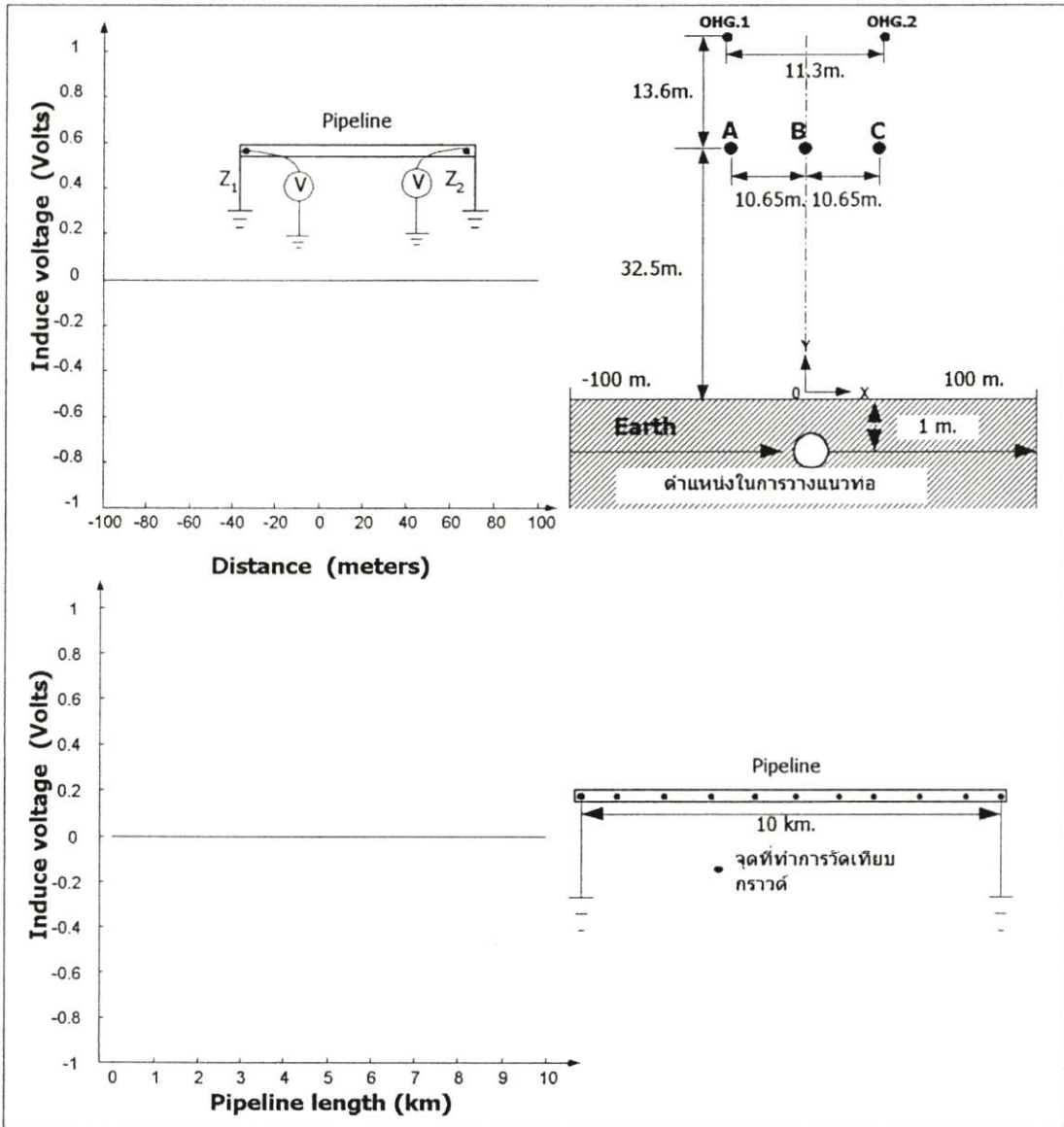
เมื่อทำการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและอิมพีแดนซ์ของโหลดพบว่า

- กรณีที่ 1 แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับศูนย์ตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อเนื่องจากการต่อกราวด์ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อดังรูปที่ 5.60
- กรณีที่ 2 แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อดังรูปที่ 5.61
- กรณีที่ 3 แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดแนวท่อ
- กรณีที่ 4 แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดเริ่มต้นและมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดสิ้นสุดแนวท่อเนื่องจากการต่อกราวด์ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดต่อกับท่อ
- กรณีที่ 5 แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดเริ่มต้นและมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดสิ้นสุดแนวท่อเนื่องจากการต่อกราวด์ที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดต่อฉนวน

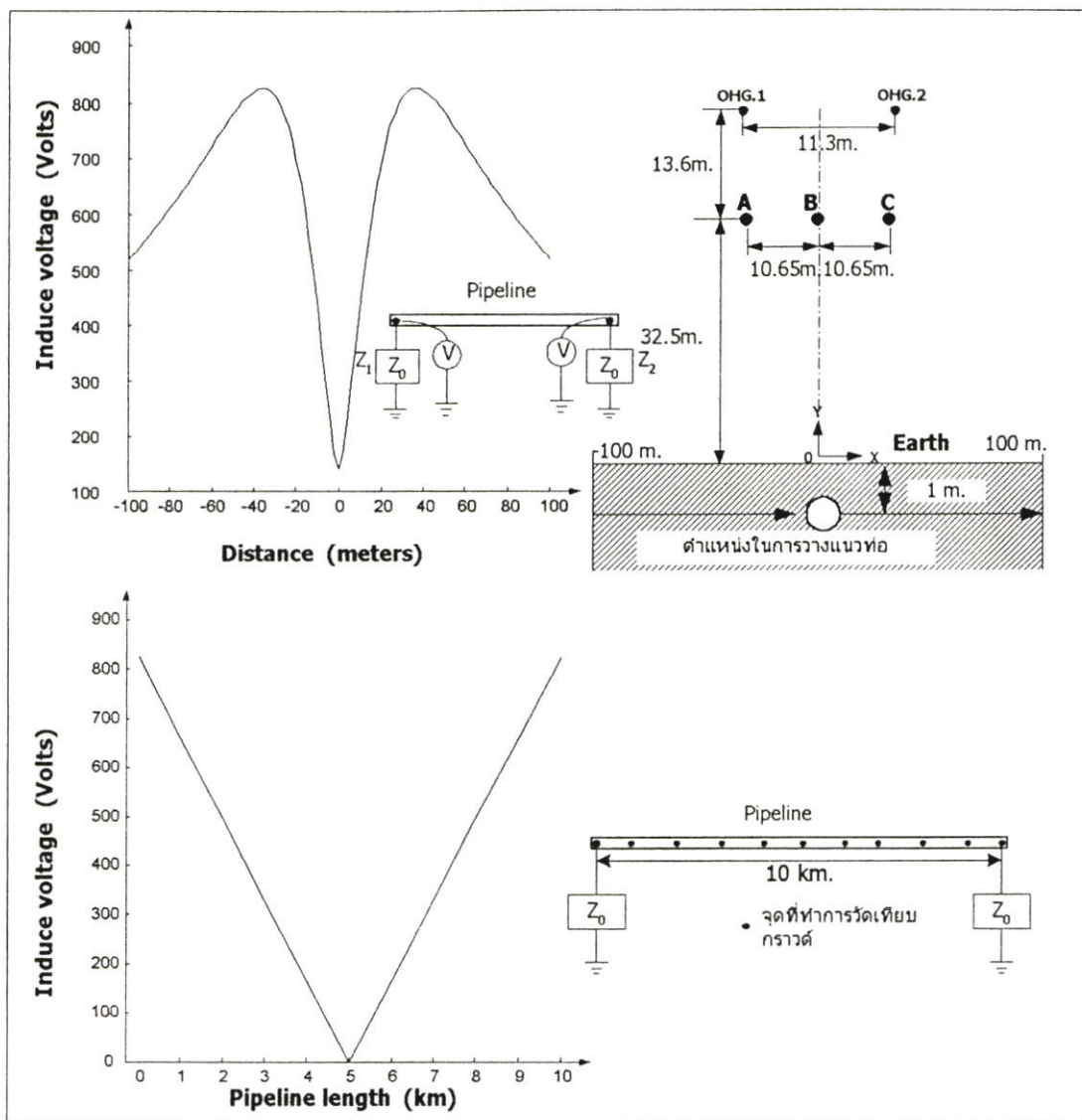
กรณีที่ 6 แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุดที่จุดเริ่มต้นและมีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดสิ้นสุดแนวท่อ เนื่องจากมีการต่อท่อส่งก๊าซที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดต่อกราวด์

กรณีที่ 7 แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดเริ่มต้นและมีค่าสูงสุดอยู่ที่จุดสิ้นสุดแนวท่อ เนื่องจากมีการต่อท่อส่งก๊าซที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดต่อฉนวน

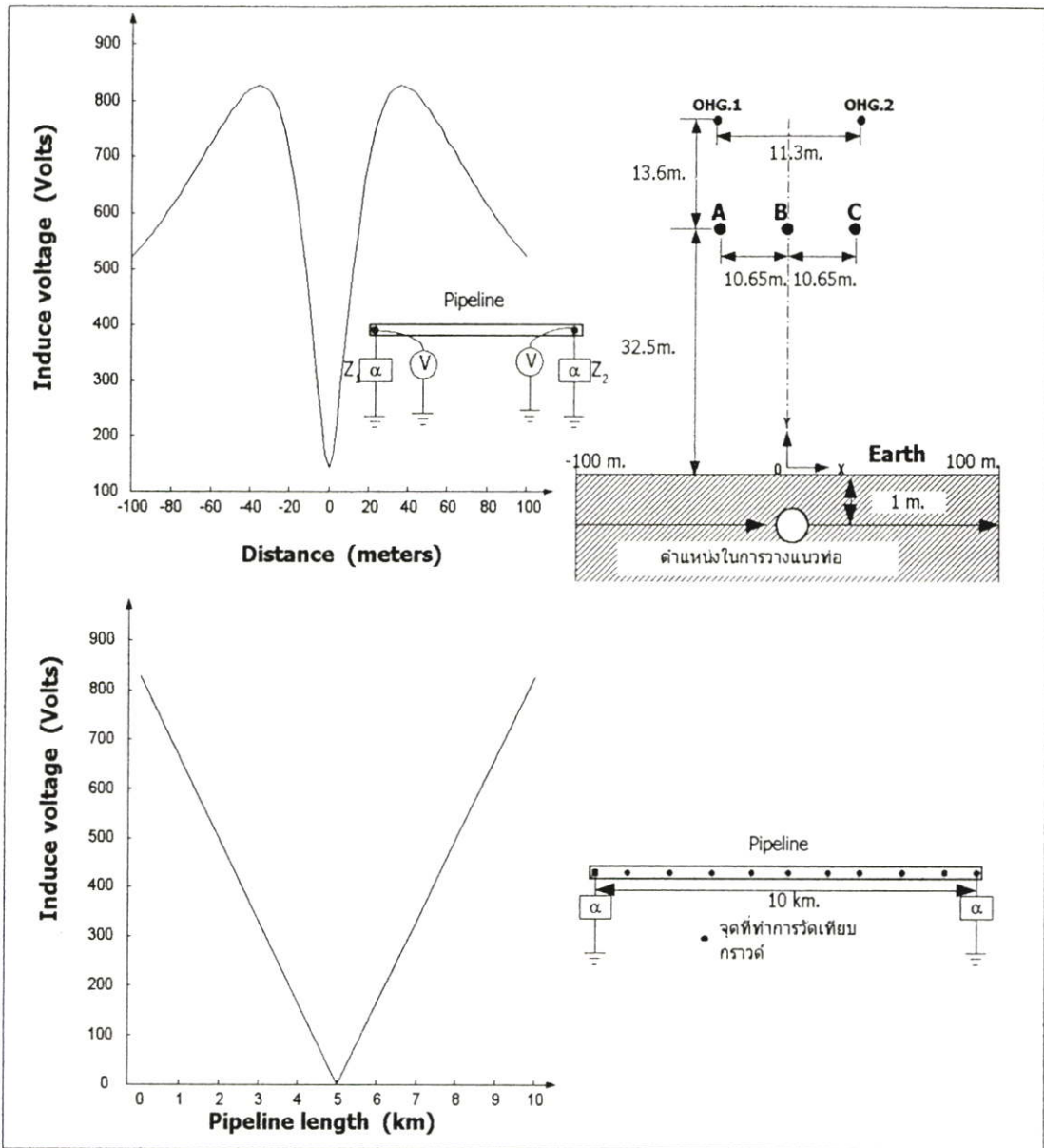
กรณีที่ 8 แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงสุดที่จุดเริ่มต้นและมีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดสิ้นสุดแนวท่อ เนื่องจากมีการต่อฉนวนที่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดต่อกราวด์



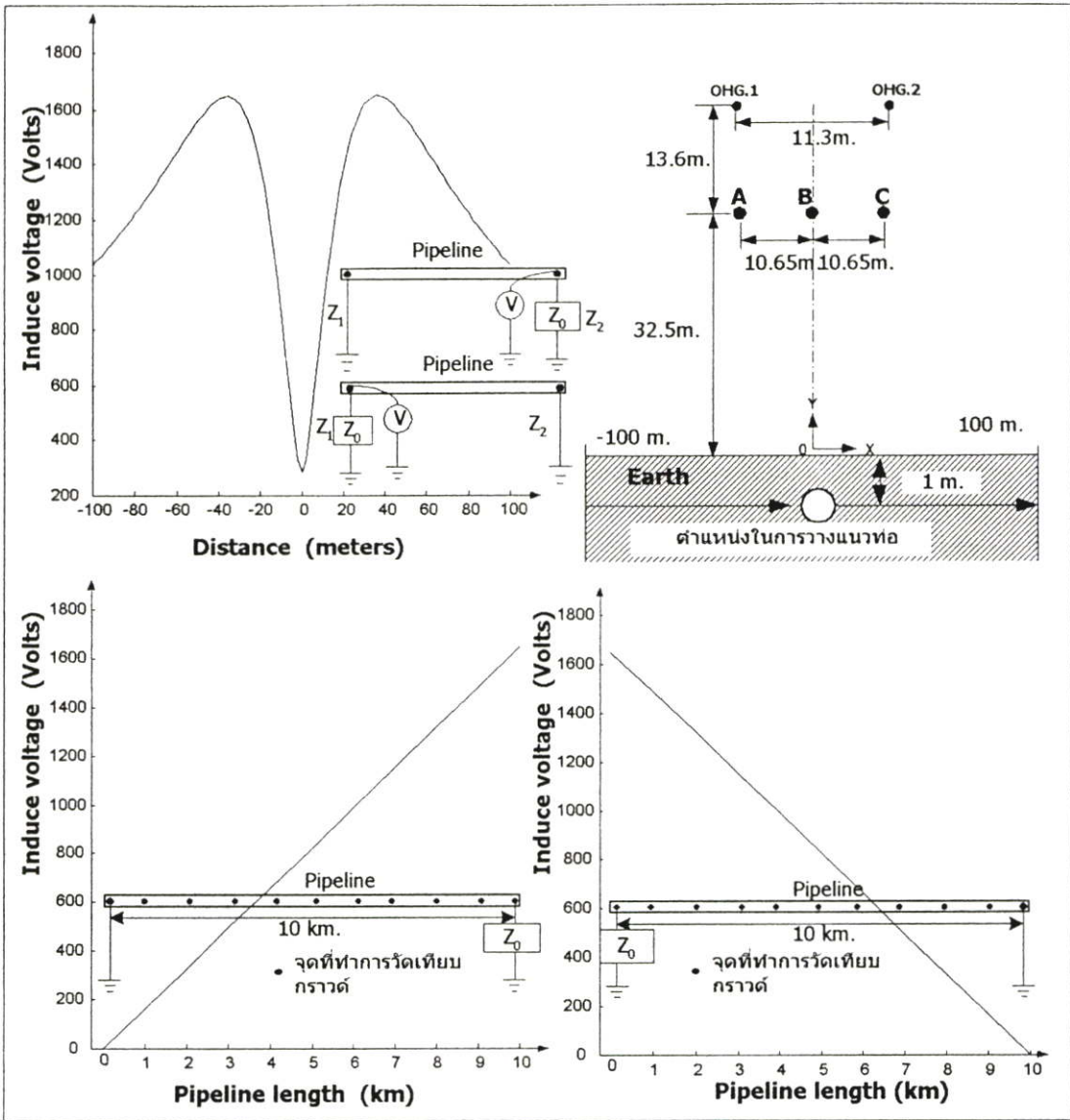
รูปที่ 5.60 แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = 0$ และ $Z_2 = 0$



รูปที่ 5.61 แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = Z_0$ และ $Z_2 = Z_0$

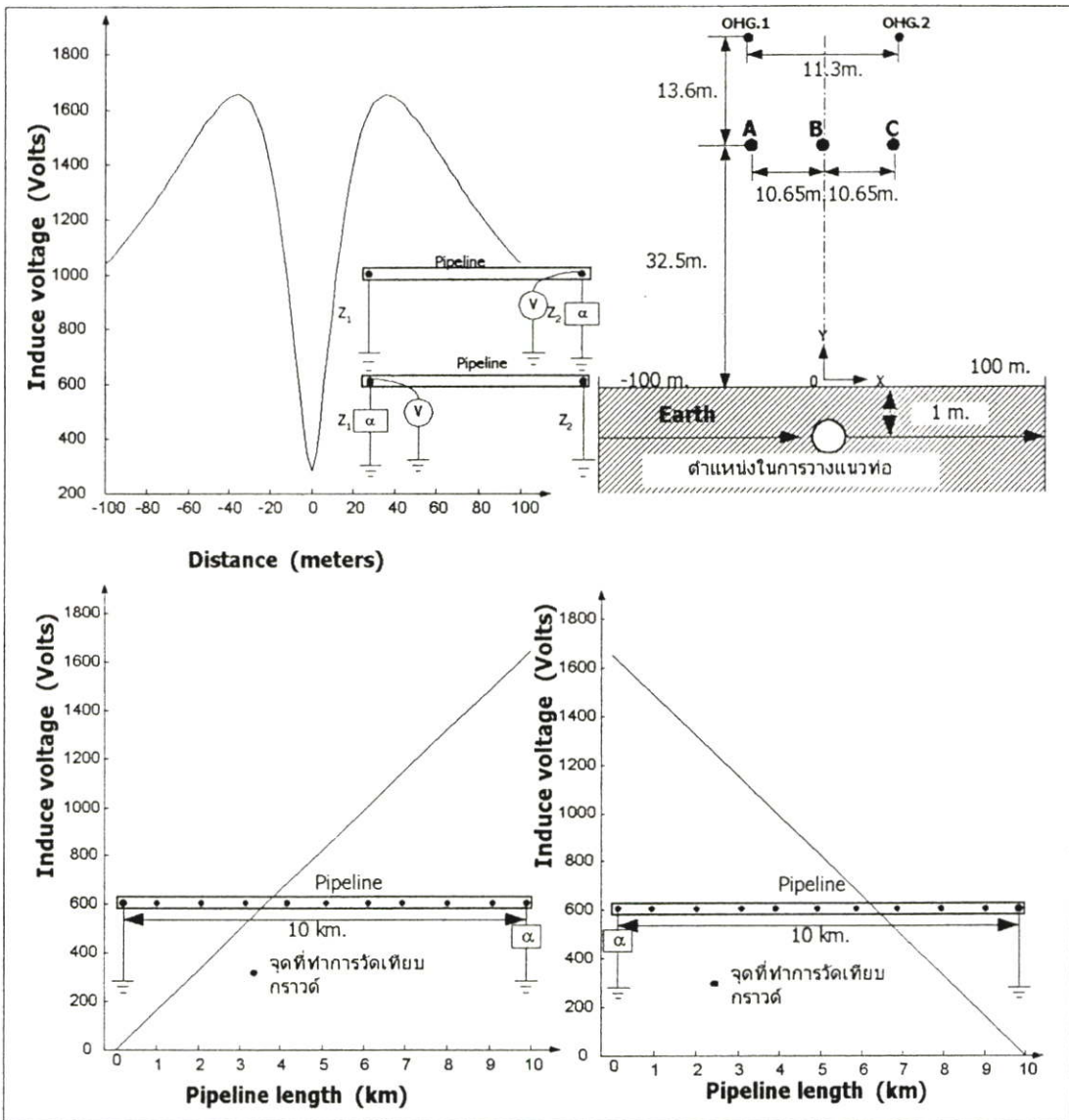


รูปที่ 5.62 แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = \infty$ และ $Z_2 = \infty$



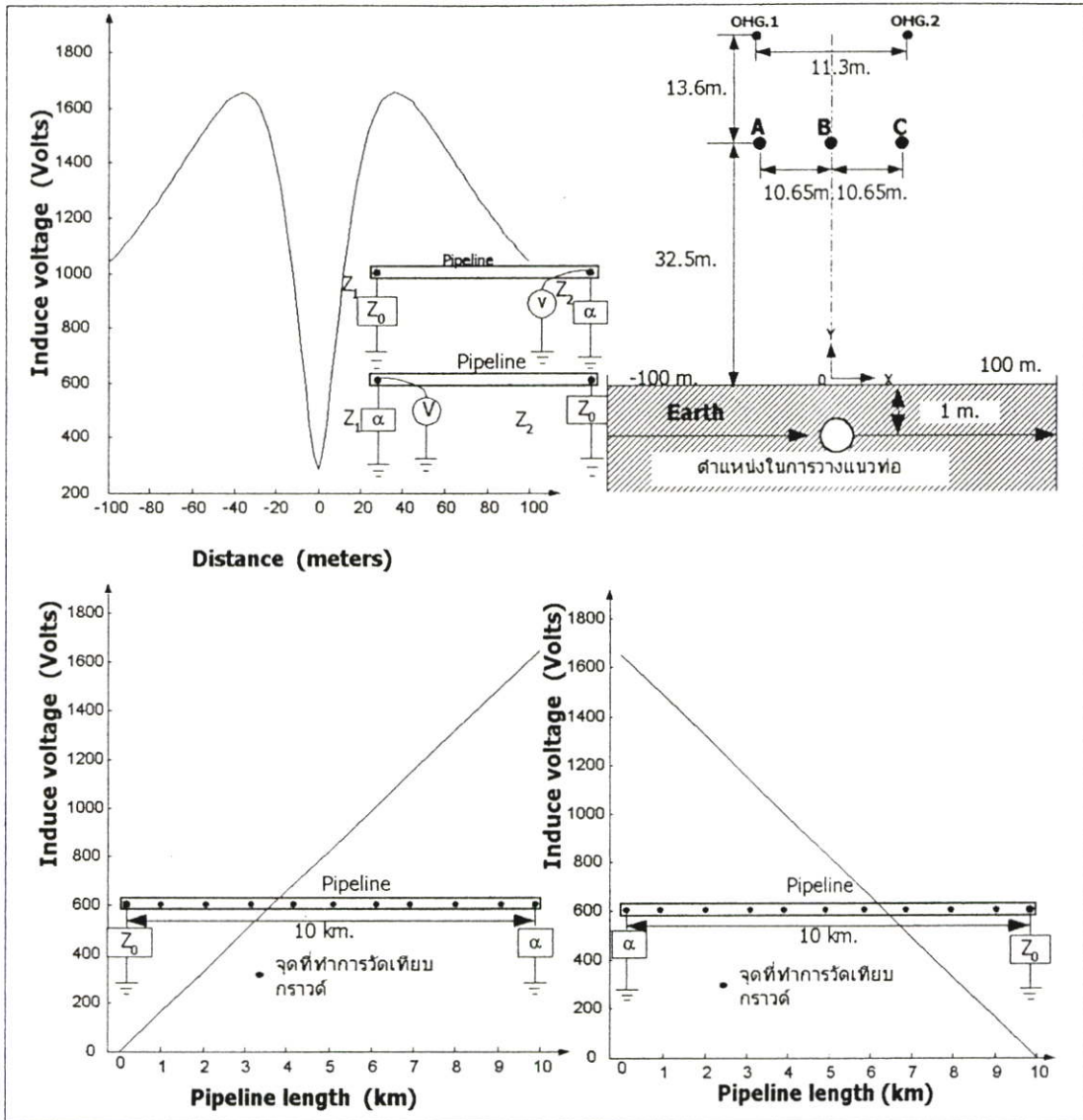
รูปที่ 5.63 แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = Z_0$ และ $Z_2 = 0$

$$Z_1 = 0 \text{ และ } Z_2 = Z_0$$



รูปที่ 5.64 แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = 0$ และ $Z_2 = \infty$

$$Z_1 = \infty \text{ และ } Z_2 = 0$$



รูปที่ 5.65 แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดต่างๆบนท่อส่งก๊าซเมื่อ $Z_1 = Z_0$ และ $Z_2 = \infty$

$$Z_2 = Z_0 \text{ และ } Z_1 = \infty$$

5.3 สรุป

ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูง ในกรณีที่โครงสร้างของเสาส่งมีการเปลี่ยนแปลงได้ทำการพิจารณาตามลักษณะโครงสร้างของเสาส่ง กรณีโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนพบว่าในการวางแนวท่อกับระบบเสาส่งประเภทนี้ไม่ควรวางแนวท่อกับตำแหน่ง -35 และ 35 เมตรจากแนวสายส่ง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดและถ้าต้องการวางแนวท่อกับแนวนอนกับแนวสายส่งควรวางแนวท่อกับจุดกึ่งกลางเสาส่ง กรณีโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม พบว่าในการวางท่อกับระบบเสาส่งประเภทนี้ไม่ควรวางแนวท่อกับตำแหน่ง -17 และ 17 เมตรจากแนวสายส่ง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดและถ้าต้องการวางแนวท่อกับแนวนอนกับแนวสายส่งควรวางแนวท่อกับจุดกึ่งกลางเสาส่ง กรณีโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจรพบว่าควรหลีกเลี่ยงการวางแนวท่อกับตำแหน่งใต้แนวสายส่งแต่ถ้าจะวางแนวท่อกับแนวนอนกับแนวสายส่งควรมีการวางแนวท่อกับแนวสายส่ง กรณีโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร และ 4 วงจรพบว่าในระบบนี้ควรหลีกเลี่ยงการวางแนวท่อกับตำแหน่งกึ่งกลางเสาส่งและถ้าจะวางแนวท่อกับแนวนอนกับแนวสายส่งควรมีการวางแนวท่อกับแนวสายส่ง ในการเพิ่มความสูงให้กับโครงสร้างเสาส่งทั้ง 5 กรณี ช่วยทำให้แรงดันเหนี่ยวนำลดลงแต่ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้ามักเพิ่มขึ้นคือกระแสในการส่งจ่ายมีค่ามากขึ้นเป็นผลทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งกำลังไฟฟ้ามักเพิ่มขึ้น

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของท่อนส่งกำลังพบว่าเมื่อความยาวของท่อนมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นกับความยาวท่อน ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการวางท่อน เมื่อทำการฝังท่อนที่ความลึกเพิ่มขึ้นพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลงซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำได้ เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ความหนาของท่อนและ ค่าความต้านทานจำเพาะของท่อนเพิ่มขึ้นพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อนและค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของท่อนเพิ่มขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลง และพบว่ากรณีที่ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้น

บทที่ 6

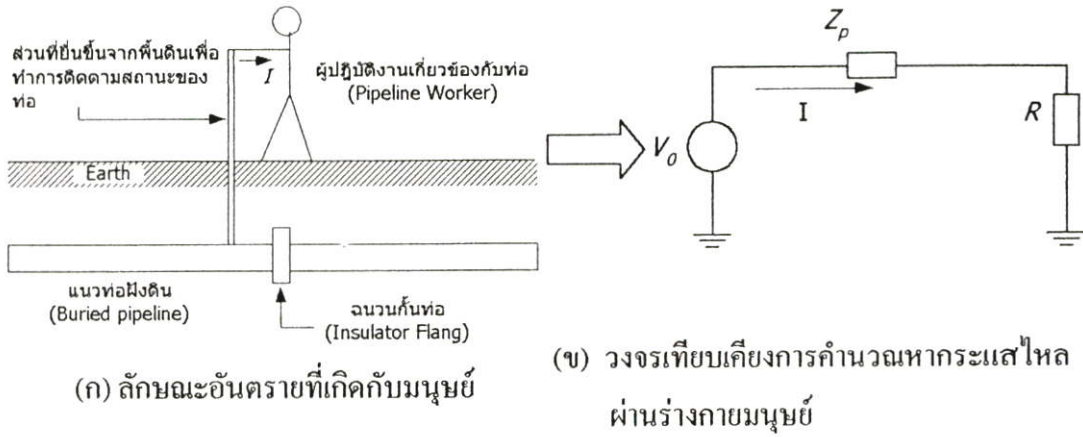
การวิเคราะห์การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

6.1 บทนำ

การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับ ชีวิตของผู้ทำงานติดตั้งและบำรุงรักษาท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจะกระทำการลดทอนก็ต่อเมื่อแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงกว่า 15Vrms ตามข้อกำหนดของมาตรฐาน NACE การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่นิยมนำมาใช้ในทางปฏิบัติสามารถทำได้ 2 วิธีคือการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเสาส่งและการต่อระบบกราวด์ให้กับท่อส่งก๊าซ ในการเลือกวิธีใดวิธีหนึ่งในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับข้อตกลงระหว่างผู้รับผิดชอบดูแลท่อส่งก๊าซและผู้รับผิดชอบดูแลสายส่งไฟฟ้า ซึ่งในประเทศไทยคือการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย(PETROLEUM AUTHORITY OF THAILAND:PTT) กับ ไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (ELECTRICAL GENERATION AUTHORITY OF THAILAND:EGAT) ดังนั้นในบทนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำโดยการลดทอนค่า LEF ซึ่งการลดทอนค่า LEF สามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเสาส่งเพื่อทำการลดค่ามิวชวลิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับท่อก๊าซและการต่อกราวด์ให้กับท่อส่งก๊าซเพื่อทำเป็นทางผ่านให้ไฟฟ้ากระแสสลับไหลลงกราวด์ โดยทั่วไปในการต่อกราวด์จะต้องต่อผ่านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ(Solid State Device) นิยมเรียกว่า DC Isolation/ AC - Coupling เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันไม่ให้ไฟฟ้ากระแสตรงของระบบป้องกันสนิมผ่านลงกราวด์แต่จะยอมให้ไฟฟ้ากระแสสลับผ่านลงกราวด์ได้ ซึ่งในการวิเคราะห์ระบบกราวด์จะไม่นำผลกระทบเนื่องจากอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมาพิจารณาเนื่องจากค่าความต้านทานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในสถานะนำกระแสจะมีค่าความต้านทานต่ำมากเป็นไมโครโอห์มซึ่งได้กล่าวไว้ในภาคผนวก ก. เนื่องไปในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำคือแรงดันเหนี่ยวนำจะต้องมีค่าต่ำกว่า 15 Vrms เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานของ NACE

6.2 อันตรายที่เกิดขึ้นกับมนุษย์

ในการบำรุงรักษาท่อส่งก๊าซจำเป็นต้องทำการตรวจวัดกระแสของระบบป้องกันสนิมและแรงดันที่ตกคร่อมท่ออยู่เสมอ เมื่อผู้ทำงานเกี่ยวข้องกับกาบำรุงรักษาท่อส่งก๊าซสัมผัสกับท่อส่งก๊าซโดยตรงหรือสัมผัสส่วนที่โผล่จากพื้นดินและมีการต่อเชื่อมกับท่อเช่นจุดที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพท่อแสดงดังรูปที่ 6.1(ก) จะทำให้มีกระแสไหลผ่านร่างกายของมนุษย์ลงกราวด์ โดยอันตรายที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสที่ไหลผ่านร่างกายของมนุษย์ ซึ่งวงจรที่ใช้ในการคำนวณหากระแสที่ไหลผ่านร่างกายแสดงดังรูปที่ 6.1(ข)



รูปที่ 6.1 อันตรายที่เกิดขึ้นกับมนุษย์เนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

จากรูปที่ 6.1(ข) แสดงวงจรเทียบเคียงที่ใช้ในการคำนวณหากระแสไหลผ่านมนุษย์เนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซ

$$I = \frac{V_0}{Z_p + R} \quad (6.1)$$

จากสมการที่ (6.1) แสดงให้เห็นว่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายของมนุษย์ (I) ขึ้นอยู่กับแรงดันเหนี่ยวนำ (V_0) ค่าความต้านทานของมนุษย์ (R) และค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อ (Z_p) ดังนั้นในการคำนวณหากระแสที่ไหลผ่านร่างกายของมนุษย์สามารถทำได้ดังนี้ กำหนดให้แรงดันเหนี่ยวนำที่ท่อเท่ากับ 15 โวลต์ และความต้านทานของมนุษย์ดังกล่าวประมาณ 1000 โอห์ม ในกรณีที่ผิวเปียก และกำหนดให้ท่อเป็นท่อเหล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 นิ้ว ค่าความต้านทานของฉนวนท่อ 100 กิโลโอห์ม-ตารางฟุต ค่าความต้านทานเฉพาะของดิน 100 โอห์ม-เมตรขนาดอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อ (Characteristic impedance: Z_p) ดังภาคผนวก ก. รูปที่ ผ.4.7 มีค่าเท่ากับ 1 โอห์ม และอิมพีแดนซ์ของกราวด์เท่ากับ 0 โอห์ม ดังนั้นกระแสที่จะไหลผ่านมนุษย์คือ

$$I = \frac{15}{1,001} = 14.985 \text{ มิลลิแอมป์}$$

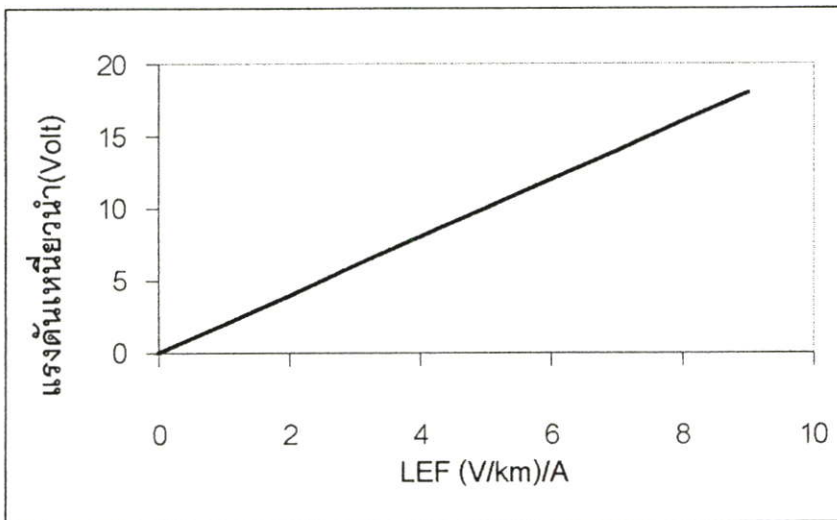
จากการคำนวณอย่างง่ายพบว่ากระแสที่ไหลผ่านมนุษย์มีค่าเท่ากับ 14.985 มิลลิแอมป์ ซึ่งจากมาตรฐาน NACE ภาคผนวก ข. แสดงให้เห็นว่าอันตรายที่เกิดขึ้นกับมนุษย์เมื่อกระแสที่ไหลผ่านร่างกายของมนุษย์ 8-15 มิลลิแอมป์ จะทำให้หมดสติบางคนกล้ำเนื้ออาจสูญเสียการควบคุม

6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับค่า LEF

ในกรณีที่แนวท่อนานกับแนวสายส่งสามารถหาคำณวนหาแรงดันเหนี่ยวนำได้จากสมการที่ (6.2) เมื่อกำหนดให้ ค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดแนวท่อมี่ค่าเท่ากัน ($Z_1 = Z_2$)

$$V = \frac{LEF * Z_1 * L}{Z_1 + Z_2} \quad (6.2)$$

พร้อมทั้งค่าความยาวท่อ (L) มีค่าคงที่สามารถหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำต่อ 1 หน่วยความยาวได้จากรูปที่ 6.2 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับ LEF เป็นเชิงเส้นจากความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า LEF เป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนท่อส่งก๊าซ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์หัวข้อที่ 6.4 ได้หยิบยกค่า LEF มาพิจารณาตามลักษณะของเสาส่ง



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับค่า LEF

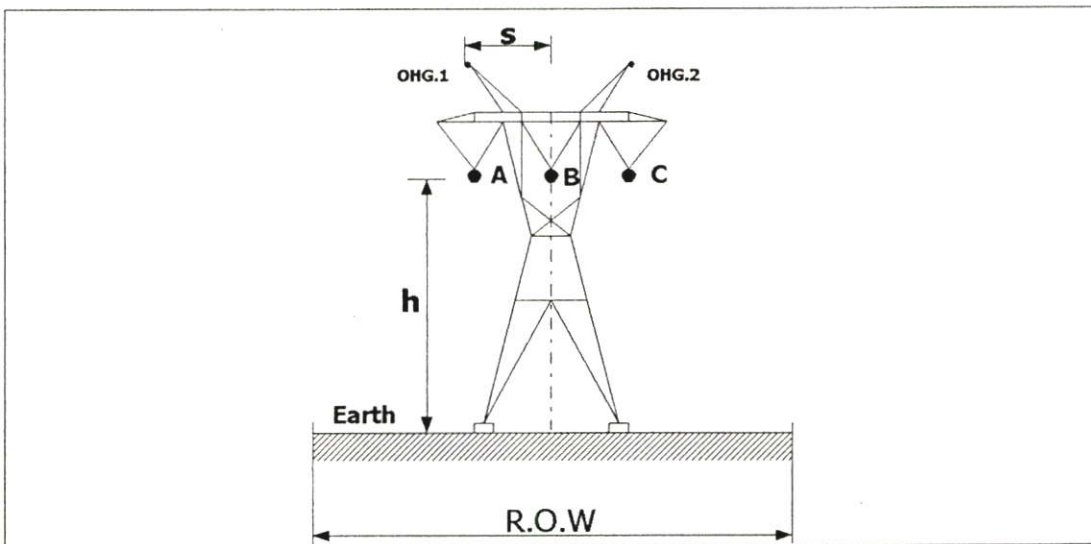
6.4 การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำโดยการลดทอนค่า LEF

จากสมการที่ (2.35) แสดงให้เห็นว่าค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่ากระแสของสายส่งและค่ามิวชวลอิมพีแดนซ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะจากแนวสายส่งถึงตำแหน่งที่ต้องการพิจารณา ดังนั้นในหัวข้อนี้ได้นำเสนอการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำโดยการลดทอนค่า LEF สามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของเสาส่ง ซึ่งโครงสร้างเสาส่งที่นำมาพิจารณาประกอบไปด้วย โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูป-

สามเหลี่ยม โครงสร้างของเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร และ โครงสร้างของเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร เพื่อทำการพิจารณาว่าในการลดทอนค่า LEF ที่เกิดขึ้นในแต่ละลักษณะของโครงสร้างของเสาสูงสามารถทำได้อย่างไรบ้างซึ่งในการพิจารณาค่า LEF จะพิจารณาเฉพาะในระบบไฟฟ้าที่สมดุลเท่านั้น

6.4.1 กรณีโครงสร้างของเสาสูงที่จัดวางตัวนำในแนวนอน

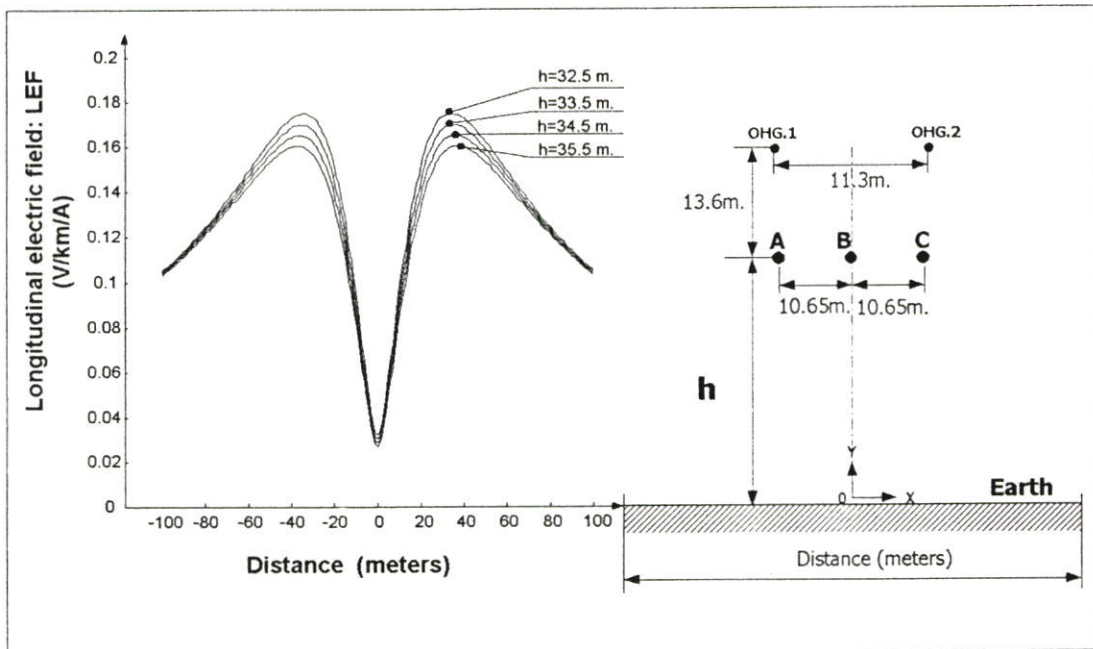
โครงสร้างของเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนแสดงดังรูปที่ 6.3 โดยเสาสูงที่นำมาพิจารณาเป็นโครงสร้างของเสาสูงที่มีการติดตั้งใช้งานภายในประเทศไทย ในระบบ 500 kV ที่ทำการส่งจ่ายจากท่าตะโก(THA TAKO SUBSTATION) จังหวัดนครสวรรค์ ไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก(NONG CHOK SUBSTATION) จังหวัดกรุงเทพฯ โดยกำหนดให้ความสูงของโครงสร้างของเสาสูงเป็นไปตามโครงสร้างที่ติดตั้งจริง ซึ่งความสูงจากพื้นดินถึงสายส่ง(h) 32.5 เมตรและระยะระหว่างตัวนำ(S) 10.65 เมตรและกระแสของสายส่งมีค่าเท่ากับ 1 แอมป์ และในการพิจารณากำหนดให้กระแสของสายป้องกันฟ้าผ่า(Overhead ground wire)มีค่า 0 แอมป์ และค่า LEF ที่ได้จากการพิจารณาคือ LEF ที่ผิวดินและระยะเขตเดินสายไฟฟ้าที่ใช้ในการพิจารณาคือ 70 เมตรเนื่องจากเป็นเขตเดินสายไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในประเทศไทย โดยการพิจารณาค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนดังนี้



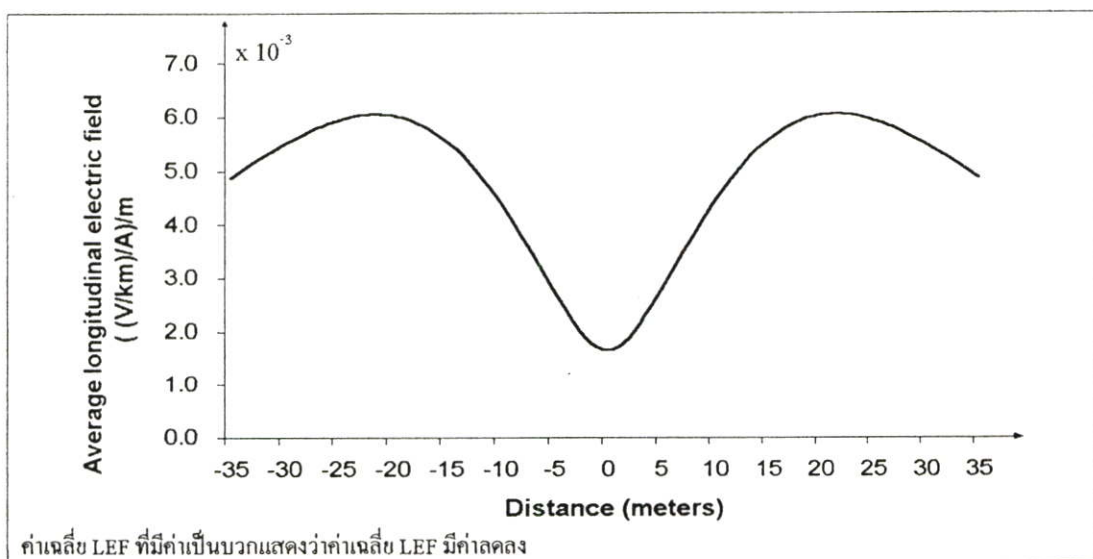
รูปที่ 6.3 โครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน

6.4.1.1 ความสูงของเสาส่ง(Line height)

การเพิ่มความสูงของเสาส่งเป็นอีกทางหนึ่งที่จะช่วยในการลดค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงในการเพิ่มความสูงของเสาส่งไฟฟ้าได้ทำการทดสอบ โดยการเพิ่มความสูงของเสาส่งจากเดิมไปอีก 3 เมตร เพื่อต้องการดูผลของ LEF ต่อเมตรที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละตำแหน่งภายในเขตเดินสายไฟฟ้าผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF

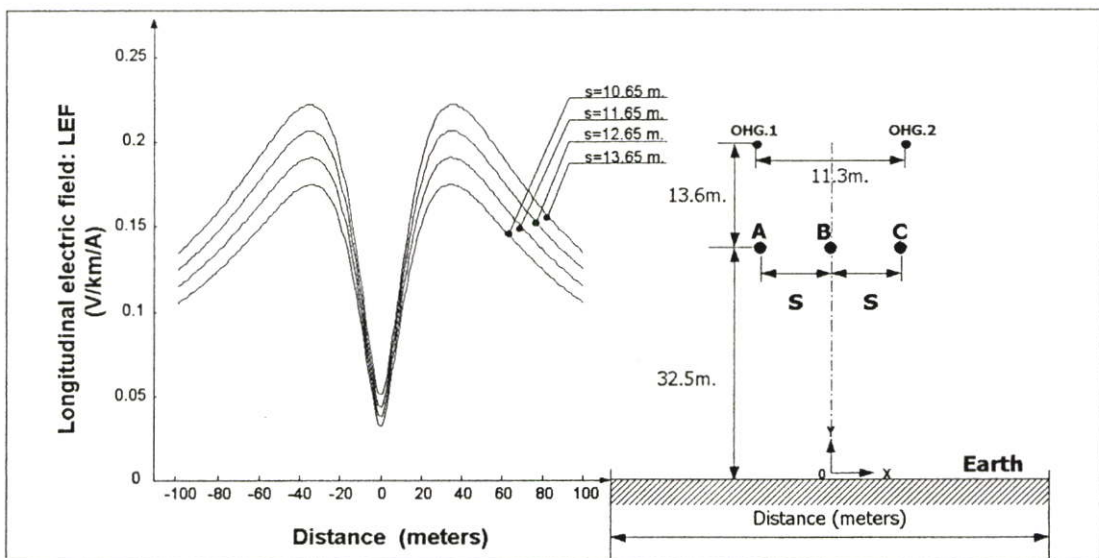


รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF เฉลี่ย

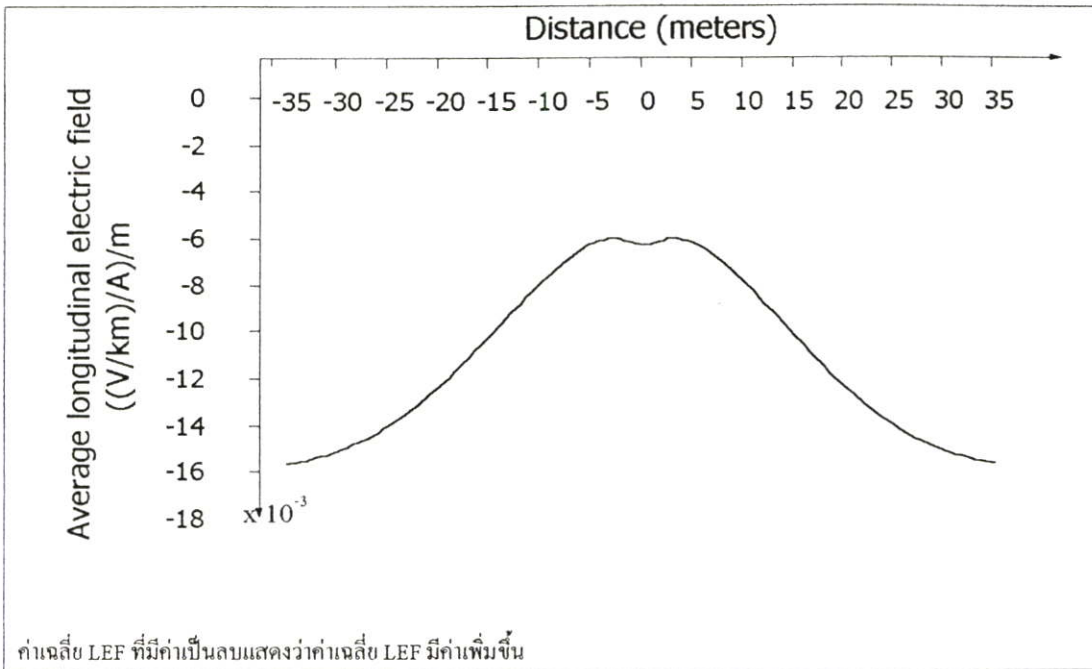
จากรูปที่ 6.4 แสดงให้เห็นว่าการกระจายของค่า LEF ที่ระยะห่างจากแนวสายส่งค่าต่างๆ พบว่าที่ความสูงปกติคือ 32.5 เมตร จุดที่ได้รับผลกระทบจากค่า LEF น้อยที่สุดคือจุดกึ่งกลางของแนวสายส่งคือมีค่า 32.044×10^{-3} (V/km)/A และจุดที่มีค่า LEF สูงสุดคือที่ระยะห่างจากแนวสายส่ง 34 เมตร มีค่า 175.261×10^{-3} (V/km)/A จากรูป 6.5 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของการลดทอนค่า LEF พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความสูงของเสาส่งจากความสูงเดิมคือ 32.5 เป็น 33.5, 34.5 และ 35.5 เมตร พบว่าการลดลงของ LEF ในแต่ละจุดไม่เท่ากัน ซึ่งจุดที่ลดทอนค่า LEF ได้น้อยที่สุดคือ 1.657×10^{-3} (V/km)/A) /m ที่จุดกึ่งกลางของสายส่ง และจุดที่มีการลดทอนค่า LEF มากที่สุดอยู่ที่จุด -22, -21, 21 และ 22 เมตรจากแนวสายส่งซึ่งเครื่องหมายลบแสดงว่าเป็นระยะทางห่างจากกึ่งกลางของเสาส่งไปทางด้านซ้าย และเครื่องหมายบวกแสดงถึงทิศทางห่างจากแนวสายส่งไปทางด้านขวามือ ซึ่งการลดทอนค่า LEF มีค่าโดยเฉลี่ย 6.063×10^{-3} (V/km)/A) /m และค่าเฉลี่ยทั้งหมดค่า LEF ที่ลดลงอยู่ประมาณ 4.803×10^{-3} (V/km)/A) /m

6.4.1.2 ระยะระหว่างเฟส(Phase spacing)

ในการพิจารณาผลที่เกิดขึ้นกับค่า LEF เมื่อทำการเพิ่มระยะระหว่างเฟส โดยการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจาก 10.65 เมตรเป็น 11.65, 12.65 และ 13.65 เมตรเพื่อดูลักษณะการกระจายของค่า LEF ภายในเขตเดินสายไฟฟ้าและพิจารณาถึงค่า LEF เฉลี่ยต่อเมตรในการเพิ่มระยะระหว่างเฟสเมื่อทำการวิเคราะห์พบว่าการกระจายของค่า LEF มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะระหว่างตัวนำซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเฟสกับค่า LEF



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเฟสกับค่า LEF เฉลี่ย

จากรูปที่ 6.6 กราฟแสดงให้เห็นว่าการกระจายของค่า LEF ที่ระยะห่างจากแนวสายส่งค่าต่างๆพบว่าที่ระยะห่างเฟสปกติคือ 32.5 เมตร จุดที่ได้รับผลกระทบจากค่า LEF น้อยที่สุดคือจุดกึ่งกลางของแนวสายส่งคือมีค่า 32.044×10^{-3} (V/km)/A และจุดที่มีค่า LEF สูงสุดคือที่ระยะห่างจากแนวสายส่ง 34 เมตร มีค่า 175.261×10^{-3} (V/km)/A

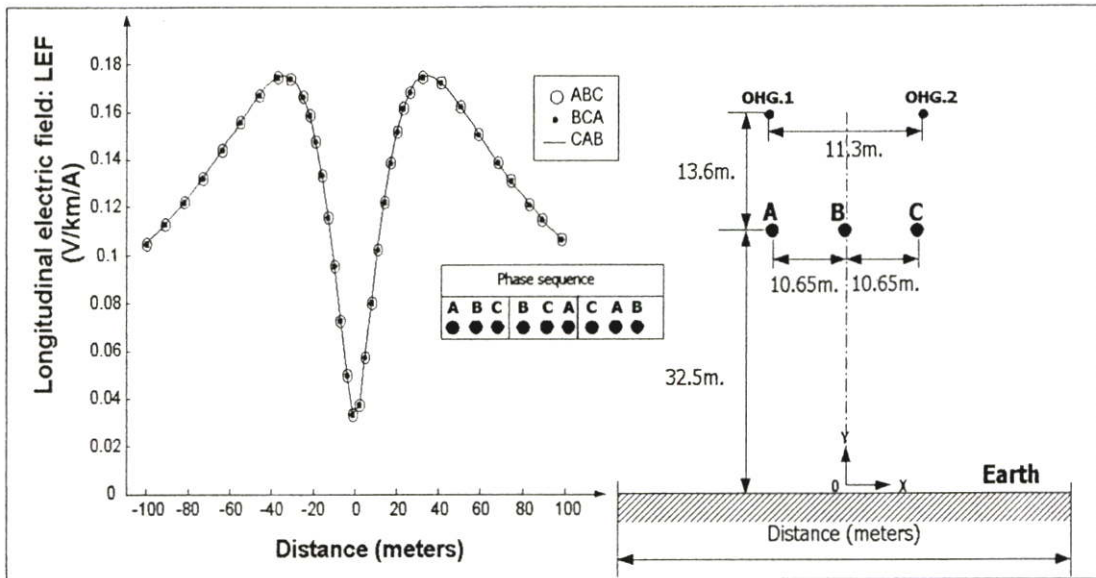
จากรูปที่ 6.7 แสดงค่าเฉลี่ยของการลดทอนค่า LEF พบว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างของเฟสจากเดิมคือ 10.65 เป็น 11.65, 12.65 และ 13.65 เมตร พบว่าค่า LEF เพิ่มขึ้นและการเพิ่มขึ้นของค่า LEF ไม่เท่ากัน ซึ่งพบว่าจุดที่มีการเพิ่มค่า LEF มากที่สุดคือระยะ 35 เมตรจากแนวสายส่ง โดยค่าเฉลี่ยของการเพิ่มมีค่าเท่ากับ 15.694×10^{-3} (V/km)/A/m และจุดที่มีการเพิ่มค่าเฉลี่ย LEF น้อยที่สุดคือระยะ -3 เมตรและ 3 เมตรจากกึ่งกลางเสาส่ง โดยมีค่าเฉลี่ยของการเพิ่มมีค่าเท่ากับ 6.112×10^{-3} (V/km)/A/m และค่า LEF เฉลี่ยที่เพิ่มทุกจุดมีค่าเท่ากับ 11.059×10^{-3} (V/km)/A/m

6.4.1.3 การจัดลำดับเฟส(Phase sequence)

ในการพิจารณาการจัดลำดับเฟสเพื่อดูผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อค่า LEF โดยการจัดลำดับเฟสแบ่งเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา ซึ่งได้แสดงลักษณะการจัดวางตัวนำดังตารางที่ 6.1 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 6.8 จากรูปที่ 6.8 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการจัดลำดับเฟสไม่ว่าจะเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกาหรือแบบตามเข็มนาฬิกาจะไม่ส่งผลให้ค่า LEF เปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 6.1 การจัดลำดับเฟสสำหรับโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน

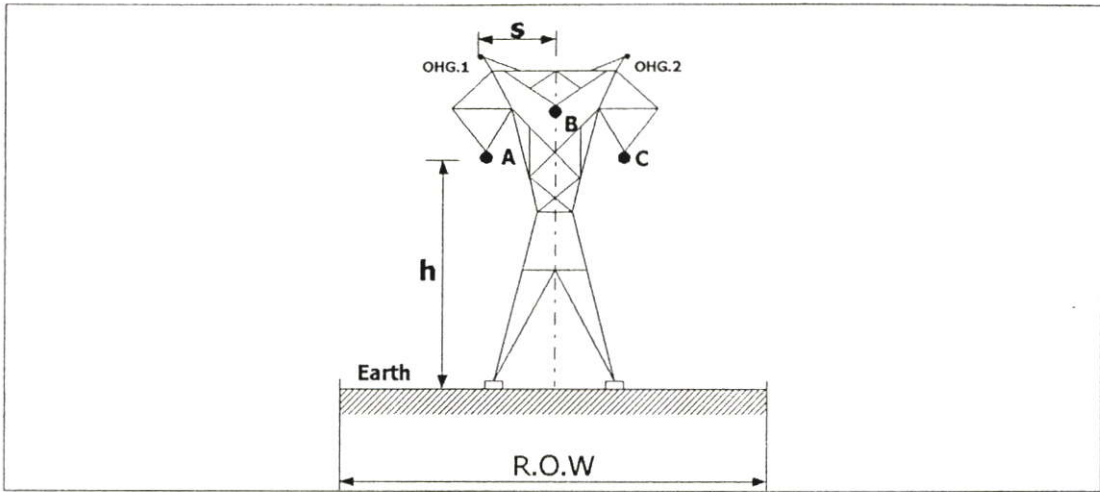
การจัดลำดับเฟส	การจัดวางตัวนำ		
ตามเข็มนาฬิกา	ABC	BCA	CAB
ทวนเข็มนาฬิกา	ACB	CBA	BAC



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF

6.4.2 กรณีโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

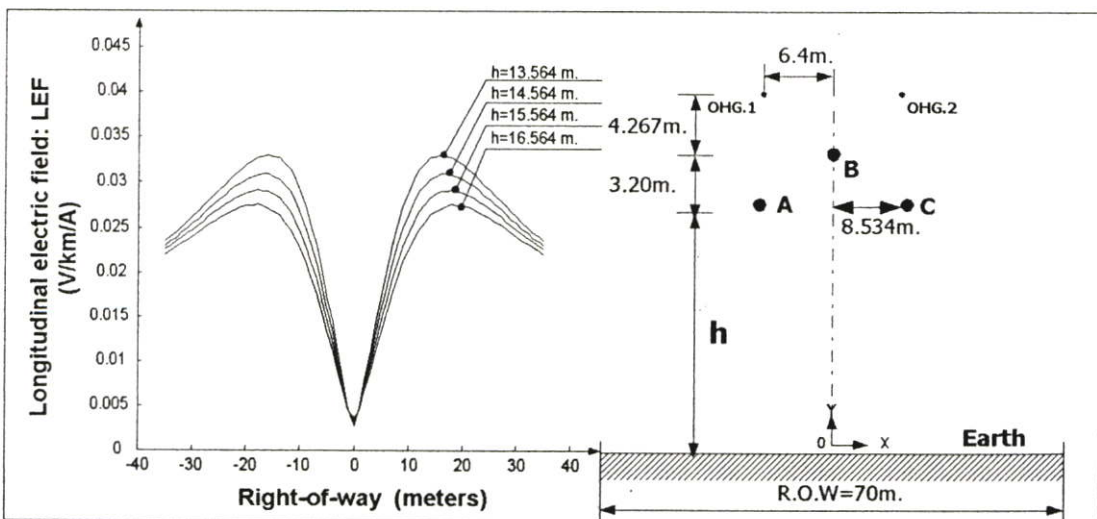
โครงสร้างของเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 6.9 โดยเสาส่งที่นำมาพิจารณาเป็นโครงสร้างของเสาส่งที่มีการติดตั้งใช้งานในระบบ 500 kV โดยกำหนดให้ความสูงของโครงสร้างของเสาส่งเป็นไปตามโครงสร้างที่ติดตั้งจริง ซึ่งความสูงจากพื้นดินถึงสายส่ง(h) 13.564 เมตรและระยะระหว่างตัวนำเฟส(S)3.2 เมตร กระแสของสายส่งมีค่าเท่ากับ 1 แอมป์ และในการพิจารณากำหนดให้กระแสของสายป้องกันฟ้าผ่ามีค่า 0 แอมป์ และค่า LEF ที่ได้จากการพิจารณาคือ LEF ที่พื้นดินและระยะเขตเดินสายไฟฟ้าที่ใช้ในการพิจารณาคือ 70 เมตรเนื่องจากเป็นเขตเดินสายไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในประเทศไทย โดยการพิจารณาค่า LEFที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยมดังนี้



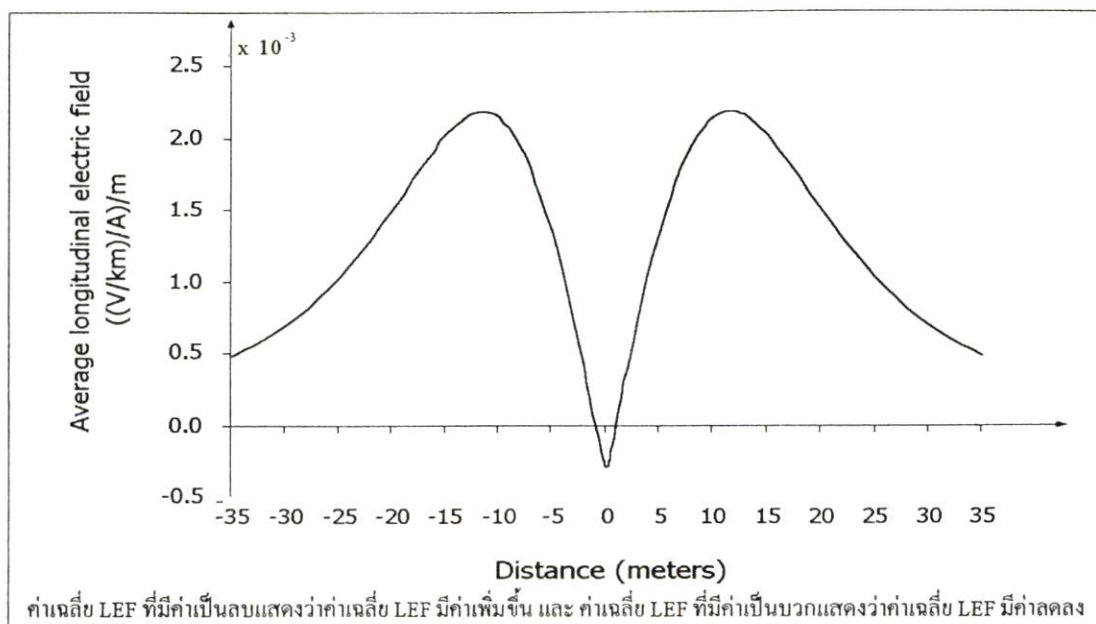
รูปที่ 6.9 โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม

6.4.2.1 การเพิ่มความสูงของเสาส่ง(h)

ในการพิจารณาค่าความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการเพิ่มความสูงจากเดิม 13.564 เมตร เป็น 14.564, 15.564 และ 16.564 เมตร เพื่อต้องการดูการกระจายของค่า LEF ต่อความสูงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละตำแหน่งภายในเขตเดินสายไฟฟ้าผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.10 จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการกระจายของค่า LEF ที่ตำแหน่งต่างๆภายใต้เขตเดินสายไฟฟ้าที่ความสูงปกติ คือ 13.564 เมตร จุดที่ได้รับผลกระทบจากค่า LEF น้อยที่สุดคือจุดกึ่งกลางของแนวสายส่งคือมีค่า 2.831×10^{-3} (V/km)/A และจุดที่มีค่า LEF สูงสุดคือที่ระยะห่างจากแนวสายส่ง 16 และ -16 เมตร มีค่า 32.989×10^{-3} (V/km)/A และเมื่อค่าความสูงของเสาส่งมีค่าเพิ่มขึ้นค่า LEF จะมีค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 6.11



รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF

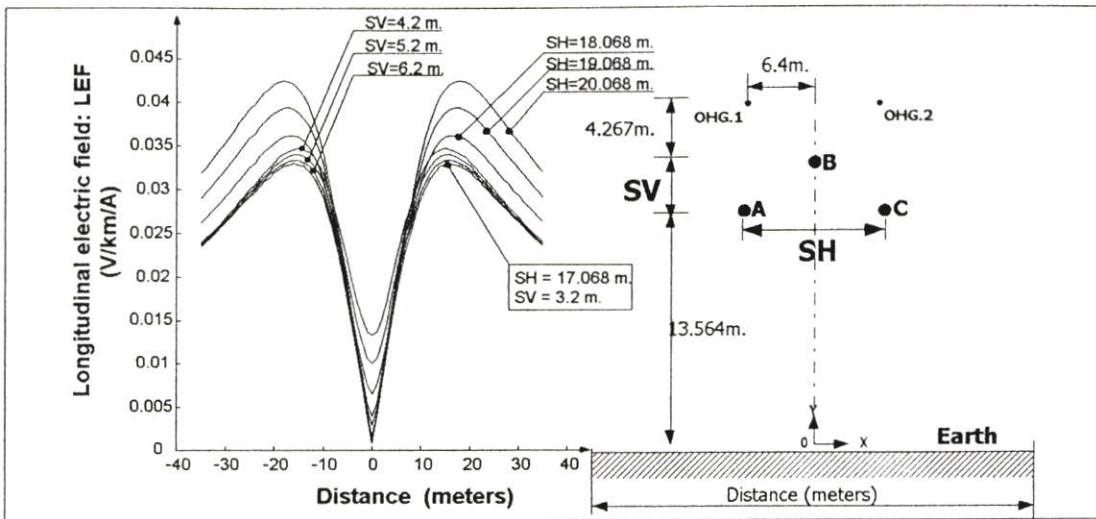


รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEFเฉลี่ย

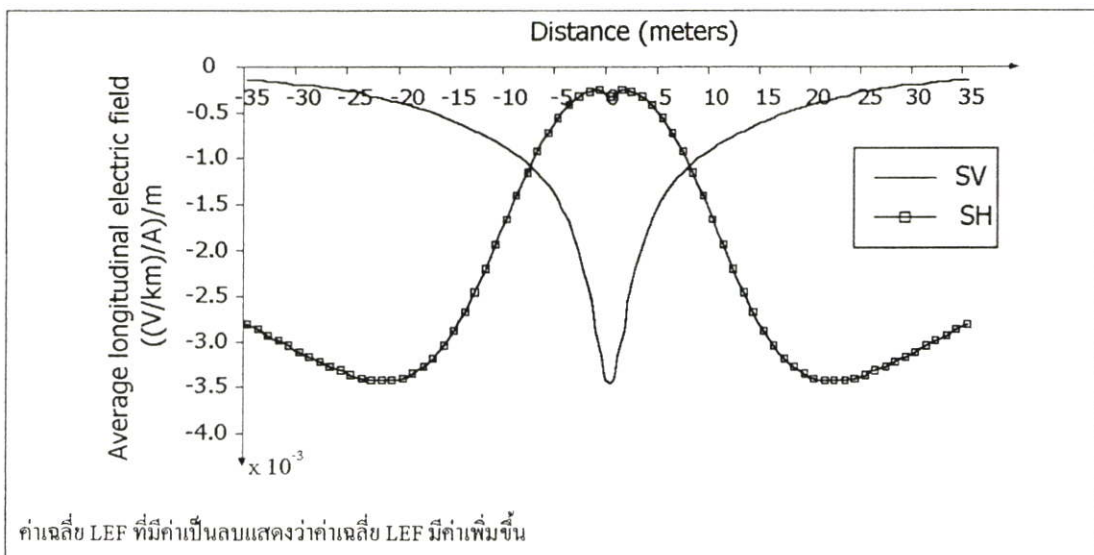
จากรูปที่ 6.11 แสดงค่าเฉลี่ยของค่า LEF ที่ระยะต่างๆภายในเขตการเดินสายไฟฟ้าซึ่งที่จุดกึ่งกลางของเฟสมีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการเพิ่มความสูงของเสาส่งมีค่าเท่ากับ $0.29 \times 10^{-3} ((V/km)/A)/m$ ส่วนจุดอื่น ๆ จะมีค่าลดลงซึ่งค่า LEF เฉลี่ยลดลงมากที่สุดคือจุด 11,12,-11 และ -12 มีค่าเท่ากับ $2.193 \times 10^{-3} ((V/km)/A)/m$ ซึ่งค่า LEF เฉลี่ยลดลงน้อยที่สุดระยะ 1 และ -1 เมตรมีค่าเท่ากับ $0.012 \times 10^{-3} ((V/km)/A)/m$

6.4.2.2 การเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำ(SV,SH)

ในการพิจารณา ระยะระหว่างตัวนำเปลี่ยนแปลงได้กำหนดให้ระยะตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง 2 ทิศทางคือการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้ง(SV)โดยการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจากเดิม 3.2 เมตรเป็น 4.2 5.2 และ 6.2 เมตร และการเปลี่ยนแปลงในแนวนอน(SH) จากระยะห่างเดิม 17.068 เมตร เป็น 18.068, 19.068 และ 20.068 เมตร เพื่อดูการกระจายของค่า LEF ในแต่ละตำแหน่งภายในเขตการเดินสายไฟฟ้า เมื่อทำการเพิ่มระยะระหว่างเฟสของสายส่งทั้งในแนวนอนและในแนวตั้งพบว่าค่า LEF ภายใต้เขตเดินสายไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 6.12 ซึ่งการกระจายของค่า LEF เฉลี่ยต่อระยะระหว่างเฟสที่เปลี่ยนแปลงไป 1 เมตรแสดงดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) และระยะระหว่างเฟสในแนวนอน(SH)กับค่า LEF



รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) และระยะระหว่างเฟสในแนวนอน(SH)กับค่า LEF เฉลี่ย

จากรูป 6.13 พบว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะ SV ค่าเฉลี่ย LEF เพิ่มขึ้นและการเพิ่มขึ้นของค่า LEF ในแต่ละตำแหน่งภายใต้ขดเค้นสายไฟฟ้าไม่เท่ากัน ซึ่งจุดที่มีการเพิ่มค่า LEF มากที่สุดคือระยะ 0 เมตร โดยค่าเฉลี่ยของการเพิ่มมีค่าเท่ากับ $3.448 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A) / m}$ และจุดที่มีการเพิ่มค่าเฉลี่ย LEF น้อยที่สุดคือระยะ 35 และ -35 เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของการเพิ่มมีค่าเท่ากับ $0.137 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A) / m}$ และค่า LEF เฉลี่ยที่เพิ่มทุกๆจุดประมาณ $0.761 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A) / m}$ และเมื่อทำการเพิ่มระยะ SH ค่าเฉลี่ย LEF เพิ่มขึ้นและการเพิ่มขึ้นของค่า LEF ในแต่ละตำแหน่งภายใต้ขดเค้นสายไฟฟ้าไม่เท่า

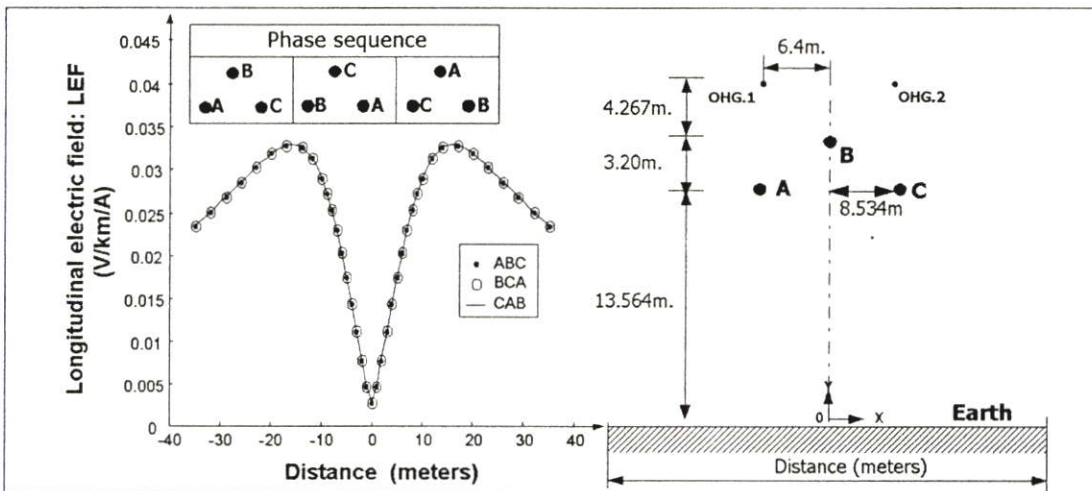
กัน ซึ่งจุดที่มีการเพิ่มค่า LEF มากที่สุดคือระยะ 22 และ -22 เมตร โดยค่าเฉลี่ยของการเพิ่มมีค่าเท่ากับ $3.4428 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A /m}$ และจุดที่มีการเพิ่มค่าเฉลี่ย LEF น้อยที่สุดคือระยะ 1 และ -1 เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของการเพิ่มมีค่าเท่ากับ $0.262 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A /m}$ และค่า LEF เฉลี่ยที่เพิ่มทุกๆจุด ประมาณ $2.367 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A /m}$

6.4.2.3 การจัดลำดับเฟสของสายส่ง(Phase sequence)

ในการพิจารณาการจัดลำดับเฟสเพื่อคุณลักษณะที่เกิดขึ้นต่อค่า LEF โดยการจัดลำดับเฟสแบ่งเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา ซึ่งได้แสดงลักษณะการจัดวางตัวนำดังตารางที่ 6.2 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 6.14 แสดงให้เห็นว่าการจัดลำดับเฟสไม่ได้ช่วยทำให้ค่า LEF เพิ่มขึ้นหรือลดลง

ตารางที่ 6.2 การจัดลำดับเฟส

การจัดลำดับเฟส	การจัดวางตัวนำ		
ตามเข็มนาฬิกา	ABC	BCA	CAB
ทวนเข็มนาฬิกา	ACB	CBA	BAC

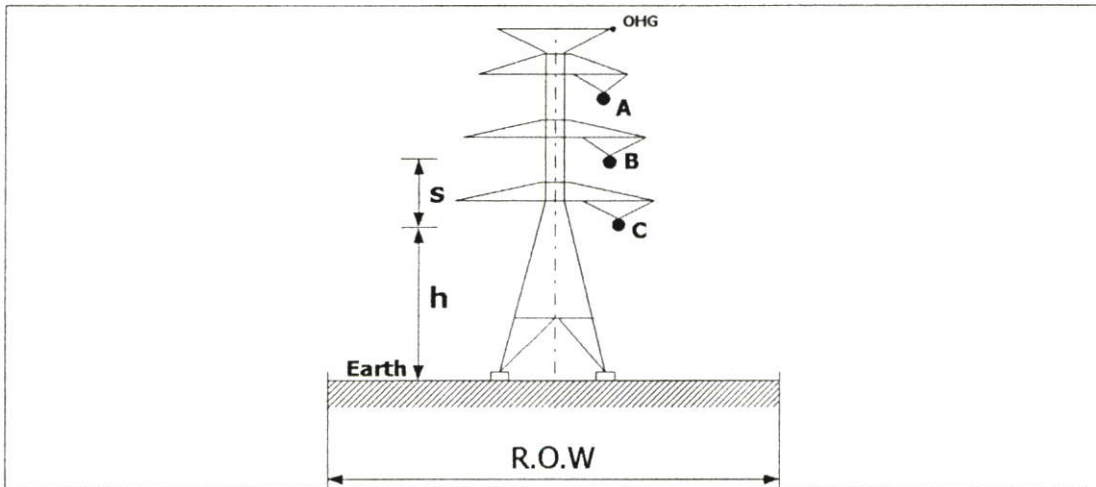


รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF

6.4.3 กรณีโครงสร้างของเสาส่งมีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

โครงสร้างของเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้งวงจรเดียวแสดงดังรูปที่ 6.15 โดยเสาส่งที่นำมาพิจารณาเป็น โครงสร้างของเสาส่งที่มีการติดตั้งใช้งานในต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่โดยค่าความสูงของโครงสร้างของเสาส่งเป็นไปตามโครงสร้างที่ติดตั้งจริง ซึ่งความสูงจากพื้นดินถึงสายส่ง(h) 12.55 เมตรและระยะระหว่างตัวนำ(S) 7.4 เมตรและกระแสของสายส่งมีค่าเท่ากับ 1 แอมป์

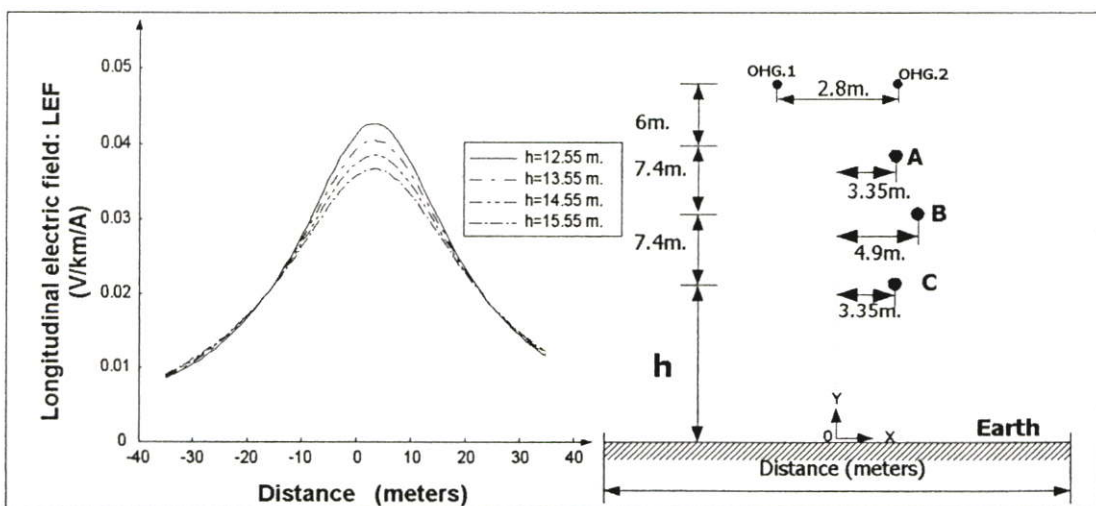
และในการพิจารณากำหนดค่าให้กระแสของสายป้องกันฟ้าผ่ามีค่าเท่ากับ 0 แอมป์ และค่า LEF ที่ได้จากการพิจารณาคือ LEF ที่พื้นดินและระยะเขตเดินสายไฟฟ้าที่ใช้ในการพิจารณาคือ 70 เมตรเนื่องจากเป็นเขตการเดินสายไฟฟ้าสูงสุดที่ใช้ในประเทศไทย โดยการพิจารณาค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจรดังนี้



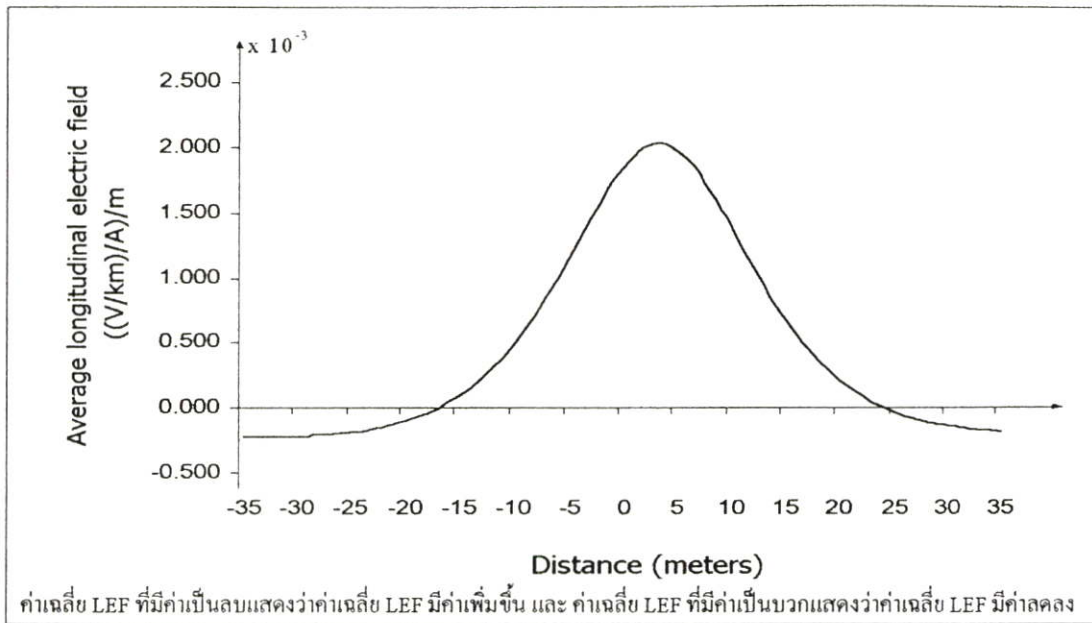
รูปที่ 6.15 โครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร

6.4.3.1 การเพิ่มความสูงของเสาสูง(h)

ในการพิจารณาค่าความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการเพิ่มความสูงจากเดิม 12.55 เมตรเป็น 13.55 , 14.55 และ 15.55 เมตรเพื่อต้องการดูผลของ LEF ต่อเมตรที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละตำแหน่งภายในเขตเดินสายไฟฟ้าผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาสูงกับค่า LEF

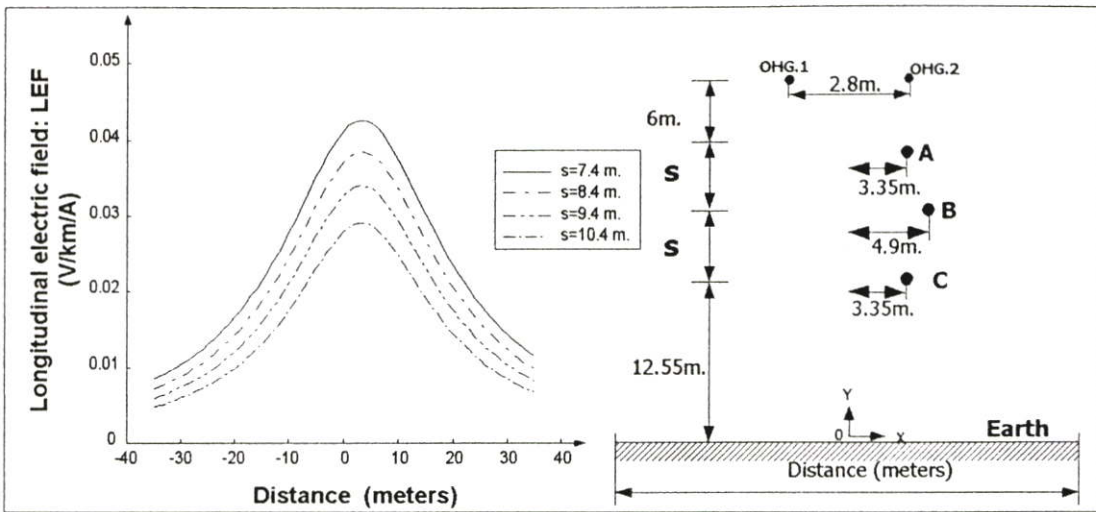


รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของเสาส่งกับค่า LEF เฉลี่ย

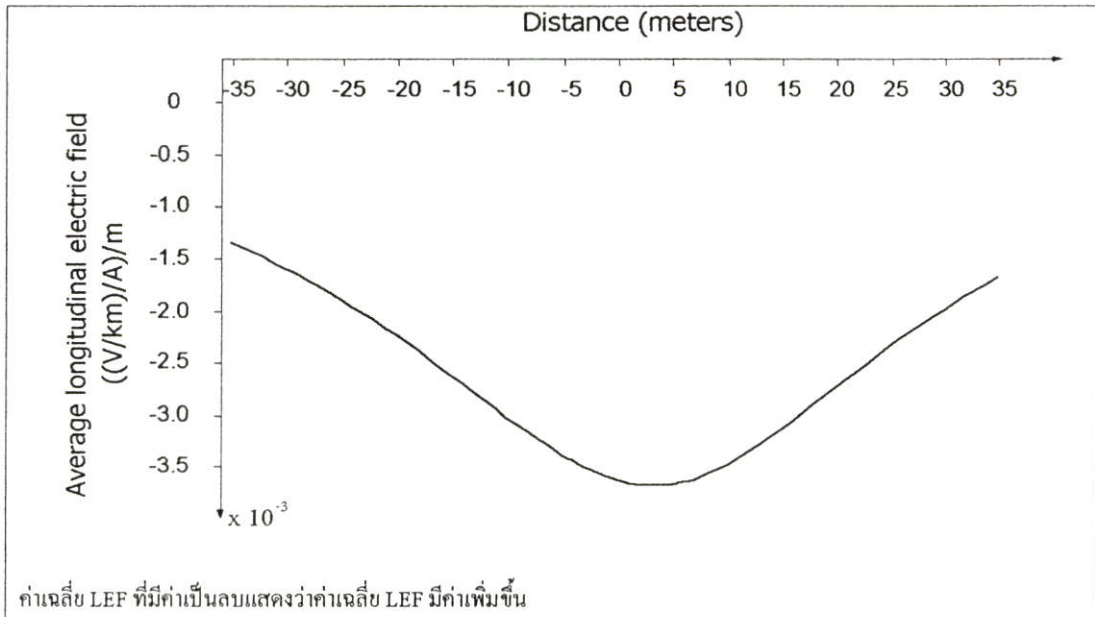
จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการกระจายของค่า LEF ที่ระยะห่างจากแนวสายส่งค่าต่างๆพบว่าที่ความสูงปกติคือ 12.55 เมตร จุดที่ได้รับผลกระทบจากค่า LEF น้อยที่สุดคือขอบของเขตการเดินสายไฟฟ้า(-35 เมตร) คือมีค่า 0.009×10^{-3} (V/km)/A และจุดที่มีค่า LEF สูงสุดคือที่ระยะห่างจากกึ่งกลางเสาส่ง 3 เมตร มีค่า 0.035×10^{-3} (V/km)/A และเมื่อค่าความสูงของเสาส่งมีค่าเพิ่มขึ้นค่า LEF จะมีค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 6.17 จากกราฟรูปที่ 6.17 แสดงค่าเฉลี่ยของการลดทอนค่า LEF เมื่อทำการเพิ่มความสูงของเสาส่งจากความสูงเดิม พบว่าค่าเฉลี่ยของการลดทอนค่า LEF ในแต่ละจุดไม่เท่ากันจุดที่ลดทอนค่า LEF ได้มากที่สุดที่ระยะ 3 เมตร จากจุดกึ่งกลางเสาส่งโดยมีค่าเท่ากับ 2.032×10^{-3} ((V/km)/A) /m และจุดที่มีการลดทอนค่า LEF น้อยที่สุดที่ระยะ 24 เมตร มีค่าเท่ากับ 0.001×10^{-3} ((V/km)/A) /m และที่ตำแหน่ง -17 ถึง -35 เมตร 25 ถึง 35 เมตรเป็นช่วงที่ค่า LEF เฉลี่ยเพิ่มขึ้น

6.4.3.2 การเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำ(s)

ในการพิจารณาผลที่เกิดขึ้นกับค่า LEF เมื่อทำการเพิ่มระยะระหว่างเฟส โดยการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจาก 7.4 เมตร เป็น 8.4, 9.4 และ 10.4 เมตร เพื่อดูลักษณะการกระจายของค่า LEF ภายในเขตเดินสายไฟฟ้าและพิจารณาถึงค่า LEF เฉลี่ยต่อเมตรในการเพิ่มระยะระหว่างเฟสเมื่อทำการวิเคราะห์พบว่าการกระจายของค่า LEF มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะระหว่างตัวนำซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 6.18 และค่า LEF เฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดแสดงดังรูป 6.19



รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสกับค่า LEF



รูปที่ 6.19 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสกับค่า LEF เฉลี่ย

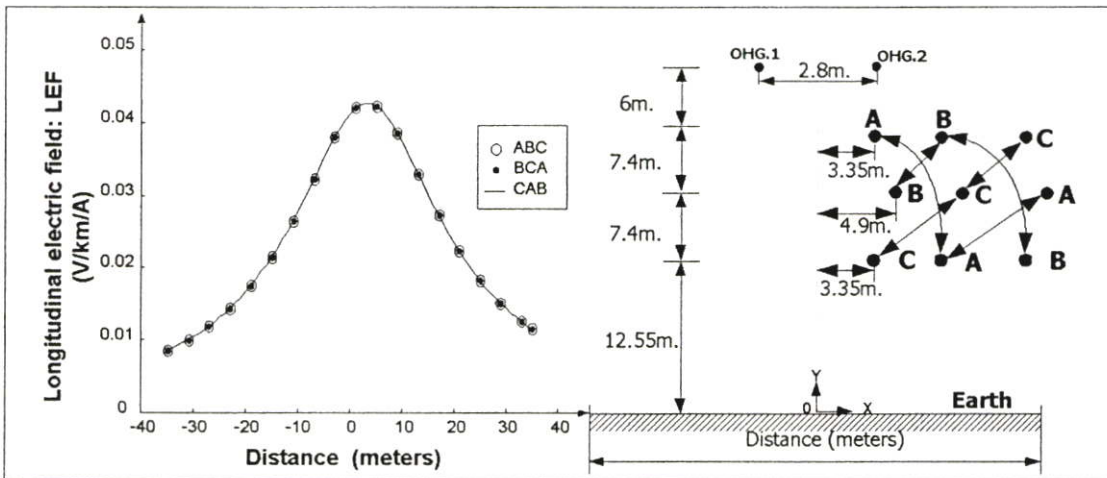
จากรูปที่ 6.19 แสดงค่าเฉลี่ยของการลดทอนค่า LEF พบว่าเมื่อทำการเพิ่มระยะห่างของเฟส จากเดิมคือ 7.4 เป็น 8.4, 9.4 และ 10.4 เมตร พบว่าค่า LEF เพิ่มขึ้นและการเพิ่มขึ้นของค่า LEF ในแต่ละตำแหน่งภายใต้เขตเดินสายไฟฟ้าไม่เท่ากัน ซึ่งพบว่าจุดที่มีการเพิ่มค่า LEF มากที่สุดคือระยะ 3 เมตรจากจุดกึ่งกลางเสาส่ง โดยค่าเฉลี่ยของการเพิ่มมีค่าเท่ากับ $3.674 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A) /m}$ และจุดที่มีการเพิ่มค่าเฉลี่ย LEF น้อยที่สุดคือ ระยะ -35 เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของการเพิ่มมีค่าเท่ากับ $1.351 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A) /m}$ และค่า LEF เฉลี่ยที่เพิ่มทุกๆจุดมีค่าเท่ากับ $2.644 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A) /m}$

6.4.3.3 การจัดลำดับเฟสของสายส่ง(Phase sequence)

ในการพิจารณาการจัดลำดับเฟสเพื่อผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อค่า LEF โดยการจัดลำดับเฟสแบ่งเป็นแบบทวนเข็มนาฬิกาและตามเข็มนาฬิกา ซึ่งได้แสดงลักษณะการจัดวางตัวนำดังกล่าวที่ 6.3 ผลที่ได้จากการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 6.20 จากรูปที่ 6.20 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการจัดลำดับเฟสดังตารางที่ 6.2 ผลที่เกิดขึ้นคือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการจัดลำดับเฟส

ตารางที่ 6.3 การจัดลำดับเฟส

การจัดลำดับเฟส	การจัดวางตัวนำ		
ตามเข็มนาฬิกา	ABC	BCA	CAB
ทวนเข็มนาฬิกา	ACB	CBA	BAC

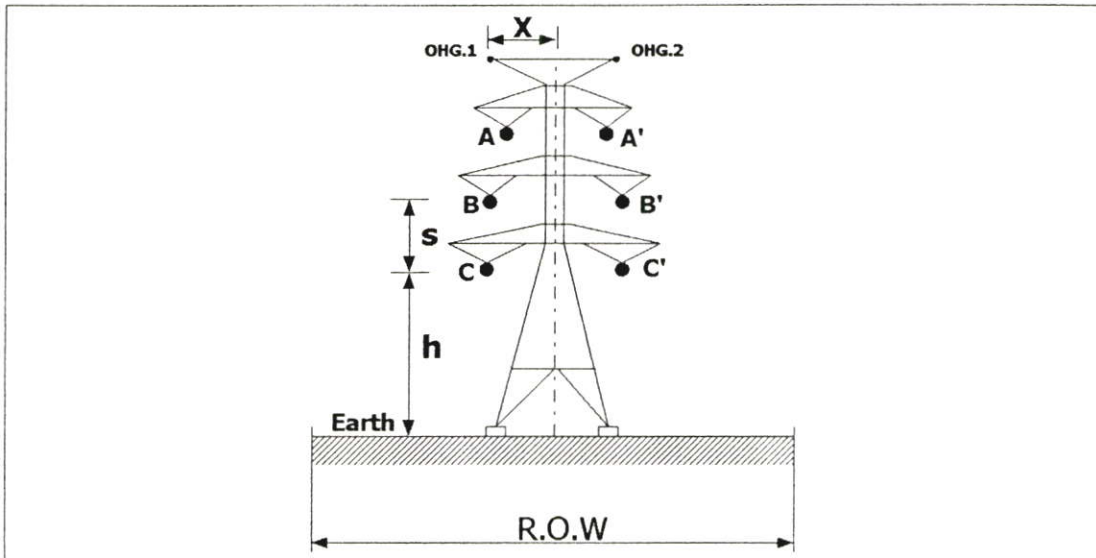


รูปที่ 6.20 การกระจายค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการจัดลำดับเฟส

6.4.4 กรณีโครงสร้างของเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวดิ่ง 2 วงจร

โครงสร้างของเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวดิ่ง 2 วงจรแสดงดังรูปที่ 6.21 โดยเสาส่งที่นำมาพิจารณาเป็นโครงสร้างของเสาส่งที่มีการติดตั้งใช้งานภายในประเทศไทย ในระบบ 500 kV โดยทำการติดตั้งจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ(MAE MOH POWERPLANT) จังหวัดลำปาง ไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก(THA TAKO SUBSTATION) จังหวัดนครสวรรค์ โดยกำหนดให้ความสูงของโครงสร้างของเสาส่งเป็นไปตามโครงสร้างที่ติดตั้งจริง ซึ่งความสูงจากพื้นดินถึงสายส่ง(h) 29 เมตรและระยะระหว่างตัวนำ(S) 11 เมตร กระแสของสายส่งมีค่าเท่ากับ 1 แอมป์ และในการพิจารณากำหนดให้กระแสของสายป้องกันไฟฟ้ามี่ค่า 0 แอมป์ และค่า LEF ที่ได้จากการพิจารณาคือ LEF ที่ผิวของพื้นดินและระยะเขตเดินสายไฟฟ้าที่ใช้ในการพิจารณาคือ 70 เมตรเนื่องจากเป็นเขต

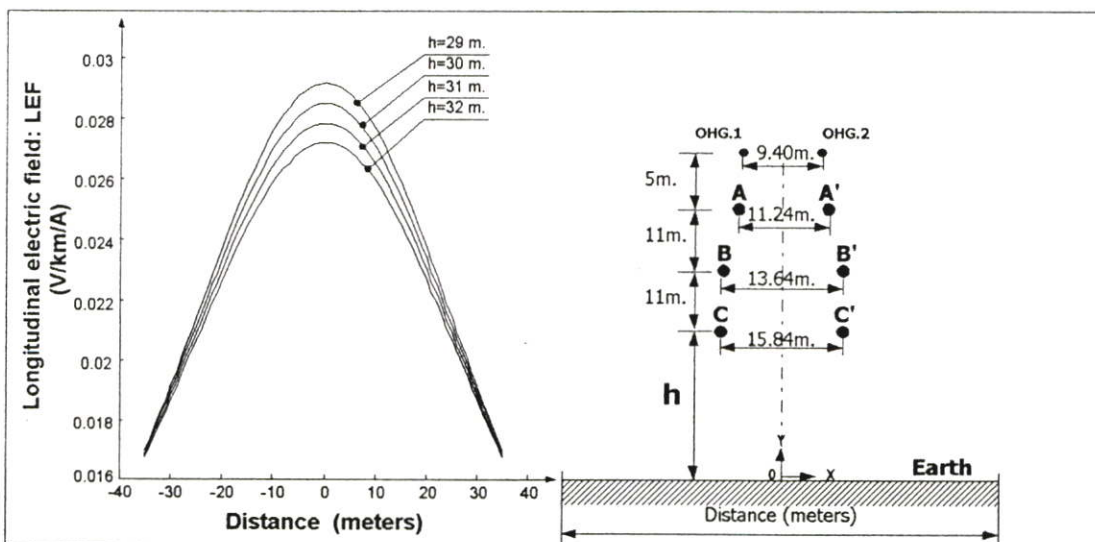
ปลอดภัยของการเดินสายสูงสุดที่ใช้ในประเทศไทย โดยการพิจารณาค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร ดังนี้



รูปที่ 6.21 โครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำของสายส่งในแนวตั้ง 2 วงจร

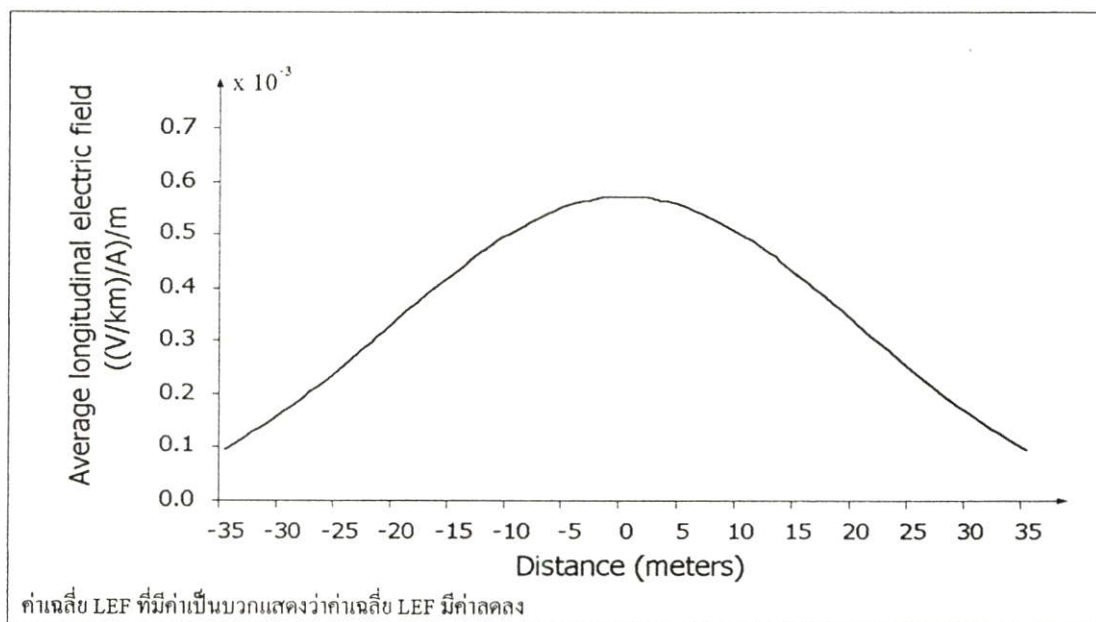
6.4.4.1 การเพิ่มความสูงของเสาสูง(h)

ในการพิจารณาค่าความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการเพิ่มความสูงจากเดิม 29 เมตรเป็น 30 31 และ 32 เมตรเพื่อต้องการดูการกระจายของค่า LEF ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละตำแหน่งภายในเขตเดินสายไฟฟ้าผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.22 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาสูงกับค่า LEF

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าการกระจายของค่า LEF ที่ตำแหน่งต่างๆภายใต้เขตเดินสายไฟฟ้าที่ความสูงปกติ คือ 29 เมตร จุดที่ได้รับค่า LEF น้อยที่สุดที่ 35 และ -35 เมตร มีค่าเท่ากับ 16.754×10^{-3} (V/km)/A และจุดที่มีค่า LEF สูงสุดคือใต้แนวสายส่ง มีค่าเท่ากับ 27.207×10^{-3} (V/km)/A เมื่อทำการเพิ่มความสูงของเสาส่งพบว่าค่า LEF ภายในเขตการเกิดสายไฟฟ้ามีค่าลดลง ซึ่งค่า LEF เฉลี่ยต่อการเพิ่มความสูงของเสาส่ง 1 เมตรแสดงดังรูปที่ 6.23



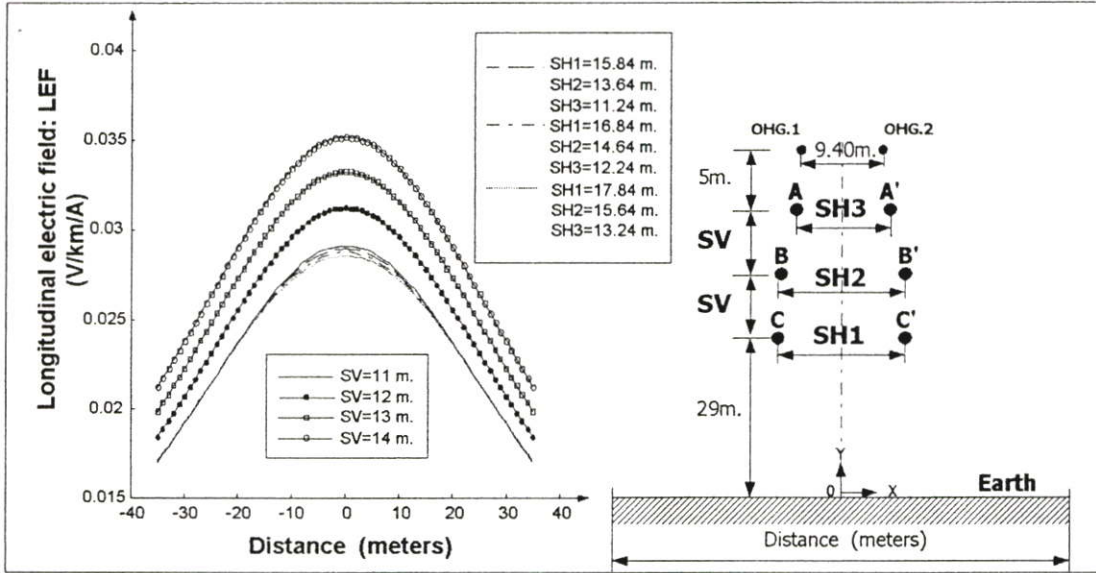
รูปที่ 6.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF เฉลี่ย

จากรูป 6.23 แสดงค่าเฉลี่ยของการลดทอนค่า LEF พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความสูงของเสาส่ง จากความสูงเดิมคือ 29 เป็น 30, 31 และ 32 เมตร พบว่าการลดลงของ LEF ในแต่ละจุดไม่เท่ากัน ตำแหน่งที่มีอัตราการลดทอนค่า LEF มากที่สุดคือตำแหน่งกึ่งกลางของเสาส่ง มีค่าเฉลี่ยของการลดทอนค่า LEF เท่ากับ 0.572×10^{-3} (V/km)/A /m และตำแหน่งที่มีการลดทอนค่า LEF น้อยที่สุดอยู่ที่ สุดคือตำแหน่ง 35 และ -35 เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของการลดทอนเท่ากับ 0.096×10^{-3} (V/km)/A /m

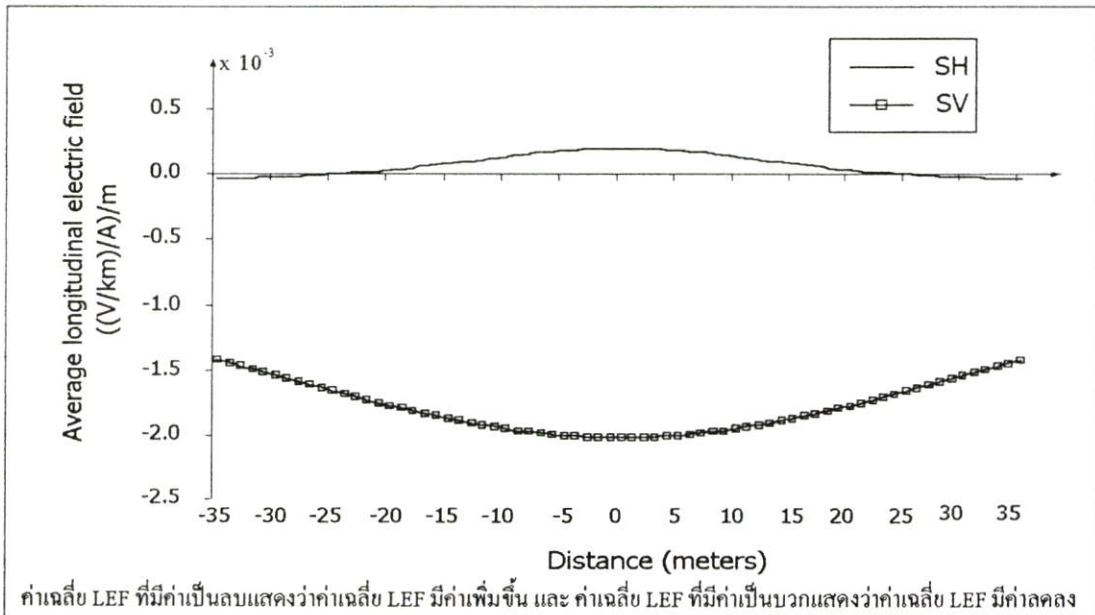
6.4.4.2 ระยะระหว่างเฟส(Phase spacing)

ในการพิจารณาระยะระหว่างตัวนำเปลี่ยนแปลงได้กำหนดให้ระยะตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง 2 ทิศทางคือการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้ง(SV) โดยการเพิ่มระยะระหว่างเฟสจากเดิม 11 เมตร เป็น 12 13 และ 14 เมตร และการเปลี่ยนแปลงในแนวนอน(SH) จากระยะเดิม SH1= 15.84, SH2=13.64 และ SH3=11.24 เมตร เป็น SH1= 16.84, SH2=14.64 และ SH3=12.24 , SH1= 17.84, SH2=15.64 และ SH3=13.24 และ SH1= 18.84, SH2=16.64 และ SH3=14.24 เพื่อดูการกระจายของค่า LEF ใน

แต่ละตำแหน่งภายในเขตการเดินสายไฟฟ้า ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.24 จากกราฟพบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า SV ค่า LEF มีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการปรับ SH ค่า LEF ในช่วง 24 ถึง -24 เมตร มีค่าลดลง และในช่วง 25 ถึง 35 เมตร และ -25 ถึง -35 เมตร ค่า LEF มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า LEF เหล่านี้ที่ลดลงและเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 6.25



รูปที่ 6.24 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) และระยะระหว่างเฟสในแนวนอน(SH)ค่า LEF



ค่าเฉลี่ย LEF ที่มีค่าเป็นลบแสดงว่าค่าเฉลี่ย LEF มีค่าเพิ่มขึ้น และ ค่าเฉลี่ย LEF ที่มีค่าเป็นบวกแสดงว่าค่าเฉลี่ย LEF มีค่าลดลง

รูปที่ 6.25 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) และระยะระหว่างเฟสในแนวนอน(SH)ค่า LEF, เฉลี่ย

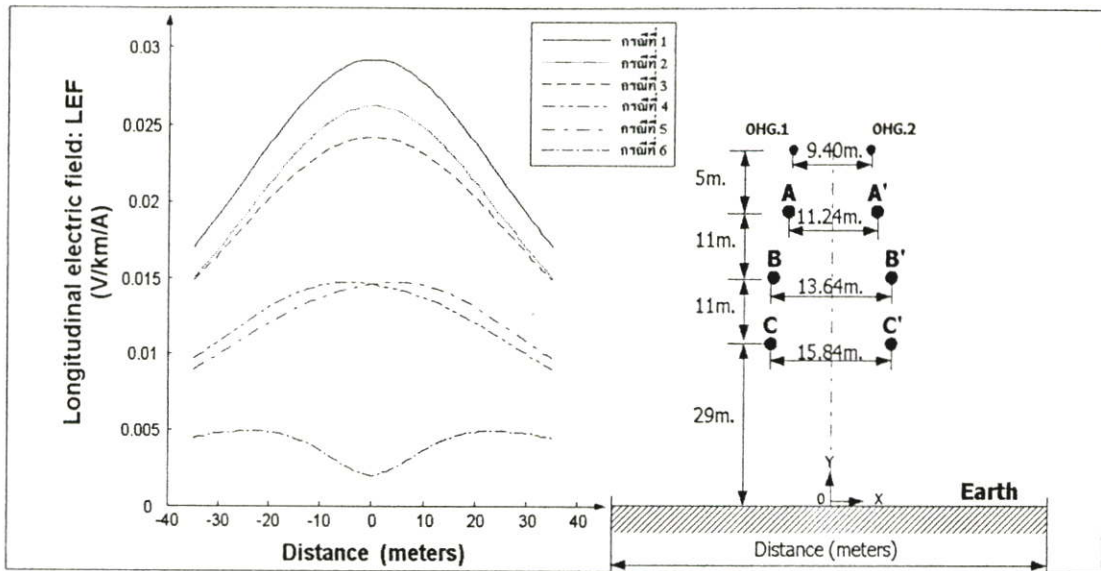
จากรูปที่ 6.25 แสดงค่าเฉลี่ยของการลดทอนค่า LEF พบว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า SV พบว่าค่า LEF เพิ่มขึ้นและการเพิ่มขึ้นของค่า LEF ไม่เท่ากัน ซึ่งพบว่าจุดที่มีการเพิ่มค่า LEF มากที่สุดคือจุดศูนย์กลางของเสาส่ง โดยค่าเฉลี่ยของการเพิ่มมีค่าเท่ากับ 2.015×10^{-3} ((V/km)/A) /m และจุดที่มีการเพิ่มค่าเฉลี่ย LEF น้อยที่สุดคือตำแหน่ง 35 และ -35 เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของการเพิ่มมีค่าเท่ากับ 1.422×10^{-3} ((V/km)/A) /m และค่า LEF เฉลี่ยที่เพิ่มทุกๆจุดมีค่าเท่ากับ 1.688×10^{-3} ((V/km)/A) /m และเมื่อทำการเพิ่มค่า SH พบว่าในช่วงระยะระหว่าง 25 เมตรจากซ้ายและขวาจากแนวสายส่ง ค่า LEF เฉลี่ยมีค่าลดลงโดยที่ตำแหน่งกึ่งกลางของเสาส่งมีค่าเฉลี่ยของการลดลงเท่ากับ 0.194×10^{-3} ((V/km)/A) /m

6.4.4.3 การจัดลำดับเฟสของสายส่ง(Phase sequence)

ในการพิจารณาการจัดลำดับเฟสเพื่อคุณลักษณะที่เกิดขึ้นต่อค่า LEF โดยการจัดลำดับเฟสซึ่งแบ่งตามลักษณะการจัดวางตัวนำเป็น 6 กรณี ดังแสดงในตารางที่ 6.4 และผลของการจัดลำดับเฟสทำให้ค่า LEF กระจายดังรูปที่ 6.26

ตารางที่ 6.4 ตารางแสดงเงื่อนไขการจัดลำดับเฟส

กรณีที่	การจัดวางตัวนำ					
1	A ↔ A' C ↔ C' B ↔ B'	A ↔ A' B ↔ B' C ↔ C'	B ↔ B' C ↔ C' A ↔ A'	C ↔ C' B ↔ B' A ↔ A'	B ↔ B' A ↔ A' C ↔ C'	C ↔ C' A ↔ A' B ↔ B'
2	A ↔ A' B ↔ C' C ↔ B'	B ↔ B' C ↔ A' A ↔ C'	C ↔ C' A ↔ B' B ↔ A'			
3	C ↔ B' B ↔ C' A ↔ A'	A ↔ C' C ↔ A' B ↔ B'	B ↔ A' A ↔ B' C ↔ C'			
4	C ↔ A' A ↔ B' B ↔ C'	A ↔ B' B ↔ C' C ↔ A'	B ↔ C' C ↔ A' A ↔ B'			
5	C ↔ A' B ↔ C' A ↔ B'	B ↔ C' A ↔ B' C ↔ A'	A ↔ B' C ↔ A' B ↔ C'			
6	A ↔ B' B ↔ A' C ↔ C'	B ↔ A' C ↔ C' A ↔ B'	C ↔ B' A ↔ A' B ↔ C'			



รูปที่ 6.26 ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF

จากรูปที่ 6.26 แสดงการจัดลำดับเฟสแสดงให้เห็นว่าในการจัดลำดับเฟสในกรณีที่ 6 เป็นการจัดลำดับเฟสที่ทำให้ค่า LEF ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุดและในการจัดลำดับเฟสในกรณีที่ 1 เป็นการจัดลำดับเฟสที่ส่งผลทำให้ค่า LEF มีค่ามากที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบมาเปอร์เซ็นต์การลดทอนในแต่ละกรณีเทียบกันแสดงให้เห็นดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 เปอร์เซ็นการลดทอนจากการจัดลำดับเฟส

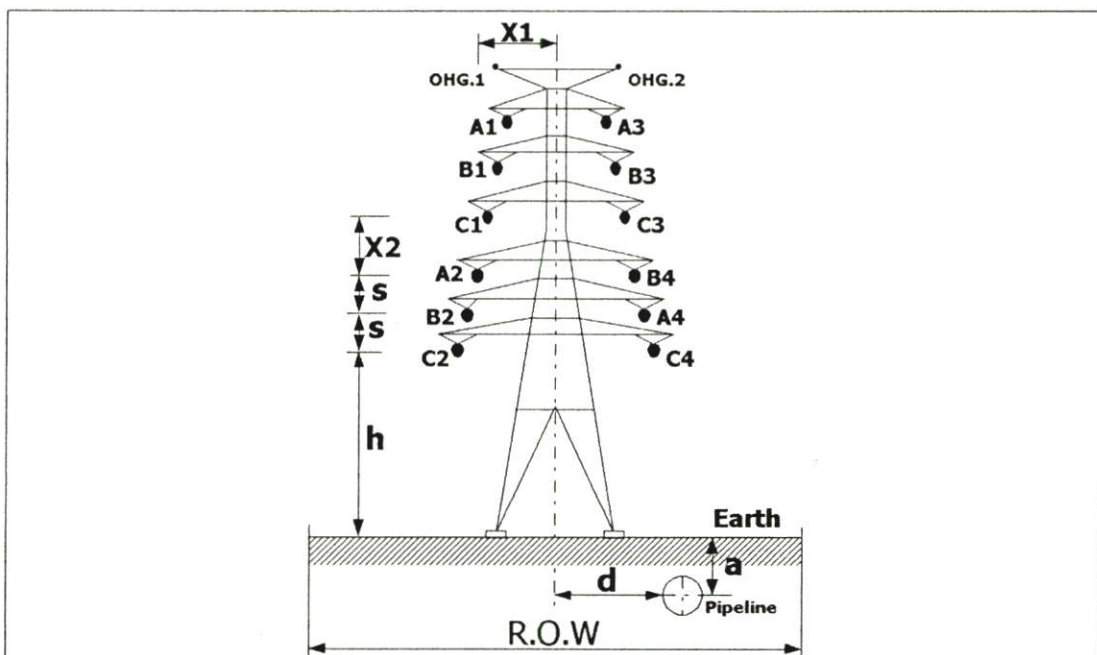
กรณีที่	เปอร์เซ็นต์ในการเปรียบเทียบโดยเฉลี่ย					
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6
1	0	-11%	-15%	-48%	-48%	-82%
2	11%	0	-5%	-41%	-41%	-80%
3	15%	5%	0	-38%	-38%	-79%
4	48%	41%	38%	0	-7%* 7%**	-66%
5	48%	41%	38%	7%* -7%**	0	-66%
6	82%	80%	79%	66%	66%	0

* ระยะทางจาก 0 ถึง -35 เมตร
 ** ระยะทางจาก 0 ถึง 35 เมตร
 “-“ แสดงว่า LEF เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 6.5 แสดงการเปรียบเทียบการจัดลำดับเฟสทั้ง 6 กรณี จะเห็นได้ว่ากรณีที่ 1 เป็นกรณีที่ก่อให้เกิดค่า LEF มีค่าสูงสุดและในกรณีที่ 6 เป็นกรณีที่ก่อให้เกิดค่า LEF มีค่าน้อยที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีการจัดวางตัวนำทั้งสองพบว่าการจัดวางตัวนำในกรณีที่ 6 สามารถลดค่า LEF ได้ถึง 82 % เมื่อเทียบกับการจัดวางตัวนำในกรณีที่ 1

6.4.5 กรณีโครงสร้างของเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร

ในโครงสร้างของเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจรแสดงดังรูปที่ 6.27 โดยเสาสูงที่นำมาพิจารณาเป็นโครงสร้างของเสาสูงที่มีการติดตั้งใช้งานในระบบ 230 kV ที่ทำการส่งจ่ายจาก บริษัทไทยโคเจนเนอเรชั่น จำกัด (THAI COGENERATION Co.,Ltd.) ไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงระยอง 2 (RAYONG2 SUBSTATION) จังหวัดระยอง โดยกำหนดให้ความสูงของโครงสร้างของเสาสูงเป็นไปตามโครงสร้างที่ติดตั้งจริง ซึ่งความสูงจากพื้นดินถึงสายส่ง (h) 29 เมตรและระยะระหว่างตัวนำ (S) 5.5 เมตรและระยะห่างระหว่างวงจรในแนวตั้ง 7.5 เมตร กระแสของสายส่งมีค่าเท่ากับ 1 แอมป์ต่อเฟส ในการพิจารณากำหนดให้กระแสของสายป้องกันฟ้าผ่า (Overhead ground wire) มีค่า 0 แอมป์ และค่า LEF ที่ได้จากการพิจารณาคือ LEF ที่พื้นดิน และระยะเขตเดินสายไฟฟ้าที่ใช้ในการพิจารณาคือ 70 เมตรเนื่องจากเป็นเขตการเดินสายสูงสุดที่ใช้ในประเทศไทย โดยการพิจารณาค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากโครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจรดังนี้

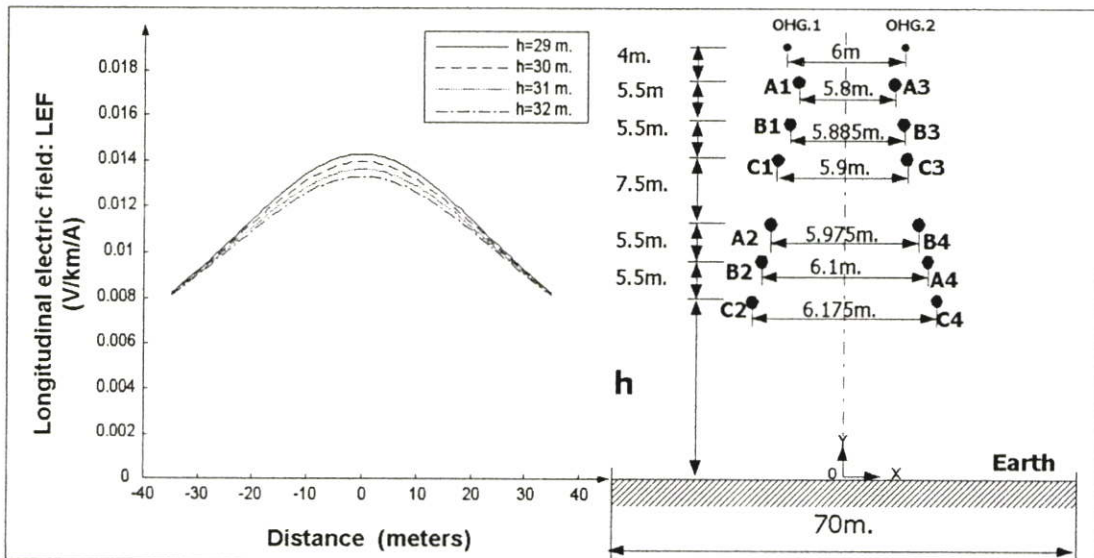


รูปที่ 6.27 โครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร

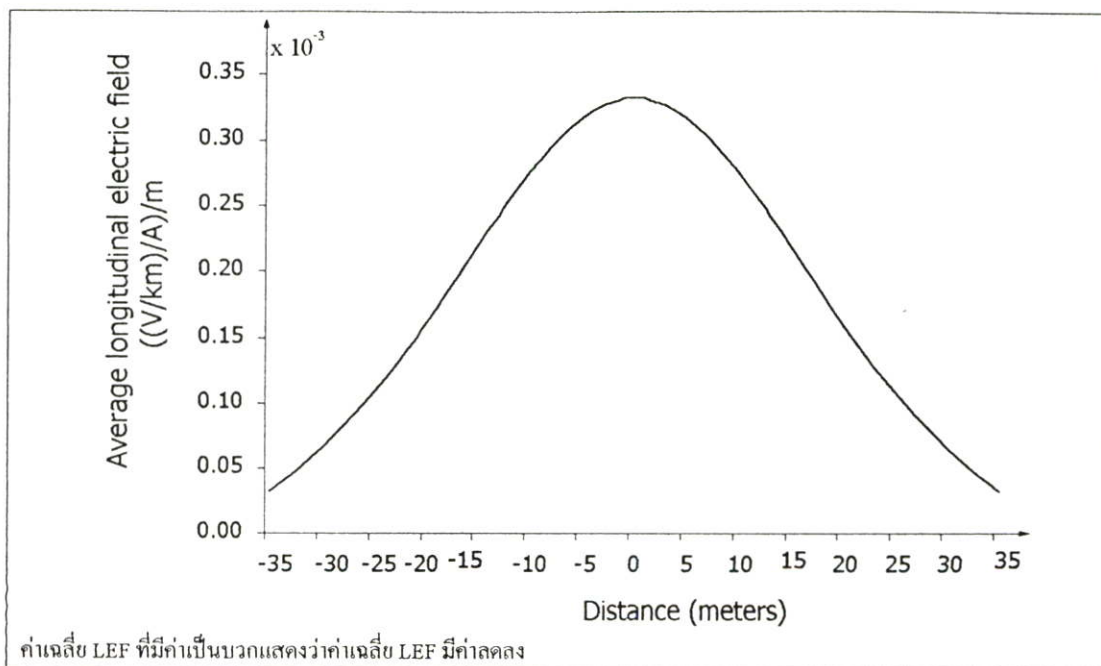
6.4.5.1 การเพิ่มความสูงของเสาส่ง

ในการพิจารณาค่าความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปโดยการเพิ่มความสูงจากเดิม 29 เมตร เป็น 30 , 31 และ 32 เมตรเพื่อต้องการดูผลของ LEF ต่อเมตรที่เกิดการเปลี่ยนแปลงในแต่ละตำแหน่งภายในเขตเดินสายไฟฟ้าผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.28 และจากกราฟแสดงให้เห็นว่าการกระจายของค่า LEF ที่ระยะห่างจากแนวสายส่งค่าต่างๆพบว่าที่ความสูงปกติคือ 29 เมตร จุดที่ได้รับผลกระทบจากค่า LEF น้อยที่สุดคือตำแหน่งที่ 35 เมตรจากกึ่งกลางของเสาส่งมีค่า 8.205×10^{-3} (V/km)/A และจุดที่มีค่า LEF สูงสุดคือที่จุดกึ่งกลางของเสาส่งมีค่า 14.331 (V/km)/A และเมื่อค่าความสูงของเสาส่งมีค่าเพิ่มขึ้นค่า LEF จะมีค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 6.29

จากรูปที่ 6.29 ค่าเฉลี่ยของการลดทอนค่า LEF พบว่าเมื่อทำการเพิ่มความสูงของเสาส่ง จากความสูงเดิมคือ 29 เป็น 30, 31 และ 32 เมตร พบว่าการลดลงของ LEF ในแต่ละจุดไม่เท่ากัน พบว่าตำแหน่งที่มีอัตราการลดทอนค่า LEF มากที่สุดคือตำแหน่งกึ่งกลางของเสาส่ง มีค่าเฉลี่ยของการลดทอนค่า LEF เท่ากับ 0.333×10^{-3} (V/km)/A /m และตำแหน่งที่มีการลดทอนค่า LEF น้อยที่สุดคือตำแหน่ง-35 เมตร และ 35 เมตรจากกึ่งกลางของเสาส่ง โดยมีค่าเฉลี่ยของการลดทอนเท่ากับ 0.033×10^{-3} (V/km)/A /m



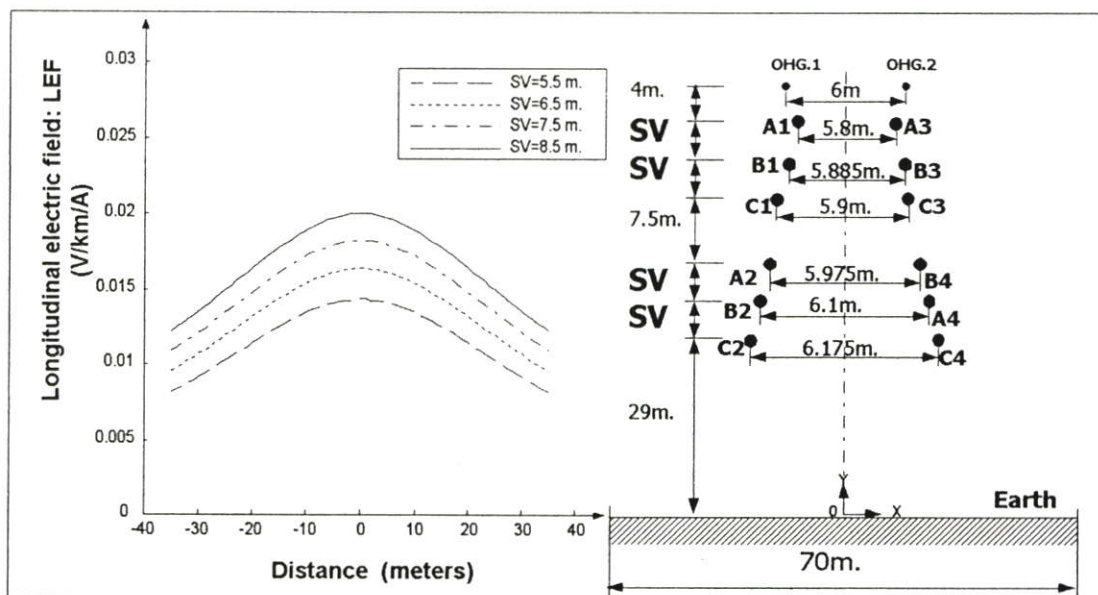
รูปที่ 6.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEF



รูปที่ 6.29 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเสาส่งกับค่า LEFเฉลี่ย

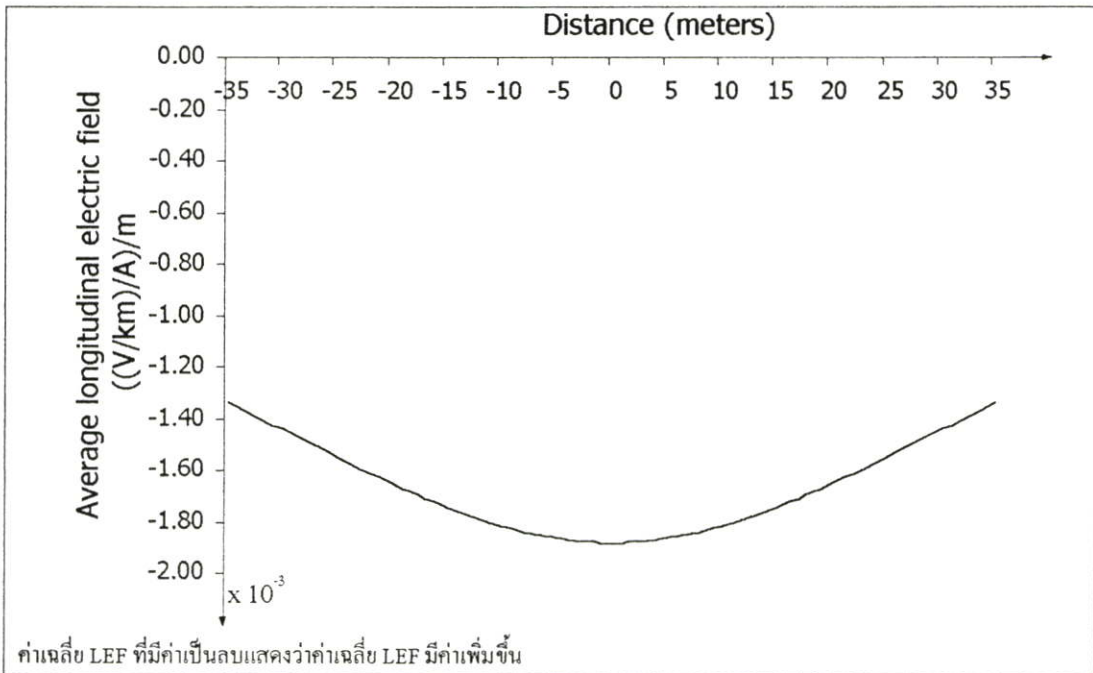
6.4.5.2 ระยะระหว่างเฟส(Phase spacing)

ในการพิจารณาระยะระหว่างตัวนำเปลี่ยนแปลงได้กำหนดให้ระยะตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง 2 ทิศทางคือการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้ง(SV) และการเปลี่ยนแปลงในแนวนอน(SH)



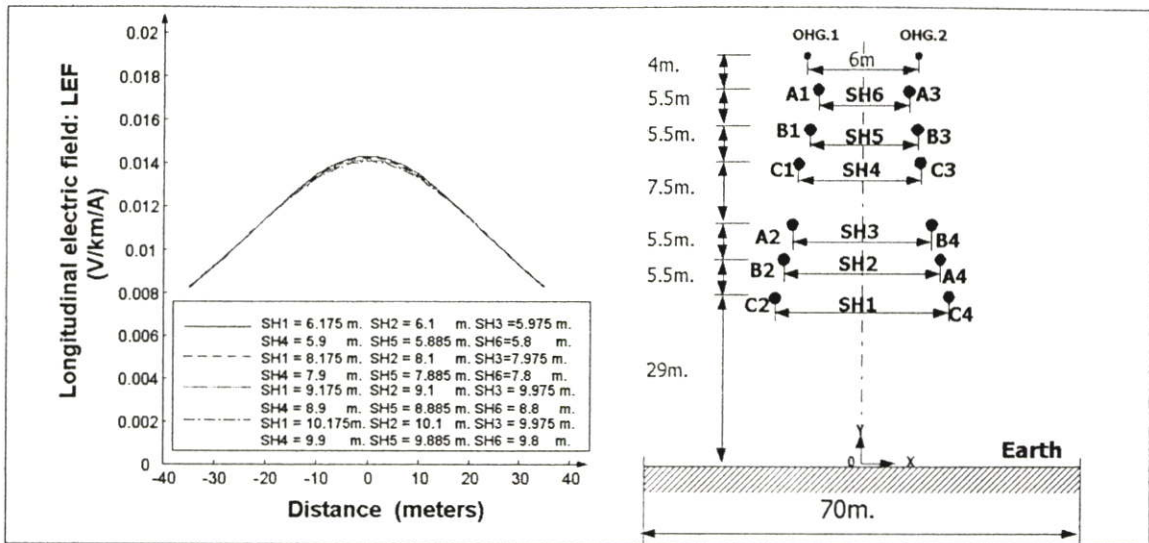
รูปที่ 6.30 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) กับค่า LEF

พบว่าเมื่อเพิ่มระยะ SV ทำให้ค่า LEF มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่าสูงสุดของการเพิ่มค่า LEF อยู่ที่กึ่งกลางแนวสายส่งแสดงดังรูปที่ 6.30 จุดต่ำสุดอยู่ที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้า และเมื่อทำการเพิ่มค่า SH ทำให้ค่า LEF มีค่าลดลงจุดต่ำสุดอยู่ที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าและจุดสูงสุดอยู่ที่กึ่งกลางแนวสายส่งแสดงดังรูปที่ 6.32 และค่า LEF เฉลี่ยเมื่อมีการเพิ่มระยะ SV และ SH แสดงดังรูป 6.31 และ 6.33

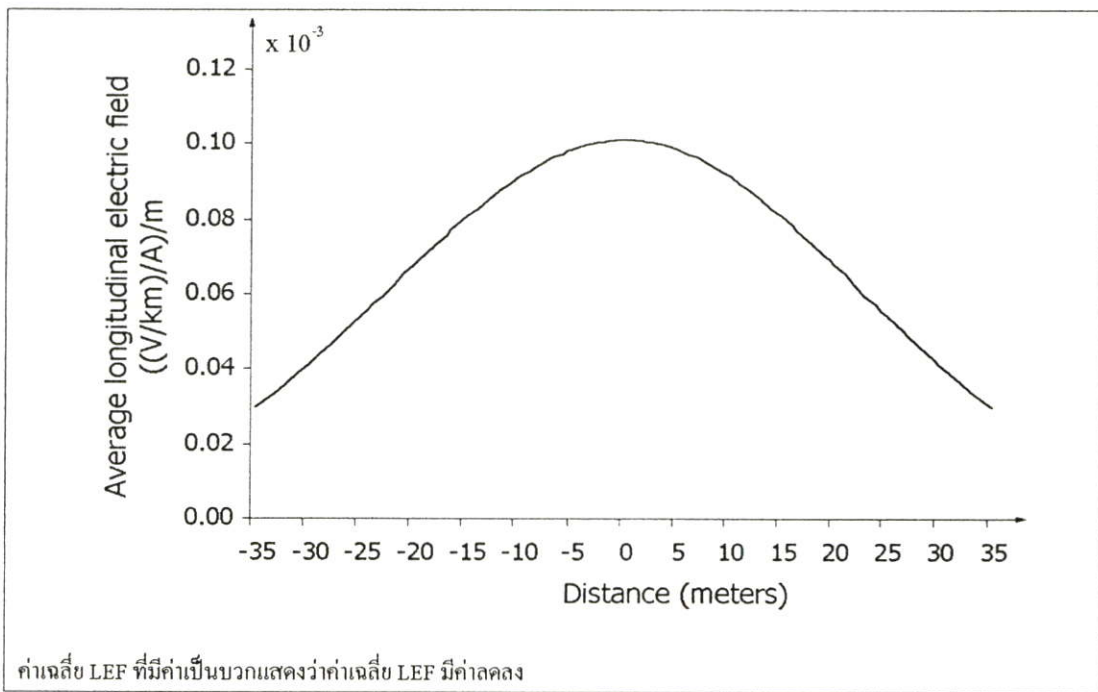


รูปที่ 6.31 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวตั้ง(SV) กับค่า LEF เฉลี่ย

จากรูปที่ 6.31 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะระหว่างเฟสในแนวตั้งค่า LEF เฉลี่ยทุกๆจุดภายใต้เขตของการเดินสายไฟฟ้ามียค่า LEF เพิ่มขึ้นซึ่งค่าเฉลี่ยที่เพิ่มในแต่ละจุดไม่เท่ากัน จุดที่ค่า LEF เฉลี่ยเพิ่มสูงสุดคือตำแหน่งกึ่งกลางของแนวสายส่งซึ่งอัตราการเพิ่มมีค่าเท่ากับ $1.881 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A) /m}$ ดังนั้นในการลดทอนค่า LEF ไม่สามารถทำได้โดยการเพิ่มระยะระหว่างเฟสในแนวตั้งได้



รูปที่ 6.32 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวนอน(HS) กับค่า LEF

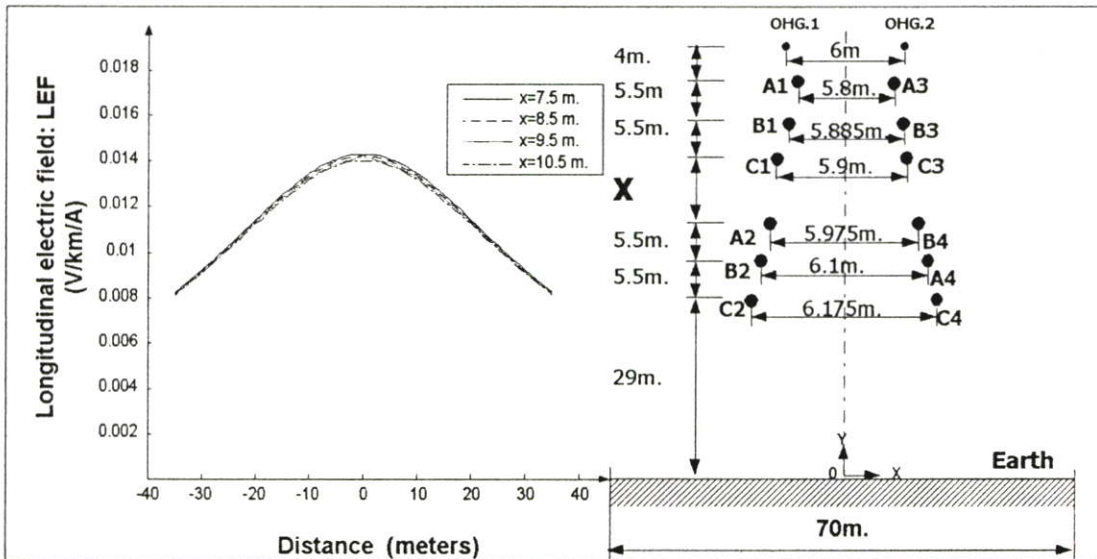


รูปที่ 6.33 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะระหว่างเฟสในแนวนอน(HS) กับค่า LEF เฉลี่ย

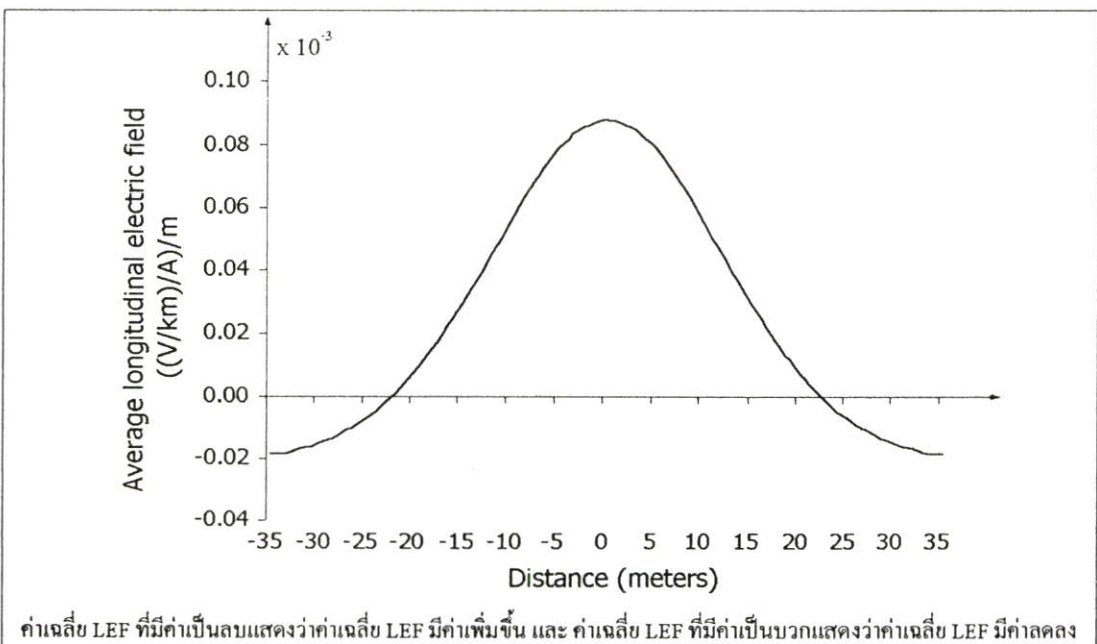
จากรูปที่ 6.33 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระยะระหว่างเฟสในแนวนอนค่า LEF เฉลี่ยทุกๆจุดภายใต้เขตของการเดินสายไฟฟ้ามีค่า LEF ลดลงซึ่งค่าเฉลี่ยที่ลดลงในแต่ละจุดไม่เท่ากัน จุดที่ค่า LEF เฉลี่ยมีค่าลดลงมากที่สุดคือตำแหน่งกึ่งกลางของแนวสายส่งซึ่งอัตราการลดมีค่าเท่ากับ 0.101×10^{-3} (V/km)/A) /m

6.4.5.3 การเพิ่มระยะระหว่างวงจร

การเพิ่มระยะระหว่างวงจร 1 และ 3 กับวงจร 2 และ 4 เพื่อต้องการการกระจายของ LEF ในแต่ละตำแหน่งบนพื้นดินซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.34 จากรูปพบว่าค่า LEF ในช่วง -22 ถึง 22 เมตร เมื่อทำการเพิ่มระยะระหว่างวงจรจะทำให้ค่า LEF มีค่าลดลง ช่วง 23 ถึง 35 เมตร และ ช่วง -23 ถึง -35 เมตร เป็นช่วงที่ค่า LEF มีค่าเพิ่มขึ้น โดยค่า LEF เฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 6.35



รูปที่ 6.34 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มระยะระหว่างวงจร 1 และ 3 กับวงจร 2 และ 4 กับค่า LEF

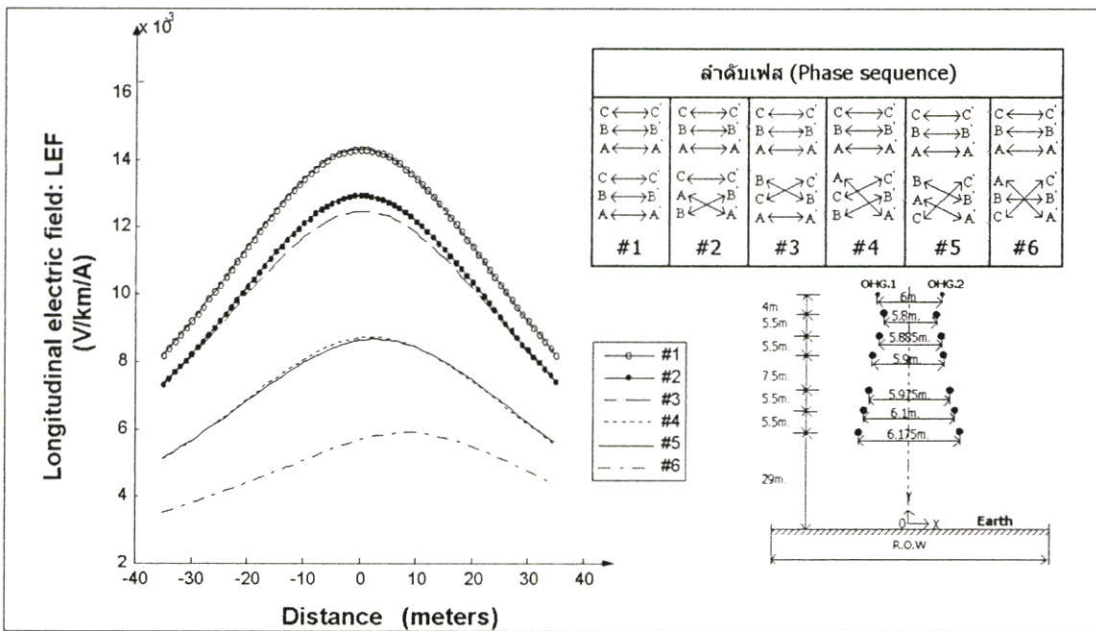


รูปที่ 6.35 ความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มระยะระหว่างวงจร 1 และ 3 กับวงจร 2 และ 4 กับค่า LEF เฉลี่ย

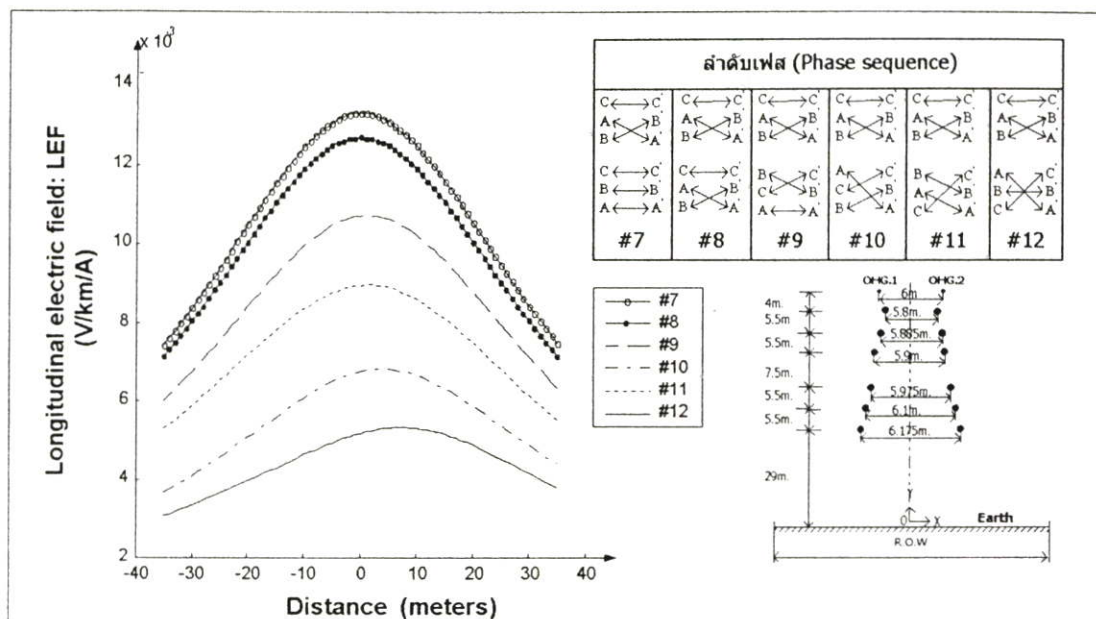
จากรูปที่ 6.35 แสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการเพิ่มค่า X ค่า LEF เฉลี่ยในช่วง -22 ถึง 22 เมตร มีค่าลดลง ซึ่งค่าเฉลี่ยที่ลดลงในแต่ละตำแหน่งไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับระยะที่ต้องการพิจารณาเป็นหลักซึ่งในช่วงนี้ ค่า LEF เฉลี่ยที่ลดลงมากที่สุดคือตำแหน่ง 0 เมตร โดยมีค่าเฉลี่ยของการลดลงเท่ากับ 0.088×10^{-3} ((V/km)/A)/m และในช่วง 23 ถึง 35 และ -23 ถึง -35 เมตร แสดงให้เห็นว่าค่า LEF โดยเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าเฉลี่ยสูงสุดของการเพิ่มมีค่าเท่ากับ 0.018×10^{-3} ((V/km)/A)/m ที่ตำแหน่ง 33, 34, 35 -33 -34 และ -35 เมตร

6.4.5.4 การจัดลำดับเฟสของสายส่ง(Phase sequence)

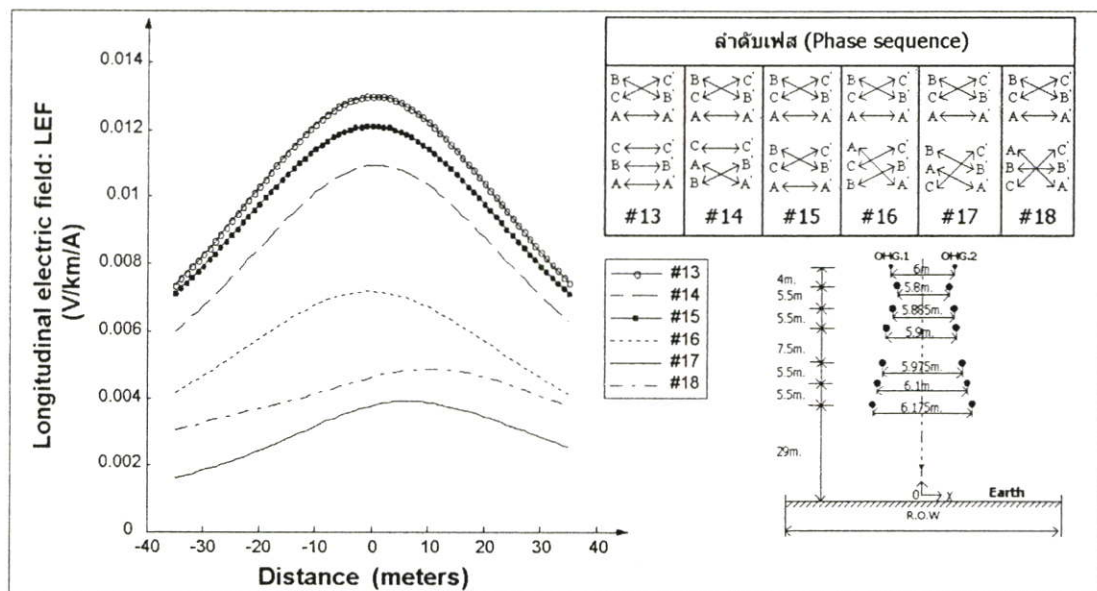
ในการจัดลำดับของสายส่งในกรณีที่ลักษณะของเสาส่งมีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4วงจร ได้ทำการแบ่งลักษณะของสายส่งออกเป็น 36 ลักษณะ เพื่อต้องการหาลักษณะการจัดลำดับของสายส่งให้ค่า LEF ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุดซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.36-6.41



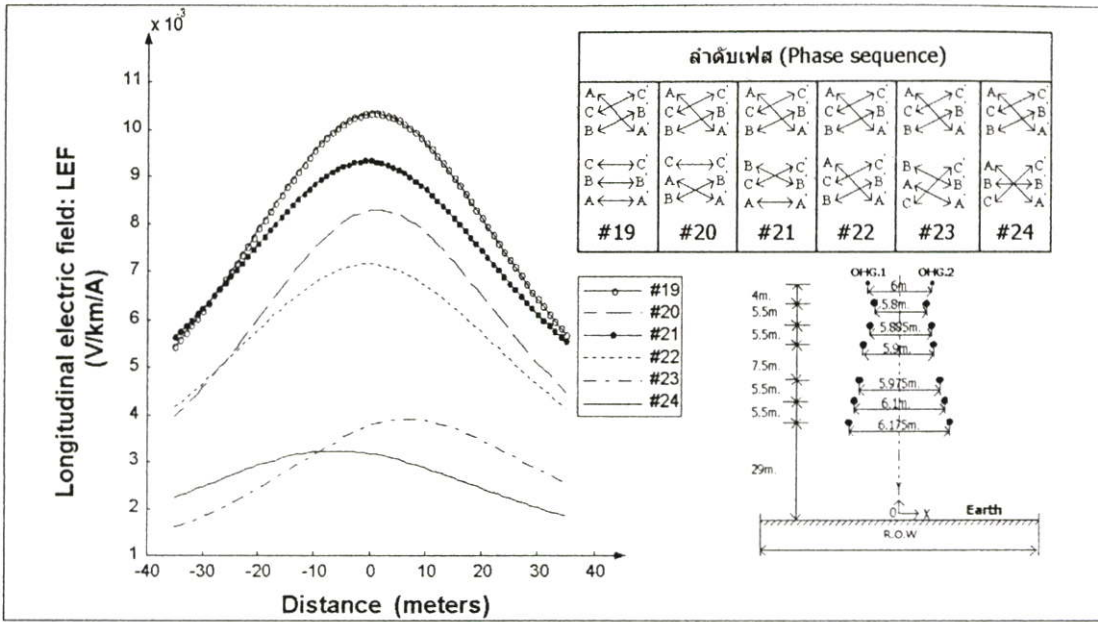
รูปที่ 6.36 ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 1-6



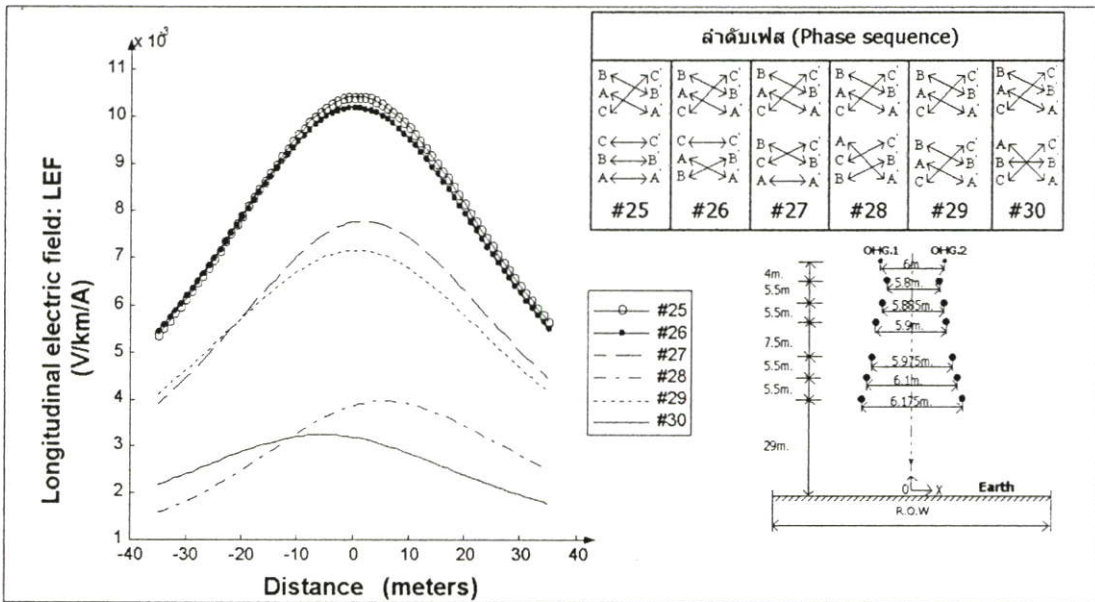
รูปที่ 6.37 ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 7-12



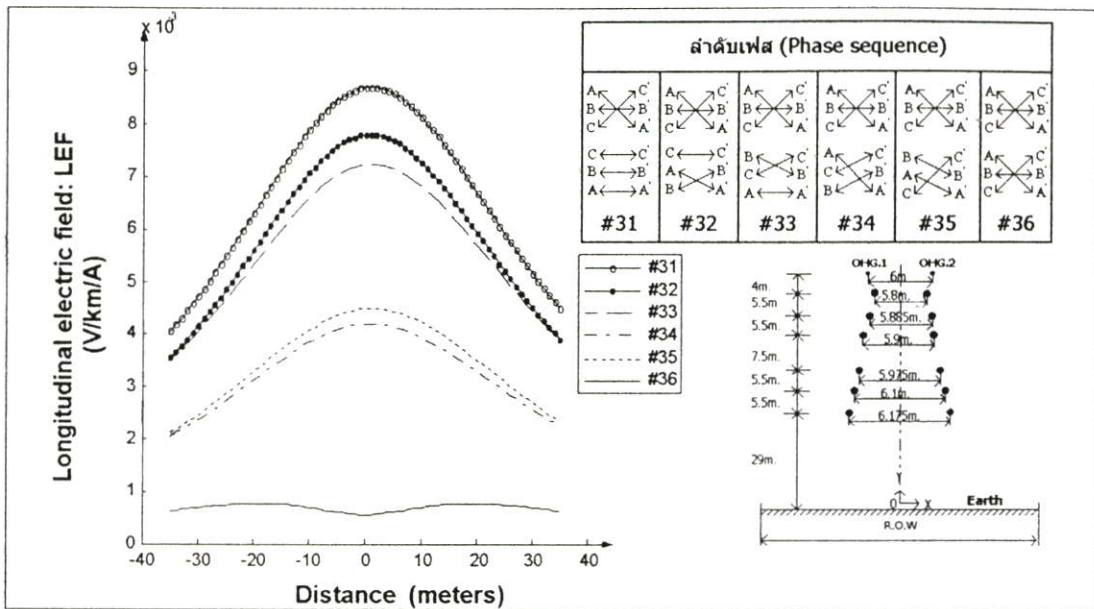
รูปที่ 6.38 ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 13-18



รูปที่ 6.39 ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 19-24



รูปที่ 6.40 ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 25-30



รูปที่ 6.41 ความสัมพันธ์ระหว่างการจัดลำดับเฟสกับค่า LEF กรณี 31-36

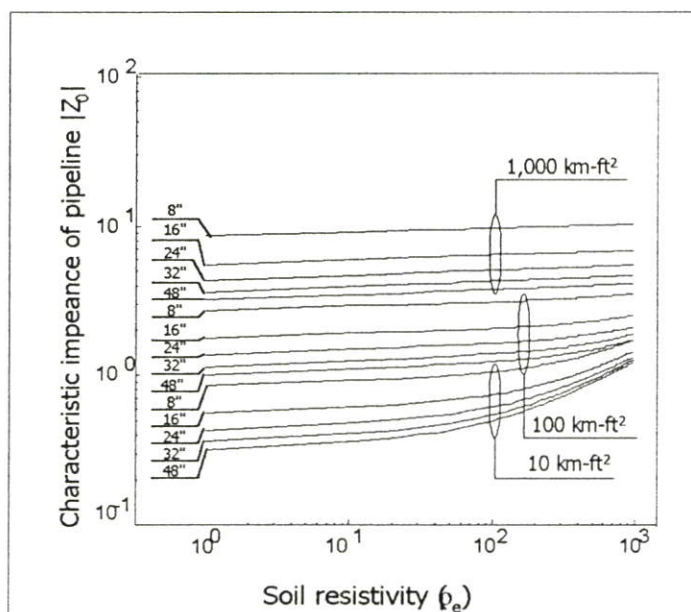
จากการจัดลำดับเฟสทั้งหมด 36 ลักษณะแสดงให้เห็นว่า ค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการจัดลำดับเฟสตามลักษณะที่ 1 ซึ่งค่า LEF สูงสุด และในการจัดลำดับเฟสของสายส่งดังในกรณีที่ 36 แสดงให้เห็นว่าการกระจาย ของค่า LEF มีค่าต่ำที่สุดซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า LEF ระหว่างการจัดวางตัวนำในกรณีที่ 1 กับการจัดวางตัวนำในกรณีที่ 36 พบว่าสามารถลดค่า LEF ลงได้ถึง 84% โดยเฉลี่ย ดังนั้นในการจัดลำดับเฟสที่เหมาะสมจะช่วยลดค่า LEF ได้

6.5 การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำโดยการต่อกราวด์ให้กับท่อส่งก๊าซ

เทคนิคที่นิยมใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำอีกวิธีหนึ่งคือเทคนิคการต่อกราวด์ให้กับท่อส่งก๊าซ โดยวิธีการที่จะต่อระบบกราวด์ให้ได้ผลมากที่สุดคือการต่อระบบกราวด์บริเวณท่อที่มีแรงดันเหนี่ยวนำสูงที่สุดซึ่งจุดดังกล่าวคือจุดที่ไม่ต่อเนื่อง เช่น บริเวณที่มีฉนวนกั้นในการเชื่อมต่อระหว่างท่อกับท่อ, บริเวณที่มีการหักออกหักเข้าจากแนวสายส่งเป็นต้น ซึ่งในการเชื่อมต่อระบบกราวด์จะไม่เกิดประโยชน์เลยถ้าการเชื่อมต่อระบบกราวด์บริเวณที่แรงดันเหนี่ยวนำที่ต่ำ เช่น บริเวณจุดกึ่งกลางของท่อที่ขนานกับแนวสายส่ง ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึง ระบบกราวด์อัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ โดยการพิจารณาจะแสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำและความสัมพันธ์อัตราส่วนของแรงดันเหนี่ยวนำที่ทำการลดทอนกับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์และการหาขนาดของกราวด์ในแต่ละระบบซึ่งในการพิจารณาได้ทำการแบ่งลักษณะของระบบกราวด์เป็นดังนี้

6.5.1 ระบบกราวด์

ในการพิจารณาการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นซึ่งเงื่อนไขของการต่อระบบกราวด์ที่นำมาวิเคราะห์ของระบบกราวด์ที่อยู่ภายใต้เขตการเดินสายไฟฟ้า ในการพิจารณาในแต่ละระบบกราวด์จะแสดงให้เห็นถึงอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำกับขนาดของกราวด์และขนาดของอิมพีแดนซ์กับอัตราส่วนของกราวด์ลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ในการพิจารณาได้ทำการแบ่งระบบกราวด์ออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบกราวด์รูด(Ground rod) และ ระบบกราวด์ไวร์(Ground wire) ในการติดตั้งกราวด์ทั้ง 2 ระบบจำเป็นจะต้องคำนึงถึงค่า อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อส่งก๊าซด้วยเนื่องจากว่า ในกรณีค่าความต้านทานของกราวด์สูงทำให้ไฟฟ้ากระแสสลับไหลลงกราวด์ได้น้อยทำให้การติดตั้งระบบกราวด์ไม่ได้ผลเท่าที่ควร

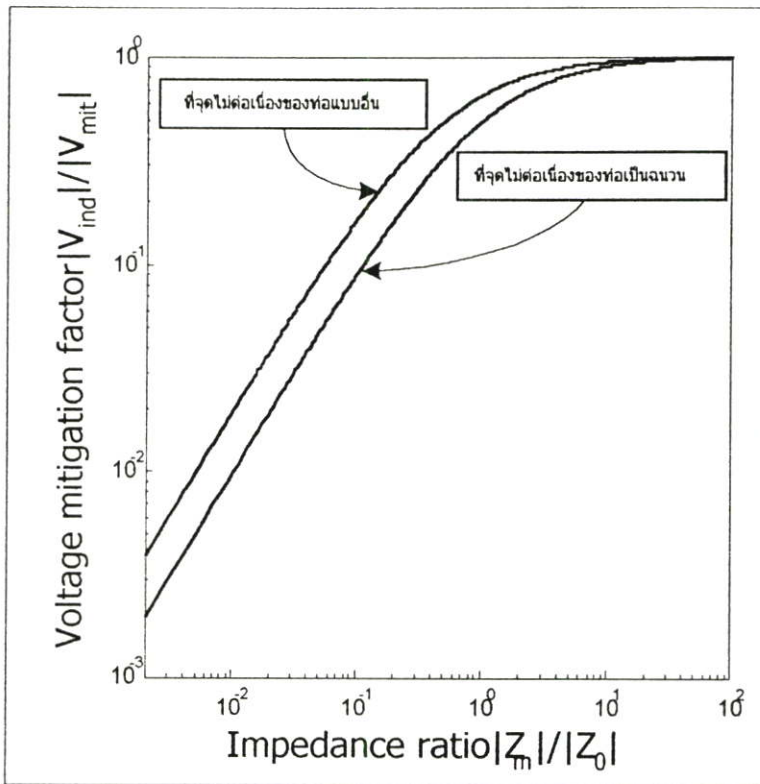


รูปที่ 6.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อกับความต้านทานจำเพาะของดิน

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อขึ้นอยู่กับความต้านทานจำเพาะของดินและความต้านทานจำเพาะของฉนวนท่อ รวมทั้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ แสดงให้เห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อมีค่าไม่เกิน 10 Ω ดังนั้นในการเลือกระบบกราวด์จึงจำเป็นต้องเลือกระบบกราวด์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์น้อยกว่า อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อ

6.5.2 อัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ (Voltage mitigation factor)

จากสมการที่ (3.1) สามารถหาค่าอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซได้โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ของกราวด์ต่ออัตราส่วนอิมพีแดนซ์ของท่อซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.43

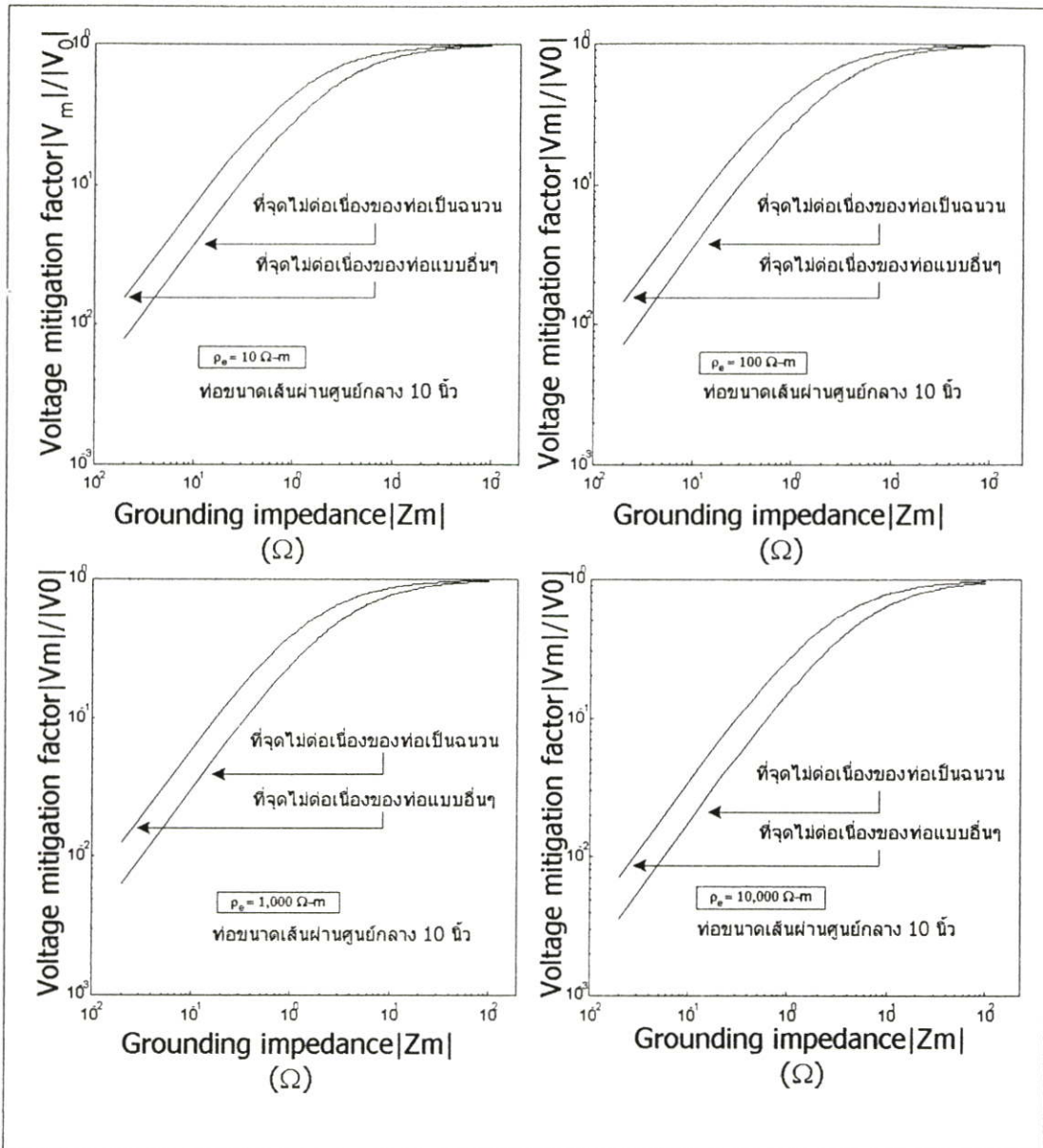


รูปที่ 6.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $|Z_m|/|Z_0|$ กับอัตราส่วน $|V_{ind}|/|V_{mit}|$

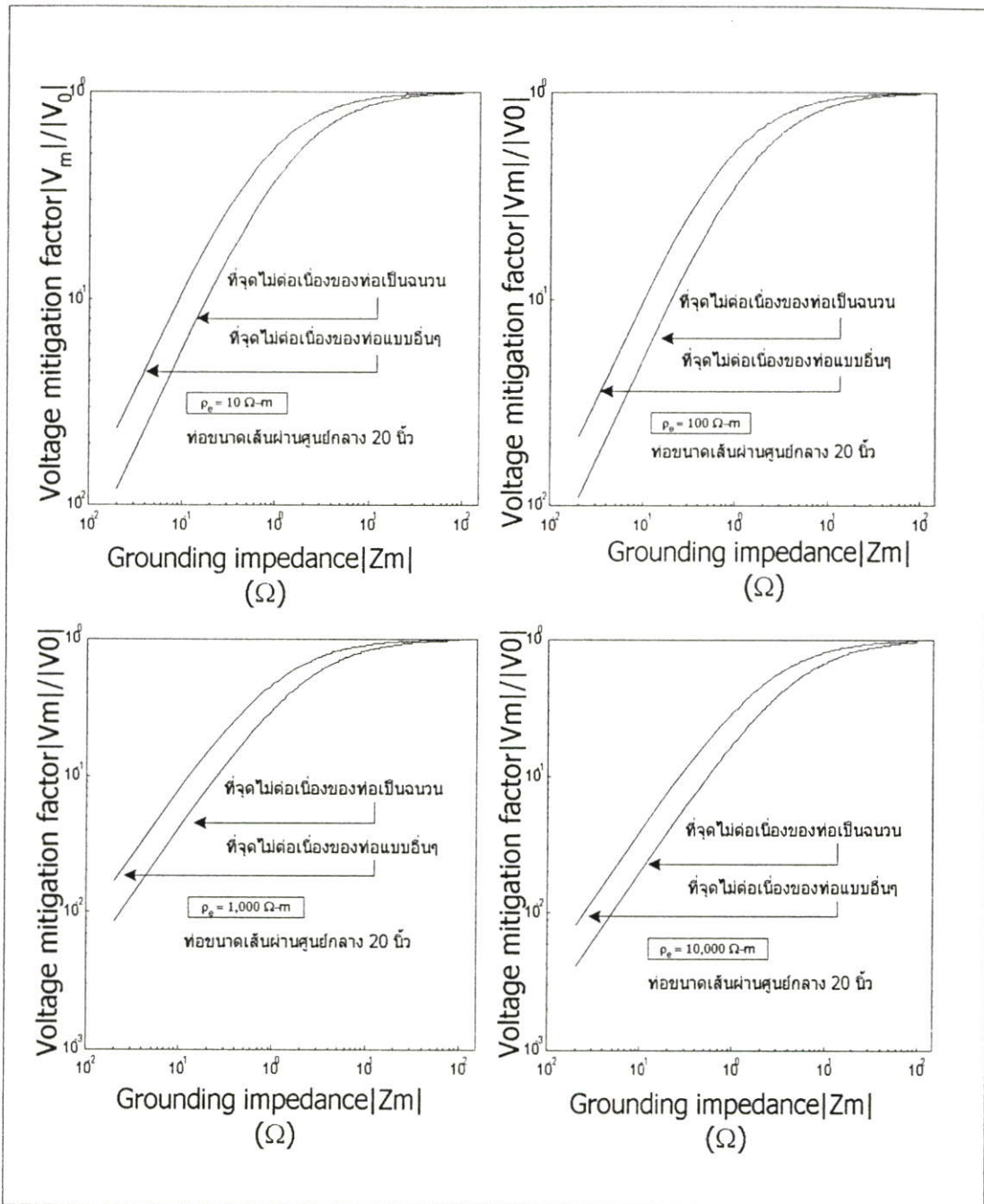
จากกราฟรูปที่ 6.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำกับอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ พบว่าอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ มีค่ามากขึ้นอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ถ้าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่าไม่มีการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำและเมื่ออัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่ามีการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำให้มีค่าเป็น 0 โวลต์ ดังนั้นในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจำเป็นต้องคำนึงถึง ค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของทอและค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ ต่อไปจะแสดงให้เห็นถึงขอบเขตของค่าอิมพีแดนซ์เมื่อขนาดของทอเปลี่ยนแปลง

6.5.3 กรณีขนาดของทอเปลี่ยนแปลง

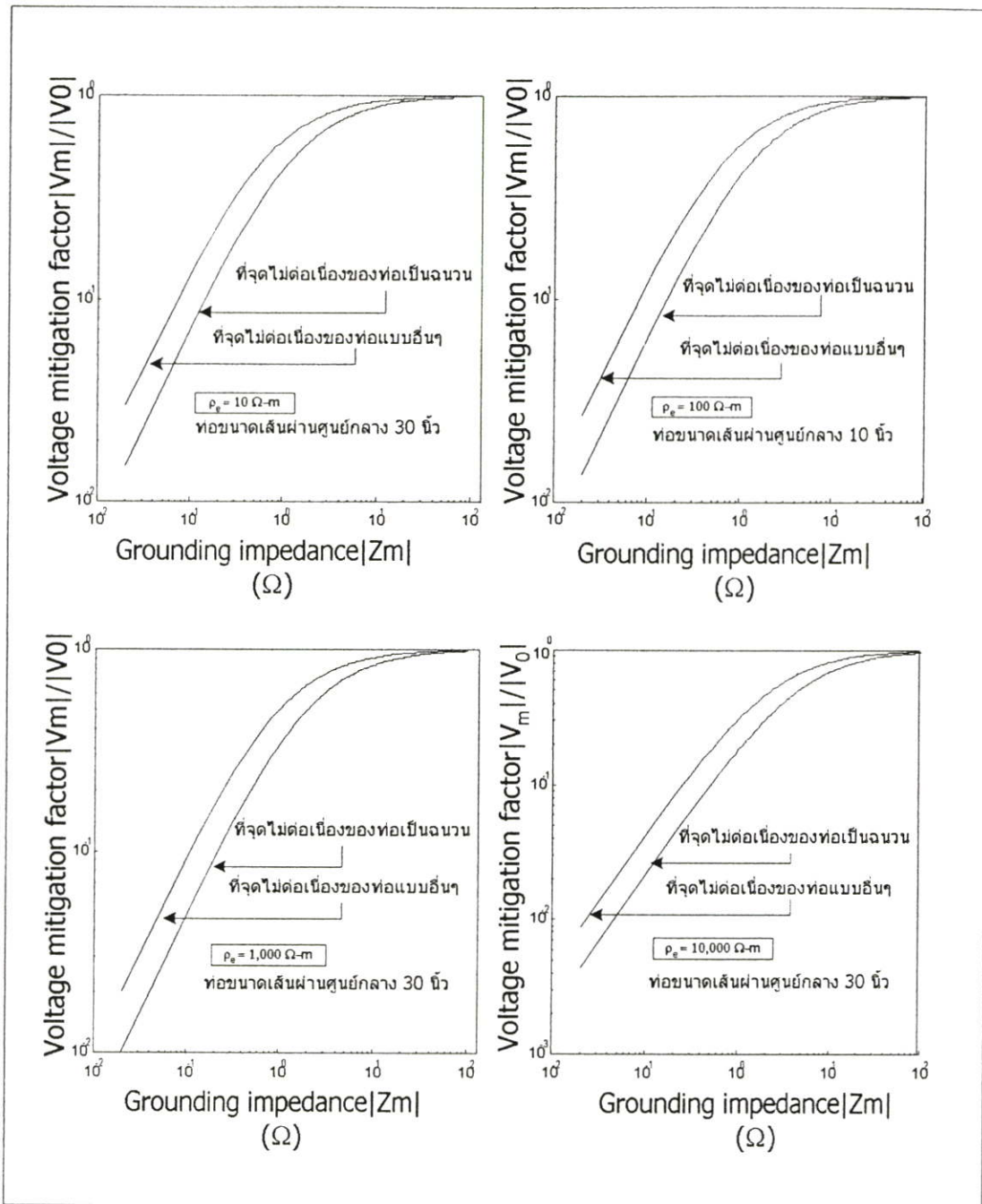
เนื่องจากอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับค่า อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของทอซึ่งค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของทอเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของทอดังนั้นในการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำกับค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ที่ขนาดของทอเปลี่ยนแปลงไปโดยการเพิ่มความต้านทานของกราวด์รูดตั้งแต่ 0.02-100 โอห์มได้ดังรูปที่ 6.44, 6.45 6.46 และ 6.47



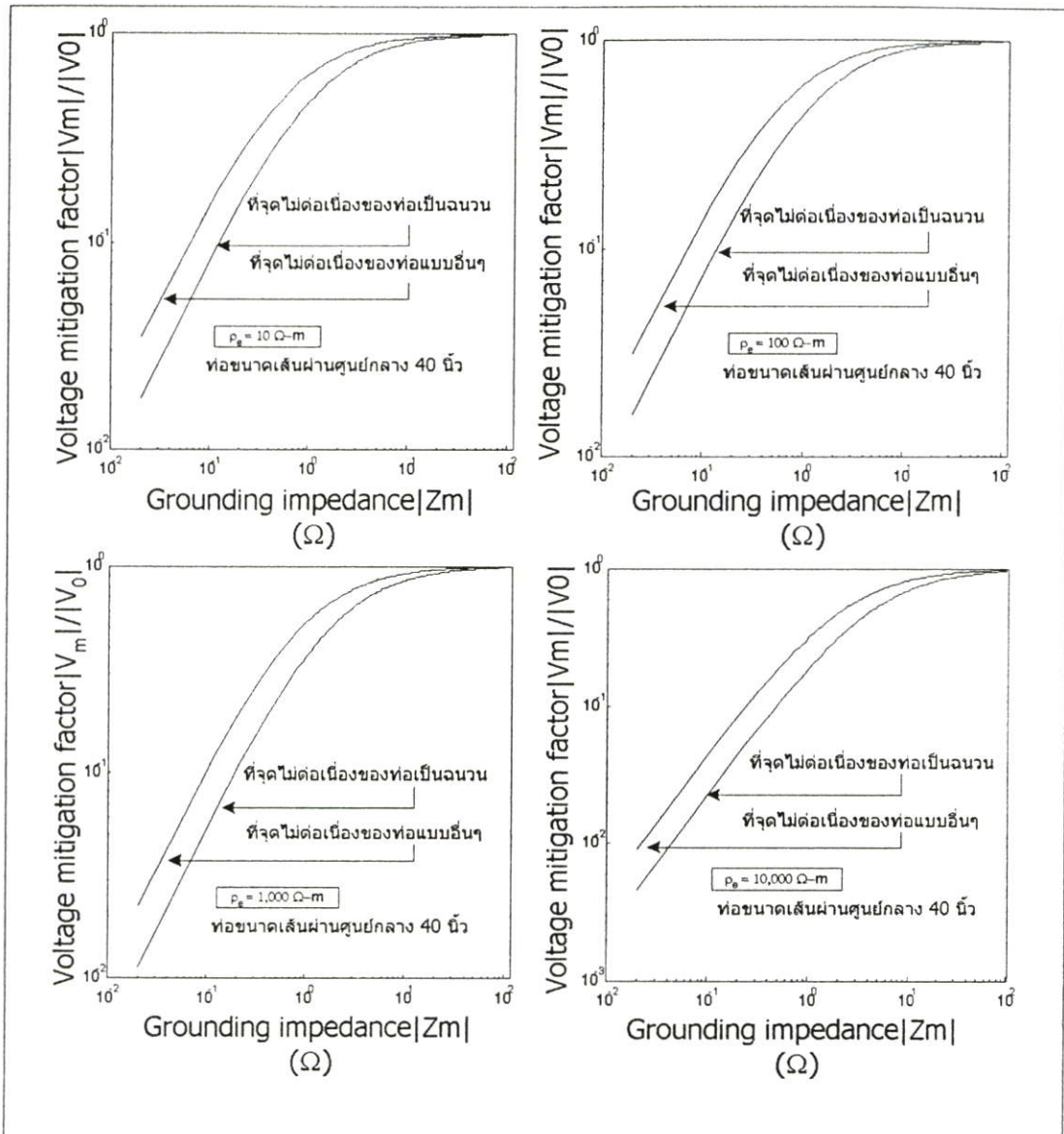
รูปที่ 6.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำเมื่อท่อมีขนาด 10 นิ้ว



รูปที่ 6.45 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเห็นขวนำ
เมื่อท่อมีขนาด 20 นิ้ว



รูปที่ 6.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำเมื่อทอมีขนาด 30 นิ้ว

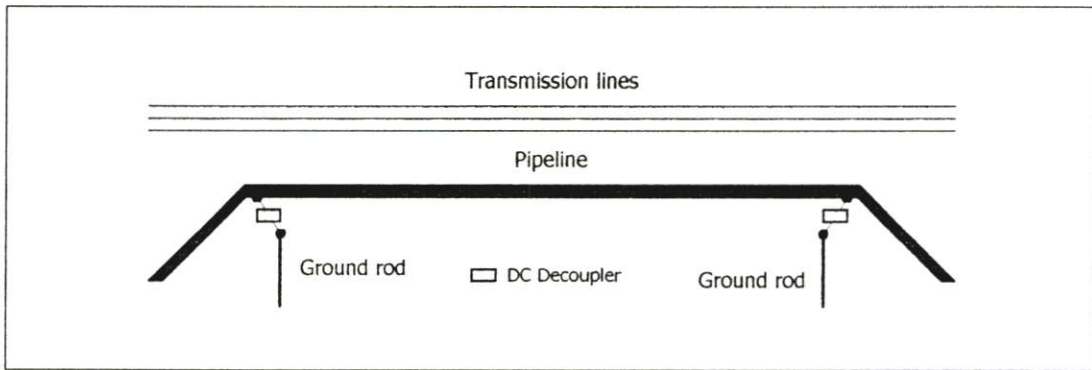


รูปที่ 6.47 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำเมื่อท่อมีขนาด 40 นิ้ว

จากกราฟรูปที่ 6.44, 6.45, 6.46 และ 6.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเป็น 10, 20, 30, และ 40 นิ้ว ตามลำดับพบว่าในการเลือกขนาดอิมพีแดนซ์ของกราวด์เพื่อทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ไม่ควรเลือกอิมพีแดนซ์ของกราวด์เกิน 10 โอห์ม เนื่องจากอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าเข้าใกล้ 1 หมายความว่าถ้าเพิ่มอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์มีค่ามากกว่านี้การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจะไม่เป็นผล

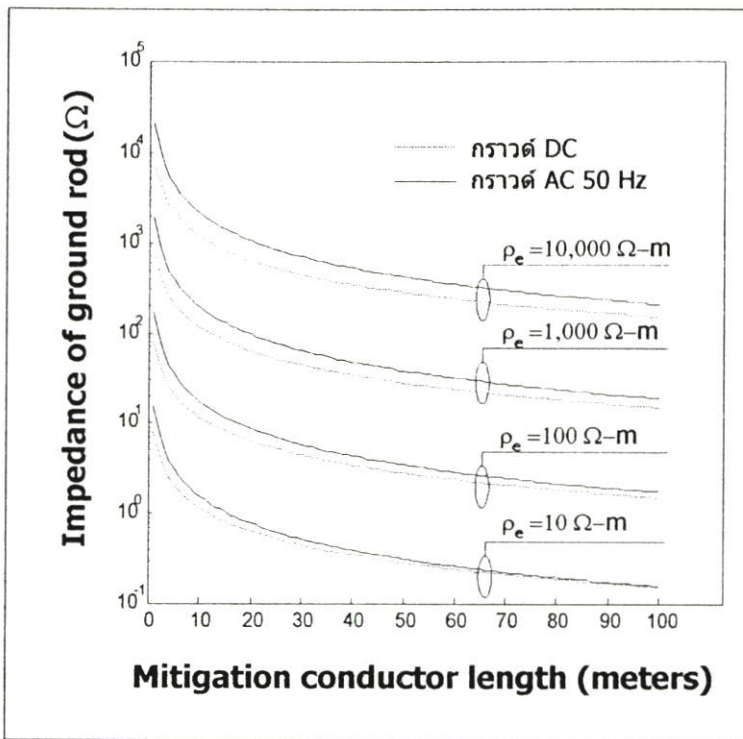
6.5.4 ระบบกราวด์รูด(Ground rod)

ในการพิจารณา กราวด์รูด ซึ่งลักษณะของระบบกราวด์สามารถแสดงให้เห็นดังรูปที่ 6.48 ในการติดตั้งระบบกราวด์ชนิดนี้มีข้อดีตรงที่ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย ข้อเสียคือในบริเวณที่เป็นภูเขาการติดตั้งทำได้ลำบาก และการติดตั้งต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูง



รูปที่ 6.48 ลักษณะการติดตั้งกราวด์รูด

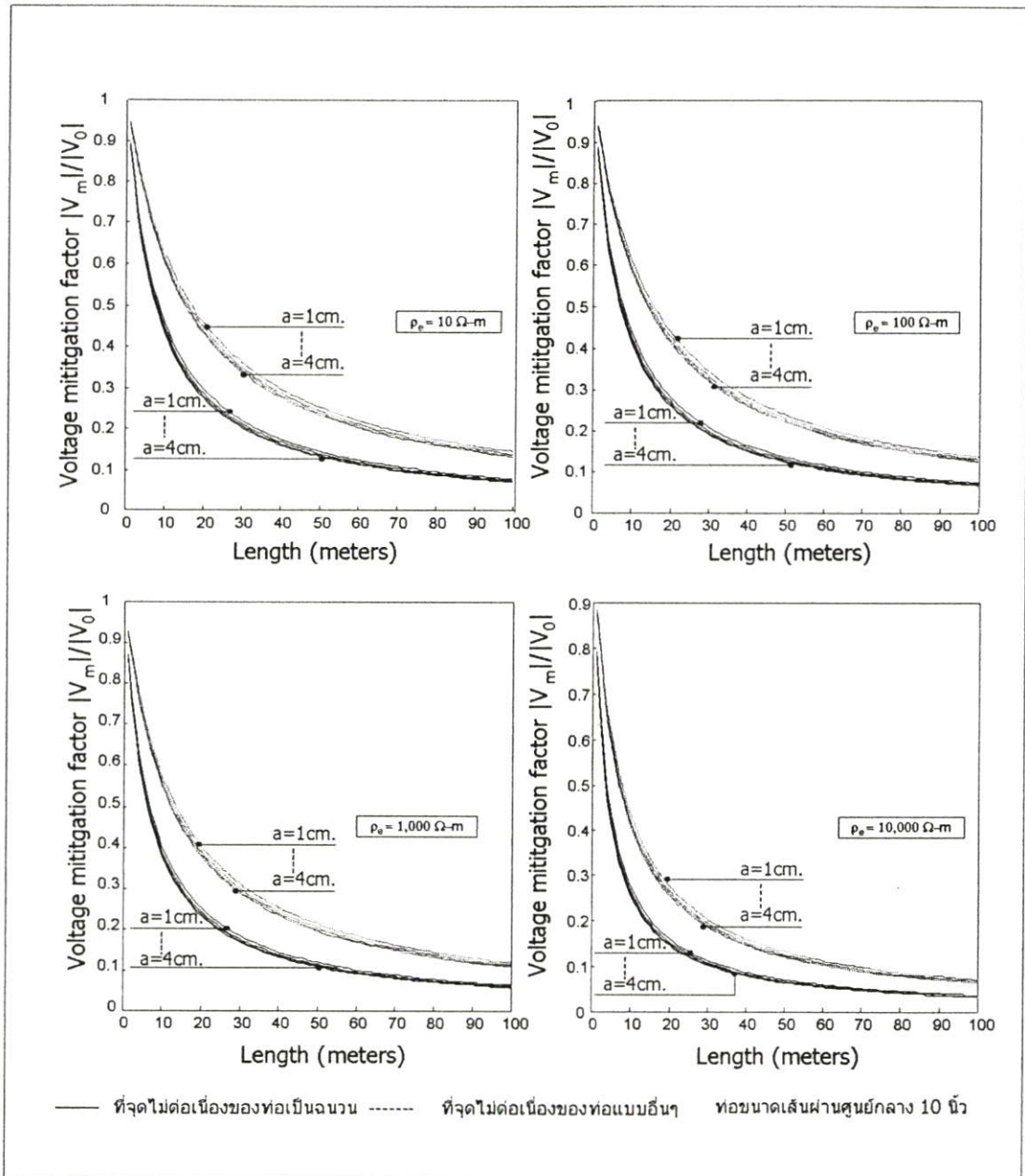
ในการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์จะวิเคราะห์ในรูปแบบของกราวด์ไฟฟ้ากระแสสลับ [6] คือในการคิดค่าความต้านทานของกราวด์ให้อยู่ในรูปของอิมพีแดนซ์แทนการคิดเฉพาะค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวเหมือนกับความต้านทานที่ใช้กับระบบไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งทำการเปรียบเทียบให้เห็นดังรูปที่ 6.49 พบว่าค่าความต้านทานของกราวด์ที่ทำการติดตั้งกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ(ac)และระบบไฟฟ้ากระแสตรง(dc) ที่ขนาดเท่ากันคือ รัศมี 1 cm. ความยาวท่อเปลี่ยนแปลงจาก 1-100 m. พบว่าค่าความต้านทานของกราวด์ที่ใช้ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับมีค่ามากกว่าค่าความต้านทานในระบบไฟฟ้ากระแสตรงและจากกราฟยังแสดงให้เห็นว่าในการเลือก กราวด์รูดไปใช้งานต้องคำนึงถึงค่าความต้านทานจำเพาะของดินด้วยเนื่องจากที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่ามีค่า 1000 โอห์ม-เมตร ที่ความยาว 100 เมตรค่าความต้านทานของกราวด์รูดยังมีค่าสูงกว่า 10 โอห์มซึ่งมีค่าที่สูงกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของท่อคั้งนั้นที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าไม่เหมาะสมที่จะใช้กราวด์รูดในการลดทอน



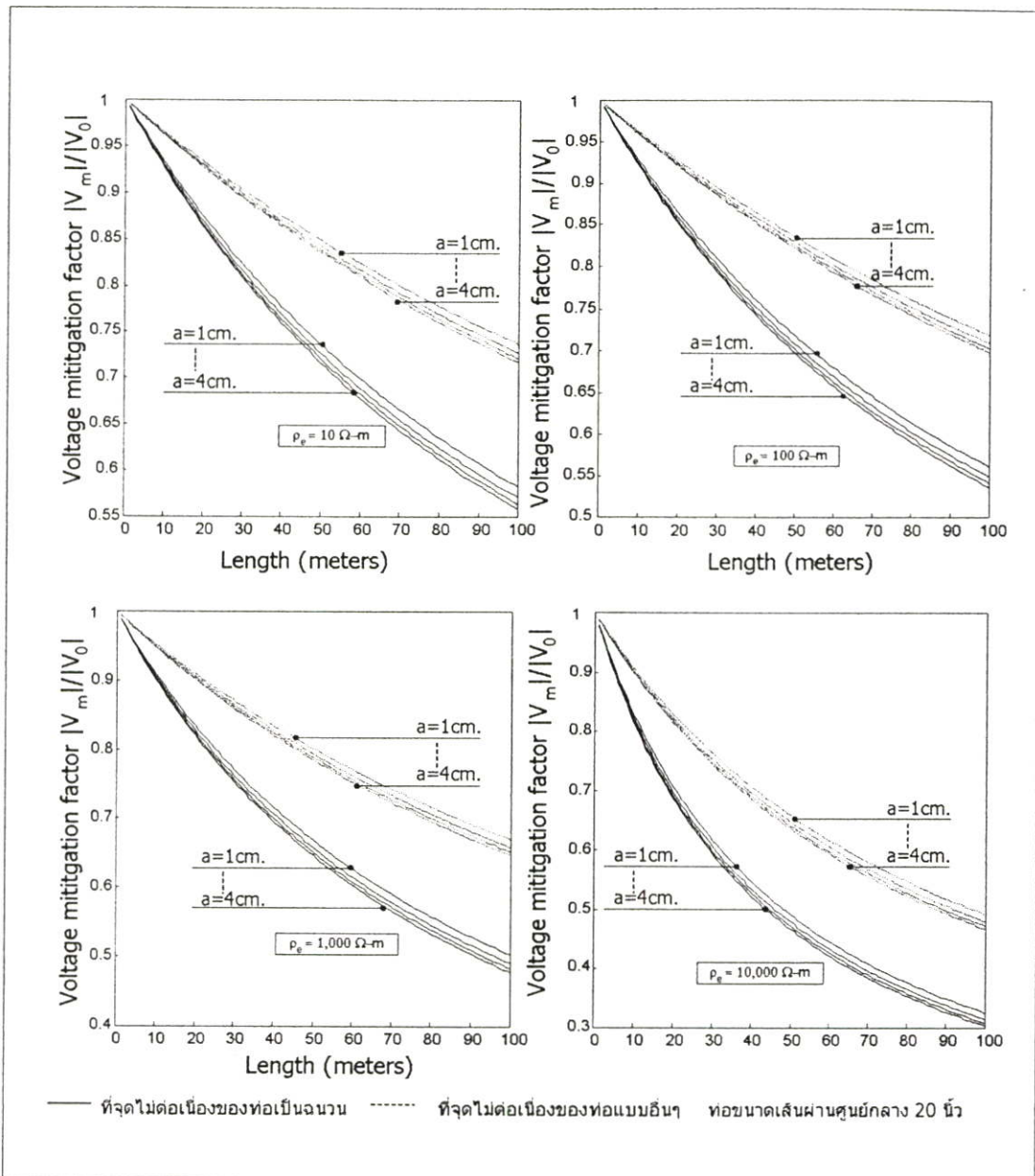
รูปที่ 6.49 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์ของ กราวด์รูดกับความยาว

ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์รูดกับอัตรา การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

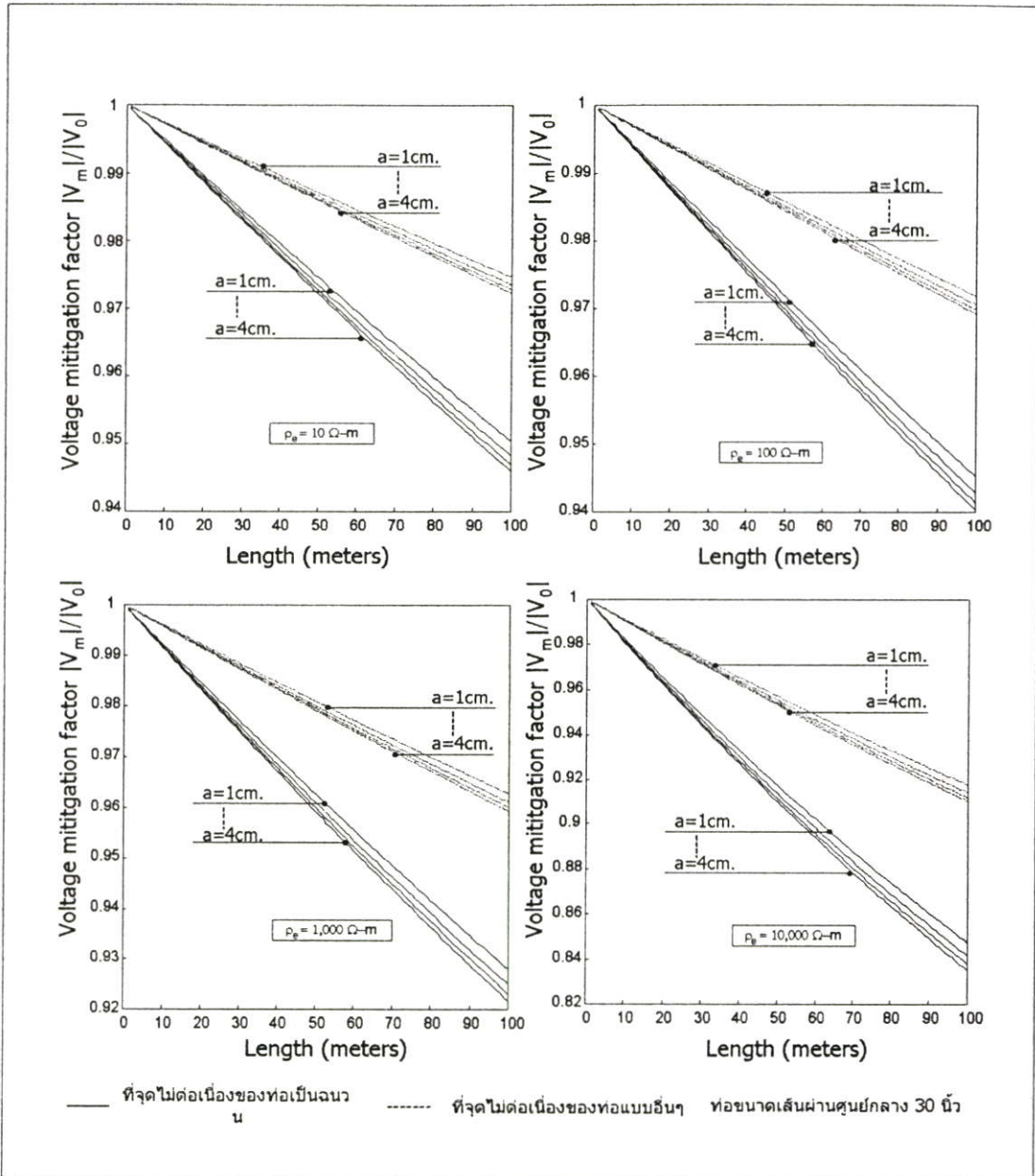
ในหัวข้อนี้จะแสดง ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์รูดกับอัตราส่วน การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ โดยกำหนดให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าตั้ง 10, 100, 1,000 และ 10,000 โอห์ม-เมตร รัศมีของกราวด์มีค่า 1, 2, 3 และ 4 เซนติเมตร แล้วทำการปรับเปลี่ยนค่า ความยาวของกราวด์รูดตั้งแต่ 1 เมตร ถึง 100 เมตร พร้อมทั้งแสดงให้เห็นถึงผลของความไม่ต่อ เนื่องของท่อส่งก๊าซที่มีผลต่ออัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ โดยแบ่งเป็น 2 กรณีคือกรณีที่ จุดไม่ต่อเนื่องของท่อเกิดขึ้นเนื่องจากมีฉนวนกั้นระหว่างท่อและจุดไม่ต่อเนื่องของท่อเป็นผลเนื่อง จากกรณีอื่นๆผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.50-6.53



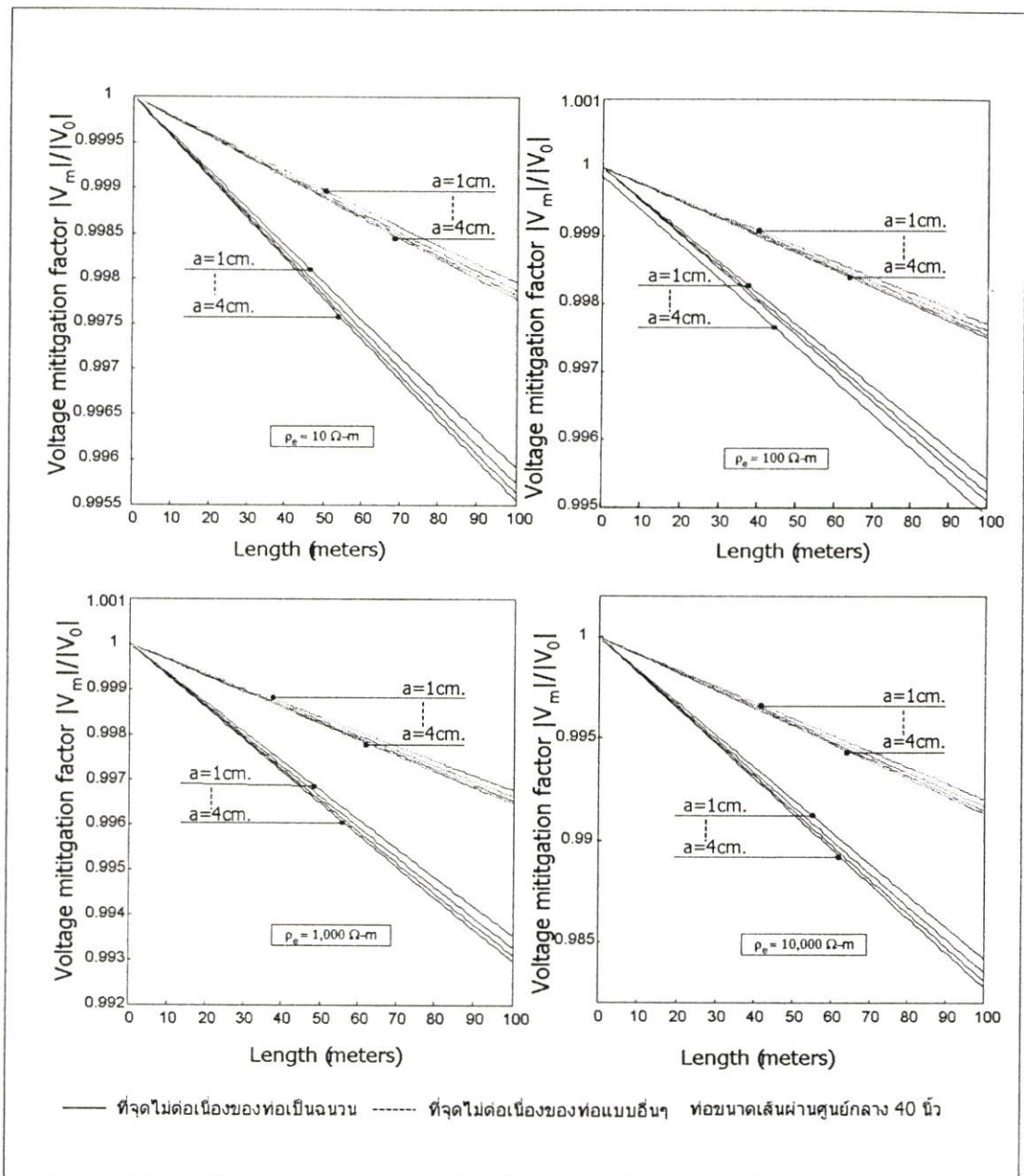
รูปที่ 6.50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 10 นิ้ว



รูปที่ 6.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกรวดค้ำกับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 20 นิ้ว



รูปที่ 6.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 30 นิ้ว



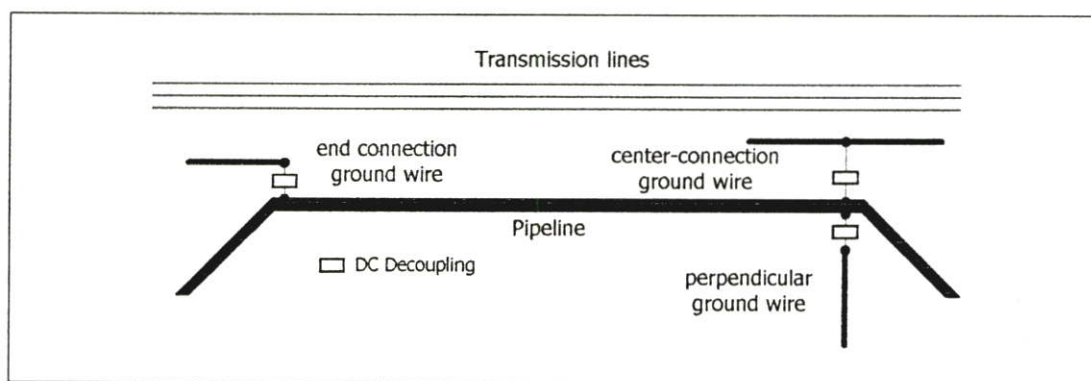
รูปที่ 6.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของทอ 40 นิ้ว

จากรูปที่ 6.50 – 6.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำเมื่อขนาดของท่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานจำเพาะของดินรวมถึงลักษณะของท่อที่ไม่ต่อเนื่องคือที่จุดที่ท่อไม่ต่อเนื่องเป็นผลมาจากจุดนั้นมีการเชื่อมต่อท่อโดยใช้ฉนวนเป็นข้อต่อและกรณีที่ท่อไม่ต่อเนื่องแบบอื่นๆ จากการวิเคราะห์พบว่าอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดเมื่อความยาวและรัศมีของกราวด์มีค่ามากขึ้นและที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมากขึ้นจะสังเกตเห็นว่าอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นหมายความว่ากราวด์

ประเภทนี้ไม่เหมาะที่จะให้ในบริเวณที่ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูงมากกว่า 100 โอห์ม-เมตร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้กราวด์ชนิดอื่น

6.5.5 ระบบกราวด์ไวร์(Ground wire)

กราวด์ไวร์เป็นระบบกราวด์ที่มีการฝังอยู่ใกล้กับผิวดินและมีความยาวมาก เหมาะที่จะทำการติดตั้งบริเวณที่ไม่สามารถเจาะพื้นเพื่อฝังกราวด์ชนิดอื่นได้ ในการนำกราวด์ไวร์มาใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ สามารถแบ่งกราวด์ไวร์ตามลักษณะการติดตั้งเป็น 3 ลักษณะดังรูปที่ 6.54



รูปที่ 6.54 ตำแหน่งในการติดตั้งกราวด์ไวร์

- ลักษณะที่ 1 ลักษณะกราวด์ไวร์ที่มีการวางขนานกับแนวสายส่งและมีการเชื่อมต่อจากจุดกึ่งกลางของกราวด์ไปยังจุดที่ต้องการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ เรียกว่า Center connection ground wire ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจำเป็นต้องนำผลของสนามแม่เหล็กเนื่องจากสายส่งมาคิดด้วยเนื่องจากลักษณะการวางกราวด์ไวร์ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก
- ลักษณะที่ 2 ลักษณะกราวด์ไวร์ที่มีการวางขนานกับแนวสายส่งและมีการเชื่อมต่อจากสิ้นสุดของกราวด์ไปยังจุดที่ต้องการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำมักนิยมเรียกว่า End connection ground wire ในการคิดค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ชนิดนี้จำเป็นต้องคิดผลของสนามแม่เหล็กด้วย
- ลักษณะที่ 3 กราวด์ไวร์ที่วางตั้งฉากกับแนวสายส่ง(perpendicular ground wire)เป็นกราวด์ไวร์ที่ไม่มีผลของสนามแม่เหล็กมาเกี่ยวข้องเนื่องจากแนวของกราวด์ไวร์วางขนานกับแนวของเส้นแรงแม่เหล็กดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ชนิดนี้ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ภายในของกราวด์ไวร์(internal impedance)และอิมพีแดนซ์ภายนอกของกราวด์ไวร์(External impedance)

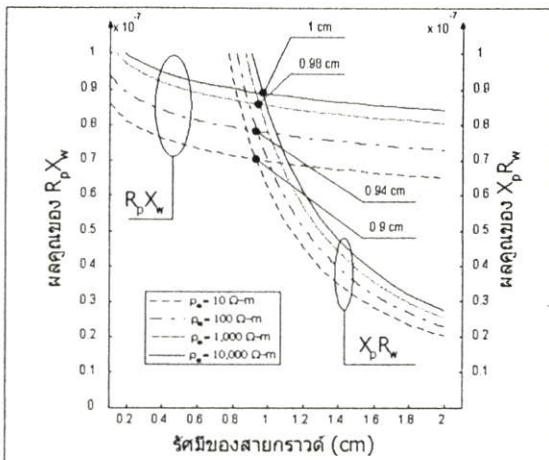
จากสมการที่ 3.12 และ 3.14 พบว่าการหาค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ไวร์ขึ้นอยู่กับรัศมีของกราวด์ไวร์ค่าความต้านทานของวัสดุที่นำมาทำเป็นกราวด์ไวร์และความยาวของกราวด์ไวร์ ดังนั้นในการหาขนาดของกราวด์ไวร์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

6.5.5.1 การหารัศมีที่เหมาะสม

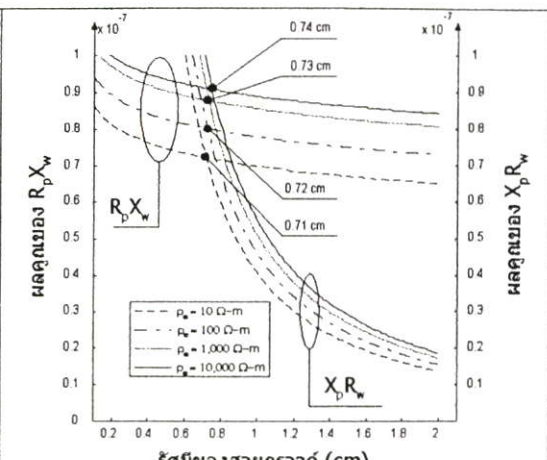
ในการหารัศมีของสายกราวด์ที่เหมาะสมซึ่งหาได้จากสมการที่ 3.12 โดยกำหนดให้วัสดุที่จะนำมาทำเป็นกราวด์ของระบบท่อแสดงดังตารางที่ 6.6 โดยวัสดุที่นำมาทำเป็นกราวด์ไวร์ประกอบไปด้วย commercial hard drawn copper, commercial aluminum wire , zin-coated steel wire ซึ่งวัสดุที่นำมาทำเป็นกราวด์ไวร์ทั้ง 3 ชนิดจะมีค่าความต้านทานจำเพาะแตกต่างกันและในการหาค่าความต้านทานจำเพาะคิดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิโดยประมาณที่ใช้ภายในประเทศ และขนาดของท่อที่นำมาพิจารณามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคือ 10, 20, 30 และ 40 นิ้วใช้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากับ 10, 100, 1,000 และ 10,000 โอห์ม-เมตร ในการหารัศมีที่เหมาะสมคือการหาจุดตัดระหว่างผลคูณของค่า $R_p X_w$ กับ $R_w X_p$ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.55-6.56

ตารางที่ 6.6 ตารางความต้านทานจำเพาะของกราวด์ไวร์

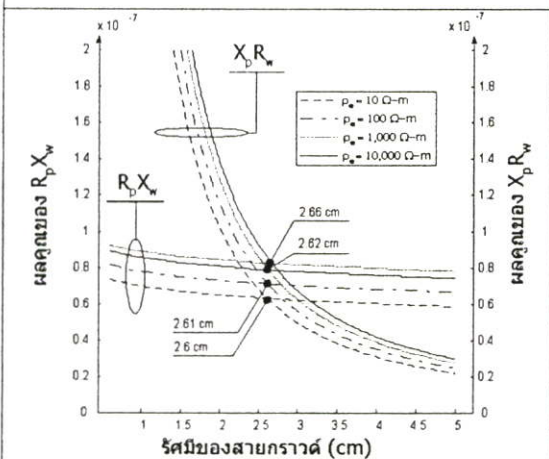
วัสดุที่นำมาทำกราวด์	ความต้านทานจำเพาะ ($\Omega - m$)	
	20 °C	40 °C
commercial hard drawn copper	1.7774 [9]	1.856
commercial aluminum wire	2.862[9]	3.0582
zin-coated steel wire	20.1[9]	21.384



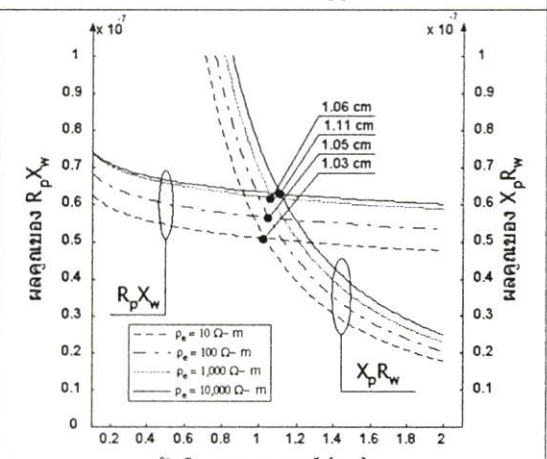
ก. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Commercial aluminum wire



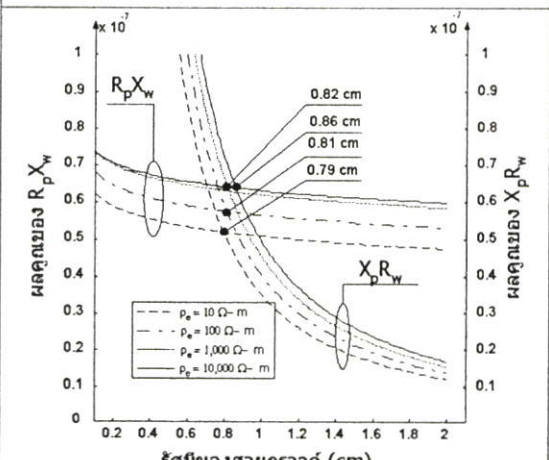
ข. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Commercial hard drawn copper



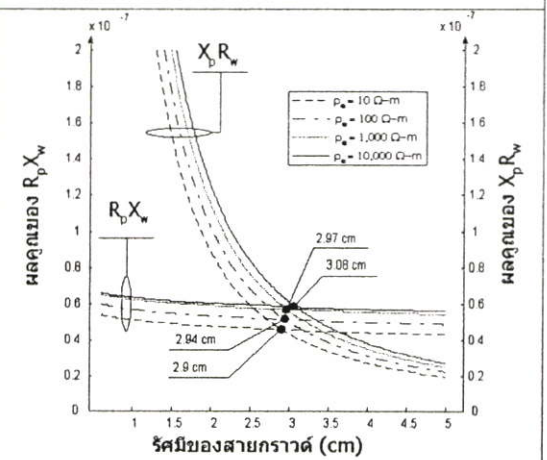
ค. เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Zin-coated steel wire



ง. เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Commercial aluminum

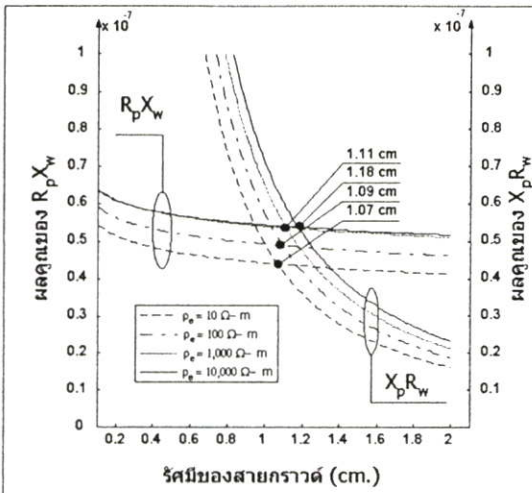


จ. เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Commercial hard drawn copper

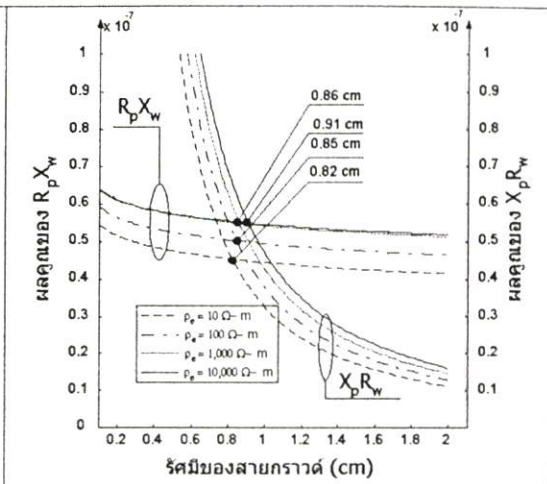


ฉ. เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Zin-coated steel wire

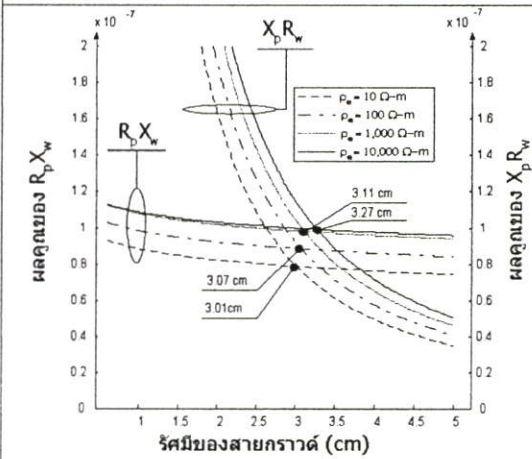
รูปที่ 6.55 ความสัมพันธ์ระหว่าง $R_p X_w$ กับ $R_w X_p$ ของท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 และ 20 นิ้ว



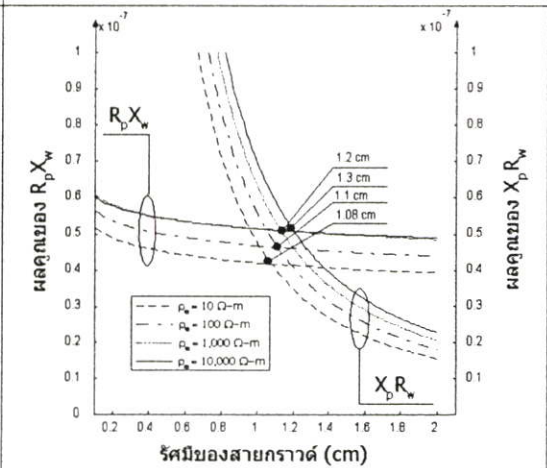
ก. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 30 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Commercial aluminum wire



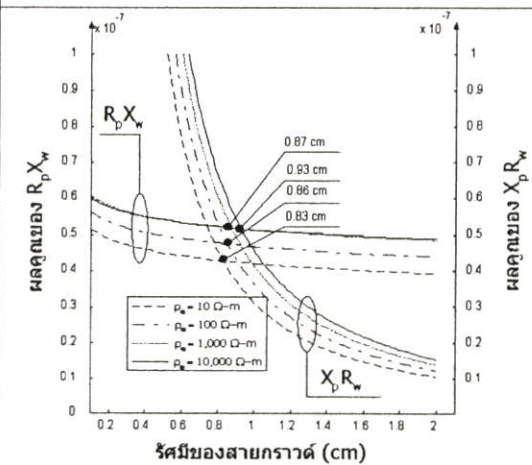
ข. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 30 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Commercial hard drawn copper



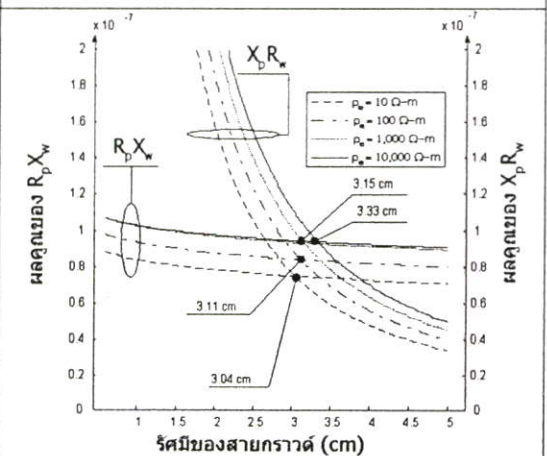
ค. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 30 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Zinc-coated steel wire



ง. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 40 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Commercial aluminum



จ. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 40 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Commercial hard drawn copper



ฉ. เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 40 นิ้วเมื่อกรวด ไร่ เป็น Zinc-coated steel wire

รูปที่ 6.56 ความสัมพันธ์ระหว่าง $R_p X_w$ กับ $R_w X_p$ ของท่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 และ 40 นิ้ว

จากกราฟรูปที่ 6.55-6.56 เป็นการหารัศมีของกราวด์ไวร์ที่เหมาะสมแสดงให้เห็นว่ารัศมีของสายกราวด์เปลี่ยนแปลงตามค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าสูงขึ้นค่ารัศมีของสายกราวด์ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตาม และในการเลือกวัสดุที่จะทำเป็นกราวด์ที่ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุมีค่ามากกว่ารัศมีของสายกราวด์ก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน

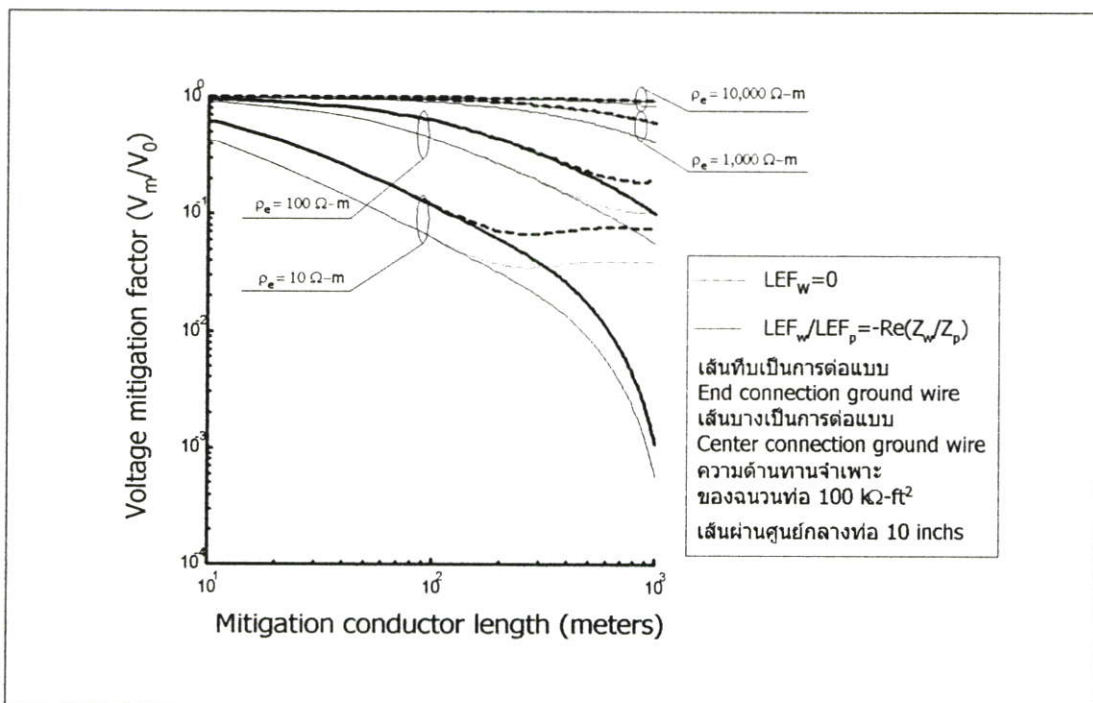
เมื่อได้ค่ารัศมีของกราวด์ที่เหมาะสมแล้วต่อไปจะทำการพิจารณาหาความยาวของกราวด์ไวร์ที่จะนำมาติดตั้งเพื่อทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ซึ่งความยาวของกราวด์ไวร์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 6.7 รัศมีที่เหมาะสม

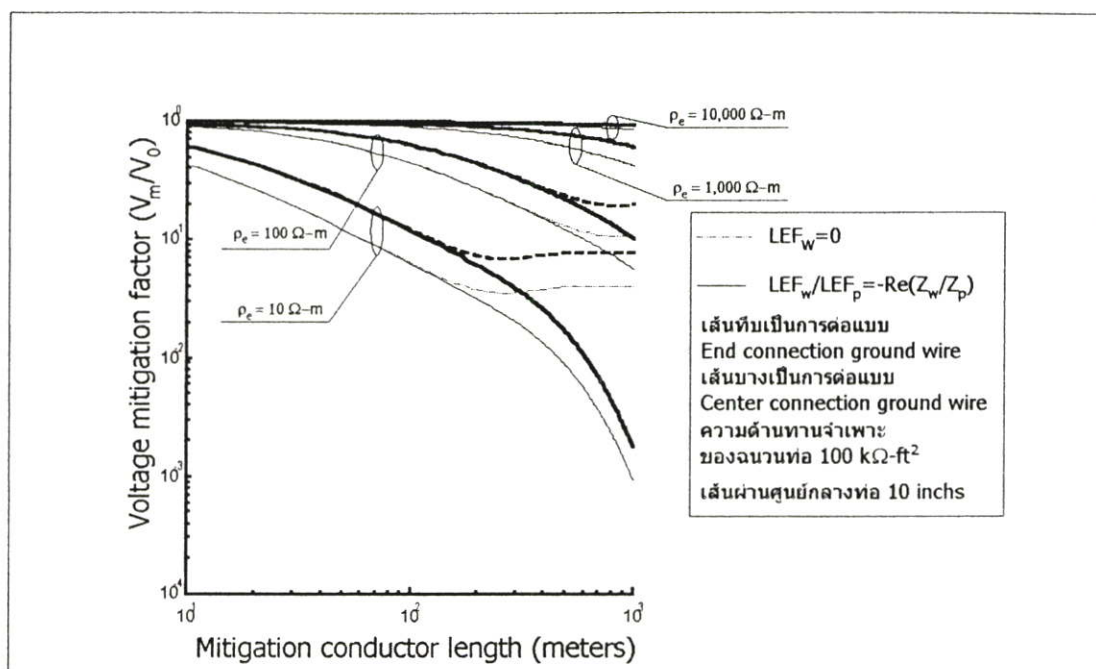
ขนาดท่อ	ค่าความต้านทาน จำเพาะของดิน ($\Omega - m$)	รัศมีของกราวด์(cm)		
		Commercial hard drawn copper	Commercial aluminum wire	Zin-coated steel wire
10	10	0.71	0.9	2.6
	100	0.72	0.94	2.61
	1,000	0.73	0.98	2.62
	10,000	0.74	1	2.66
20	10	0.79	1.03	2.9
	100	0.81	1.05	2.94
	1,000	0.82	1.06	2.97
	10,000	0.86	1.11	3.08
30	10	0.82	1.07	3.01
	100	0.85	1.09	3.07
	1,000	0.86	1.11	3.11
	10,000	0.91	1.18	3.27
40	10	0.83	1.08	3.04
	100	0.86	1.1	3.11
	1,000	0.87	1.2	3.15
	10,000	0.93	1.3	3.33

6.5.5.2 การหาความยาวของกราวด์ไวร์ (Mitigation conductor length)

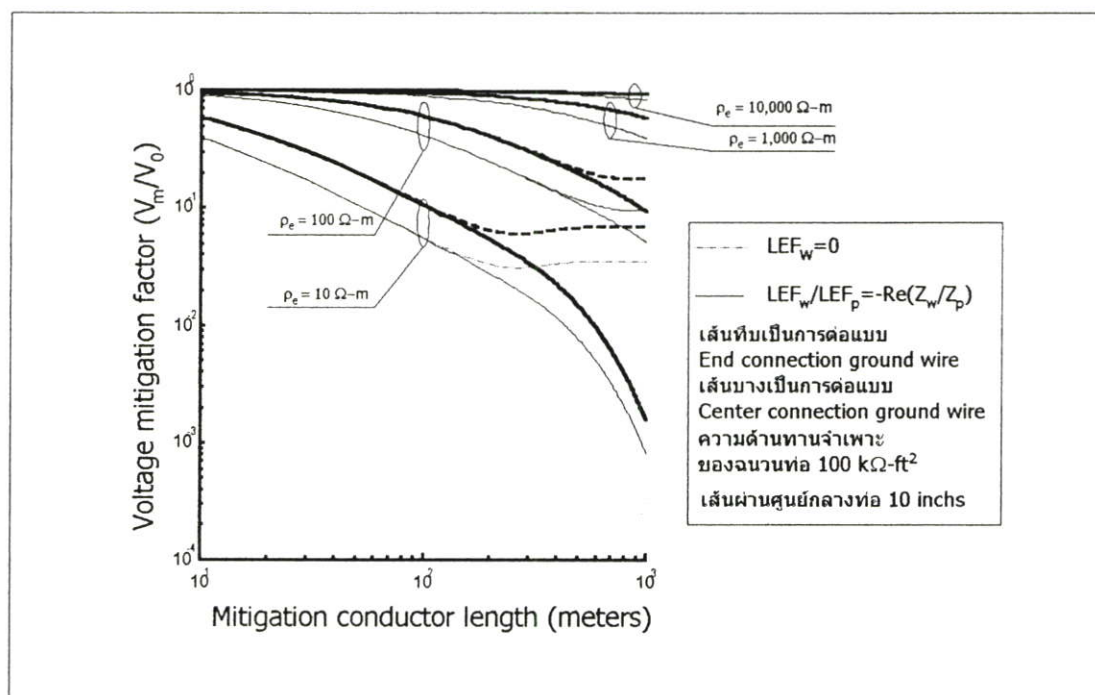
ในการพิจารณาความยาวของกราวด์ไวร์สามารถทำได้โดยกำหนดให้ความยาวของสายกราวด์มีความยาวตั้งแต่ 10 ถึง 1000 เมตร และค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่า 10, 100, 1,000 และ 10,000 โอห์ม-เมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 นิ้ว และค่าของอัตราส่วนของค่าLEF คือ $-\frac{E_w}{E_p} = \text{Re}\left(\frac{Z_w}{Z_p}\right)$ และ $-\frac{E_w}{E_p} = 0$ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 6.57-6.68 จากรูปที่ 6.57 - 6.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์ไวร์ กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ(แสดงดังเส้นบาง) ซึ่งลักษณะกราวด์เป็นการเชื่อมต่อแบบกรณีที่มีความยาวที่ได้จากการคำนวณจะเป็นความยาวเพียงครึ่งหนึ่งของความยาวทั้งหมดคั้งนั้นเมื่อทำการคำนวณหาความยาวของสายกราวด์ได้แล้วให้คูณด้วย2จึงจะได้ความยาวจริง และ จากรูป6.57-6.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของกราวด์ไวร์กับอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ(แสดงดังเส้นทึบ) ซึ่งลักษณะกราวด์เป็นการเชื่อมต่อที่จุดสิ้นสุดของกราวด์ไวร์(End connection ground wire) ความยาวที่ได้จากกราฟเป็นความยาวจริงของกราวด์ไวร์ที่จะนำมาใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ และในกรณีของ Perpendicular connection ground wire จะพิจารณาเหมือนกับ End connection ground wire ในกรณีนี้ $-\frac{E_w}{E_p} = 0$



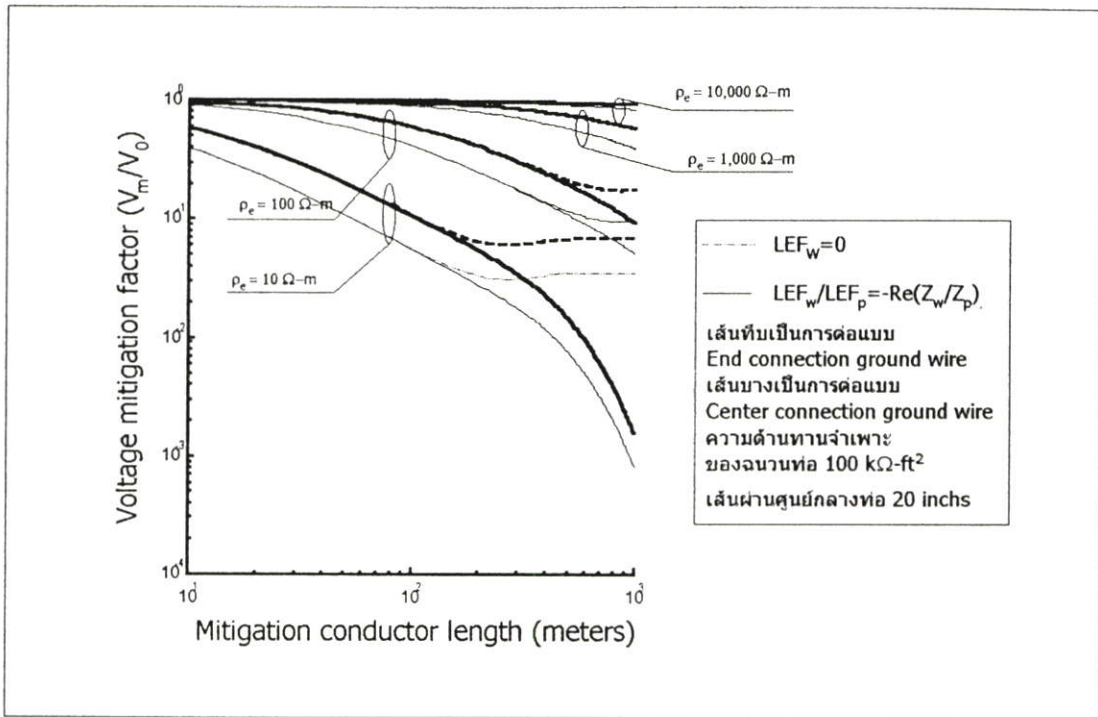
รูปที่ 6.57 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 10 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Commercial aluminum wire



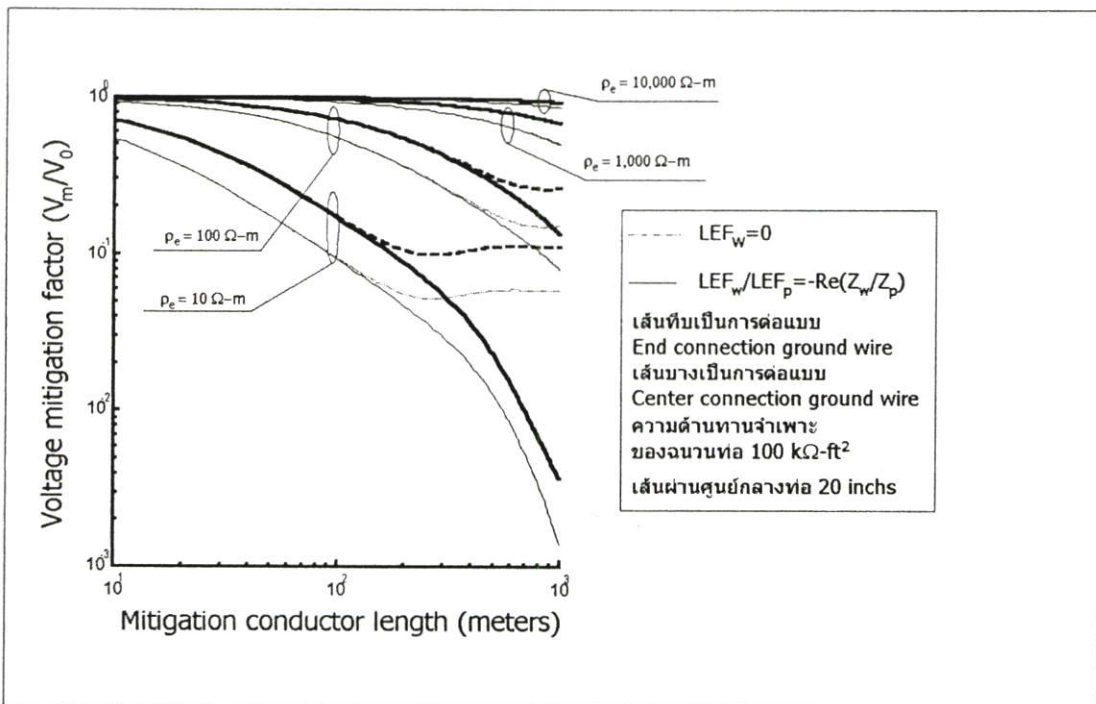
รูปที่ 6.58 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 10 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Commercial hard drawn copper



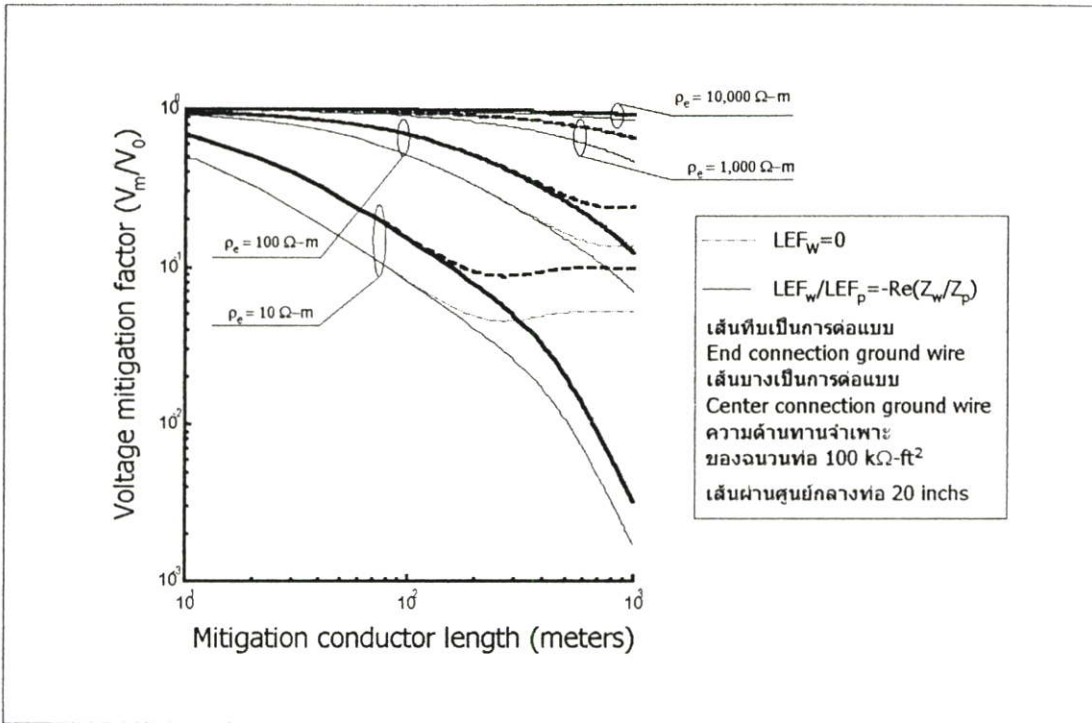
รูปที่ 6.59 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 10 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Zin-coated steel wire



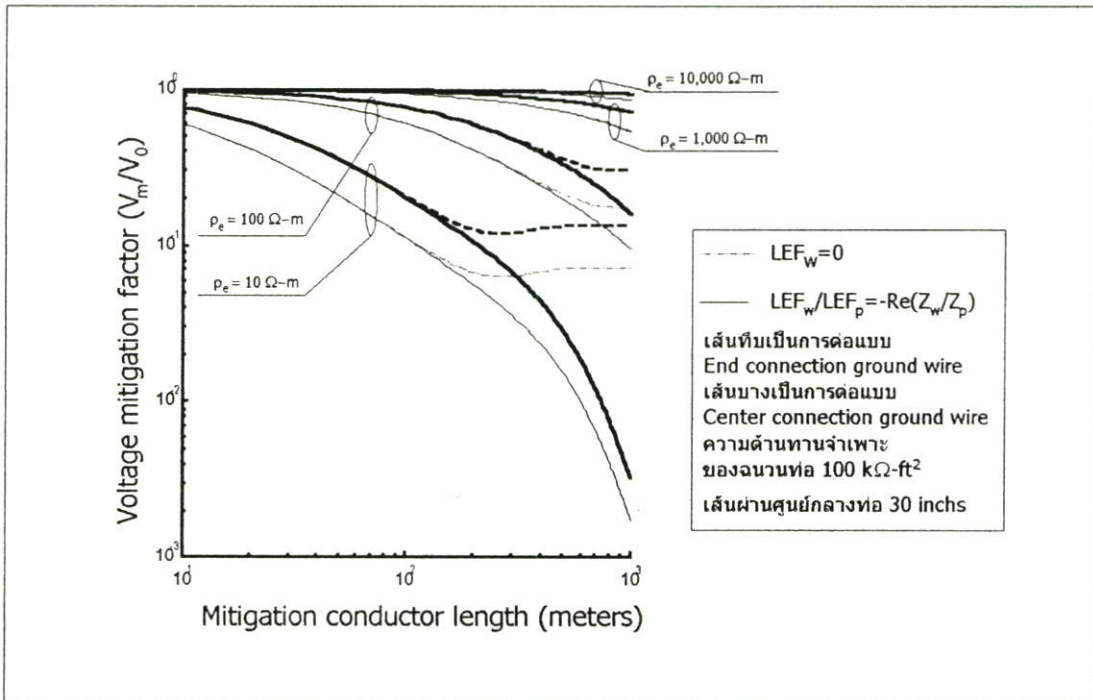
รูปที่ 6.60 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราลดทอนแรงดันคั้นเหนี่ยวนำของท่อ 20 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Commercial aluminum wire



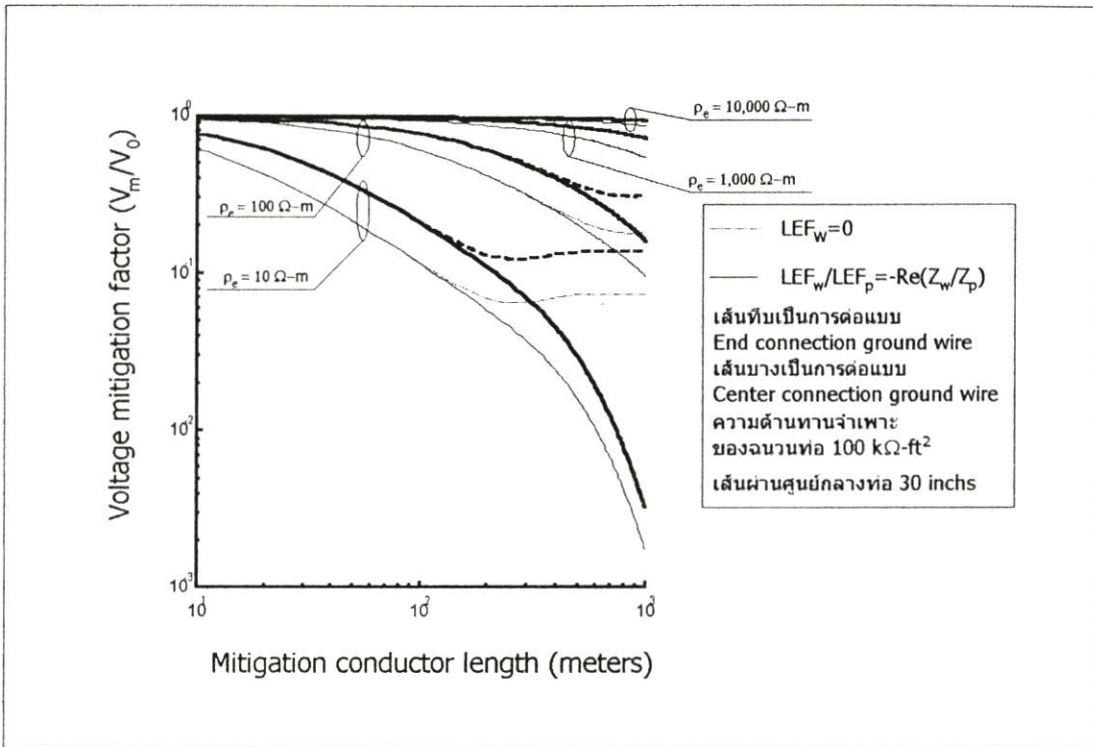
รูปที่ 6.61 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราลดทอนแรงดันคั้นเหนี่ยวนำของท่อ 20 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Commercial hard drawn copper



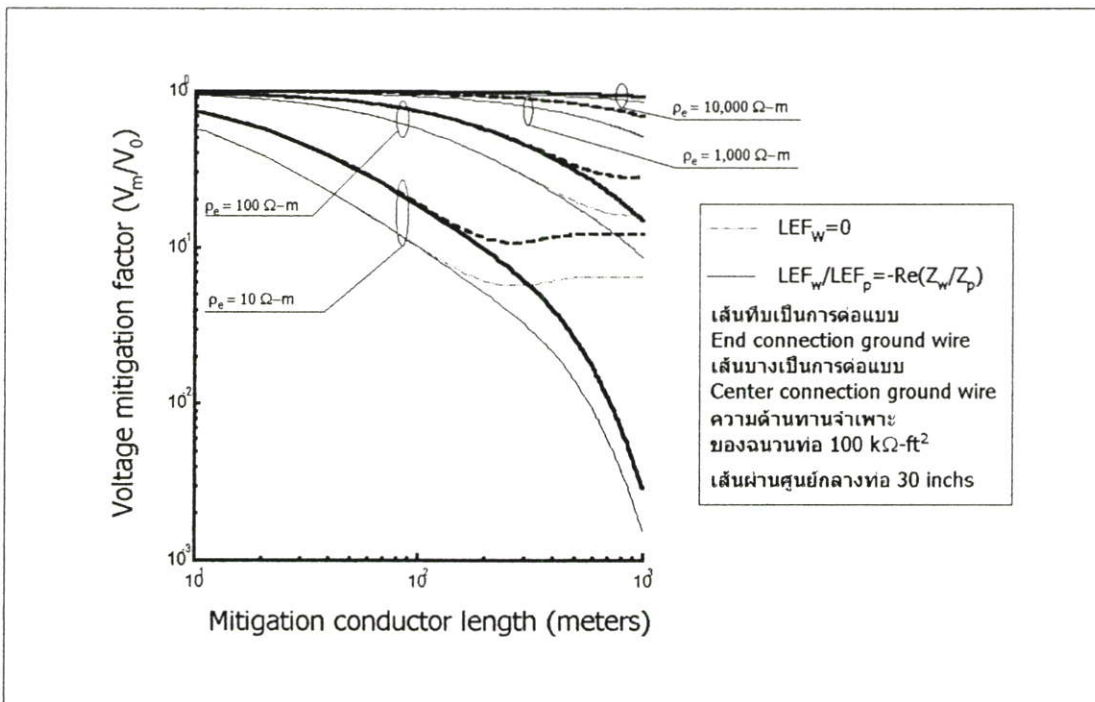
รูปที่ 6.62 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 20 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Zin-coated steel wire



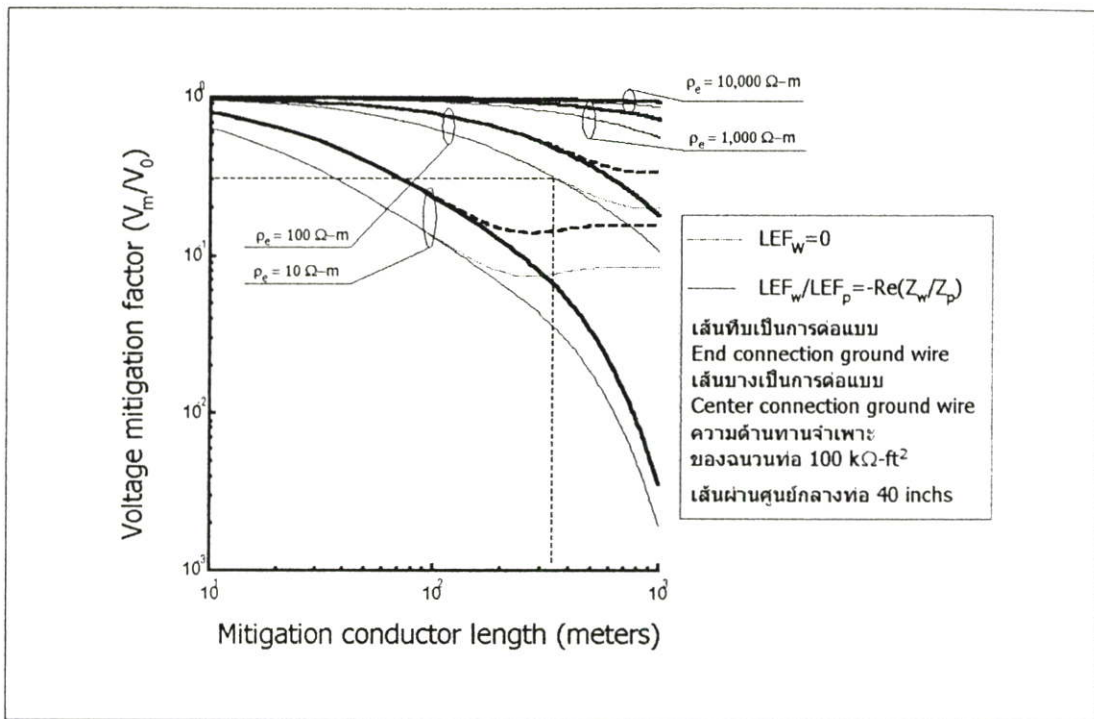
รูปที่ 6.63 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 30 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Commercial aluminum wire



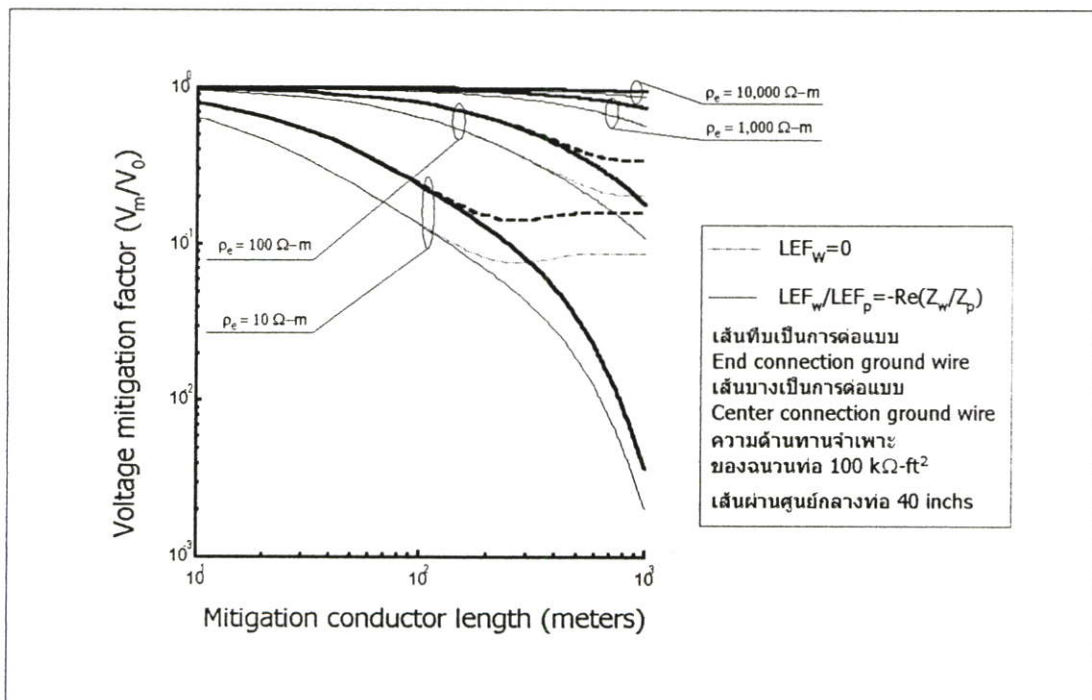
รูปที่ 6.64 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 30 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Commercial hard drawn copper



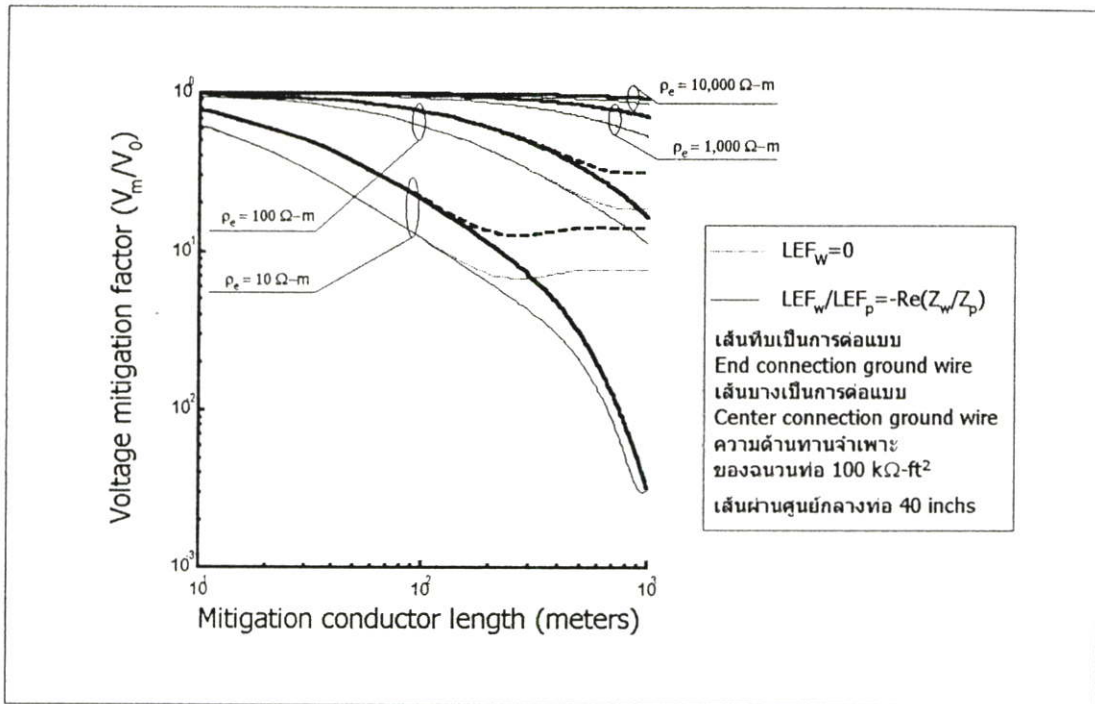
รูปที่ 6.65 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 30 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Zin-coated steel wire



รูปที่ 6.66 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 40 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Commercial aluminum wire



รูปที่ 6.67 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 40 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Commercial hard drawn copper



รูปที่ 6.68 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของ กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 40 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Zin-coated steel wire

จากกราฟรูปที่ 5.57-6.68 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำกับความยาวของกราวด์ไวร์ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่งก๊าซมีค่าเท่ากับ 10, 20, 30 และ 40 นิ้ว ลักษณะการเชื่อมต่อกราวด์เป็นแบบ End connection ground wire และ Center connection ground wire โดยการพิจารณาแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

กรณี $(LEF_w/LEF_p) = -Re(Z_w/Z_p)$ พบว่าเมื่อความยาวของกราวด์ มากขึ้นอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงและกรณีที่ ค่าความต้านทานจำเพาะของสายกราวด์ ค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมีค่าเพิ่มขึ้นที่อัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เท่ากันจะใช้เวลาในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำน้อยกว่า

ในกรณี $LEF_w = 0$ คือกราวด์ที่ไม่เกิดผลของสนามแม่เหล็กแสดงดังกราฟเส้นประพบว่าเมื่อความยาวของสายกราวด์มากขึ้นอัตราส่วนการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าลดลงถึงค่าหนึ่งซึ่งอัตราการลดทอนจะมีค่าคงที่เนื่องจากค่าความต้านทานของกราวด์มีค่าเท่ากับ อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อและกรณีที่ความยาวของกราวด์เท่ากันค่าความต้านทานจำเพาะของดินมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าสูงขึ้น และจากกราฟแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมต่อ Center connection ground wire อัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่าน้อยกว่าการต่อแบบ End

ตารางที่ 6.8 ข้อมูลที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

รายละเอียด	ค่า	หน่วย
เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ(D)	40	นิ้ว
ระยะห่างระหว่างท่อกับเสาส่ง (d)	10	เมตร
ความลึกของท่อ(a)	1	เมตร
ความสูงจากพื้นถึงตัวนำเฟสโดยเฉลี่ย	32.5	เมตร
กระแสของสายส่งต่อเฟส	1	แอมป์
ความถี่ของระบบส่งจ่าย	50	เฮิรตซ์
ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน	100	โอห์ม-เมตร
แรงดันเหนี่ยวนำที่จุดไม่ต่อเนื่อง	50	โวลต์

จากลักษณะการวางโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนระยะที่อยู่ห่างจากแนวสายส่ง 10 เมตร สามารถหาค่า LEF ได้รูปที่ 6.70 จะได้ค่าขนาดของ $LEF_{Lp} = 0$ เนื่องจากแนวท่อกหักออกนอกแนวสายส่ง และ $LEF_{Rp} = 0.091 \text{ (V/km)/A}$ ที่ระยะ 10 เมตรจากแนวสายส่ง จากตาราง 6.7 กรณีที่ใช้กราวด์ไวร์แบบ Commercial aluminum wire จะได้ค่ารัศมีของกราวด์ไวร์มีค่าเท่ากับ $\alpha_w = 1.1 \text{ cm}$ สามารถหาค่าของอิมพีแดนซ์ของสายกราวด์และอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อได้จาก การใช้โปรแกรม AC Mitigation

$$Z_w = 9.513e-005 + 6.972e-004i \text{ โอห์ม/เมตร}$$

$$Z_p = 6.482e-005 + 4.868e-004i \text{ โอห์ม/เมตร}$$

จำนวนจริงของค่าอัตราส่วนอิมพีแดนซ์

$$Re\left(\frac{Z_w}{Z_p}\right) = 1.433$$

อัตราส่วนของสนามไฟฟ้าตามแนวยาว

$$\frac{LEF_w}{LEF_p} = -Re\left(\frac{Z_w}{Z_p}\right) = 1.433$$

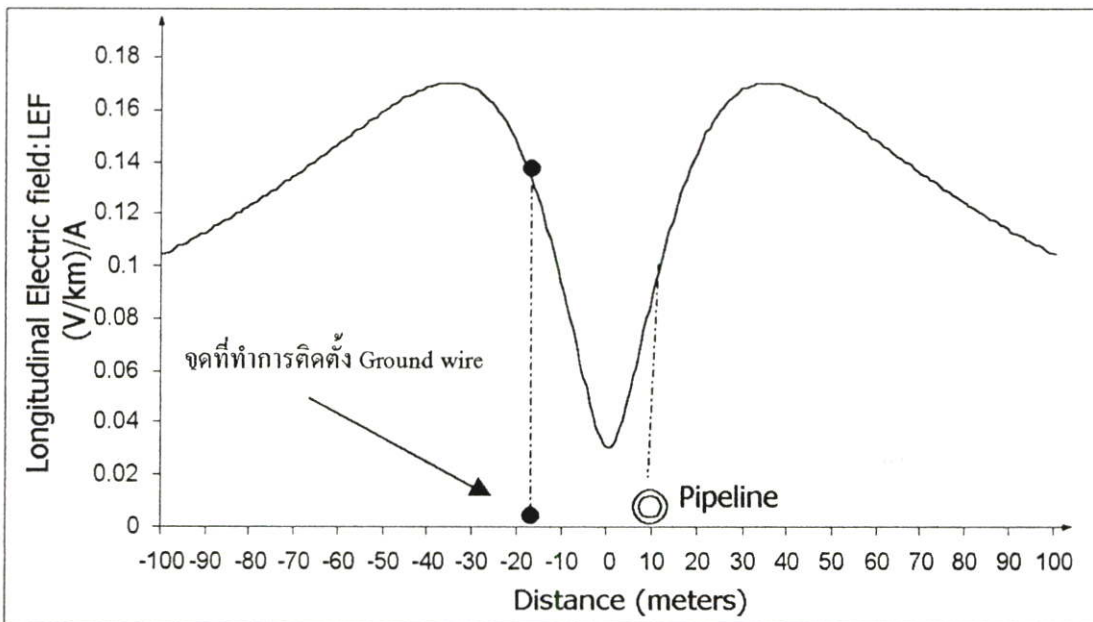
$$\begin{aligned} LEF_w &= 1.433 * LEF_p = 1.433 * 0.091 \text{ (V/km)/A} \\ &= 0.13 \text{ (V/km)/A} \end{aligned}$$

$$LEF_{Rw} = LEF_{Lw} = 0.13 \text{ (V/km)/A}$$

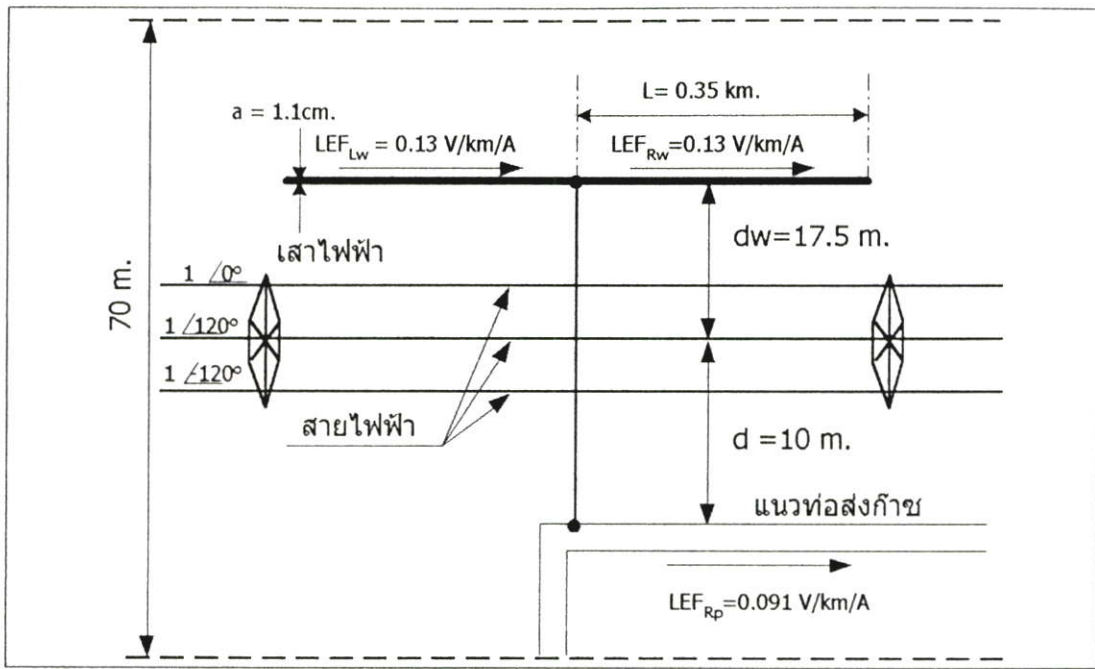
จากการคำนวณสนามไฟฟ้าตามแนวสายแสดงให้เห็นว่าจุดที่ต้องการฝังกราวด์ต้องมีค่า $LEF_{Rw} = LEF_{Lw} = 0.13 \text{ (V/km)/A}$ จากกราฟรูปที่ 6.70 พบว่าจุดที่ต้องการฝังกราวด์คือที่ตำแหน่ง 17.5 เมตรจากกึ่งกลางเสาส่งจึงจะทำให้ $LEF_{Rw} = LEF_{Lw} = 0.13 \text{ (V/km)/A}$ ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นโดยการยึดหลักมาตรฐานของ NACE คือแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นต้องไม่เกิน 15 V ดังนั้นในการเลือกกราวด์ที่จะทำการติดตั้งเพื่อลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำให้มีค่าน้อยกว่า 15 โวลต์ สามารถทำได้ดังนี้

$$\frac{V_m}{V_0} = \frac{15}{50} = 0.3$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนั้นต้องมีค่าน้อยกว่า 0.3 ดังนั้นจากกราฟรูปที่ 6.66 กราวด์ไวร์กับอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของท่อ 40 นิ้ว เมื่อสายกราวด์เป็น Commercial aluminum wire จะได้ความยาวขั้นต่ำอยู่ที่ (L) 350 เมตรความยาว 350 เมตรเป็นความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวทั้งหมดดังนั้นการใช้ความยาวจริงๆคือ 700 เมตรการติดตั้งแสดงดังรูปที่ 6.71



รูปที่ 6.70 แสดงค่า LEF ที่ตำแหน่งการวางสายกราวด์กับตำแหน่งการวางท่อ



รูปที่ 6.71 ลักษณะการติดตั้งกราวด์

6.7 สรุป

การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำบนทอส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสามารถทำได้ 2 กรณี คือการลดทอนค่า LEF เนื่องจากสายส่งและการติดตั้งระบบกราวด์ให้กับทอส่งก๊าซ

กรณีการลดทอนค่า LEF เนื่องจากสายส่งพบว่า

กรณีเสาส่งที่มีการจัดวาง ตัวนำในแนวนอน	พบว่าสามารถลดทอนค่า LEF ได้โดยการเพิ่มความสูงของเสาส่ง ซึ่ง อัตราการลดทอน โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $4.803 \times 10^{-3} (\text{V/km})/\text{A} / \text{m}$ การ ทำการเพิ่มระยะเฟสและการจัดลำดับเฟสไม่สามารถลดค่า LEF ได้
กรณีเสาส่งที่มีการจัดวาง ตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม	พบว่าสามารถลดทอนค่า LEF ได้โดยการเพิ่มความสูงของเสาส่ง ซึ่ง อัตราการลดทอน โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $1.282 \times 10^{-3} (\text{V/km})/\text{A} / \text{m}$ การทำการเพิ่มระยะเฟสและการจัดลำดับเฟสไม่สามารถลดค่า LEF ได้
กรณีเสาส่งที่มีการจัดวาง ตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร	ในการลดทอนค่า LEF มากที่สุดคือการเพิ่มความสูงของเสาส่งโดยเฉลี่ย อยู่ที่ประมาณ $2.032 \times 10^{-3} ((\text{V/km})/\text{A}) / \text{m}$ การทำการเพิ่มระยะเฟสและ การจัดลำดับเฟสไม่สามารถลดค่า LEF ได้

<p>กรณีเสาสูงที่มีการจัดวาง ตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร</p>	<p>ในการลดทอนค่า LEF มากที่สุดคือการเพิ่มความสูงของเสาสูงโดยเฉลี่ย อยู่ที่ประมาณ $0.3623 \times 10^{-3} (\text{V/km}/\text{A})/\text{m}$ การทำการเพิ่มระยะเฟสใน แนวตั้งไม่สามารถลดLEFได้ ในการปรับระยะเฟสในแนวนอนสามารถ ลดค่าLEF ได้และการจัดลำดับเฟสที่เหมาะสมช่วยลดค่าLEFได้ถึง 82 %</p>
<p>กรณีเสาสูงที่มีการจัดวาง ตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร</p>	<p>ในการลดทอนค่า LEF มากที่สุดคือการเพิ่มความสูงของเสาสูงโดยเฉลี่ย อยู่ที่ประมาณ $0.188 \times 10^{-3} (\text{V/km}/\text{A}) /\text{m}$ การทำการเพิ่มระยะเฟสใน แนวตั้งไม่สามารถลดทอนค่า LEF ได้ ในการปรับระยะเฟสในแนวนอน สามารถลดค่า LEF ได้และการจัดลำดับเฟสที่เหมาะสมสามารถลดค่า LEF ได้ถึง 84 %</p>

กรณีต่อกราวด์ให้กับท่อน้ำก๊าซ

<p>กราวด์ รอด</p>	<p>ในการเลือกติดตั้งกราวด์รอดที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจาก สายส่งไฟฟ้าแรงสูงพบว่ากราวด์รอดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับค่าCharacteristic impedanceของท่อน้ำก๊าซ อัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ลักษณะความไม่ต่อเนื่อง ของท่อ และ ค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ โดยค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ควรมีค่าน้อย กว่าค่า Characteristic impedance คือ 10 โอห์ม จึงจะทำให้การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ นำเป็นผล และในการหาค่าความต้านทานของกราวด์รอดขึ้นอยู่กับค่า ความต้านทาน จำเพาะของดินพบว่าที่ความยาวของกราวด์รอดน้อยกว่า 100 เมตร ค่าความต้านทาน จำเพาะของดินต้องมีค่าน้อยกว่า 100 โอห์ม-เมตร จึงจะทำให้การติดตั้งกราวด์รอดให้ มีค่าความต้านทานน้อยกว่า 10 โอห์ม</p>
<p>กราวด์ ไวร์</p>	<p>ในการติดตั้งกราวด์ไวร์เพื่อใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ ความต้านทานของกราวด์พบว่าที่ความยาวของกราวด์ไวร์น้อยกว่า 250 เมตรการลด ทอนแรงดันเหนี่ยวนำของกราวด์ไวร์ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์โดยผลกระทบ เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยมากเนื่องจากความยาวของกราวด์ไวร์มีค่าน้อย และ พบว่าในกรณีนี้ค่าอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่ความยาวของกราวด์ไวร์เท่ากัน กราวด์ไวร์ชนิด Center connection ground wire จะมีค่าอัตราการลดทอนแรงดัน เหนี่ยวนำต่ำกว่ากราวด์ที่ต่อแบบ End connection ground wire เนื่องจากการต่อแบบ Center connection ground wire คือการนำอิมพีแดนซ์ด้านซ้ายและด้านขวามือจากแนว จุดต่อขนานกันและพบว่าในกรณีที่อัตราการลดทอนมีค่าเท่ากัน กราวด์ลักษณะของ กราวด์ไวร์เหมือนกัน กราวด์ไวร์ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะของกราวด์ไวร์มีค่าจะใช้ ความยาวน้อยกว่ากราวด์ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงของกราวด์ไวร์สูง</p>

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 บทนำ

จากจุดมุ่งหมายที่ได้กำหนดไว้สำหรับการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้ทำการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงโดยการใช้ทฤษฎีของสายส่ง วงจรเทียบเคียงเทวินิน และทฤษฎีวงจรในการพัฒนาเป็นโปรแกรม AC mitigation ลักษณะของโปรแกรมได้ทำการแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน หลักๆคือ ส่วนที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซและส่วนที่ใช้ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานของ NACE [8] โดยในส่วนที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำได้ทำการแบ่งลักษณะของโครงสร้างเสาส่งออกเป็น 5 ลักษณะ คือโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร โครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจร ซึ่งลักษณะโครงสร้างของเสาส่งทั้ง 5 ลักษณะสามารถพบเห็นได้โดยทั่วไป และในส่วนที่ใช้คำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกราวด์ในการลดทอนได้ทำการแบ่งระบบกราวด์ออกเป็น 2 ระบบคือ กราวด์รูด และกราวด์ไวร์ซึ่งกราวด์ไวร์ได้ทำการแยกออกเป็น 2 ลักษณะ คือกราวด์ไวร์ทำไม่คิดผลของสนามแม่เหล็กและกราวด์ไวร์ที่คิดผลของสนามแม่เหล็ก

7.2 โปรแกรมคำนวณและลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

ขั้นตอนการศึกษาและวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงเริ่มต้นจากการคำนวณโดยใช้กราฟมาตรฐานในการออกแบบ จากนั้นได้ทำการพัฒนาโปรแกรมบนภาษาวิซวลเบสิกคือโปรแกรม AC mitigation เพื่อใช้เป็นเครื่องมือช่วยในการคำนวณหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำและใช้ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซแทนการใช้กราฟในการออกแบบซึ่งสามารถใช้งานง่ายกว่าการใช้กราฟในการออกแบบ จากโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นได้ทำการทดสอบความถูกต้องกับกราฟที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ โดยเริ่มจากการเปรียบเทียบค่า LEF จากสายส่ง ที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนและเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ต่อไปได้นำผลการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ และ ค่าคงที่การแพร่ของคลื่น เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก และ สุดท้ายได้มีการเปรียบเทียบการคำนวณโดยใช้โปรแกรม AC mitigation กับกราฟมาตรฐาน ซึ่งพบว่าค่าความผิดพลาดระหว่างการใช้กราฟและการใช้โปรแกรมในการออกแบบ 0.14 % ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโปรแกรมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น

สามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซได้ แต่ในการนำโปรแกรม AC mitigation มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างที่มีการติดตั้งใช้งานที่นิคมมาบตาพุดจังหวัดระยอง พบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณยังมีค่า ความผิดพลาดเกิดขึ้นเนื่องจากไม่สามารถทำการควบคุมพารามิเตอร์เช่น กระแสที่ไหลในสายส่ง ความต้านทานจำเพาะของดิน ระบบส่งจ่ายที่วางที่อยู่ใกล้เคียง วัชพืชบริเวณใต้แนวสายส่ง

7.3 การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำ

การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำได้ทำการแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นกรณีการวิเคราะห์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระบบ และการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำเมื่อพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซมีการเปลี่ยนแปลงโดยผลที่ได้จะนำเสนอต่อไปนี้

7.3.1 พารามิเตอร์ของเสาส่งเปลี่ยนแปลง

จากการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างของเสาส่ง ในการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในกรณีที่โครงสร้างของเสาส่งมีการเปลี่ยนแปลงได้ทำการพิจารณาตามลักษณะโครงสร้างของเสาส่ง กรณีโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนพบว่าในการวางแนวท่อที่ระบบเสาส่งประเภทนี้ไม่ควรวางแนวท่อที่ตำแหน่ง -35 และ 35 เมตร จากกึ่งกลางเสาส่ง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดและในการวางควรวางที่จุดกึ่งกลางเสาส่ง กรณีโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยม พบว่าในการวางท่อที่ระบบเสาส่งประเภทนี้ไม่ควรวางแนวท่อที่ตำแหน่ง -17 และ 17 เมตร จากกึ่งกลางเสาส่ง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุดและในการวางควรวางแนวท่อที่จุดกึ่งกลางเสาส่ง กรณีโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจร พบว่าควรหลีกเลี่ยงการวางแนวท่อส่งก๊าซที่ตำแหน่งได้แนวสายส่งหรือ 3 เมตรนับจากจุดกึ่งกลางเสาส่ง แต่ถ้าจะวางแนวท่อขนานกับระบบสายส่งนี้ควรมีการวางแนวท่อห่างจากแนวสายส่ง กรณีโครงสร้างเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 2 วงจร และ 4 วงจรพบว่าในระบบนี้ควรหลีกเลี่ยงการวางแนวท่อส่งก๊าซที่ตำแหน่งที่จุดกึ่งกลางเสาส่ง แต่ถ้าจะวางแนวท่อขนานกับระบบสายส่งนี้ควรมีการวางแนวท่อห่างจากจุดกึ่งกลางเสาส่ง ในการเพิ่มความสูงให้กับเสาส่งทั้ง 5 กรณี ช่วยทำให้แรงดันเหนี่ยวนำลดลง แต่ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าที่กำลังไฟฟ้ามูลค่าเพิ่มขึ้นคือกระแสในการส่งจ่ายมีค่ามากขึ้นเป็นผลทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซมีค่ามากขึ้น

7.3.2 พารามิเตอร์ของท่อที่มีการเปลี่ยนแปลง

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซพบว่าเมื่อความยาวของท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นกับความยาวท่อ ซึ่งแรงดันเหนี่ยวนำจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งของการวางท่อ เมื่อทำการฝังท่อที่ความลึกเพิ่มขึ้นพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลงซึ่งเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดแรงดันเหนี่ยวนำได้ เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน ความหนาของท่อและ ค่าความต้านทานจำเพาะฉนวนของท่อเพิ่มขึ้นพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเพิ่มขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลง เมื่อค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์ของท่อเพิ่มขึ้นแรงดันเหนี่ยวนำมีค่าลดลงและพบว่ากรณีที่กำลังอิมพีแดนซ์ของโพลและอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้นด้วย

7.4 การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ

การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ 2 ลักษณะคือการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำกรณีการปรับปรุงโครงสร้างเสาส่งเพื่อทำการลดทอนค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งและการต่อระบบกราวด์ให้กับท่อส่งก๊าซ

7.4.1 การลดทอนโดยการออกแบบโครงสร้างเสาส่ง

ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำโดยการปรับปรุงโครงสร้างเช่น การปรับปรุงด้านความสูงระยะระหว่างเฟส ระยะระหว่างวงจร และการจัดลำดับเฟสของสายส่ง พบว่า

กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน สามารถลดทอนค่า LEF ได้โดยการเพิ่มความสูงของเสาส่ง ซึ่งอัตราการลดทอนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $4.803 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A/m}$ การทำการเพิ่มระยะเฟสและการจัดลำดับเฟสไม่สามารถลดค่า LEF ได้

กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำเป็นรูปสามเหลี่ยมสามารถลดทอนค่า LEF ได้โดยการเพิ่มความสูงของเสาส่ง ซึ่งอัตราการลดทอนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $1.282 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A } / \text{m}$ การทำการเพิ่มระยะเฟสและการจัดลำดับเฟสไม่สามารถลดค่า LEF ได้

กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 1 วงจรในการลดทอนค่า LEF มากที่สุดคือการเพิ่มความสูงของเสาส่งโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $2.032 \times 10^{-3} \text{ ((V/km)/A) /m}$ การทำการเพิ่มระยะเฟสและการจัดลำดับเฟสไม่สามารถลดค่า LEF ได้

กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน 2 วงจรสามารถลดทอนค่า LEF ได้โดยการเพิ่มความสูงของเสาส่ง ซึ่งอัตราการลดทอนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $0.3623 \times 10^{-3} \text{ (V/km)/A } / \text{m}$ การเพิ่มระยะเฟสและการจัดลำดับเฟสไม่สามารถลดค่า LEF ได้ เมื่อทำการจัดลำดับเฟสให้เหมาะสมจะเห็นได้ว่ากรณีที่ 1 เป็นกรณีที่ก่อให้เกิดค่า LEF มีค่าสูงสุดและในกรณีที่ 6 เป็นกรณีที่ก่อให้เกิดค่า

LEF มีค่าน้อยที่สุดเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างกรณีการจัดวางตัวนำทั้งสองพบว่าการจัดวางตัวนำในกรณีที่ 6 สามารถลดค่า LEF ได้ถึง 82 % เมื่อเทียบกับการจัดวางตัวนำในกรณีที่ 1

กรณีเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง 4 วงจรสามารถลดทอนค่า LEF ได้โดยการเพิ่มความสูงของเสาส่ง ซึ่งอัตราการลดทอนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $0.188 \times 10^{-3} (\text{V/km})/\text{A} / \text{m}$ การทำการเพิ่มระยะเฟสและการจัดลำดับเฟสไม่สามารถลดค่า LEF ในการจัดลำดับเฟสของสายส่งตั้งในกรณีที่ 36 แสดงให้เห็นว่าการกระจาย ของค่า LEF มีค่าต่ำที่สุดซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า LEF ระหว่างการจัดวางตัวนำในกรณีที่ 1 กับการจัดวางตัวนำในกรณีที่ 36 พบว่าสามารถลดค่า LEF ลงได้ถึง 84% โดยเฉลี่ยดังนั้นในการจัดลำดับเฟสที่เหมาะสมจะช่วยลดค่า LEF ได้

7.4.2 การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำโดยการต่อกราวด์

กรณีต่อกราวด์ให้กับท่อส่งก๊าซได้ทำการแบ่งระบบกราวด์ออกเป็น 2 ระบบ คือกราวด์รูดและกราวด์ไวร์ จากการวิเคราะห์พบว่า

กราวด์รูดในการเลือกติดตั้งกราวด์รูดที่ใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงพบว่าการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อส่งก๊าซ อัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำ ลักษณะความไม่ต่อเนื่องของท่อและค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ โดยค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์ควรจะมีค่าน้อยกว่าค่าอิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อส่งก๊าซ คือ 10 โอห์ม จึงจะทำให้การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำเป็นผล และในการหาค่าความต้านทานของกราวด์รูดขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน พบว่าที่ความยาวของกราวด์รูดน้อยกว่า 100 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดินต้องมีค่าน้อยกว่า 100 โอห์ม-เมตร จึงจะทำให้การติดตั้งกราวด์รูดให้มีค่าความต้านทานน้อยกว่า 10 โอห์ม

กราวด์ไวร์ในการติดตั้งกราวด์ไวร์เพื่อใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือความต้านทานของกราวด์พบว่าที่ความยาวของกราวด์ไวร์น้อยกว่า 250 เมตร การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำของกราวด์ไวร์ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์โดยผลกระทบเนื่องจากสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยมากเนื่องจากความยาวของกราวด์ไวร์มีค่าน้อย และพบว่าในกรณีนี้ค่าอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่ความยาวของกราวด์ไวร์เท่ากับกราวด์ไวร์ชนิด Center connection ground wire จะมีค่าอัตราการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำต่ำกว่ากราวด์ที่ต่อแบบ End connection ground wire เนื่องจากการต่อแบบ Center connection ground wire คล้ายกับการนำอิมพีแดนซ์ทางด้านซ้ายและด้านขวามือจากแนวจุดต่อขนานกันและพบว่าในกรณีที่อัตราการลดทอนค่าเดียวกันกราวด์ลักษณะของกราวด์ไวร์เหมือนกันความยาวของกราวด์ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะของกราวด์ไวร์มีค่าจะใช้ความยาวน้อยกว่ากราวด์ที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสูงของสายกราวด์สูง

7.5 ผลที่ได้รับ

จากผลการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ การลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติ ตลอดจนการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำและการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำผลที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์มีดังนี้

- 1) สามารถอธิบายการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้
- 2) สามารถทำการวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้
- 3) สามารถลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของ NACE Standard RP0177-83 ได้
- 4) สามารถนำผลที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ใช้ประกอบการตัดสินใจการวางท่อนส่งก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่ใต้ดินและแนวท่อนอยู่ภายใต้เขตดินสายไฟฟ้าได้
- 5) เพื่อพัฒนาโปรแกรมที่ใช้คำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่ใต้ดินและแนวท่อนอยู่ภายใต้เขตดินสายไฟฟ้าและลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อนส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้อยู่ภายใต้ข้อกำหนดของ NACE Standard RP0177-83 ได้โดยจัดทำเป็นโปรแกรมซึ่งพัฒนาจากโปรแกรมภาษาวิชวลเบสิก (Visual BASIC Programing) ซึ่งโปรแกรมที่จัดสร้างขึ้นเรียกว่า โปรแกรม AC mitigation

7.6 ข้อเสนอแนะ

จากโปรแกรม AC mitigation ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นมาใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำและการคำนวณอิมพีแดนซ์ของกราวด์เพื่อใช้ในการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำภายใต้เงื่อนไขในการคำนวณดังนี้

- 1) ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อนส่งก๊าซธรรมชาติจะไม่คำนึงถึงแอมโวนของระบบป้องกันการสนิม
- 2) ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากมิวชวลจากท่อหรือวัสดุอื่นๆที่อยู่ใกล้เคียง
- 3) ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากมิวชวลจากสายส่งที่อยู่ใกล้เคียง
- 4) พื้นดินที่ใช้ในการวิเคราะห์เป็นพื้นดินที่มีความสม่ำเสมอราบเรียบและค่าความต้านทานจำเพาะของดินเท่ากันตลอดแนวของการฝังท่อ

- 5) ความสูงของเสาส่งที่ใช้เป็นความสูงโดยเฉลี่ย
- 6) ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำไม่ได้พิจารณาผลกระทบจากมิชวลจากสายป้องกันฟ้าผ่า
- 7) ใช้คำนวณแรงดันเหนี่ยวนำเฉพาะสภาวะคงตัวเท่านั้น
- 8) ใช้คำนวณแรงดันเหนี่ยวนำเฉพาะท่อส่งก๊าซที่อยู่ใต้ดินเท่านั้น

7.7 งานวิจัยที่พัฒนาต่อไป

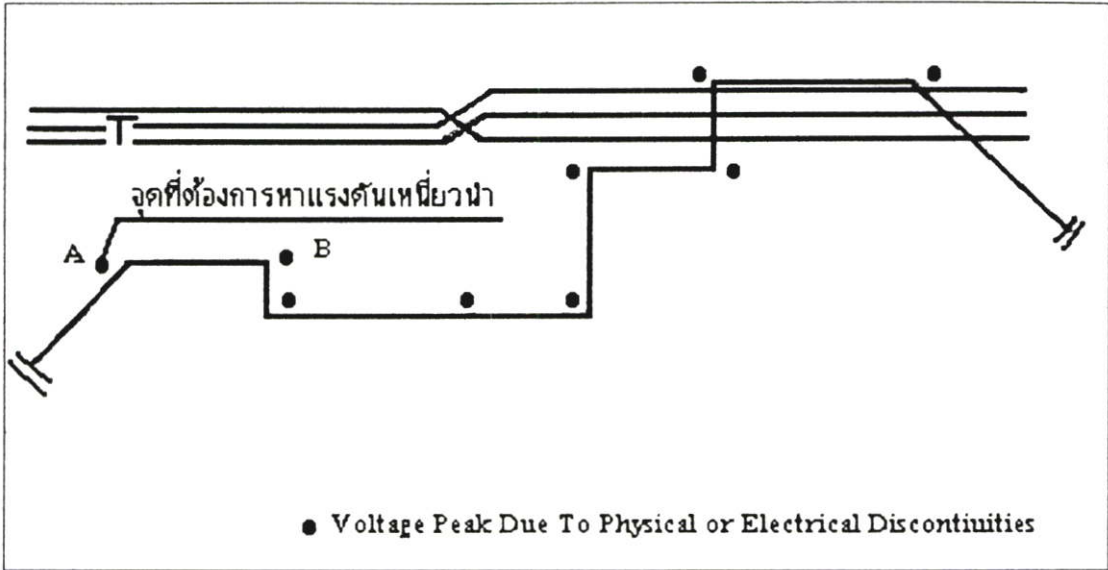
การวิเคราะห์แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการวิเคราะห์เฉพาะผลที่เกิดขึ้นในสภาวะคงตัว(Steady state) เท่านั้น ดังนั้นในการพัฒนาต่อไปควรที่จะพัฒนาในส่วนของ ทรานเซียน เช่น เมื่อเกิด ความผิดปกติ (Fault) ขึ้นที่ระบบ หรือเมื่อฟ้าผ่าที่สายป้องกันฟ้าผ่าเพื่อพิจารณาว่าการฝังท่อควรจะอยู่ห่างจาก กราวด์ของเสาส่งเท่าใดจึงจะก่อให้เกิดความปลอดภัย และการวิเคราะห์อัตราเสี่ยงของอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับท่อส่งก๊าซในการวางแนวท่อภายใต้แนวสายส่ง

เอกสารอ้างอิง

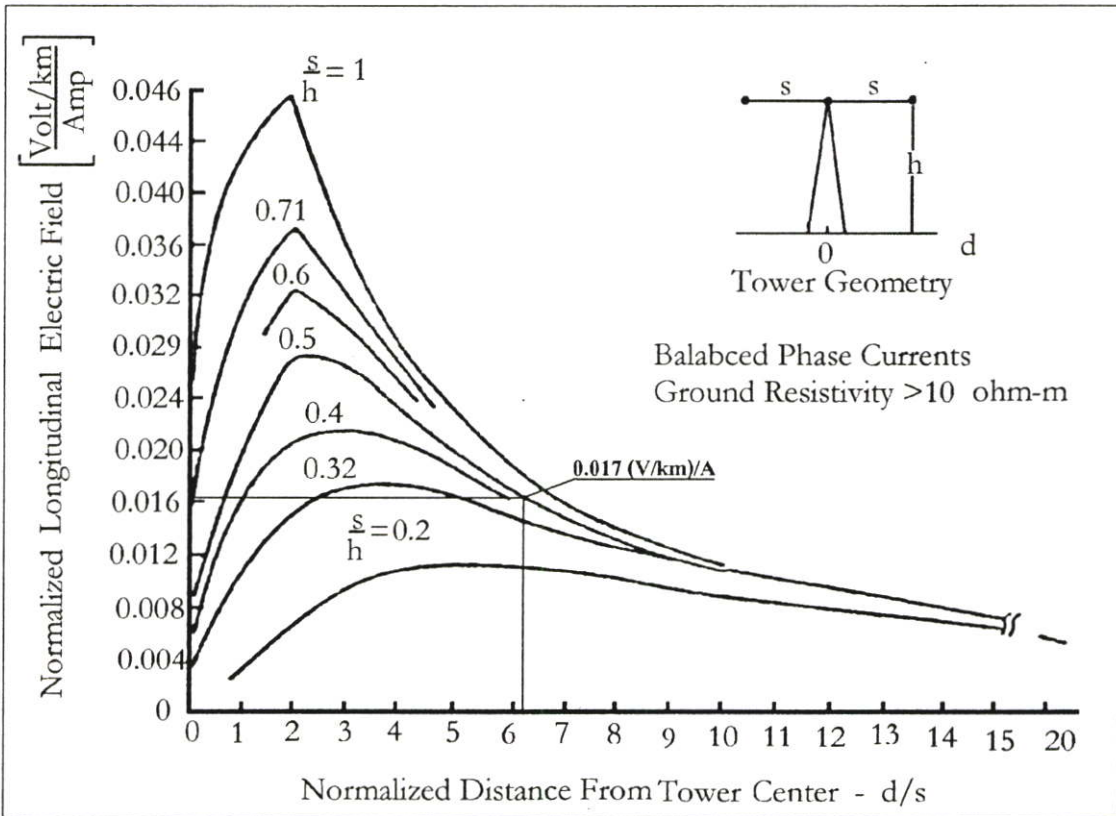
- [1] จเร สุรวัฒนนันท์ปัญญา “**Electromagnetic Engineerings**” วศ.สจล. 130
- [2] J. Dabkowski., “**Calculations and Mitigation of Induce Voltages on Buried Pipelines**”
Paper 64 National Association of Corrosion Engineering Standard”
- [3] A.Taflove and J. Dabkowski., “**Prediction Method for Pipeline Voltage due to 60 Hz AC Inductive Coupling Part I-Analysis** “IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems”, .Vol. PAS-98,No. 3 May/ June 1979.pp.780-787
- [4] “**Power Line-Induce AC Potential on Natural Gas Pipelines for Complex Rights-of-Way Configuration Volume1: Engineering Analysis**” ,EPRI/A.G.A Project 742-2,EL-3106PR-151-127,May/Novemer,1983
- [5] R. Andolfato, L.Bernardi, L.Fellin “**Overhead and Buried Conductor Sysem**”,The 8st International Conferenceon Harmonics and Quality of Power ICHQP '98, 14-16 October/1998. Pp1064-1070
- [6] A.Taflove, M. Genge and J. Dabkowski., “**Mitigation of Buried Pipeline Voltages due to 60 Hz AC Inductive Coupling Part II-Design of Joint Rights-of-way** “IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems”, .Vol. PAS-98,No. 5 September/ October 1979.pp.1806-1813
- [7] J. Dabkowski., “**The Calculation of Magnetic Field Coupling From Overhead Transmission Lines** “IEEE Transaction on Power Apparatus and System” .Vol.PAS-100,No. 8 August 1981.pp.3850-3860
- [8] National Association of Corrosion Engineering Standard , RP0177-83 Item No.53039
- [9] ANSI/IEEE Std 80-1986”**IEEE Guide for Safety in AC substation Grounding**”1986

ภาคผนวก ก.

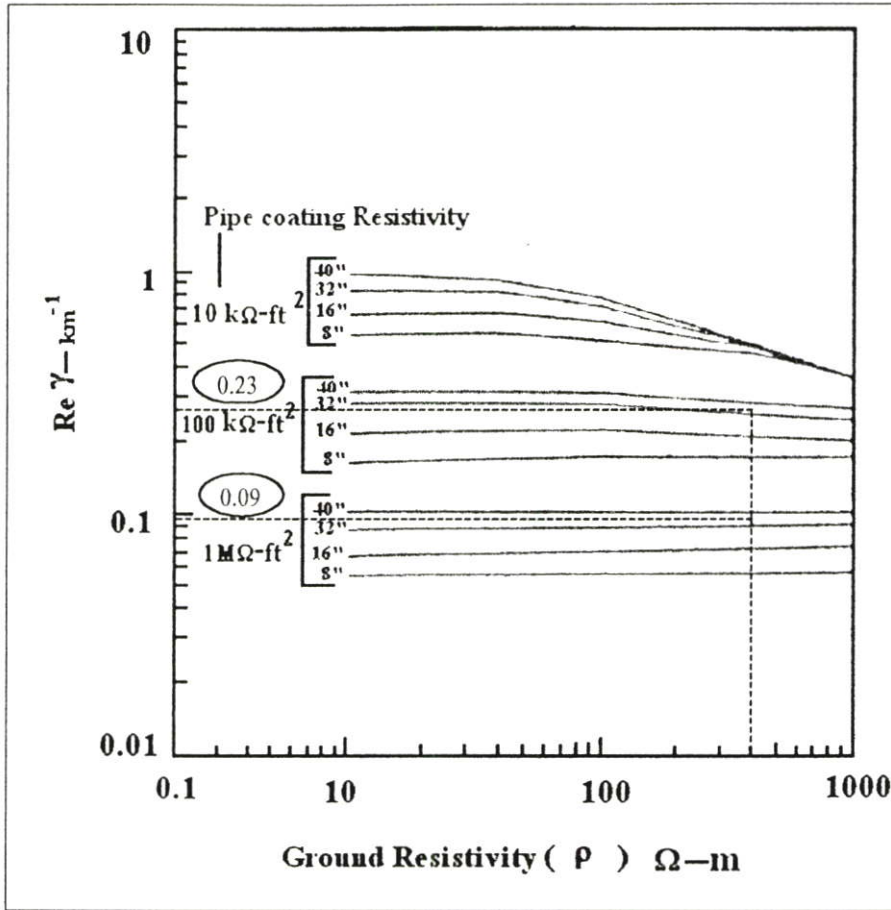
กราฟมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบตามมาตรฐาน NACE



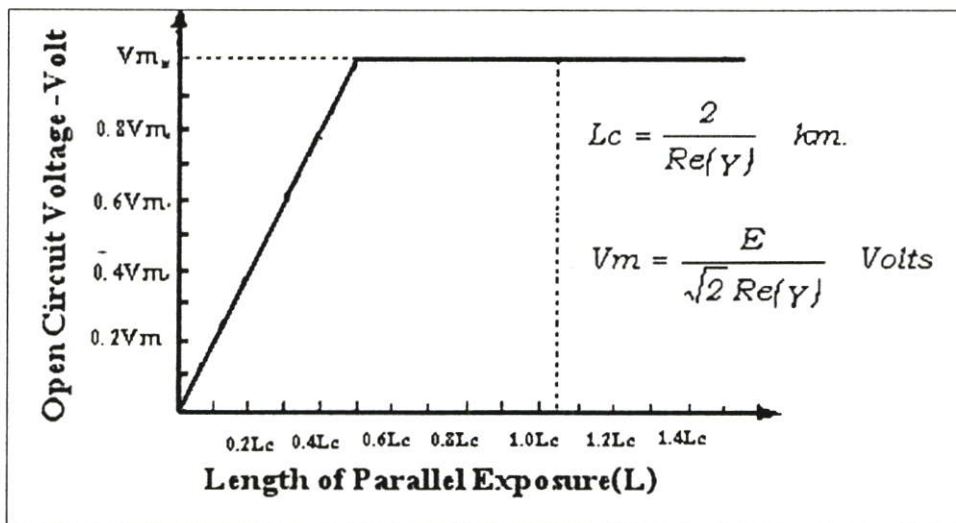
รูปที่ ๔.๑ ตำแหน่งที่ก่อให้เกิดแรงดันสูงสุด



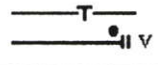
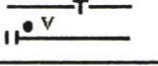
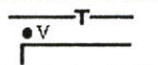

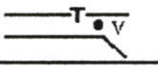
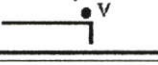
รูปที่ ๔.๒ Normalize Longitudinal Electric Field[8]



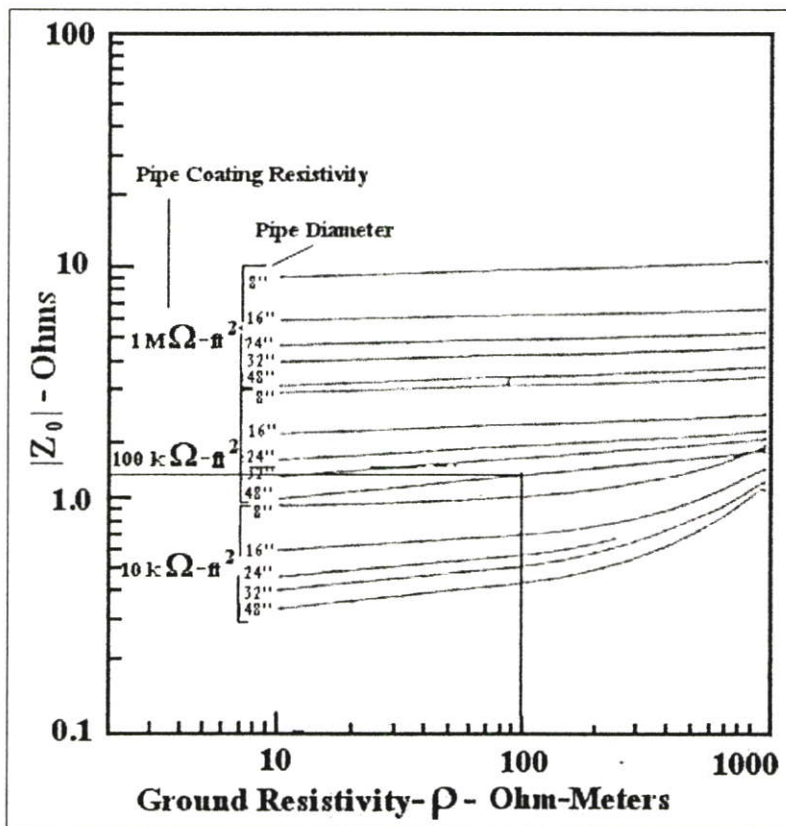
รูปที่ ๔.๓ กราฟ Propagation Constant [8]



รูปที่ ๔.๔ แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซกรณีเปิดวงจร (Open circuit voltage) [8]

Discontinuity	Worst Case Induced Voltage
1. Pipeline Insulation	
a. 	$V=V_{oc}(L)$
b. 	$V=V_{oc}(R)$
2. Enter & Leaving	
a. 	$V=V_{oc}(R)/2$
b. 	$V=V_{oc}(R)/2$
c. 	$V=V_{oc}(L)/2$
d. 	$V=V_{oc}(L)/2$

รูปที่ ผ.4.5 ลักษณะของท่อที่ไม่ต่อเนื่อง[8]



รูปที่ ผ.4.6 อิมพีแดนซ์คุณสมบัติของท่อ(Characteristic impedance of pipe)[8]

ภาคผนวก ข.
มาตรฐาน NACE



Standard Recommended Practice

Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems

The National Association of Corrosion Engineers (NACE) issues this standard in conformance with the best current technology regarding the specific subject. This standard represents a consensus of those individual members who have reviewed this document, its scope, and provisions. It is intended to aid the manufacturer, the consumer, and the general public. Its acceptance does not in any respect preclude anyone, whether he has adopted the standard or not, from manufacturing, marketing, purchasing, or using products, processes, or procedures not in conformance with this standard. Nothing contained in this NACE standard is to be construed as granting any right, by implication or otherwise, to manufacture, sell, or use in connection with any method, apparatus, or product covered by Letters Patent, or as indemnifying or protecting anyone against liability for infringement of Letters Patent. This standard represents minimum requirements and should in no way be interpreted as a restriction on the use of better procedures or materials. Neither is this standard intended to apply in all cases relating to the subject. Unpredictable circumstances may negate the usefulness of this standard in specific instances. NACE assumes no responsibility for the interpretation or use of this standard by other parties and accepts responsibility for only those official NACE interpretations issued by NACE in accordance with its governing procedures and policies which preclude the issuance of interpretations by individual volunteers.

Users of this standard are responsible for reviewing appropriate health, safety, and regulatory documents and for determining their applicability in relation to this standard prior to its use. This NACE standard may not necessarily address all safety problems and hazards associated with the use of materials, operations, and/or equipment detailed or referred to within this document.

CAUTIONARY NOTICE: NACE standards are subject to periodic review, and may be revised or withdrawn at any time without prior notice. The user is cautioned to obtain the latest edition. NACE requires that action be taken to reaffirm, revise, or withdraw this standard no later than two years from the date of initial publication. Purchasers of NACE standards may receive current information on all standards and other NACE publications by contacting the NACE Publication Orders Department, P.O. Box 218340, Houston, Texas 77218 (telephone 713/492-0535).

Approved July 1977
Revision Approved July 1983
National Association of Corrosion Engineers
P.O. Box 218340
Houston, TX 77218
713/492-0535

Copyright 1983, National Association of Corrosion Engineers

**Standard
Recommended Practice**

**Mitigation of Alternating Current
and Lightning Effects on Metallic Structures
and Corrosion Control Systems**

Contents

Foreword	1
1. Definitions.....	1
2. Exposures and Effects of Alternating Current and Lightning	2
3. Design Considerations for Protective Devices	3
4. Personnel Protection.....	5
5. AC and Corrosion Control Considerations	10
6. Special Considerations in Operation and Maintenance of Cathodic Protection and Safety Systems	11
References.....	12
Additional Resources	12

Foreword

This NACE Recommended Practice was prepared by Work Group T-10B-5a of Unit Committee T-10B on Interference Problems and is issued by NACE under the auspices of Group Committee T-10 on Underground Corrosion Control. It presents guidelines and procedures for use during design, construction, operation, and maintenance of metallic structures and corrosion control systems used to mitigate the effects of lightning and overhead alternating current (AC) power transmission systems. This recommended practice is not intended to supersede or replace existing electrical safety standards.

As shared right-of-way and utility corridor practices become more common, AC influence on adjacent metallic structures will have greater significance and personnel safety will become of greater concern. This document addresses problems primarily caused by proximity of metallic structures to AC powered transmission systems.

NACE continues to recognize the need for a recommended practice on this subject. At present, limited documented experience is available. Future development and field experience should provide

additional information, procedures, and devices for Unit Committee T-10B to consider in future revisions of this recommended practice.

This recommended practice should be used in conjunction with the references contained herein. It does not designate procedures for any specific situation.

The provisions of this recommended practice should be applied under the direction of competent persons, who, by reason of knowledge of the physical sciences and the principles of engineering and mathematics, acquired by professional education and related practical experience, are qualified to engage in the practice of corrosion control on metallic structures. Such persons may be registered professional engineers or persons recognized as being qualified or accredited as corrosion specialists by the National Association of Corrosion Engineers if their professional activities include suitable experience in corrosion control on metallic structures.

Section 1: Definitions

Definitions presented in this document pertain to the application of this Standard only. Reference should be made to other industry standards where appropriate.

AC Exposure—Alternating voltages and currents present on a structure due to the AC power system.

AC Power Structure—The structures associated with AC power systems.

AC Power System—The components associated with the generation, transmission, and distribution of alternating current.

Affected Structure—Pipes, cables, conduits, or other metallic structures exposed to the effects of alternating current and/or lightning.

Bond—A low impedance connection (usually metallic) provided for electrical continuity.

Breakdown Potential—A potential in excess of the dielectric strength of a barrier film, coating, or other insulator.

Capacitive Coupling—The association of two or more circuits with one another by means of a capacitance mutual to the circuits.

Coupling—The association of two or more circuits or systems in such a way that energy may be transferred from one to another.

DC Decoupling Device—A device used in electrical circuits which allows the flow of AC in both directions and stops or reduces substantially the flow of direct current (DC).

Dead Front Construction—A type of construction in which the energized components are recessed or covered to preclude the possibility of accidental contact with elements having electrical potential.

Earth Current—Electricity flowing in the earth.

Electric Field—One of the elementary energy fields in nature. It is found in the vicinity of an electrically charged body.

Electric Potential—The voltage difference between two points.

Electric Shield—A housing, screen, or other object, usually electrically conductive, which is installed to substantially reduce the effects of electric fields on one side caused by devices or circuits on the other side of the shield.

Electrolytic Grounding Cell—A DC decoupling device consisting of two or more electrodes, commonly made of zinc, installed at a fixed spacing and resistively coupled through a prepared backfill mixture.

Fault Current—A current that flows from one conductor to ground or to another conductor due to an abnormal connection (including an arc) between the two. A fault current flowing to ground may be called a ground fault current.

Ground—An electrical connection to earth.

Ground Current—Current flowing to or from earth in a grounding circuit.

Grounded—Connected to earth or to some extensive conducting body that serves instead of the earth, whether the connection is intentional or accidental.

Ground Electrode Resistance—The ohmic resistance between a grounding electrode and remote earth.

Ground Mat (Gradient Control Mat)—A system of bare conductors on or below the surface of the earth, so arranged and interconnected as to provide an area of equal potential within the range of step distances. (Metallic plates and grating of suitable area are common forms of ground mats.)

Grounding Grid—A system of grounding electrodes consisting of interconnected bare conductors buried in the earth to provide a common electrical ground.

Inductive Coupling—The association of two or more circuits with one another by means of the mutual inductance of the circuits.

Lightning—An electric discharge that occurs in the atmosphere between clouds or between clouds and the earth.

Load Current—The current in an AC power system under normal operating conditions.

Magnetic Field—One of the elementary energy fields in nature. It occurs in the vicinity of a magnetic body or current-carrying medium.

One Hand Testing Technique—A procedure in which only one preparation (test lead connection, etc.) is done at a time, and each operation is done with only one hand. The other hand is kept away from the test equipment, wires, etc.

Polarization Cell—A DC decoupling device consisting of two or

RP0177-83

more pairs of inert metallic plates immersed in an aqueous electrolyte. The electrical characteristics of the polarization cell are high resistance to low DC potentials and low impedance to AC.

Potential—See Electric Potential.

Potential Gradient—Change in the potential with respect to distance.

Reclosing Procedure—A procedure which normally takes place automatically, whereby the circuit breaker system protecting a transmission line, generator, etc. recloses one or more times after it has tripped due to abnormal conditions such as surges, faults, lightning strokes, etc.

Reference Electrode—A device whose open circuit potential is reproducible under similar conditions of measurement.

Remote Earth—A location on the earth, far enough from the affected structure that the soil potential gradients associated with currents entering the earth from the affected structure are insignificant.

Resistive Coupling—The association of two or more circuits with one another by means of resistance (metallic or electrolytic) between the circuits.

Shock Hazard—Considered to exist at an accessible part in a circuit between the part and ground or other accessible part if the open circuit AC potential is more than 30 volts (RMS) and capable of delivering 5 milliamperes (mA) or more through 1500 ohms.

Step Potential—The voltage difference between two points on the earth's surface separated by a distance of one pace, which will be assumed to be one meter, calculated in the direction of maximum potential gradient.

Surface Potential Gradient—The slope of a potential profile, the path of which intersects equipotential lines at right angles.

Switching Surge—The transient wave of potential and current which results from the sudden change of current flow caused by a switching operation such as the opening or closing of a circuit breaker.

Touch Potential—The potential difference between a metallic structure and a point on the earth's surface separated by a distance equal to the normal maximum horizontal reach (approximately one meter).

Section 2: Exposures and Effects of Alternating Current and Lightning

2.1 Introduction

2.1.1 This section outlines the physical phenomena by which alternating current, AC power systems, and lightning may affect metallic structures.

2.2 Resistive Coupling (Electrolytic)

2.2.1 Grounded structures of an AC power system share an electrolytic environment with other underground or submerged structures. Coupling effects may transfer AC energy to a metallic structure in the earth in the form of alternating current or potential. Whenever a power system with a grounded neutral has unbalanced conditions, current may flow in the earth. Substantial currents in the earth may result from phase-to-phase or phase-to-ground faults. A metallic structure in the earth may carry part of this current. Also, a structure in the earth coated with an insulating material may develop an AC potential across the coating.

2.3 Capacitive Coupling

2.3.1 The electric field associated with potentials on power conductors can develop a potential on an inadequately grounded structure in the vicinity of the power system. The potential which the structure will attain due to capacitive coupling varies with the power conductor potential and depends on many factors including the geometric configurations of the structures involved. During construction, when the structure is above ground or in an open trench, it may reach a dangerously high potential. When the structure is buried or submerged, the capacitive coupling effect usually is not significant.

2.4 Inductive Coupling

2.4.1 AC flow in power conductors produces an alternating magnetic field around these conductors. Thus, an AC potential will be induced in an adjacent structure within this magnetic field, and current may flow in that structure. The magnitude of the induced potential depends upon many factors including the overall geometric configuration of the structures involved, the

magnitude of the current in the power circuit, and any current imbalance. If the currents in a three phase power system are equal (balanced) and the structure is equidistant from each of the conductors, the total induced voltage would be zero. This, however, is seldom the case. An induced AC voltage is usually present on the affected structure. Single phase circuits normally produce greater electromagnetic effects than multiphase circuits. However, greater electromagnetically induced potentials may occur during a phase-to-ground or phase-to-phase fault in multiphase circuits because of the higher magnitude of fault current in these systems. The leakage conductance-to-ground, due to the resistive coupling of the affected structure, allows AC to flow between that structure and earth. This phenomenon, combined with other factors, results in different values of AC structure-to-soil potential along the affected structure.

2.5 Power Arc

2.5.1 During a fault-to-ground on an AC power system, the AC power structures and surrounding earth may develop a high potential with reference to remote earth. A long metallic structure, whether coated or bare, tends to remain at remote earth potential. If the resulting potential to which the structure is subjected exceeds breakdown potential of any circuit element, a power arc can occur which will damage the circuit element(s). Elements of specific concern include coating, insulating fittings, bonds, lightning arresters and cathodic protection facilities.

2.6 Lightning

2.6.1 Lightning strikes on the power system can initiate fault current conditions. Lightning strikes to a structure or to earth in the vicinity of a structure can produce electrical effects similar to those caused by AC fault currents. Lightning may also strike a metallic structure at some point remote from AC power systems, also with deleterious effects.

2.7 Switching Surges or Other Transients

2.7.1 A switching surge or other transient may generate abnormal currents or potentials on a power system causing a momentary increase in inductive and capacitive coupling on the affected structures.

Section 3: Design Considerations for Protective Devices

3.1 Introduction

3.1.1 The purpose of this section is to describe various protective devices used to mitigate the AC effects on metallic structures, minimize damage to the structures, and reduce the electrical hazard to persons coming in contact with these structures.

3.1.2 The methods listed in this section can be used to mitigate the problems of power arcing, lightning arcing, resistive coupling, inductive coupling, and capacitive coupling.^{1,2,3}

3.2 Electrical Shields

3.2.1 Shields are intended to protect the structure from arcing effects which may be produced in the earth between AC power systems and affected structures, thus reducing the possibility of puncturing the coating and/or structure under surge conditions.

3.2.2 Among the factors which influence the design of electrical shields are the extent to which the structure is affected and the magnitude of the electrical potential between the structure and earth. These factors vary from one location to another and must be calculated or determined for each specific location.

3.2.3 Shields may consist of one or more electrodes installed paralleling and/or encircling an affected structure at specific locations or along its entire length. Some types of shields, such as those made of an anodic material, should be electrically connected to the affected structure. Shields of the parallel or encircling anode type shall be connected to the structure at least at the end points of the shield. Shields constructed of materials which are cathodic to the protected structure must be connected to the structure through a DC decoupling device.

3.2.4 Other types of electrical shields can be designed for protection against surges on miscellaneous underground or aboveground structures. A long, buried, bare conductor can be used effectively as a shield.

3.3 Grounding Mats

3.3.1 Grounding mats, bonded to the structure, are used to reduce electrical touch and step potentials in areas where persons may come in contact with a structure subject to hazardous potentials. Permanent grounding mats, bonded to the structure, may be used at valves, metallic vents, and other aboveground metallic appurtenances.

3.3.2 Grounding mats should be large enough to extend through and beyond the entire area on which persons may be standing when contacting the affected structure. They should be installed close enough to the surface so that step and touch potentials are reduced for individuals coming in contact with the structure.¹

3.3.3 Grounding mats, regardless of materials of construction, should be bonded to the structure, preferably at more than one point. If cathodic protection of the structure becomes difficult because of shielding, a DC decoupling device may be installed. Connections to the structure should be made above ground to allow a means of testing for effectiveness of the grounding mat in reducing AC potentials and of their effects on the cathodic protection system. Care should be taken to prevent the possible establishment of detrimental galvanic cells between the grounding mat and structures which are not cathodically protected.

3.3.4 A bed of clean, well drained gravel can reduce the shock hazard associated with step and touch potentials. The thickness of the bed should be no less than 3 in. (8 cm) above grade. Gravel should be a minimum of 1/2 in. (1.3 cm) in diameter. The

hazards of step potentials at the edge of a mat may be mitigated by extending the gravel beyond the perimeter of the grounding mat.

3.4 Independent Structure Grounds

3.4.1 Wherever a metallic structure is installed which is not electrically connected to an existing grounded structure, it shall have an independent grounding system. This grounding system may consist of one or more ground rods and interconnecting wires. Care shall be taken to interconnect properly all components of the structure to be grounded. Factors to be considered in the design of the grounding system of an independent structure include the resistivity of the soil and the magnitude of the induced potential and current which the designer expects the structure to encounter under all possible conditions.

3.4.2 Where an independent metallic structure or its grounding system is in close proximity to an existing grounded structure, an electrical hazard may develop for any person contacting both structures and/or their grounds simultaneously. In such cases, both grounding systems should be connected, either directly or through a DC decoupling device, unless it is determined that such a connection is undesirable. For more details on the designing systems for independent structures, refer to Reference 1.

3.5 Bonding to Existing Structures

3.5.1 One available means of reducing induced AC potentials on a structure involves bonding the structure to the power system ground through adequately sized cables and decoupling devices. Such bonds may, under fault conditions, contribute to increased potentials and currents on the affected structure for the duration of the fault. If the bonded structure is above ground, or well insulated from earth, elevated potentials may be created and exist temporarily along the entire length of the bonded structure. In such instances, additional protective devices may be required outside the immediate area of the origin of electrical effects. Close coordination should be maintained with all other utilities in the area and especially with those utilities to which bond connections are proposed. The corresponding utilities shall be notified in advance of the need to bond to their structures and shall be furnished with details of the proposed bonding arrangements. A utility may prefer to have the connection to its structures made by its own personnel.

3.6 Distributed Anodes

3.6.1 Whenever distributed galvanic anodes are used as part of the grounding system to reduce the AC potential between a structure and earth, they should be installed in close proximity to the protected structure and away from power system grounds. It may be desirable to connect anodes directly to the affected structure, without test connections. Direct connection reduces the number of points at which persons can come in contact with the structure and offers the shortest path to ground. Should it be desirable for measurement purposes to disconnect the circuit the distributed grounding system and the structure, the connection should be made in an accessible test box. Where galvanic anodes are used as part of a grounding system, it is important to consider the useful life of the electrode material. Dissipation of the anode material will increase the grounding system resistance.

3.7 Casings

3.7.1 Bare casings may be deliberately connected to a coated structure through a DC decoupling device to lower the impedance of the structure to earth during surge conditions and to avoid arcing between the structure and the casing.

TABLE 1 — Maximum 60 Hz Fault Currents—Grounding Cables⁽¹⁾

Cable Size AWG	Fault Time Cycles	RMS Amperes		Cable Size AWG	Fault Time Cycles	RMS Amperes	
		Copper	Aluminum			Copper	Aluminum
1	15	10550	6500	3/0	15	26500	16500
	30	7500	4600		30	18500	16500
	60	5300	3200		60	13000	8000
1/0	15	16500	10500	4/0	15	30000	21000
	30	11500	7500		30	21000	15000
	60	8000	5300		60	15000	10000
2/0	15	21000	13000	250 MCM	15	35000	25000
	30	15000	9000		30	25000	17500
	60	10000	6500				

⁽¹⁾Based on 30 C ambient and a total temperature of 175 C established by Insulated Cable Engineers Association (ICEA) for short circuit characteristic calculations for power cables. Values are approximately 57 1/2% of fusing currents.

3.8 Connector (Electrical and Mechanical) and Conductor Sizes

3.8.1 All anodes, bonds, grounding devices, and jumpers must have secure, reliable, low resistance connections to themselves and to the devices to which they are attached. Structure members with rigid bolted, riveted, or welded connections may be used in lieu of a bonding cable for part or all of the circuit. For adequate sizing of bonding cables, refer to Table 1 and Figures 1, 2, and 3. All cables, connections, and structural members should be capable of withstanding the maximum anticipated magnitude and duration of the fault current.

3.8.2 Mechanical connections should be avoided, where practical, for the installation of permanent protective devices. Where practical, field connections to the structure and/or grounding device should be made by the exothermic welding process. However, compression-type connectors may be used for splices on connecting wires. Mechanical connectors may be used for temporary protective measures, but extreme care should be taken to avoid high resistance contacts. Soft soldered connections are not acceptable in grounding circuits.

3.9 Insulating Joints

3.9.1 Insulating joints may be installed to isolate the structure into shorter electrical sections or to isolate a section adjacent to an AC power system from the remainder of the structure. Insulating joints, installed in areas where a possibility of damage exists due to induced AC potentials or fault currents, should be overwrapped with pipe coating tape and have lightning arresters, electrolytic grounding cells, or similar protective devices installed across the joints. The high threshold voltage characteristics of lightning arresters should be considered, and installation should include personnel protection such as dead front construction. (During the conducting mode of protective devices, the AC isolation provided by insulating joints does not exist.)

3.10 Electrolytic Grounding Cells, Polarization Cells, and Other Devices

3.10.1 The installation of electrolytic grounding cells, polarization cells, or other devices between the affected structure and suitable grounds should be considered where arcing and induced AC potentials could develop. Although they will not eliminate the induced potentials resulting during normal operation and/or surge conditions, these devices will reduce the possibility of arcing and structure puncture.

3.10.2 Where electrolytic grounding cells, polarization cells, or other devices are used, they should be properly sized, spaced, and physically secured in a manner that will safely conduct the maximum amount of anticipated surge current. Cables connecting these devices to the structures shall be properly sized as described in Paragraph 3.8.1. An adequately sized shunting circuit should be provided to permit isolation of the grounding device during testing and maintenance.

3.11 Lightning Arresters

3.11.1 Lightning arresters may be used between structures and transmission line tower footing or grounding systems and across pipeline insulating joints. However, one restriction to the use of lightning arresters is that a potential difference has to develop before the arrester will break down. On certain types of arresters, this potential may be high enough to become hazardous to persons coming in contact with the arrester. Where lightning arresters are used, they shall be connected to the structure through adequately sized cables as in Paragraph 3.8.1. Lightning arresters should always be provided with a reliable low resistance ground connection. They should be located close to the structure to be protected and have a short, direct ground path. An adequately sized shunting circuit should be provided to permit isolation of the grounding device during testing or maintenance.

3.11.2 Certain types of self-healing lightning arresters may be used in locations where a combustible atmosphere is anticipated, but only if it can be determined that the maximum possible power fault current will not exceed the design rating of the arrester. Open spark gaps shall not be used in these locations.

3.12 Stray Direct Current Areas

3.12.1 In areas where stray direct currents are present, galvanic anodes (including those in electrolytic grounding cells), grounding grids, or grounds directly connected to the structure may pick up stray direct current. This current could possibly discharge directly to earth from the structure at other locations resulting in corrosion of the structure at those points. Also, direct current pickup by the structure could result in DC discharge to earth through the galvanic anodes and/or grounding devices, resulting in increased consumption of the anode material or corrosion of grounding rods and an increase in their effective resistance to earth.

Section 4: Personnel Protection

4.1 Introduction

4.1.1 The purpose of this section is to recommend practices that will contribute to the safety of persons who, during construction, system operation, corrosion survey, or cathodic protection maintenance of metallic structures, may be exposed to the hazards of AC potentials on those structures. The possibility of hazards to personnel during construction and system operation, due to contact with metallic structures exposed to AC electrical and/or lightning effects, should be recognized and provisions made to alleviate such hazards. The severity of the personnel hazard is usually proportional to the magnitude of the potential difference between the structure and the earth or between separate structures. The severity also depends on the duration of the exposure. Before construction work is started, coordination with the appropriate utilities in the area should be made so that proper work procedures are established and the construction will not damage or interfere with other utilities' equipment or operations.⁽¹⁾

4.1.2 Each utility should be aware of the others' facilities and cooperate in the mitigation of the electrical effects of one installation on the other. The mitigation required for a specific situation should be based on safety considerations with good engineering judgment used to balance cost against benefits.

4.1.3 Separation of facilities is generally effective in reducing the electrical effects of one installation on another.

4.2 Recognition of Shock Hazards to Personnel

4.2.1 AC potentials on structures should be reduced to and maintained at safe levels to prevent shock hazards to personnel. The degree of shock hazard and the threshold levels of current that can be tolerated by human beings depend on many factors. The possibility of shock from lower voltages is the most difficult to assess. The degree of shock hazard depends on factors such as the voltage level and duration of human exposure, human body and skin conditions, and the path and magnitude of any current conducted by the human body. The magnitude of current conducted by the human body is a function of the internal impedance of the voltage source and of the voltage impressed across the human body and the electrical resistance of the body path. This resistance also depends on the contact resistance (i.e., wet or dry skin, standing on dry land or in water) and on the current path through the body (i.e., hand-to-foot, hand-to-hand, etc.).

4.2.1.1 The safe limits should be determined by qualified personnel based on anticipated exposure conditions. For the purpose of this recommended practice, 30 volts AC (RMS) open circuit or a source current capacity of 5 mA or more, through 1500 ohms, will be considered to constitute an anticipated shock hazard. Tables 2 and 3 indicate the probable human resistance to electrical current and current values affecting human beings.

4.2.1.2 The beginning sensation of shock, which may occur at 1 to 8 mA, may not be painful or harmful to a human being but may lead to an accident by causing rapid involuntary movement of a person.

4.2.2 In areas of AC influence, a 15 volt (RMS) or greater voltage level measured between a structure and ground (or some other adjacent structure) should be considered an indication that further study is required.

⁽¹⁾In some cases, the electric utility can shut down the electrical transmission facility or block the reclosing features. The utility may designate a coordinator while the project is in progress. These possibilities should be explored with the electric utility.

TABLE 2 — Human Resistance to Electrical Current⁽¹⁾

Dry skin	1,000,000 to 5,000,000 ohms
Wet skin	1,000 ohms
Standing or lying in water	150 ohms
Internal body—hand to foot	400 to 500 ohms
Internal body—ear to ear	(About) 100 ohms

⁽¹⁾Accident Prevention Manual For Industrial Operations—National Safety Council and Frank A. Jenkins, "Hazards of Low Voltage Electricity" U.S. Department of Labor Pamphlet MP-8-C, (June, 1962).

4.2.3 Where the voltage level on a structure presents a shock hazard, the voltage level should be reduced to safe levels by taking remedial measures. In those cases where the voltage level cannot be reduced to a safe level, other safety measures shall be practiced to prevent shock to operating and maintenance personnel and to the public.

4.3 Construction

4.3.1 Severe hazards may exist during construction of facilities adjacent to AC power systems. A responsible person shall be in charge of electrical safety. This person shall be fully aware of proper grounding procedures and of the dangers associated with inductive and capacitive couplings, fault current, lightning, etc., on both above and below ground structures. He should also know the hazards of the construction equipment being used as related to the "limit-of-the-approach" regulations governing them.⁴ He should be furnished with the instrumentation, equipment, and authority required to implement and maintain safe working conditions.

4.3.2 The potential difference between a structure and the earth can be substantially reduced by appropriate grounding procedures. The potential difference between structures can be reduced by appropriate bonding procedures. The potential difference between separate points in the earth can be reduced through the use of appropriate grounding grids. The grounding or bonding procedure for safe construction activities depends upon the type, magnitude, and duration of the AC exposure. Each situation should be analyzed by a competent person, and safe operating procedures should be employed during the entire construction operation.

4.3.3 During the construction of metallic structures in areas of AC influence, the following minimum protective requirements are prescribed:

- (a) On long metallic structures paralleling AC power systems, temporary electrical grounds shall be used at intervals not greater than 300 m (1000 feet), with the first ground installed at the beginning of the section. Under certain conditions, a ground may be required on individual structure joints or sections before handling.
- (b) All temporary grounding connections shall be left in place until immediately prior to backfilling. Sufficient temporary grounds shall be maintained on each portion of the structure until adequate permanent grounding connections have been made.

4.3.4 Temporary grounding connections may be made to ground rods, bare pipe casing, or other appropriate grounds. These temporary grounding facilities are intended to reduce AC potentials. Direct connections made to the electrical utility's

**TABLE 3 — 60 Hz Alternating Current Values
Affecting Human Beings⁽¹⁾**

The following table shows the effect of various currents on the human body:

Current	Effects
1 mA or less	No sensation—Not felt
1 to 8 mA	Sensation of shock—Not painful; individual can let go at will; muscular control not lost.
8 to 15 mA	Painful shock—Individual can let go at will; muscular control not lost.
15 to 20 mA	Painful shock—Muscular control lost; cannot let go.
20 to 50 mA	Painful shock—Severe muscular contractions; breathing difficult.
50 to 100 mA (possible)	Ventricular fibrillation—Death will result if prompt cardiac massage not administered.
100 to 200 mA (certain)	Defibrillator shock must be applied to restore normal heart-beat. Breathing probably stopped.
200 mA and over	Severe burns—Severe muscular contractions; chest muscles clamp heart and stop it during shock (ventricular fibrillation is prevented). Breathing stopped—heart may start following shock, or cardiac massage may be required.

⁽¹⁾Accident Prevention Manual For Industrial Operations—National Safety Council. W. B. Kouwenhoven, Ph.D., "Treatment of Electric Shock" In *Low Voltage Shock Hazards*, The Johns Hopkins University, (June, 1962).

grounding system during construction could increase the probability of a hazard during switching surges, lightning strikes, or fault conditions and may intensify normal steady state effects if the grounding system is carrying AC.

4.3.5 Cables used for bonding or for connections to grounding facilities should have good mechanical strength as well as adequate conductivity. As a minimum, copper conductor, #2 American Wire Gage (AWG) stranded welding cable or equivalent, is recommended. Refer to Table 1 and Figures 1-3 for cable sizes adequate to conduct the anticipated fault current safely.

4.3.6 Temporary cable connections to the affected structure and to the grounding facilities shall be securely made with clamps that apply firm pressure and have a current carrying capacity equal to or greater than that of the grounding conductor. Clamps shall be installed so that they cannot be accidentally dislodged.

4.3.7 All permanent cable connections shall be thoroughly checked to ensure that they are mechanically and electrically sound and properly coated prior to back filling.

4.3.8 The grounding cable shall first be attached to the grounding facilities and then securely attached to the affected structure. Removal shall be in reverse order. THE END CONNECTED TO THE GROUND SHALL BE REMOVED LAST. NOTE: In those instances where high power levels are anticipated in the bonding cable, the following procedure is recommended to prevent "all burns" on this pipe.

1. The pipe grounding clamp shall be connected to the pipeline.
2. The grounding cable shall be connected to the grounding facility.

4.3.9 All grounding attachments and removals will be made by or under the supervision of the person in charge of electrical safety.

4.3.10 If hazardous potentials are measured across an insulating joint or flange, both sides of the joint or flange should be grounded and/or bonded across. If required, a permanent bond shall be made before the temporary bond is removed.

4.3.11 Before the temporary grounding facilities are removed, provisions must be made to control permanently the effects of AC potentials on the affected structure. These provisions will depend on the type of cathodic protection, the type of structure, and the anticipated magnitude of AC potentials.

4.3.12 Vehicles and other construction equipment are subject to existing electrical safety regulations where operated in the vicinity of high voltage AC lines.⁴

4.3.12.1 Metallic construction sheds or trailers, fences, or other temporary structures shall be grounded if subject to AC influence.

4.3.13 The person in charge of electrical safety should communicate at least daily with the utility controlling the involved power lines to ascertain any switching which might be expected during each work period. He may request that reclosing procedures be suspended during construction hours, and may explore the possibility of taking the power line out of service. He should also keep informed of any electrical storm activity that might affect safety on the work site. He should order a discontinuation of construction during local electrical storms.

4.3.14 The use of electrically insulating materials for above ground appurtenances such as vent pipes, conduits, and test boxes may reduce shock hazards in specific instances.

RP0177-83

4.4 Operations and Maintenance

4.4.1 Maintenance of structures and cathodic protection facilities under conditions that include AC potentials may require special precautions. Warning signs should be used as a minimum precaution. All maintenance should be performed by or under the supervision of a person familiar with the possible hazards involved. Maintenance personnel should be informed of these hazards and of the safety procedures to follow.

4.4.2 Testing of devices intended to limit AC potentials should be in accordance with manufacturer's recommendations and performed under the supervision of a person familiar with the possible hazards involved. Before connections are made or broken, tests should be conducted to determine that the combustible vapor level is within safe limits in those areas where the presence of these vapors is suspected. No more than one device intended to limit the AC potential should be disconnected at any one time. When a single protective device is to be installed, a temporary shunt bond, with or without another decoupling device, must be established prior to removing the unit for service.

4.4.3 Testing of cathodic protection systems under the influence of AC potentials should be performed by or under the supervision of a qualified person. In all cases, tests to detect AC potentials should be performed first, and the structure shall be treated as a live electrical conductor until proven otherwise. Cathodic protection records should include the results of these tests.

4.4.4 Test stations for cathodic protection systems on structures that may at times be subject to AC potentials should have dead front construction to reduce the possibility of contacting energized test leads. Test stations employing metallic pipes for support should be of dead front construction.

4.4.5 Safe work practices must include attaching all test leads to the instrument(s) first and then to the structure to be tested. Leads should be removed from the structure first and from the instrument(s) last.

4.4.6 When structures subject to AC influence are exposed for the purpose of cutting, tapping, or separating, tests shall be made to determine AC potentials or current to ground. In the event that potentials or currents greater than those permitted by Section 4.2 are found, appropriate remedial measures shall be taken to reduce the AC effects to a safe level. In the event this cannot be achieved, the structure shall be regarded as a live electrical conductor and treated accordingly. Solid bonding across the point to be cut or the section to be removed shall be established prior to separation, using as a minimum the cable and clamps outlined in Paragraphs 4.3.5 and 4.3.6.

4.4.7 On facilities carrying combustible liquids or gases, safe operating procedures require that bonding across the sections to be separated precede structure separation, regardless of the presence of AC.

Section 5: AC and Corrosion Control Considerations

5.1 Introduction

5.1.1 The purpose of this section is to recommend practices for determining the level of AC influence and lightning effects to which an existing metallic structure may be subjected. This section also outlines several points for consideration regarding the effects these potentials may have on corrosion control systems and associated equipment.

5.2 Determination of AC Influence and Lightning Effects

5.2.1 A cathodic protection system design should include an evaluation to estimate the level of AC potentials and currents under normal conditions, fault conditions, and lightning surges. Since significant AC potentials may be encountered during field surveys, all personnel shall follow proper electrical safety procedures and treat the structure as a live electrical conductor until proven otherwise.

5.2.2 Tests and investigations to estimate the extent of AC influence should include the following:

- (a) Meeting with electric utility personnel to determine peak load conditions and maximum fault currents and to discuss test procedures to be used in the survey.
- (b) Electrical measurement of induced AC potentials between the affected structure and ground.
- (c) Electrical measurement of induced AC current on the structure.
- (d) Calculations of the potentials and currents to which the structure may be subjected under normal and fault conditions.⁵

5.2.3 A survey should be conducted over those portions of the affected structure where AC exposure has been noted or is suspected. The location and time that each measurement was taken should be recorded.

5.2.3.1 The potential survey should be conducted using a suitable AC voltmeter of proper range. Contact resistance of connections should be sufficiently low to preclude measurement errors due to the relationship between external circuit impedance and meter impedance. Suitable references for measurements are:

- (a) A metal rod.⁽²⁾
- (b) Bare pipeline casings, if adequately insulated from the carrier pipe.
- (c) Tower legs or power system neutrals, if in close proximity to the affected structure. (Meter connections made to tower legs or power system neutrals may present a hazard during switching surges, lightning strikes, or fault conditions.)

5.2.3.2 The presence of AC on a structure may be determined using a suitable AC voltmeter to measure IR drop at the line current test stations. This method, however, will give only an indication of current flow, and cannot be readily converted to amperes because of the AC impedance characteristics of ferromagnetic materials. A clamp-on AC ammeter may be used to measure current in temporary or permanent bond connections.

5.2.3.3 Indications of AC power levels on affected structures may be obtained by temporarily bonding the structure to an adequate ground and measuring the resulting current flow with a clamp-on AC ammeter while measuring the AC potential. Suitable temporary grounds may be obtained by bonding to tower legs, power system

⁽²⁾Following meter hookup, the reference rod should be inserted deeper into the earth until no further potential increase is noted. This will reduce the possibility of high resistance contact errors in the measurement.

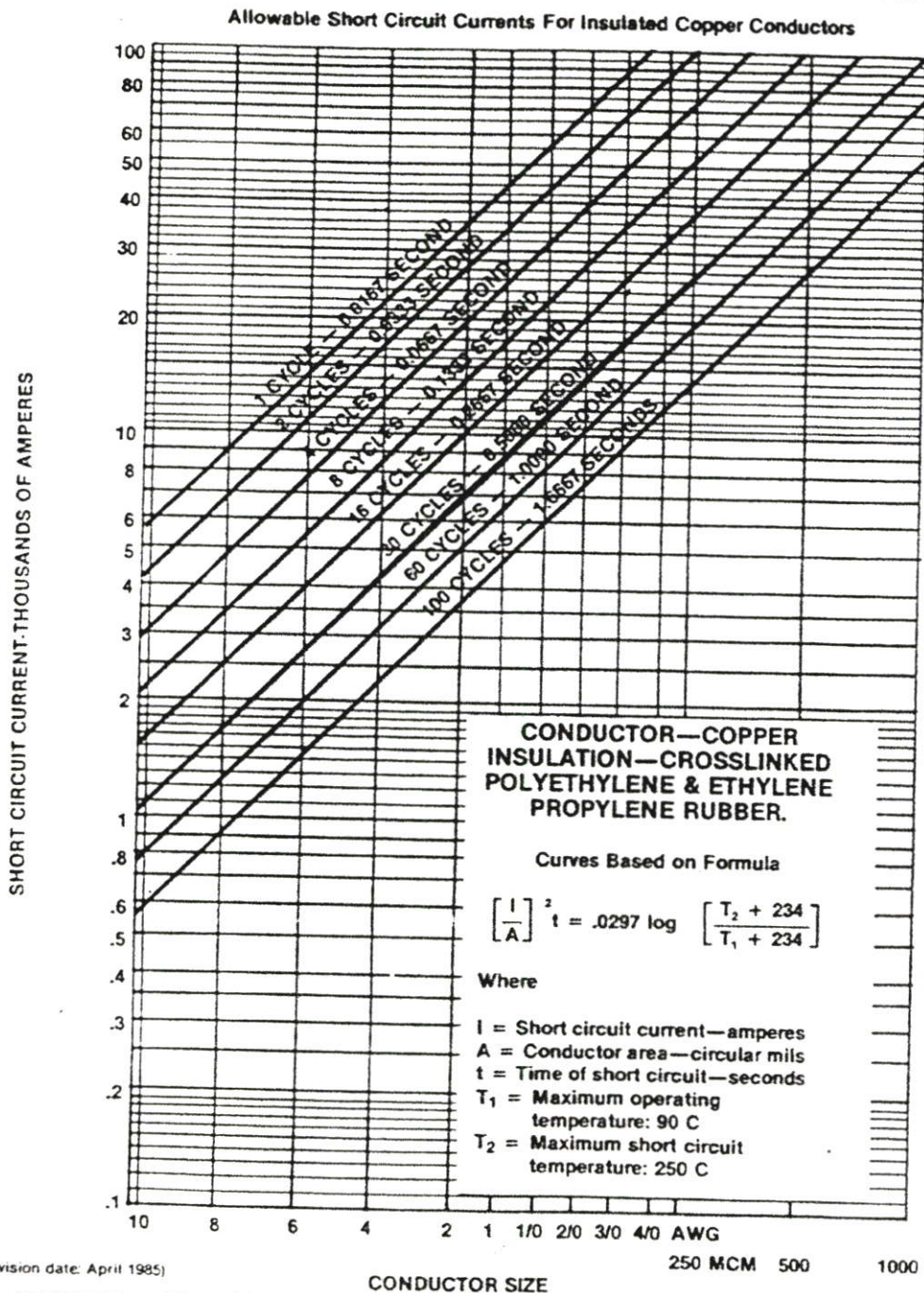


FIGURE 3 — Allowable short circuit currents for insulated copper conductors.

Reprinted with permission from Insulated Cable Engineers Association (ICEA). Publication P-32-382, copyright 1969.

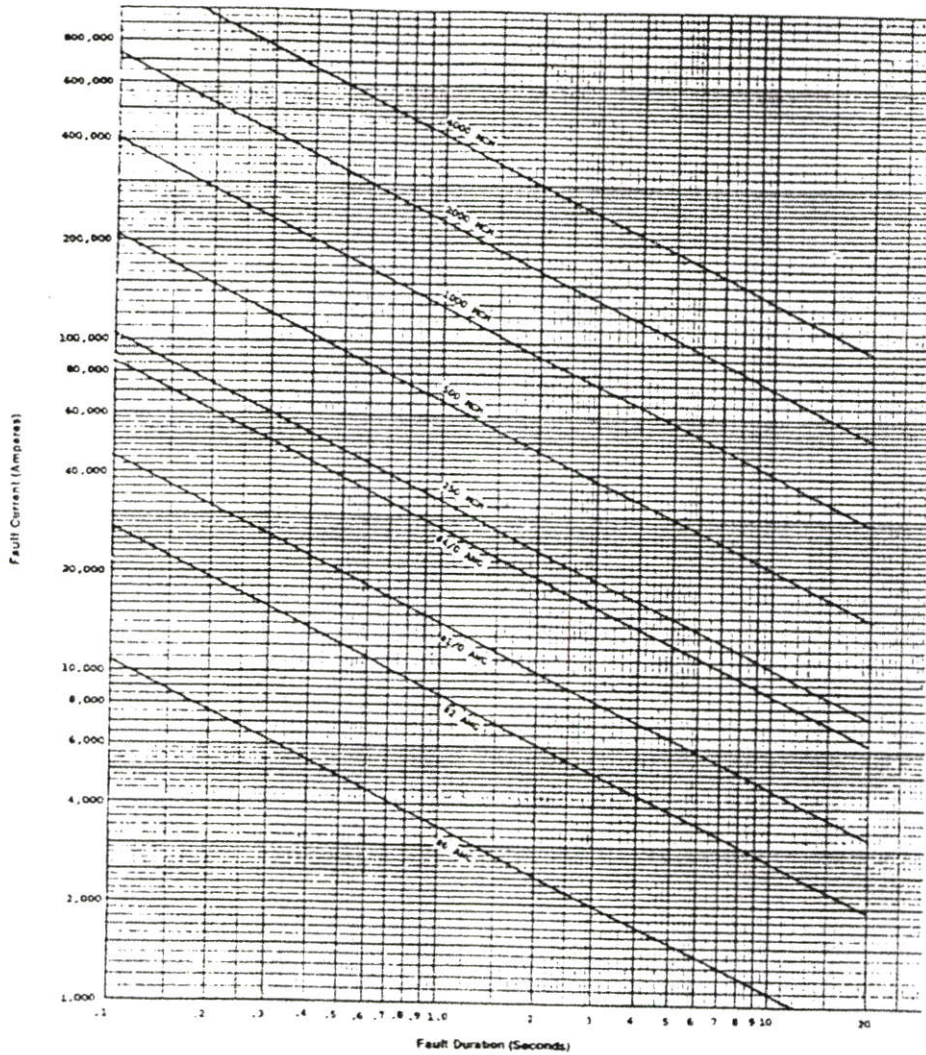


FIGURE 1 — Approximate current required to raise the temperature of stranded annealed soft drawn copper cable 1232 F (685 C) above an ambient temperature of 68 F (20 C).

Figure is based on the assumption that no heat is radiated or conducted from the cable to the surrounding media during a fault period. Electrical energy released in cable equals the heat energy absorbed by the cable:

$$I^2 RT = 1055 Q \text{ (watt seconds = BTU)}$$

where I = fault current in amperes, R = average AC resistance of conductor over temperature range T_1 to T_2 , T = fault duration in seconds, and Q = heat energy in British Thermal Units.

$$Q = CM(T_1 - T_2) \text{ (Thermodynamics)}$$

where C = average specific heat of annealed soft drawn copper over the temperature range T_1 to T_2 , M = mass of copper in pounds, T_1 and T_2 = initial and final temperatures in degrees Fahrenheit, $c = 0.104$, $T_1 = 68$ F, and $T_2 = 1300$ F.

Conductor	Average 60 Hz Impedance Ohms/1000 Feet
#6 AWG	0.923
#2 AWG	0.366
#1/0 AWG	0.2295
#4/0 AWG	0.1097
250 MCM	0.0968
500 MCM	0.0492
1000 MCM	0.0259
2000 MCM	0.0151
4000 MCM	0.00972

Note: Fusing current is 10% higher than current for 1232 F (685 C) temperature rise.

neutral, bare pipeline casings, or across an insulating joint to a well grounded system. DC drainage bonds existing on the structure under investigation should also be checked for AC power vessels.

5.2.3.4 Locations indicating maximum AC potential and current flow values during the survey discussed in Paragraphs 5.2.3 through 5.2.3.2 should be surveyed with recording instruments for a period of 24 hours or until the variation with power line load levels has been established.⁽¹⁾

5.2.4 In designing mitigative measures, the following power system parameters should be determined:

- (a) Maximum operating and emergency load conditions.
- (b) Maximum single line-to-ground fault current and duration.
- (c) Maximum phase-to-phase fault current and duration.
- (d) Type of grounding system used.

5.3 Special Considerations in Cathodic Protection Design

5.3.1 AC influence on the affected structure and its associated cathodic protection system should be considered.

5.3.2 Cathodic protection survey instruments should have sufficient AC rejection to provide accurate DC data.

⁽¹⁾Survey data, gathered in accordance with Paragraphs 5.2.3 through 5.2.3.4, should be reviewed with electric utility personnel for the purpose of correlating with the power line operating conditions at the time of the survey.

5.3.3 The AC current in the structure to be protected may flow to ground through cathodic protection equipment. Current flowing in the cathodic protection circuits under normal AC power system operating conditions may cause sufficient heating to damage or destroy the equipment. Heating may be significantly reduced by the use of properly designed series inductive reactances and/or shunt capacitive reactances in the cathodic protection circuits.

5.3.3.1 Rectifiers should be equipped with lightning and surge protection at the AC input and DC output connections.

5.3.3.2 Resistance bonds for the purpose of DC interference mitigation should be designed for the maximum normal AC and DC flow in order to prevent damage to the bond. Installation of polarization cells or other devices in parallel with DC resistance bonds may prevent damage to bonds. Installation of semiconductors in DC interference bonds between cathodically protected structures may result in undesirable rectification.

5.3.3.3 When bonds to other structures or grounds are used, polarization cells or grounding cells should be used, as required, in order to maintain effective levels of cathodic protection.

5.3.3.4 Semiconductor drain switches for the mitigation of stray DC from traction systems should be provided with surge current protection devices.

5.3.4 In DC stray current areas, the grounding methods should be chosen to avoid creating interference problems.

Section 6: Special Considerations in Operation and Maintenance of Cathodic Protection and Safety Systems

6.1 Introduction

6.1.1 The purpose of this section is to outline safe maintenance and testing procedures for cathodic protection systems on structures subject to AC influence.

6.2 Safety Measures for Operation and Maintenance of Cathodic Protection Systems

6.2.1 Cathodic protection rectifiers which are subject to damage by adjacent electric utility systems should be checked for proper operation at more frequent intervals than rectifiers not subject to electric system influence.

6.2.2 Cathodic protection testing or work of similar nature should not be performed on a structure subject to influence by an adjacent electric utility system during a period of thunderstorm activity in the area.

6.2.3 Where repeated rectifier outages can be attributed to adjacent electric utility system influences, positive measures must be taken to maintain continuous rectifier operation. One or more of the following mitigative measures may be employed:

- (a) Self-healing type lightning arresters across the AC input and DC output terminals.
- (b) Heavy-duty choke coils installed in the AC and/or DC leads.

6.2.4 If galvanic anodes are used for cathodic protection in an area of AC influence, and if test stations are available, the

following tests should be conducted during each structure survey using suitable instrumentation:

- (a) Measure and record both the AC and DC currents from the anodes.
- (b) Measure and record both the AC and DC structure-to-soil potentials.

6.2.5 At all aboveground pipeline metallic appurtenances, devices used to keep the general public or livestock from coming into direct contact with the structure shall be examined for effectiveness. If the devices are found to be ineffective, they shall be replaced or repaired immediately.

6.2.6 In making test connections for electrical measurements, all test leads, clips, and terminals should be properly insulated. Always connect leads to the test instruments before making connections to the structure. When each test is completed, remove the connections from the structure before removing the lead connection from the instrument. All test connections should be made on a step-by-step basis, using a one-hand testing technique.

6.2.7 When long test leads are laid out near a power line, significant potentials may be induced in these leads. The hazards associated with this situation may be reduced by using the following procedures:

- (a) Properly insulate all test lead clips, terminals, and wires.
- (b) Avoid direct contact with bare test lead terminals.
- (c) Place the reference electrodes in position for measurement prior to making any test connections.

RP0177-83

- (d) Connect the lead to the reference electrode and reel the wire back to the test location.
- (e) Connect the other test lead to the instrument and then to the structure.
- (f) Connect the reference electrode lead to the instrument.
- (g) When the tests are complete, disconnect in reverse order.

6.2.8 No tool, instrument, or other implement shall be handled at any time between a person standing over a ground mat or grounding grid and a person who is not over the mat or grid.

6.2.9 Grounding facilities for the purpose of mitigating AC effects should be carefully tested at regular intervals to ascertain the integrity of the grounding system.

6.2.9.1 No disconnection or reconnection shall be allowed when a flammable or explosive atmosphere is suspected without first testing to ensure a safe atmosphere.

6.2.9.2 No one shall make contact with the structure, either directly or through a test wire, while a grounding grid is disconnected for test purposes.

6.2.9.3 Measurement of resistance-to-earth of disconnected grounds shall be made promptly to minimize personnel hazards.

6.2.10 All interference mitigation devices and test equipment should be maintained in accordance with the manufacturer's instructions.

References

1. IEEE Guide for Safety in Substation Grounding (IEEE Std. 80-1976), 1976. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE), New York, NY.
2. National Electrical Code, NFPA 70, 1981 Edition, National Fire Protection Association (NFPA), Quincy, MA. Also available from American National Standards Institute (ANSI), New York, NY.
3. National Electrical Safety Code, ANSI C2-81, 1981.
4. Construction, Safety, and Health Regulations, OSHA 2207, Part 1926, 1974, Occupational Safety and Health Administration (OSHA), Washington, DC.
5. Mutual Design Considerations for Overhead AC Transmission Lines and Gas Transmission Pipelines, Volume 1: Engineering Analysis, and Volume 2: Prediction and Mitigation Procedures, AGA Catalog No. L51278, American Gas Association (AGA), Arlington, VA; published in conjunction with The Electric Power Research Institute (EPRI), 1978.

Additional Resources

1. Inductive Interference Engineering Guide, March 1974, Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, NJ (Available through local Bell System Inductive Coordinator).
2. Recommended Practice OCC-77-3 for the Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects in Metallic Structures and Corrosion Control Facilities, 1977. Canadian Gas Association, Don Mills, Ontario, Canada.
3. The Effects of Electrical Shock on Man, C. F. Dalziel, 1956, Transactions on Medical Electronics (PGME-5), Institute of Radio Engineers (IRE), now available from IEEE.
4. Westinghouse Transmission and Distribution Handbook, 1950, Westinghouse Electric Corp., Relay-Instrument Div., Newark, NJ.
5. Short Circuit Characteristics of Insulated Cable, Publication P-32-382, revised 1969, reprinted 1973 and 1980, Insulate Cable Engineers Association, Inc. (ICEA), South Yarmouth, MA.

ภาคผนวก ก.

อุปกรณ์ DC Isolation/AC Coupling

Introduction to DC Isolation/AC Coupling Device

Use Of Decouplers For AC Voltage Mitigation

Introduction

AC voltage mitigation is primarily of concern when cathodically protected pipelines are adjacent to electric power distribution or transmission lines. If the voltage on the pipeline exceeds 15 volts, mitigation may be warranted (NACE Standard RP0177-95, Section 5.2.1).

The general technique for mitigating induced AC voltage is to connect the pipeline to a suitable grounding system so as to load the induced voltage source, thereby causing the voltage to collapse to an insignificant value. This must be accomplished without affecting cathodic protection (CP) levels. One method is to utilize anodic type materials for the grounding system, such as zinc, because one can bond directly to zinc without significant affect on CP levels. Another method is to bond to a grounding system through a decoupler, thereby enabling other materials to be used for the grounding system because the grounding system is DC isolated from the pipeline. There are a number of distinct advantages to using solid-state decouplers in the design of an AC mitigation system as described in the DEI article "Induced AC Voltage On Pipelines: Mitigation Considerations Using Solid-State DC Isolation/AC Coupling Devices." It is suggested that this article be read in conjunction with this application note because it mentions other necessary considerations when designing an AC mitigation system.

Product Description

The product primarily used for AC mitigation is the DEI solid-state Polarization Cell Replacement because it has the ability to provide AC grounding and DC decoupling simultaneously under normal operating conditions. On rare occasions, the higher rated Isolator/Surge Protector (ISP) is required. The designer of the grounding system for AC mitigation (a task generally referred to consultants who have the necessary software and knowledge in designing such systems) has control over the product ratings that will be required. When decouplers are incorporated into the overall design, the following ratings must be determined in order to select the appropriate product model number, namely, the steady-state AC current rating and the AC fault current rating. This information should be available from the mitigation system designer.

In those cases where a user chooses to do their own AC mitigation design without the appropriate software, DEI can provide general guidelines for selecting product ratings upon request.

The Polarization Cell Replacement is available in two versions. PCR models are listed for either ordinary or Class I, Division 2 hazardous locations, and PCRH models are listed for Class I, Division 1 hazardous locations. For most applications, the PCR model should be acceptable.

Product Ratings

The following table shows the standard PCR, PCRH, and ISP product ratings available.

Standard Product Ratings [1]

Description	ISP	PCR	PCRH	OVP
DC Blocking Voltage, Volts	-/+ 12.5 -/+ 20	-3 / +1 -2 / +2	-3 / +1 -2 / +2	-3 / +1 -2 / +2
60 Hz AC-RMS Steady-State Current, Amperes	30, 60, 90	45, 80	45	0[2]
50 Hz AC-RMS Steady-State Current, Amperes	25, 50, 75	40, 70	40	0[2]
60 Hz AC-RMS Fault Current @ 30 cycles, kA	3.7, 11, 14, 30	3.7, 10, 15	3.7, 10, 15	3.7
50 Hz AC-RMS Fault Current @ 30 cycles, kA	3.6, 10, 13, 28	3.5, 9, 14	3.5, 9, 14	3.5
Lightning Current, kA (8 x 20 μ s waveform)	50, 75, 100	100	100	100

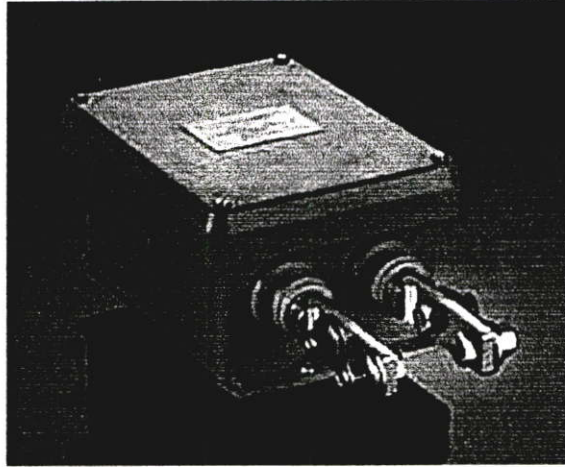
[1] Other options are available. Contact DEI if other ratings are required.

[2] Not recommended where induced AC voltage is present, or likely to be present in the future.

Product Options

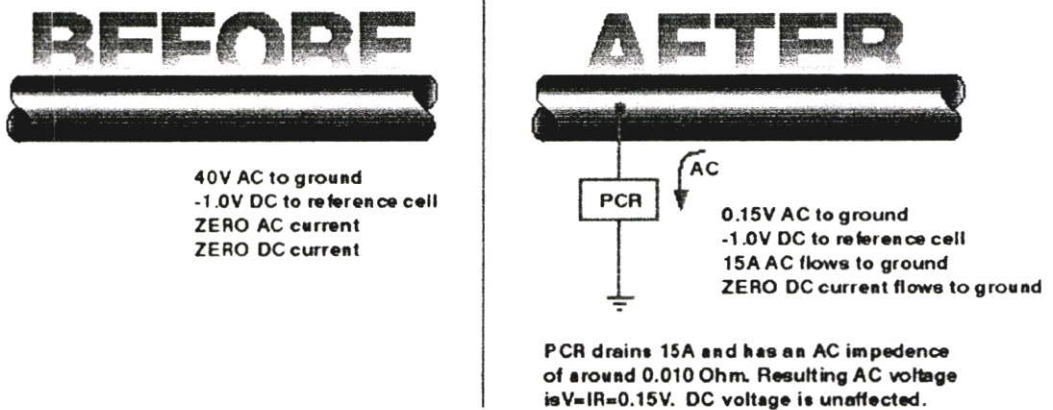
When decouplers are used in AC mitigation applications, they are normally connected in one of the following ways: (1) from the pipeline to bare gradient control wires comprised of zinc, copper, or other materials, (2) from the pipeline to an isolated ground bed (such as a gradient control mat used at above ground appurtenances), or (3) across an insulated flange, one side of which is grounded. On occasion, decouplers are also connected between the pipeline and an adjacent electric transmission tower ground. This is a practice that DEI does not recommend for reasons described in the referenced article. The PCR/PCRH catalog section in the DEI catalog describes product installation and mounting options for typical installations.

DC Isolation/AC Coupling Device



รูปที่ ผ.6.1 ตัวอย่างอุปกรณ์ DC Isolation/AC Coupling Device

การติดตั้งอุปกรณ์ DC Isolation/AC Coupling Device



รูปที่ ผ.6.2 ลักษณะการติดตั้ง DC Isolation/AC Coupling Device

ภาคผนวก ง.
การลดทอนค่า LEF

ตารางที่ ผ.6.1 เปอร์เซ็นการลดทอนค่า LEF กรณีโครงสร้างเสาส่งมีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง
2 วงจร โดยการจัดลำดับเฟส

ระยะทาง (m)	ค่า LEF x 10 ³ (V/km)/A		การลดทอนค่า LEF เมื่อทำการจัดวางตัวนำ กรณีที่ 2 เทียบกับ
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 1
-35	16.990	14.948	12%
-34	17.407	15.329	12%
-33	17.832	15.717	12%
-32	18.264	16.113	12%
-31	18.703	16.516	12%
-30	19.148	16.925	12%
-29	19.599	17.340	12%
-28	20.055	17.759	11%
-27	20.515	18.183	11%
-26	20.977	18.610	11%
-25	21.442	19.040	11%
-24	21.907	19.470	11%
-23	22.372	19.901	11%
-22	22.835	20.330	11%
-21	23.294	20.756	11%
-20	23.748	21.178	11%
-19	24.196	21.594	11%
-18	24.635	22.002	11%
-17	25.064	22.402	11%
-16	25.481	22.790	11%
-15	25.884	23.165	11%
-14	26.271	23.526	10%
-13	26.641	23.870	10%
-12	26.991	24.196	10%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่า LEF x10 ⁻³ (V/km)/A		การลดทอนค่า LEF เมื่อทำการจัดวางตัว นำค้ำกรณีที่ 2 เทียบกับ
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 1
-11	27.320	24.503	10%
-10	27.626	24.788	10%
-9	27.908	25.051	10%
-8	28.164	25.289	10%
-7	28.393	25.503	10%
-6	28.594	25.690	10%
-5	28.766	25.849	10%
-4	28.907	25.981	10%
-3	29.018	26.084	10%
-2	29.098	26.158	10%
-1	29.146	26.203	10%
0	29.162	26.218	10%
1	29.146	26.203	10%
2	29.098	26.158	10%
3	29.018	26.084	10%
4	28.907	25.981	10%
5	28.766	25.849	10%
6	28.594	25.690	10%
7	28.393	25.503	10%
8	28.164	25.289	10%
9	27.908	25.051	10%
10	27.626	24.788	10%
11	27.320	24.503	10%
12	26.991	24.196	10%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่า LEF $\times 10^3$ (V/km)/A		การลดทอนค่า LEF เมื่อทำการจัดวางตัว นำคังกรณีสี่ที่ 2 เทียบกับ
	กรณีสี่ที่ 1	กรณีสี่ที่ 2	กรณีสี่ที่ 1
13	26.641	23.870	10%
14	26.271	23.526	10%
15	25.884	23.165	11%
16	25.481	22.790	11%
17	25.064	22.402	11%
18	24.635	22.002	11%
19	24.196	21.594	11%
20	23.748	21.178	11%
21	23.294	20.756	11%
22	22.835	20.330	11%
23	22.372	19.901	11%
24	21.907	19.470	11%
25	21.442	19.040	11%
26	20.977	18.610	11%
27	20.515	18.183	11%
28	20.055	17.759	11%
29	19.599	17.340	12%
30	19.148	16.925	12%
31	18.703	16.516	12%
32	18.264	16.113	12%
33	17.832	15.717	12%
34	17.407	15.329	12%
35	16.990	14.948	12%
เฉลี่ย			11%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่าLEF $\times 10^{-3}$ (V/km)/A			การลดทอนค่าLEFเมื่อทำการจัดวางตัวนำตั้ง กรณีที่ 3 เทียบกับ	
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
-35	16.990	14.948	14.829	13%	1%
-34	17.407	15.329	15.171	13%	1%
-33	17.832	15.717	15.519	13%	1%
-32	18.264	16.113	15.871	13%	2%
-31	18.703	16.516	16.227	13%	2%
-30	19.148	16.925	16.587	13%	2%
-29	19.599	17.340	16.950	14%	2%
-28	20.055	17.759	17.316	14%	2%
-27	20.515	18.183	17.682	14%	3%
-26	20.977	18.610	18.050	14%	3%
-25	21.442	19.040	18.417	14%	3%
-24	21.907	19.470	18.782	14%	4%
-23	22.372	19.901	19.146	14%	4%
-22	22.835	20.330	19.505	15%	4%
-21	23.294	20.756	19.860	15%	4%
-20	23.748	21.178	20.209	15%	5%
-19	24.196	21.594	20.551	15%	5%
-18	24.635	22.002	20.884	15%	5%
-17	25.064	22.402	21.207	15%	5%
-16	25.481	22.790	21.519	16%	6%
-15	25.884	23.165	21.819	16%	6%
-14	26.271	23.526	22.104	16%	6%
-13	26.641	23.870	22.375	16%	6%
-12	26.991	24.196	22.630	16%	6%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่า LEF x 10 ³ (V/km)/A			การลดทอนค่า LEF เมื่อทำการจัดวางค่านำตั้ง กรณีที่ 3 เทียบกับ	
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
13	26.641	23.870	22.375	16%	6%
14	26.271	23.526	22.104	16%	6%
15	25.884	23.165	21.819	16%	6%
16	25.481	22.790	21.519	16%	6%
17	25.064	22.402	21.207	15%	5%
18	24.635	22.002	20.884	15%	5%
19	24.196	21.594	20.551	15%	5%
20	23.748	21.178	20.209	15%	5%
21	23.294	20.756	19.860	15%	4%
22	22.835	20.330	19.505	15%	4%
23	22.372	19.901	19.146	14%	4%
24	21.907	19.470	18.782	14%	4%
25	21.442	19.040	18.417	14%	3%
26	20.977	18.610	18.050	14%	3%
27	20.515	18.183	17.682	14%	3%
28	20.055	17.759	17.316	14%	2%
29	19.599	17.340	16.950	14%	2%
30	19.148	16.925	16.587	13%	2%
31	18.703	16.516	16.227	13%	2%
32	18.264	16.113	15.871	13%	2%
33	17.832	15.717	15.519	13%	1%
34	17.407	15.329	15.171	13%	1%
35	16.990	14.948	14.829	13%	1%
เฉลี่ย				15%	5%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่าLEF $\times 10^3$ (V/km)/A			การลดทอนค่าLEFเมื่อทำการจัดวางตัวนำตั้ง กรณีที3เทียบกับ	
	กรณีที1	กรณีที2	กรณีที3	กรณีที1	กรณีที2
-11	27.320	24.503	22.868	16%	7%
-10	27.626	24.788	23.088	16%	7%
-9	27.908	25.051	23.289	17%	7%
-8	28.164	25.289	23.471	17%	7%
-7	28.393	25.503	23.632	17%	7%
-6	28.594	25.690	23.773	17%	7%
-5	28.766	25.849	23.893	17%	8%
-4	28.907	25.981	23.991	17%	8%
-3	29.018	26.084	24.068	17%	8%
-2	29.098	26.158	24.123	17%	8%
-1	29.146	26.203	24.156	17%	8%
0	29.162	26.218	24.167	17%	8%
1	29.146	26.203	24.156	17%	8%
2	29.098	26.158	24.123	17%	8%
3	29.018	26.084	24.068	17%	8%
4	28.907	25.981	23.991	17%	8%
5	28.766	25.849	23.893	17%	8%
6	28.594	25.690	23.773	17%	7%
7	28.393	25.503	23.632	17%	7%
8	28.164	25.289	23.471	17%	7%
9	27.908	25.051	23.289	17%	7%
10	27.626	24.788	23.088	16%	7%
11	27.320	24.503	22.868	16%	7%
12	26.991	24.196	22.630	16%	6%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่าLEF $\times 10^{-3}$ (VAm)/A				การลดทอนค่าLEFเมื่อทำการจัดวางตัว นำค้ำกรณีที4เทียบกับ		
	กรณีที1	กรณีที2	กรณีที3	กรณีที4	กรณีที1	กรณีที2	กรณีที3
-35	16.990	14.948	14.829	9.698	43%	35%	35%
-34	17.407	15.329	15.171	9.921	43%	35%	35%
-33	17.832	15.717	15.519	10.148	43%	35%	35%
-32	18.264	16.113	15.871	10.377	43%	36%	35%
-31	18.703	16.516	16.227	10.608	43%	36%	35%
-30	19.148	16.925	16.587	10.841	43%	36%	35%
-29	19.599	17.340	16.950	11.074	43%	36%	35%
-28	20.055	17.759	17.316	11.307	44%	36%	35%
-27	20.515	18.183	17.682	11.540	44%	37%	35%
-26	20.977	18.610	18.050	11.771	44%	37%	35%
-25	21.442	19.040	18.417	12.000	44%	37%	35%
-24	21.907	19.470	18.782	12.226	44%	37%	35%
-23	22.372	19.901	19.146	12.448	44%	37%	35%
-22	22.835	20.330	19.505	12.664	45%	38%	35%
-21	23.294	20.756	19.860	12.875	45%	38%	35%
-20	23.748	21.178	20.209	13.078	45%	38%	35%
-19	24.196	21.594	20.551	13.273	45%	39%	35%
-18	24.635	22.002	20.884	13.458	45%	39%	36%
-17	25.064	22.402	21.207	13.634	46%	39%	36%
-16	25.481	22.790	21.519	13.798	46%	39%	36%
-15	25.884	23.165	21.819	13.949	46%	40%	36%
-14	26.271	23.526	22.104	14.088	46%	40%	36%
-13	26.641	23.870	22.375	14.214	47%	40%	36%
-12	26.991	24.196	22.630	14.325	47%	41%	37%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่าLEF $\times 10^3$ (V/km)/A				การลดทอนค่าLEFเมื่อทำการจัดวางตัว นำคิ่งกรณีที4เทียบกับ		
	กรณีที่1	กรณีที่2	กรณีที่3	กรณีที่4	กรณีที่1	กรณีที่2	กรณีที่3
-11	27.320	24.503	22.868	14.421	47%	41%	37%
-10	27.626	24.788	23.088	14.503	48%	41%	37%
-9	27.908	25.051	23.289	14.571	48%	42%	37%
-8	28.164	25.289	23.471	14.623	48%	42%	38%
-7	28.393	25.503	23.632	14.662	48%	43%	38%
-6	28.594	25.690	23.773	14.687	49%	43%	38%
-5	28.766	25.849	23.893	14.698	49%	43%	38%
-4	28.907	25.981	23.991	14.697	49%	43%	39%
-3	29.018	26.084	24.068	14.684	49%	44%	39%
-2	29.098	26.158	24.123	14.660	50%	44%	39%
-1	29.146	26.203	24.156	14.625	50%	44%	39%
0	29.162	26.218	24.167	14.581	50%	44%	40%
1	29.146	26.203	24.156	14.527	50%	45%	40%
2	29.098	26.158	24.123	14.465	50%	45%	40%
3	29.018	26.084	24.068	14.395	50%	45%	40%
4	28.907	25.981	23.991	14.317	50%	45%	40%
5	28.766	25.849	23.893	14.231	51%	45%	40%
6	28.594	25.690	23.773	14.138	51%	45%	41%
7	28.393	25.503	23.632	14.037	51%	45%	41%
8	28.164	25.289	23.471	13.929	51%	45%	41%
9	27.908	25.051	23.289	13.814	51%	45%	41%
10	27.626	24.788	23.088	13.690	50%	45%	41%
11	27.320	24.503	22.868	13.560	50%	45%	41%
12	26.991	24.196	22.630	13.421	50%	45%	41%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่าLEF $\times 10^{-3}$ (V/km)/A				การลดทอนค่าLEFเมื่อทำการจี้ดวงตัว นำคั้งกรณีที่ 4 เทียบกับ		
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
13	26.641	23.870	22.375	13.275	50%	44%	41%
14	26.271	23.526	22.104	13.122	50%	44%	41%
15	25.884	23.165	21.819	12.962	50%	44%	41%
16	25.481	22.790	21.519	12.794	50%	44%	41%
17	25.064	22.402	21.207	12.620	50%	44%	40%
18	24.635	22.002	20.884	12.440	50%	43%	40%
19	24.196	21.594	20.551	12.255	49%	43%	40%
20	23.748	21.178	20.209	12.064	49%	43%	40%
21	23.294	20.756	19.860	11.869	49%	43%	40%
22	22.835	20.330	19.505	11.669	49%	43%	40%
23	22.372	19.901	19.146	11.467	49%	42%	40%
24	21.907	19.470	18.782	11.261	49%	42%	40%
25	21.442	19.040	18.417	11.054	48%	42%	40%
26	20.977	18.610	18.050	10.845	48%	42%	40%
27	20.515	18.183	17.682	10.635	48%	42%	40%
28	20.055	17.759	17.316	10.424	48%	41%	40%
29	19.599	17.340	16.950	10.214	48%	41%	40%
30	19.148	16.925	16.587	10.004	48%	41%	40%
31	18.703	16.516	16.227	9.796	48%	41%	40%
32	18.264	16.113	15.871	9.589	47%	40%	40%
33	17.832	15.717	15.519	9.384	47%	40%	40%
34	17.407	15.329	15.171	9.181	47%	40%	39%
35	16.990	14.948	14.829	8.981	47%	40%	39%
เฉลี่ย					48%	41%	38%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่า LEF $\times 10^{-3}$ (V/km)/A					การลดทอนค่า LEF เมื่อทำการจัด วางตัวนำดังกรณีที่ 5 เทียบกับ			
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
	1	2	3	4	5	1	2	3	4
-35	16.990	14.948	14.829	9.698	8.981	43%	35%	35%	7%
-34	17.407	15.329	15.171	9.921	9.181	43%	35%	35%	7%
-33	17.832	15.717	15.519	10.148	9.384	43%	35%	35%	8%
-32	18.264	16.113	15.871	10.377	9.589	43%	36%	35%	8%
-31	18.703	16.516	16.227	10.608	9.796	43%	36%	35%	8%
-30	19.148	16.925	16.587	10.841	10.004	43%	36%	35%	8%
-29	19.599	17.340	16.950	11.074	10.214	43%	36%	35%	8%
-28	20.055	17.759	17.316	11.307	10.424	44%	36%	35%	8%
-27	20.515	18.183	17.682	11.540	10.635	44%	37%	35%	8%
-26	20.977	18.610	18.050	11.771	10.845	44%	37%	35%	8%
-25	21.442	19.040	18.417	12.000	11.054	44%	37%	35%	8%
-24	21.907	19.470	18.782	12.226	11.261	44%	37%	35%	8%
-23	22.372	19.901	19.146	12.448	11.467	44%	37%	35%	8%
-22	22.835	20.330	19.505	12.664	11.669	45%	38%	35%	8%
-21	23.294	20.756	19.860	12.875	11.869	45%	38%	35%	8%
-20	23.748	21.178	20.209	13.078	12.064	45%	38%	35%	8%
-19	24.196	21.594	20.551	13.273	12.255	45%	39%	35%	8%
-18	24.635	22.002	20.884	13.458	12.440	45%	39%	36%	8%
-17	25.064	22.402	21.207	13.634	12.620	46%	39%	36%	7%
-16	25.481	22.790	21.519	13.798	12.794	46%	39%	36%	7%
-15	25.884	23.165	21.819	13.949	12.962	46%	40%	36%	7%
-14	26.271	23.526	22.104	14.088	13.122	46%	40%	36%	7%
-13	26.641	23.870	22.375	14.214	13.275	47%	40%	36%	7%
-12	26.991	24.196	22.630	14.325	13.421	47%	41%	37%	6%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่า LEF x10 ⁻³ (V/km)/A					การลดทอนค่า LEF เมื่อทำการจัด วางตัวนำค้ำกรณที่ 5 เทียบกับ			
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
-11	27.320	24.503	22.868	14.421	13.560	47%	41%	37%	6%
-10	27.626	24.788	23.088	14.503	13.690	48%	41%	37%	6%
-9	27.908	25.051	23.289	14.571	13.814	48%	42%	37%	5%
-8	28.164	25.289	23.471	14.623	13.929	48%	42%	38%	5%
-7	28.393	25.503	23.632	14.662	14.037	48%	43%	38%	4%
-6	28.594	25.690	23.773	14.687	14.138	49%	43%	38%	4%
-5	28.766	25.849	23.893	14.698	14.231	49%	43%	38%	3%
-4	28.907	25.981	23.991	14.697	14.317	49%	43%	39%	3%
-3	29.018	26.084	24.068	14.684	14.395	49%	44%	39%	2%
-2	29.098	26.158	24.123	14.660	14.465	50%	44%	39%	1%
-1	29.146	26.203	24.156	14.625	14.527	50%	44%	39%	1%
0	29.162	26.218	24.167	14.581	14.581	50%	44%	40%	0%
1	29.146	26.203	24.156	14.527	14.625	50%	45%	40%	-1%
2	29.098	26.158	24.123	14.465	14.660	50%	45%	40%	-1%
3	29.018	26.084	24.068	14.395	14.684	50%	45%	40%	-2%
4	28.907	25.981	23.991	14.317	14.697	50%	45%	40%	-3%
5	28.766	25.849	23.893	14.231	14.698	51%	45%	40%	-3%
6	28.594	25.690	23.773	14.138	14.687	51%	45%	41%	-4%
7	28.393	25.503	23.632	14.037	14.662	51%	45%	41%	-4%
8	28.164	25.289	23.471	13.929	14.623	51%	45%	41%	-5%
9	27.908	25.051	23.289	13.814	14.571	51%	45%	41%	-5%
10	27.626	24.788	23.088	13.690	14.503	50%	45%	41%	-6%
11	27.320	24.503	22.868	13.560	14.421	50%	45%	41%	-6%
12	26.991	24.196	22.630	13.421	14.325	50%	45%	41%	-7%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่า LEF x10 ³ (V/km)/A					การลดทอนค่า LEF เมื่อทำการจัด วางตัวนำดังกรณีที่ 5 เทียบกับ			
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4
13	26.641	23.870	22.375	13.275	14.214	50%	44%	41%	-7%
14	26.271	23.526	22.104	13.122	14.088	50%	44%	41%	-7%
15	25.884	23.165	21.819	12.962	13.949	50%	44%	41%	-8%
16	25.481	22.790	21.519	12.794	13.798	50%	44%	41%	-8%
17	25.064	22.402	21.207	12.620	13.634	50%	44%	40%	-8%
18	24.635	22.002	20.884	12.440	13.458	50%	43%	40%	-8%
19	24.196	21.594	20.551	12.255	13.273	49%	43%	40%	-8%
20	23.748	21.178	20.209	12.064	13.078	49%	43%	40%	-8%
21	23.294	20.756	19.860	11.869	12.875	49%	43%	40%	-8%
22	22.835	20.330	19.505	11.669	12.664	49%	43%	40%	-9%
23	22.372	19.901	19.146	11.467	12.448	49%	42%	40%	-9%
24	21.907	19.470	18.782	11.261	12.226	49%	42%	40%	-9%
25	21.442	19.040	18.417	11.054	12.000	48%	42%	40%	-9%
26	20.977	18.610	18.050	10.845	11.771	48%	42%	40%	-9%
27	20.515	18.183	17.682	10.635	11.540	48%	42%	40%	-9%
28	20.055	17.759	17.316	10.424	11.307	48%	41%	40%	-8%
29	19.599	17.340	16.950	10.214	11.074	48%	41%	40%	-8%
30	19.148	16.925	16.587	10.004	10.841	48%	41%	40%	-8%
31	18.703	16.516	16.227	9.796	10.608	48%	41%	40%	-8%
32	18.264	16.113	15.871	9.589	10.377	47%	40%	40%	-8%
33	17.832	15.717	15.519	9.384	10.148	47%	40%	40%	-8%
34	17.407	15.329	15.171	9.181	9.921	47%	40%	39%	-8%
35	16.990	14.948	14.829	8.981	9.698	47%	40%	39%	-8%
เฉลี่ย						48%	41%	38%	0%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่า LEF $\times 10^3$ (V/km)/A						การลดทอนค่า LEF เมื่อทำการจัดวาง				
							ความโค้งกรณีที 6 เทียบกับ				
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5
-35	16.990	14.948	14.829	9.698	8.981	4.476	74%	70%	70%	54%	50%
-34	17.407	15.329	15.171	9.921	9.181	4.539	74%	70%	70%	54%	51%
-33	17.832	15.717	15.519	10.148	9.384	4.600	74%	71%	70%	55%	51%
-32	18.264	16.113	15.871	10.377	9.589	4.658	74%	71%	71%	55%	51%
-31	18.703	16.516	16.227	10.608	9.796	4.712	75%	71%	71%	56%	52%
-30	19.148	16.925	16.587	10.841	10.004	4.762	75%	72%	71%	56%	52%
-29	19.599	17.340	16.950	11.074	10.214	4.808	75%	72%	72%	57%	53%
-28	20.055	17.759	17.316	11.307	10.424	4.848	76%	73%	72%	57%	53%
-27	20.515	18.183	17.682	11.540	10.635	4.881	76%	73%	72%	58%	54%
-26	20.977	18.610	18.050	11.771	10.845	4.907	77%	74%	73%	58%	55%
-25	21.442	19.040	18.417	12.000	11.054	4.925	77%	74%	73%	59%	55%
-24	21.907	19.470	18.782	12.226	11.261	4.934	77%	75%	74%	60%	56%
-23	22.372	19.901	19.146	12.448	11.467	4.934	78%	75%	74%	60%	57%
-22	22.835	20.330	19.505	12.664	11.669	4.922	78%	76%	75%	61%	58%
-21	23.294	20.756	19.860	12.875	11.869	4.899	79%	76%	75%	62%	59%
-20	23.748	21.178	20.209	13.078	12.064	4.862	80%	77%	76%	63%	60%
-19	24.196	21.594	20.551	13.273	12.255	4.813	80%	78%	77%	64%	61%
-18	24.635	22.002	20.884	13.458	12.440	4.748	81%	78%	77%	65%	62%
-17	25.064	22.402	21.207	13.634	12.620	4.669	81%	79%	78%	66%	63%
-16	25.481	22.790	21.519	13.798	12.794	4.574	82%	80%	79%	67%	64%
-15	25.884	23.165	21.819	13.949	12.962	4.463	83%	81%	80%	68%	66%
-14	26.271	23.526	22.104	14.088	13.122	4.335	83%	82%	80%	69%	67%
-13	26.641	23.870	22.375	14.214	13.275	4.192	84%	82%	81%	71%	68%
-12	26.991	24.196	22.630	14.325	13.421	4.033	85%	83%	82%	72%	70%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่า LEF $\times 10^{-3}$ (V/km)/A						การลดทอนค่า LEF เมื่อทำการจัดวาง ตัวนำคิ่งกรณีที 6 เทียบกับ				
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5	กรณีที่ 6	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3	กรณีที่ 4	กรณีที่ 5
-11	27.320	24.503	22.868	14.421	13.560	3.860	86%	84%	83%	73%	72%
-10	27.626	24.788	23.088	14.503	13.690	3.673	87%	85%	84%	75%	73%
-9	27.908	25.051	23.289	14.571	13.814	3.475	88%	86%	85%	76%	75%
-8	28.16	25.289	23.471	14.62	13.93	3.269	88%	87%	86%	78%	77%
-7	28.39	25.503	23.632	14.66	14.04	3.058	89%	88%	87%	79%	78%
-6	28.59	25.69	23.773	14.69	14.14	2.848	90%	89%	88%	81%	80%
-5	28.77	25.849	23.893	14.7	14.23	2.644	91%	90%	89%	82%	81%
-4	28.91	25.981	23.991	14.7	14.32	2.456	92%	91%	90%	83%	83%
-3	29.02	26.084	24.068	14.68	14.4	2.292	92%	91%	90%	84%	84%
-2	29.1	26.158	24.123	14.66	14.47	2.163	93%	92%	91%	85%	85%
-1	29.15	26.203	24.156	14.63	14.53	2.08	93%	92%	91%	86%	86%
0	29.16	26.218	24.167	14.58	14.58	2.051	93%	92%	92%	86%	86%
1	29.15	26.203	24.156	14.53	14.63	2.08	93%	92%	91%	86%	86%
2	29.1	26.158	24.123	14.47	14.66	2.163	93%	92%	91%	85%	85%
3	29.02	26.084	24.068	14.4	14.68	2.292	92%	91%	90%	84%	84%
4	28.91	25.981	23.991	14.32	14.7	2.456	92%	91%	90%	83%	83%
5	28.77	25.849	23.893	14.23	14.7	2.644	91%	90%	89%	81%	82%
6	28.59	25.69	23.773	14.14	14.69	2.848	90%	89%	88%	80%	81%
7	28.39	25.503	23.632	14.04	14.66	3.058	89%	88%	87%	78%	79%
8	28.16	25.289	23.471	13.93	14.62	3.269	88%	87%	86%	77%	78%
9	27.91	25.051	23.289	13.81	14.57	3.475	88%	86%	85%	75%	76%
10	27.63	24.788	23.088	13.69	14.5	3.673	87%	85%	84%	73%	75%
11	27.32	24.503	22.868	13.56	14.42	3.86	86%	84%	83%	72%	73%
12	26.99	24.196	22.63	13.42	14.32	4.033	85%	83%	82%	70%	72%

ตารางที่ ผ.6.1 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	ค่า LEF x 10 ³ (V/km)/A						การลดทอนค่า LEF เมื่อที่วงจรวาง ตัวนำค้ำกรณที่ 6 เทียบกับ				
	กรณที่ 1	กรณที่ 2	กรณที่ 3	กรณที่ 4	กรณที่ 5	กรณที่ 6	กรณที่ 1	กรณที่ 2	กรณที่ 3	กรณที่ 4	กรณที่ 5
13	26.64	23.87	22.375	13.28	14.21	4.192	84%	82%	81%	68%	71%
14	26.27	23.526	22.104	13.12	14.09	4.335	83%	82%	80%	67%	69%
15	25.88	23.165	21.819	12.96	13.95	4.463	83%	81%	80%	66%	68%
16	25.48	22.79	21.519	12.79	13.8	4.574	82%	80%	79%	64%	67%
17	25.06	22.402	21.207	12.62	13.63	4.669	81%	79%	78%	63%	66%
18	24.64	22.002	20.884	12.44	13.46	4.748	81%	78%	77%	62%	65%
19	24.2	21.594	20.551	12.25	13.27	4.813	80%	78%	77%	61%	64%
20	23.75	21.178	20.209	12.06	13.08	4.862	80%	77%	76%	60%	63%
21	23.29	20.756	19.86	11.87	12.87	4.899	79%	76%	75%	59%	62%
22	22.83	20.33	19.505	11.67	12.66	4.922	78%	76%	75%	58%	61%
23	22.37	19.901	19.146	11.47	12.45	4.934	78%	75%	74%	57%	60%
24	21.91	19.47	18.782	11.26	12.23	4.934	77%	75%	74%	56%	60%
25	21.44	19.04	18.417	11.05	12	4.925	77%	74%	73%	55%	59%
26	20.98	18.61	18.05	10.84	11.77	4.907	77%	74%	73%	55%	58%
27	20.51	18.183	17.682	10.63	11.54	4.881	76%	73%	72%	54%	58%
28	20.05	17.759	17.316	10.42	11.31	4.848	76%	73%	72%	53%	57%
29	19.6	17.34	16.95	10.21	11.07	4.808	75%	72%	72%	53%	57%
30	19.15	16.925	16.587	10	10.84	4.762	75%	72%	71%	52%	56%
31	18.7	16.516	16.227	9.796	10.61	4.712	75%	71%	71%	52%	56%
32	18.26	16.113	15.871	9.589	10.38	4.658	74%	71%	71%	51%	55%
33	17.83	15.717	15.519	9.384	10.15	4.6	74%	71%	70%	51%	55%
34	17.41	15.329	15.171	9.181	9.921	4.539	74%	70%	70%	51%	54%
35	16.99	14.948	14.829	8.981	9.698	4.476	74%	70%	70%	50%	54%
เฉลี่ย							82%	80%	79%	66%	66%

ตารางที่ ผ.6.2 ค่า LEF จากการจัดลำดับเฟสของโครงสร้างเสาสูงที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง

4 วงจร

ระยะทาง (m)	LEF $\times 10^3$ (V/km)/A								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-35	8.205	7.336	7.305	5.100	5.118	3.516	7.414	7.135	6.019
-34	8.400	7.510	7.471	5.209	5.224	3.573	7.596	7.308	6.161
-33	8.598	7.688	7.640	5.320	5.332	3.631	7.782	7.484	6.306
-32	8.800	7.870	7.811	5.433	5.441	3.689	7.972	7.665	6.454
-31	9.006	8.055	7.986	5.547	5.553	3.747	8.166	7.849	6.605
-30	9.215	8.244	8.164	5.664	5.665	3.806	8.364	8.036	6.759
-29	9.428	8.436	8.344	5.782	5.780	3.865	8.565	8.226	6.915
-28	9.644	8.630	8.526	5.902	5.895	3.925	8.769	8.420	7.074
-27	9.862	8.828	8.710	6.023	6.012	3.984	8.977	8.617	7.234
-26	10.083	9.028	8.897	6.146	6.130	4.045	9.187	8.815	7.397
-25	10.307	9.231	9.084	6.270	6.248	4.105	9.400	9.016	7.562
-24	10.532	9.435	9.273	6.395	6.368	4.166	9.614	9.219	7.728
-23	10.758	9.641	9.462	6.520	6.488	4.227	9.830	9.423	7.895
-22	10.985	9.847	9.652	6.647	6.608	4.289	10.047	9.628	8.063
-21	11.211	10.054	9.841	6.773	6.729	4.351	10.264	9.833	8.232
-20	11.437	10.260	10.029	6.900	6.849	4.413	10.481	10.038	8.400
-19	11.662	10.465	10.216	7.026	6.970	4.476	10.696	10.242	8.567
-18	11.884	10.669	10.401	7.152	7.089	4.540	10.910	10.444	8.734
-17	12.103	10.870	10.584	7.276	7.207	4.604	11.122	10.643	8.898
-16	12.318	11.068	10.762	7.399	7.324	4.668	11.329	10.839	9.061
-15	12.528	11.261	10.937	7.520	7.440	4.734	11.532	11.030	9.220
-14	12.731	11.450	11.106	7.638	7.553	4.799	11.729	11.216	9.375
-13	12.928	11.631	11.270	7.753	7.663	4.865	11.920	11.395	9.525
-12	13.116	11.806	11.426	7.865	7.771	4.932	12.102	11.567	9.670
-11	13.294	11.972	11.575	7.972	7.875	4.999	12.276	11.731	9.809
-10	13.462	12.129	11.716	8.075	7.975	5.066	12.439	11.884	9.941
-9	13.618	12.275	11.847	8.172	8.070	5.133	12.592	12.027	10.065

ตารางที่ 6.2 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	LEF $\times 10^{-3}$ (V/km)/A								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-8	13.761	12.409	11.967	8.263	8.161	5.199	12.732	12.159	10.181
-7	13.890	12.531	12.077	8.348	8.245	5.265	12.858	12.277	10.286
-6	14.004	12.639	12.175	8.426	8.324	5.330	12.970	12.382	10.382
-5	14.102	12.733	12.260	8.496	8.396	5.394	13.067	12.472	10.467
-4	14.183	12.812	12.332	8.557	8.461	5.456	13.147	12.547	10.540
-3	14.248	12.874	12.390	8.611	8.518	5.515	13.211	12.606	10.601
-2	14.294	12.921	12.434	8.655	8.567	5.572	13.258	12.649	10.649
-1	14.322	12.950	12.464	8.690	8.607	5.626	13.286	12.674	10.684
0	14.331	12.963	12.478	8.715	8.639	5.676	13.297	12.683	10.706
1	14.322	12.958	12.478	8.731	8.661	5.722	13.290	12.674	10.714
2	14.294	12.936	12.462	8.736	8.674	5.763	13.264	12.649	10.709
3	14.247	12.897	12.432	8.732	8.677	5.799	13.221	12.606	10.690
4	14.183	12.842	12.387	8.717	8.670	5.829	13.160	12.547	10.658
5	14.102	12.770	12.328	8.693	8.654	5.854	13.083	12.472	10.612
6	14.004	12.684	12.254	8.659	8.628	5.872	12.989	12.382	10.554
7	13.890	12.582	12.168	8.616	8.593	5.884	12.880	12.277	10.483
8	13.761	12.467	12.069	8.564	8.548	5.890	12.756	12.158	10.401
9	13.618	12.338	11.957	8.503	8.494	5.889	12.619	12.027	10.307
10	13.462	12.198	11.835	8.434	8.432	5.881	12.470	11.884	10.204
11	13.294	12.047	11.702	8.357	8.362	5.867	12.309	11.730	10.090
12	13.116	11.886	11.560	8.273	8.284	5.846	12.138	11.567	9.967
13	12.928	11.716	11.409	8.183	8.199	5.820	11.957	11.395	9.837
14	12.731	11.538	11.251	8.086	8.107	5.787	11.769	11.216	9.699
15	12.528	11.354	11.085	7.984	8.010	5.749	11.574	11.030	9.555
16	12.318	11.164	10.914	7.877	7.907	5.706	11.373	10.838	9.405
17	12.103	10.969	10.738	7.766	7.800	5.658	11.167	10.643	9.250
18	11.884	10.770	10.557	7.651	7.688	5.605	10.958	10.443	9.092

ตารางที่ ผ.6.2 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	LEF $\times 10^{-3}$ (V/km)/A								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
19	11.662	10.569	10.373	7.533	7.573	5.548	10.746	10.242	8.930
20	11.437	10.365	10.186	7.412	7.454	5.487	10.531	10.038	8.766
21	11.211	10.161	9.997	7.289	7.333	5.423	10.316	9.833	8.599
22	10.984	9.955	9.807	7.164	7.210	5.356	10.100	9.628	8.432
23	10.758	9.749	9.616	7.038	7.085	5.286	9.884	9.423	8.264
24	10.532	9.544	9.425	6.911	6.960	5.213	9.669	9.219	8.095
25	10.307	9.341	9.235	6.784	6.833	5.139	9.455	9.016	7.927
26	10.083	9.138	9.045	6.656	6.706	5.063	9.243	8.815	7.760
27	9.862	8.938	8.856	6.529	6.579	4.986	9.034	8.616	7.593
28	9.643	8.739	8.669	6.402	6.452	4.908	8.827	8.420	7.428
29	9.427	8.544	8.483	6.276	6.326	4.828	8.623	8.226	7.265
30	9.215	8.351	8.300	6.150	6.201	4.749	8.422	8.036	7.104
31	9.005	8.162	8.120	6.026	6.076	4.668	8.224	7.848	6.945
32	8.800	7.975	7.942	5.903	5.953	4.588	8.030	7.664	6.789
33	8.597	7.792	7.766	5.782	5.831	4.508	7.840	7.484	6.635
34	8.399	7.613	7.594	5.662	5.711	4.427	7.654	7.307	6.484
35	8.205	7.437	7.425	5.545	5.592	4.348	7.471	7.134	6.335

ตารางที่ ผ.6.2 (ต่อ)

ระดับน้ำ (m)	DEF $\times 10^3$ (V/km)/A								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
-35	3.689	5.297	3.082	7.367	5.984	7.091	5.280	3.630	3.039
-34	3.770	5.412	3.137	7.542	6.129	7.255	5.396	3.701	3.083
-33	3.852	5.530	3.193	7.721	6.278	7.421	5.515	3.773	3.128
-32	3.937	5.649	3.250	7.904	6.429	7.591	5.635	3.847	3.173
-31	4.023	5.770	3.307	8.091	6.585	7.764	5.757	3.921	3.217
-30	4.111	5.892	3.365	8.280	6.743	7.939	5.881	3.997	3.261
-29	4.201	6.017	3.423	8.473	6.905	8.117	6.007	4.074	3.305
-28	4.293	6.142	3.482	8.669	7.070	8.297	6.135	4.152	3.349
-27	4.386	6.269	3.542	8.868	7.237	8.479	6.263	4.231	3.392
-26	4.481	6.397	3.602	9.069	7.408	8.663	6.393	4.312	3.436
-25	4.577	6.526	3.663	9.272	7.580	8.848	6.524	4.393	3.479
-24	4.676	6.656	3.724	9.477	7.755	9.034	6.656	4.476	3.522
-23	4.775	6.786	3.786	9.684	7.932	9.221	6.788	4.560	3.565
-22	4.876	6.916	3.849	9.891	8.109	9.408	6.921	4.644	3.607
-21	4.977	7.045	3.912	10.098	8.288	9.595	7.053	4.730	3.650
-20	5.080	7.175	3.976	10.304	8.468	9.780	7.184	4.816	3.693
-19	5.183	7.303	4.040	10.510	8.647	9.964	7.315	4.903	3.735
-18	5.287	7.430	4.105	10.714	8.825	10.146	7.444	4.990	3.778
-17	5.391	7.556	4.170	10.915	9.002	10.325	7.571	5.078	3.821
-16	5.495	7.679	4.235	11.113	9.176	10.500	7.695	5.165	3.865
-15	5.598	7.800	4.301	11.306	9.348	10.670	7.817	5.253	3.908
-14	5.700	7.918	4.367	11.493	9.516	10.835	7.935	5.341	3.953
-13	5.801	8.032	4.433	11.675	9.679	10.994	8.048	5.428	3.998
-12	5.899	8.142	4.499	11.849	9.836	11.146	8.157	5.514	4.044
-11	5.996	8.247	4.564	12.014	9.986	11.290	8.261	5.598	4.090
-10	6.089	8.347	4.629	12.170	10.129	11.425	8.358	5.682	4.138
-9	6.180	8.441	4.694	12.315	10.263	11.550	8.449	5.763	4.186

ตารางที่ ผ.6.2 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	LEP $\times 10^{-3}$ (V/km)/A								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
-8	6.266	8.529	4.757	12.448	10.387	11.665	8.533	5.842	4.235
-7	6.348	8.610	4.819	12.569	10.501	11.768	8.609	5.918	4.284
-6	6.424	8.684	4.879	12.676	10.603	11.859	8.677	5.991	4.334
-5	6.495	8.750	4.938	12.768	10.693	11.937	8.736	6.059	4.384
-4	6.560	8.807	4.994	12.845	10.770	12.002	8.786	6.124	4.433
-3	6.619	8.855	5.047	12.907	10.833	12.053	8.826	6.183	4.482
-2	6.670	8.894	5.096	12.952	10.881	12.090	8.857	6.238	4.531
-1	6.714	8.924	5.142	12.980	10.915	12.112	8.877	6.286	4.577
0	6.750	8.943	5.184	12.991	10.934	12.120	8.888	6.328	4.622
1	6.778	8.953	5.222	12.985	10.938	12.112	8.888	6.364	4.665
2	6.797	8.952	5.254	12.962	10.927	12.090	8.878	6.393	4.705
3	6.808	8.941	5.282	12.922	10.900	12.053	8.858	6.414	4.742
4	6.811	8.920	5.303	12.865	10.859	12.002	8.828	6.428	4.775
5	6.805	8.889	5.319	12.793	10.804	11.937	8.789	6.434	4.804
6	6.790	8.847	5.329	12.705	10.735	11.859	8.740	6.433	4.828
7	6.768	8.796	5.333	12.602	10.653	11.768	8.682	6.424	4.848
8	6.737	8.736	5.331	12.486	10.558	11.665	8.616	6.408	4.863
9	6.698	8.667	5.323	12.356	10.452	11.550	8.541	6.384	4.872
10	6.652	8.589	5.308	12.215	10.335	11.425	8.459	6.352	4.876
11	6.599	8.503	5.288	12.063	10.208	11.290	8.370	6.314	4.875
12	6.540	8.411	5.262	11.901	10.073	11.146	8.274	6.270	4.869
13	6.474	8.311	5.230	11.730	9.929	10.994	8.173	6.219	4.857
14	6.402	8.205	5.194	11.551	9.779	10.835	8.066	6.162	4.840
15	6.326	8.094	5.152	11.366	9.623	10.670	7.954	6.100	4.818
16	6.245	7.978	5.106	11.175	9.462	10.500	7.838	6.034	4.792
17	6.160	7.858	5.055	10.979	9.296	10.325	7.719	5.962	4.761
18	6.071	7.734	5.001	10.780	9.127	10.146	7.597	5.887	4.725

ตารางที่ ผ.6.2 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	LEF $\times 10^3$ (V/km)/A								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	5.979	7.606	4.943	10.577	8.955	9.964	7.472	5.809	4.686
20	5.884	7.477	4.882	10.373	8.782	9.780	7.344	5.727	4.643
21	5.787	7.345	4.819	10.167	8.607	9.595	7.216	5.643	4.597
22	5.689	7.212	4.753	9.960	8.432	9.408	7.086	5.556	4.548
23	5.589	7.078	4.684	9.754	8.257	9.221	6.955	5.468	4.496
24	5.488	6.943	4.614	9.548	8.082	9.034	6.824	5.378	4.441
25	5.387	6.808	4.543	9.343	7.908	8.848	6.694	5.287	4.385
26	5.285	6.673	4.470	9.140	7.735	8.662	6.563	5.195	4.327
27	5.183	6.539	4.397	8.938	7.565	8.479	6.433	5.103	4.267
28	5.081	6.405	4.322	8.739	7.396	8.296	6.304	5.010	4.205
29	4.980	6.273	4.248	8.543	7.229	8.116	6.175	4.918	4.143
30	4.879	6.142	4.173	8.349	7.065	7.939	6.048	4.825	4.079
31	4.780	6.012	4.097	8.159	6.903	7.763	5.923	4.733	4.015
32	4.681	5.883	4.023	7.972	6.745	7.591	5.799	4.642	3.951
33	4.583	5.757	3.948	7.788	6.589	7.421	5.677	4.551	3.886
34	4.487	5.633	3.874	7.608	6.437	7.255	5.557	4.462	3.821
35	4.392	5.510	3.800	7.431	6.287	7.091	5.438	4.373	3.756

ตารางที่ ๘.๖.๒ (ต่อ)

ระดับความสูง (m)	LEF x10 ⁻³ (V/cm)/A								
	19	20	21	22	23	24	25	26	27
-35	5.424	3.961	5.497	4.154	1.614	1.840	5.384	5.465	3.904
-34	5.568	4.075	5.634	4.253	1.656	1.865	5.528	5.606	4.008
-33	5.715	4.193	5.775	4.354	1.700	1.889	5.676	5.751	4.115
-32	5.866	4.315	5.920	4.457	1.745	1.913	5.829	5.899	4.225
-31	6.021	4.440	6.066	4.561	1.792	1.936	5.985	6.050	4.338
-30	6.179	4.569	6.216	4.667	1.840	1.958	6.144	6.205	4.454
-29	6.340	4.701	6.369	4.775	1.891	1.980	6.307	6.364	4.573
-28	6.505	4.837	6.523	4.885	1.943	2.001	6.474	6.525	4.694
-27	6.673	4.976	6.680	4.996	1.998	2.022	6.644	6.689	4.819
-26	6.843	5.118	6.839	5.107	2.054	2.041	6.817	6.856	4.945
-25	7.017	5.263	7.000	5.220	2.112	2.060	6.993	7.025	5.074
-24	7.192	5.411	7.162	5.334	2.172	2.078	7.172	7.196	5.205
-23	7.369	5.561	7.325	5.447	2.234	2.095	7.352	7.369	5.338
-22	7.548	5.714	7.489	5.561	2.298	2.111	7.534	7.543	5.472
-21	7.728	5.868	7.652	5.675	2.364	2.127	7.718	7.718	5.608
-20	7.908	6.024	7.815	5.788	2.432	2.141	7.902	7.893	5.745
-19	8.088	6.180	7.977	5.900	2.501	2.155	8.086	8.068	5.882
-18	8.267	6.337	8.138	6.010	2.571	2.169	8.269	8.242	6.019
-17	8.445	6.494	8.296	6.119	2.643	2.181	8.451	8.414	6.155
-16	8.620	6.649	8.451	6.225	2.717	2.194	8.631	8.584	6.291
-15	8.793	6.802	8.602	6.328	2.791	2.206	8.808	8.750	6.425
-14	8.961	6.953	8.749	6.427	2.865	2.218	8.980	8.912	6.556
-13	9.124	7.101	8.890	6.523	2.941	2.231	9.148	9.069	6.685
-12	9.281	7.244	9.026	6.614	3.016	2.244	9.309	9.220	6.810
-11	9.431	7.381	9.154	6.699	3.091	2.258	9.464	9.364	6.930
-10	9.573	7.512	9.274	6.779	3.165	2.272	9.610	9.499	7.046
-9	9.706	7.637	9.386	6.853	3.238	2.288	9.747	9.626	7.155

ตารางที่ ๘.๖.๒ (ต่อ)

ระยะทาง (m)	DEF $\times 10^3$ (V/km)/A								
	19	20	21	22	23	24	25	26	27
-8	9.829	7.752	9.488	6.920	3.310	2.305	9.874	9.743	7.258
-7	9.941	7.859	9.580	6.979	3.379	2.324	9.990	9.849	7.353
-6	10.041	7.956	9.661	7.031	3.446	2.344	10.093	9.942	7.440
-5	10.128	8.042	9.731	7.075	3.511	2.366	10.184	10.024	7.519
-4	10.202	8.116	9.789	7.111	3.571	2.390	10.260	10.092	7.588
-3	10.263	8.179	9.834	7.138	3.628	2.415	10.323	10.145	7.647
-2	10.308	8.228	9.866	7.156	3.681	2.442	10.370	10.185	7.696
-1	10.338	8.265	9.886	7.165	3.729	2.470	10.401	10.210	7.734
0	10.354	8.288	9.892	7.165	3.772	2.498	10.417	10.219	7.760
1	10.354	8.297	9.884	7.157	3.810	2.528	10.417	10.214	7.776
2	10.338	8.293	9.864	7.139	3.842	2.557	10.402	10.193	7.780
3	10.308	8.275	9.830	7.113	3.867	2.586	10.370	10.157	7.772
4	10.262	8.244	9.784	7.079	3.887	2.614	10.324	10.107	7.754
5	10.203	8.201	9.725	7.036	3.901	2.641	10.263	10.043	7.724
6	10.129	8.145	9.655	6.985	3.908	2.667	10.187	9.966	7.683
7	10.042	8.077	9.573	6.927	3.909	2.690	10.098	9.876	7.632
8	9.944	7.998	9.481	6.862	3.904	2.710	9.997	9.773	7.571
9	9.833	7.909	9.379	6.791	3.893	2.728	9.883	9.660	7.501
10	9.712	7.811	9.267	6.713	3.876	2.743	9.759	9.537	7.422
11	9.582	7.704	9.147	6.631	3.853	2.755	9.625	9.404	7.335
12	9.442	7.590	9.020	6.543	3.825	2.763	9.482	9.263	7.241
13	9.295	7.468	8.886	6.450	3.793	2.768	9.332	9.115	7.140
14	9.142	7.341	8.746	6.354	3.756	2.770	9.174	8.960	7.033
15	8.983	7.209	8.600	6.254	3.715	2.768	9.011	8.801	6.921
16	8.819	7.072	8.451	6.151	3.670	2.762	8.843	8.636	6.804
17	8.651	6.933	8.298	6.045	3.621	2.754	8.672	8.469	6.684
18	8.480	6.790	8.141	5.938	3.570	2.742	8.497	8.298	6.560

ตารางที่ ผ.6.2 (ต่อ)

ระยะทาง (m)	LEF $\times 10^3$ (V/km) A								
	19	20	21	22	23	24	25	26	27
19	8.306	6.646	7.983	5.829	3.516	2.728	8.320	8.126	6.434
20	8.132	6.500	7.823	5.719	3.460	2.710	8.142	7.953	6.306
21	7.956	6.354	7.662	5.608	3.403	2.690	7.963	7.779	6.177
22	7.780	6.208	7.501	5.497	3.343	2.667	7.784	7.605	6.047
23	7.605	6.062	7.340	5.385	3.283	2.643	7.605	7.432	5.916
24	7.430	5.918	7.179	5.274	3.221	2.616	7.427	7.259	5.786
25	7.257	5.774	7.019	5.163	3.159	2.588	7.251	7.089	5.656
26	7.085	5.632	6.860	5.053	3.097	2.557	7.077	6.920	5.527
27	6.916	5.492	6.704	4.944	3.035	2.526	6.905	6.754	5.399
28	6.749	5.354	6.549	4.836	2.972	2.493	6.736	6.590	5.272
29	6.584	5.218	6.396	4.729	2.910	2.459	6.569	6.428	5.147
30	6.423	5.085	6.245	4.624	2.848	2.424	6.406	6.270	5.024
31	6.264	4.955	6.097	4.520	2.786	2.389	6.245	6.115	4.903
32	6.109	4.827	5.952	4.418	2.726	2.353	6.088	5.963	4.784
33	5.956	4.703	5.809	4.318	2.666	2.316	5.935	5.814	4.667
34	5.808	4.581	5.670	4.219	2.607	2.279	5.785	5.669	4.553
35	5.662	4.462	5.533	4.123	2.548	2.242	5.638	5.527	4.441

ตารางที่ ๘.๖.๒ (ต่อ)

ระดับน้ำ (m)	LEF x10 ³ (V/km)/A								
	28	29	30	31	32	33	34	35	36
-35	1.581	4.123	1.840	4.062	3.556	3.507	2.070	2.135	0.630
-34	1.626	4.219	1.876	4.187	3.669	3.610	2.130	2.201	0.643
-33	1.673	4.318	1.913	4.315	3.786	3.716	2.192	2.269	0.656
-32	1.721	4.418	1.951	4.448	3.906	3.825	2.255	2.338	0.669
-31	1.772	4.520	1.990	4.584	4.030	3.937	2.321	2.410	0.681
-30	1.825	4.624	2.028	4.725	4.158	4.052	2.388	2.483	0.693
-29	1.880	4.729	2.068	4.869	4.289	4.171	2.457	2.559	0.705
-28	1.938	4.836	2.108	5.017	4.424	4.291	2.527	2.636	0.716
-27	1.997	4.944	2.149	5.168	4.562	4.415	2.599	2.714	0.727
-26	2.059	5.053	2.190	5.323	4.703	4.541	2.672	2.794	0.737
-25	2.123	5.163	2.231	5.481	4.847	4.669	2.747	2.876	0.746
-24	2.190	5.274	2.274	5.642	4.994	4.799	2.823	2.958	0.754
-23	2.258	5.385	2.316	5.805	5.144	4.931	2.899	3.042	0.761
-22	2.329	5.497	2.359	5.970	5.295	5.065	2.977	3.126	0.767
-21	2.402	5.608	2.402	6.138	5.449	5.199	3.055	3.211	0.771
-20	2.476	5.719	2.445	6.306	5.603	5.334	3.133	3.296	0.774
-19	2.552	5.829	2.488	6.475	5.758	5.470	3.212	3.382	0.775
-18	2.630	5.938	2.532	6.644	5.913	5.605	3.290	3.467	0.775
-17	2.709	6.045	2.575	6.812	6.068	5.739	3.367	3.551	0.772
-16	2.789	6.151	2.618	6.979	6.221	5.872	3.444	3.634	0.768
-15	2.869	6.254	2.661	7.143	6.373	6.002	3.519	3.716	0.761
-14	2.950	6.354	2.703	7.304	6.521	6.130	3.592	3.796	0.753
-13	3.030	6.450	2.745	7.461	6.666	6.255	3.663	3.874	0.742
-12	3.110	6.543	2.786	7.613	6.806	6.375	3.732	3.950	0.730
-11	3.189	6.631	2.827	7.759	6.940	6.490	3.797	4.022	0.715
-10	3.267	6.714	2.867	7.898	7.068	6.599	3.858	4.090	0.699
-9	3.342	6.791	2.905	8.028	7.188	6.702	3.916	4.155	0.682

ตารางที่ ๘.๖.๒ (ต่อ)

ระดับน้ำ (m)	LEF $\times 10^{-3}$ (V/km)/A								
	28	29	30	31	32	33	34	35	36
-8	3.415	6.862	2.943	8.150	7.300	6.798	3.969	4.215	0.664
-7	3.486	6.927	2.979	8.261	7.402	6.886	4.018	4.270	0.646
-6	3.553	6.985	3.013	8.361	7.494	6.965	4.061	4.320	0.627
-5	3.616	7.036	3.046	8.449	7.575	7.035	4.099	4.364	0.610
-4	3.674	7.079	3.077	8.525	7.644	7.095	4.131	4.403	0.595
-3	3.729	7.113	3.106	8.587	7.701	7.145	4.158	4.435	0.582
-2	3.777	7.139	3.132	8.636	7.745	7.184	4.178	4.460	0.572
-1	3.821	7.157	3.157	8.670	7.776	7.213	4.192	4.479	0.565
0	3.859	7.165	3.178	8.690	7.793	7.230	4.199	4.491	0.563
1	3.891	7.165	3.197	8.695	7.796	7.236	4.200	4.496	0.565
2	3.916	7.156	3.213	8.685	7.786	7.230	4.195	4.494	0.572
3	3.935	7.138	3.225	8.661	7.763	7.213	4.183	4.484	0.582
4	3.948	7.111	3.234	8.623	7.726	7.186	4.166	4.468	0.595
5	3.955	7.075	3.240	8.571	7.676	7.148	4.142	4.445	0.610
6	3.955	7.031	3.242	8.506	7.615	7.099	4.113	4.416	0.627
7	3.949	6.979	3.241	8.429	7.541	7.041	4.078	4.380	0.646
8	3.937	6.920	3.236	8.339	7.457	6.973	4.039	4.338	0.664
9	3.919	6.853	3.227	8.239	7.363	6.896	3.994	4.290	0.682
10	3.895	6.779	3.214	8.129	7.260	6.812	3.945	4.237	0.699
11	3.866	6.699	3.198	8.010	7.149	6.720	3.892	4.179	0.715
12	3.833	6.614	3.179	7.883	7.030	6.621	3.835	4.117	0.729
13	3.794	6.523	3.157	7.749	6.905	6.517	3.775	4.051	0.742
14	3.752	6.427	3.131	7.608	6.774	6.407	3.712	3.981	0.753
15	3.706	6.328	3.102	7.462	6.639	6.293	3.646	3.908	0.761
16	3.656	6.225	3.071	7.312	6.500	6.175	3.579	3.832	0.768
17	3.603	6.119	3.037	7.159	6.358	6.054	3.509	3.754	0.772
18	3.548	6.010	3.001	7.003	6.214	5.930	3.439	3.675	0.774

ตารางที่ ผ.6.2 (ต่อ)

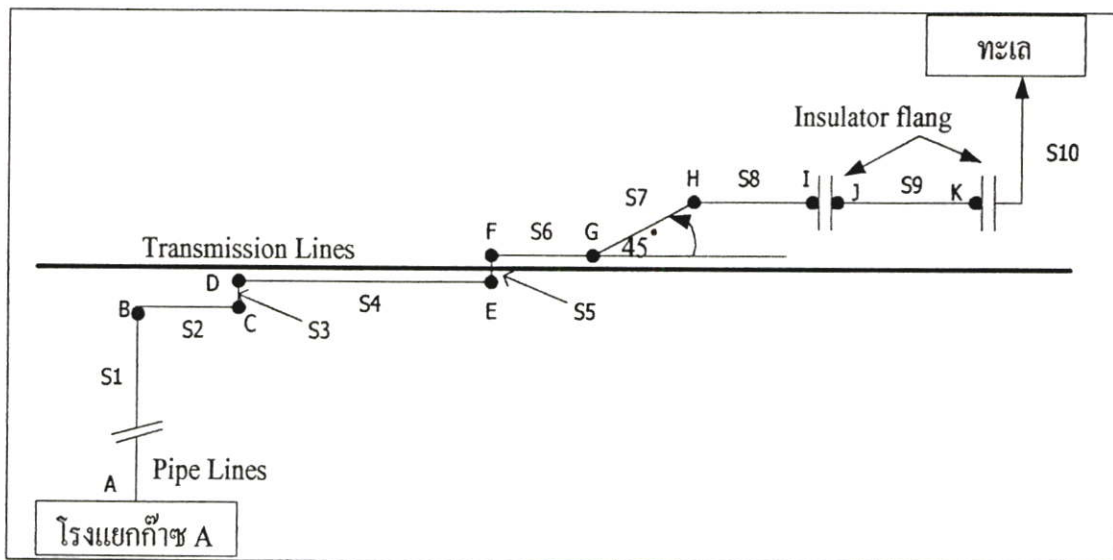
ระยะทาง (m)	LEF x10 ³ (V/km)/A								
	28	29	30	31	32	33	34	35	36
19	3.491	5.900	2.963	6.846	6.068	5.805	3.367	3.594	0.775
20	3.431	5.788	2.923	6.687	5.922	5.678	3.294	3.513	0.774
21	3.371	5.675	2.882	6.527	5.775	5.550	3.221	3.430	0.771
22	3.308	5.561	2.839	6.368	5.629	5.422	3.148	3.348	0.767
23	3.246	5.447	2.795	6.210	5.483	5.294	3.074	3.265	0.761
24	3.182	5.333	2.750	6.053	5.339	5.167	3.001	3.183	0.754
25	3.118	5.220	2.704	5.897	5.197	5.041	2.929	3.102	0.746
26	3.054	5.107	2.658	5.743	5.057	4.916	2.857	3.021	0.737
27	2.990	4.995	2.612	5.592	4.918	4.792	2.786	2.941	0.727
28	2.926	4.885	2.565	5.443	4.783	4.670	2.716	2.863	0.716
29	2.863	4.775	2.518	5.297	4.650	4.550	2.648	2.786	0.705
30	2.800	4.667	2.471	5.154	4.520	4.433	2.580	2.710	0.693
31	2.738	4.561	2.424	5.014	4.393	4.317	2.513	2.635	0.681
32	2.677	4.456	2.378	4.877	4.269	4.204	2.448	2.563	0.669
33	2.616	4.354	2.331	4.743	4.148	4.093	2.385	2.492	0.656
34	2.557	4.253	2.285	4.613	4.031	3.985	2.323	2.422	0.643
35	2.498	4.154	2.240	4.486	3.916	3.880	2.262	2.355	0.630

ภาคผนวก จ.

ตัวอย่างการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ

แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ

ในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำสามารถทำการการคำนวณ โดยการใช้ค่าสมการประมาณจากแบบจำลองที่ได้นำเสนอจะแสดงการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุดที่ไม่ต่อเนื่อง โดยการแบ่งท่อออกเป็นช่วงย่อยขึ้นอยู่กับลักษณะของท่อที่ไม่ต่อเนื่องในการพิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเนื่องแนวท่อไม่ขนานกับแนวสายส่งตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดแนวท่อในการพิจารณาจะพิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำโดยใช้พารามิเตอร์แสดงดังตารางที่ ผ.5.1 และ ผ.5.2 ลักษณะการวางท่อแสดงดังรูปที่ ผ.5.1



รูปที่ ผ.5.1 ลักษณะการวางแนวท่อกระทำกับแนวสายส่ง

ตาราง ผ.5.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

ส่วนย่อย	ระยะ		ความยาวท่อ (km)	ระยะจากสายส่ง ถึงท่อเฉลี่ย (m)	ความลึก (m)	ขนาด L EF (V/km)
	จุดเริ่มต้น	จุดสิ้นสุด				
S1	A	B	20	15	1	21.256
S2	B	C	4	15	1	21.256
S4	D	E	10	5	1	14.232
S6	F	G	4	5	1	14.232
S7	G	H	4.717	12.5	1	13.748
S8	H	I	5	25	1	28.235
S9	J	K	6	25	1	28.235

ตารางที่ ผ.5.2 พารามิเตอร์ของท่อดำส่งก๊าซ

ส่วนย่อย	ระยะ		ขนาดท่อ (mm)	γ (km^{-1})	Z_1 (Ω)	Z_2 (Ω/m)	Z_3 (Ω/m)
	จุดเริ่มต้น	จุดสิ้นสุด					
S1	A	B	34	$0.114 + 0.101i$	$2.672 + 2.356i$	0	$2.672 + 2.356i$
S2	B	C	34	$0.114 + 0.101i$	$2.672 + 2.356i$	$2.672 + 2.356i$	$2.672 + 2.356i$
S4	D	E	34	$0.114 + 0.101i$	$2.672 + 2.356i$	$2.672 + 2.356i$	$2.672 + 2.356i$
S5	F	G	34	$0.114 + 0.101i$	$2.672 + 2.356i$	$2.672 + 2.356i$	$2.672 + 2.356i$
S7	G	H	34	$0.114 + 0.101i$	$2.672 + 2.356i$	$2.672 + 2.356i$	$2.672 + 2.356i$
S8	H	I	34	$0.114 + 0.101i$	$2.672 + 2.356i$	$2.672 + 2.356i$	α
S9	J	K	34	$0.114 + 0.101i$	$2.672 + 2.356i$	α	α

ทดสอบความยาวท่อ

$$L \geq \frac{2}{\text{Re}(\gamma)} = \frac{2}{0.114} = 17.544 \text{ km.}$$

จากการคำนวณพบว่าความยาวที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 17.544 km ดังในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นหากท่อมีความยาวมากกว่า 17.544 km ให้พิจารณาเป็นท่อระยะยาวและในกรณีที่ความยาวของท่อน้อยกว่า 17.544 km. ให้ถือว่าเป็นท่อระยะสั้นซึ่งในการคำนวณจะพิจารณาเป็นส่วนดังต่อไปนี้

แรงดันเหนี่ยวนำที่จุด B

ส่วนย่อย S1 นับตั้งแต่โรงแยกก๊าซคือจุด A และจุดสิ้นสุดที่จุด B มีความยาวท่อโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 20 km ดังนั้นการพิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนส่วนย่อยนี้พิจารณาแบบท่อระยะยาวแต่ในการวางท่อดำส่งก๊าซวางตั้งฉากกับแนวสายส่งและมีทิศทางห่างออกจากแนวสายส่งดังนั้นแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุด A จึงมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ ต่อไปทำการพิจารณาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุด B เนื่องจากจุด B เป็นจุดเริ่มหักเข้าแนวสายส่ง ก่อนที่จะทำการหาแรงดันเหนี่ยวนำที่จุด B ต้องทำการหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุด C ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

หาแรงดันที่จุด C ได้ดังนี้

$$V_C = LEF * L * \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$V_C = 21.256 * 4 * \frac{2.672 + 2.356i}{(2.672 + 2.356 + 2.672 + 2.356)} = 42.512 \text{ V}$$

ดังนั้นสามารถหาแรงดันที่จุด B ได้ดังนี้

$$V_B = \frac{\frac{V_A}{Z_{A0}} + \frac{V_C}{Z_{C0}}}{\frac{1}{Z_{A0}} + \frac{1}{Z_{C0}}}$$

$$V_B = \frac{\frac{0}{2.672 + 2.356i} + \frac{42.512}{2.672 + 2.356i}}{\frac{1}{2.672 + 2.356i} + \frac{1}{2.672 + 2.356i}}$$

$$V_B = 21.256 \text{ V}$$

แรงดันเหนี่ยวนำที่จุด C และ D

ปลายของส่วนย่อย S2 นี้คือจุด C ซึ่งเป็นจุดที่ไม่ต่อเนื่องเป็นผลมาจาก LEF ที่เกิดขึ้นบนส่วนย่อย S2 และ S4 ไม่เท่า ดังนั้นในการหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่จุด C ได้ดังนี้
หาแรงดันที่จุด B ได้ดังนี้

$$V_B = LEF * L * \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$V_B = 21.256 * 4 * \frac{2.672 + 2.356i}{(2.672 + 2.356 + 2.672 + 2.356)} = 42.512 \text{ V}$$

หาแรงดันที่จุด E ได้ดังนี้

$$V_E = 14.232 * 10 * \frac{2.672 + 2.356i}{(2.672 + 2.356 + 2.672 + 2.356)} = 71.16 \text{ V}$$

ดังนั้นสามารถหาแรงดันที่จุด C ได้ดังนี้

$$V_C = \frac{\frac{V_B}{Z_{B0}} - \frac{V_E}{Z_{E0}}}{\frac{1}{Z_{B0}} + \frac{1}{Z_{E0}}}$$

$$V_C = \frac{\frac{42.512}{2.672 + 2.356i} - \frac{71.16}{2.672 + 2.356i}}{\frac{1}{2.672 + 2.356i} + \frac{1}{2.672 + 2.356i}}$$

$$V_C = V_D = 14.324 \text{ V}$$

แรงดันเหนี่ยวนำที่จุด E และ F

เป็นจุดต่อที่ไม่ต่อเนื่องจากมีการตัดผ่านสายส่งสามารถหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่จุด E และ F ได้ดังนี้

หาแรงดันที่จุด D ได้ดังนี้

$$V_D = LEF * L * \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$V_D = 14.232 * 10 * \frac{2.672 + 2.356i}{(2.672 + 2.356 + 2.672 + 2.356)} = 71.16 \quad \text{V}$$

หาแรงดันที่จุด G ได้ดังนี้

$$V_G = 14.232 * 4 * \frac{2.672 + 2.356i}{(2.672 + 2.356 + 2.672 + 2.356)} = 28.464 \quad \text{V}$$

ดังนั้นสามารถหาแรงดันที่จุด E ได้ดังนี้

$$V_E = \frac{\frac{V_D}{Z_D} - \frac{V_G}{Z_G}}{\frac{1}{Z_D} + \frac{1}{Z_G}}$$

$$V_E = \frac{\frac{42.512}{2.672 + 2.356i} - \frac{71.16}{2.672 + 2.356i}}{\frac{1}{2.672 + 2.356i} + \frac{1}{2.672 + 2.356i}}$$

$$V_E = V_F = 21.348 \quad \text{V}$$

แรงดันเหนี่ยวนำที่จุด G

เป็นจุดไม่ต่อเนื่องจากมีการเปลี่ยนระยะห่างจากสายส่ง สามารถหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนส่วนย่อย S6 และ S7

หาแรงดันที่จุด F ได้ดังนี้

$$V_F = LEF * L * \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$V_F = 14.232 * 4 * \frac{2.672 + 2.356i}{(2.672 + 2.356 + 2.672 + 2.356)} = 28.464 \quad \text{V}$$

หาแรงดันที่จุด E ได้ดังนี้

$$V_H = 13.748 * 4.717 * \frac{2.672 + 2.356i}{(2.672 + 2.356 + 2.672 + 2.356)} = 32.425 \quad \text{V}$$

ดังนั้นสามารถหาแรงดันที่จุด G ได้ดังนี้

$$V_G = \frac{\frac{V_F}{Z_{FO}} - \frac{V_H}{Z_{HO}}}{\frac{1}{Z_{FO}} + \frac{1}{Z_{HO}}}$$

$$V_G = \frac{\frac{28.464}{2.672 + 2.356i} - \frac{32.425}{2.672 + 2.356i}}{\frac{1}{2.672 + 2.356i} + \frac{1}{2.672 + 2.356i}}$$

$$V_G = 3.961 \text{ V}$$

แรงดันเหนี่ยวนำที่จุด H

เป็นจุดไม่ต่อเนื่องเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างจากสายส่งเปลี่ยนระยะห่างจากสายส่งสามารถหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิด ขึ้นบนส่วนย่อย S7 และ S8 ได้ดังนี้

หาแรงดันที่จุด G ได้ดังนี้

$$V_G = LEF * L * \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$V_G = 13.748 * 4.717 * \frac{2.672 + 2.356i}{(2.672 + 2.356 + 2.672 + 2.356)} = 32.425 \quad \text{V}$$

หาแรงดันที่จุด I ได้ดังนี้

$$V_I = 28.235 * 5 * \frac{\infty}{(2.672 + 2.356i + \infty)} = 141.157 \quad \text{V}$$

ดังนั้นสามารถหาแรงดันที่จุด H ได้ดังนี้

$$V_H = \frac{\frac{V_G}{Z_{GO}} - \frac{V_C}{Z_{IO}}}{\frac{1}{Z_{GO}} + \frac{1}{Z_{IO}}}$$

$$V_H = \frac{\frac{32.425}{2.672 + 2.356i} - \frac{141.157}{2.672 + 2.356i}}{\frac{1}{2.672 + 2.356i} + \frac{1}{2.672 + 2.356i}}$$

$$V_H = 54.375 \text{ V}$$

แรงดันเหนี่ยวนำที่จุด I

มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากมีจำนวนกัณฑ์ระหว่างท่อ

แรงดันที่ ส่วนย่อย S8

$$V_H = 28.235 * 5 * \frac{\infty}{(2.672 + 2.356i + \infty)} = 141.157 \text{ V}$$

$$V_H = 141.157 \text{ V}$$

แรงดันเหนี่ยวนำที่จุด J และ K

มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากมีจำนวนกัณฑ์ระหว่างท่อ

แรงดันที่ ส่วนย่อย S9

$$V_J = 28.235 * 6 * \frac{\infty}{(\infty + \infty)} = 169.41 \text{ V}$$

$$V_J = 169.41 \text{ V}$$

$$V_K = 169.41 \text{ V}$$

ภาคผนวก ฉ.
บทความที่ให้บริการตีพิมพ์



การประชุมวิชาการ
ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23



23rd Electrical Engineering Conference
(EECON-23)



วันที่ 23-24 พฤศจิกายน 2543 โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูง

Calculations of Induced Voltage on Gas Pipelines due to High-voltage Transmission line

พัฒนา อินทนิ สุเมธ เจนอลงกต นราดล โชติวรรณพร* และ ศิริวิวัฒน์ โพธิ์เวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร (662)3269902 Email:s2061134@kmitl.ac.th

*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

51 หมู่ ถนนเชื่อมสัมพันธ์ แขวงกระทุ่มลอย เขตหนองจอก กรุงเทพฯ 10530

โทร(02) 9883655 ต่อ 151 โทรสาร 9884040 E-mail:naradon@mut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่ใต้ดิน เนื่องจากผลการรบกวนของสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ขนานกับท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ในระยะปลอดภัยการเดินสายไฟฟ้า โดยอาศัยทฤษฎีสายส่งไฟฟ้าในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาแรงดันที่เกิดขึ้นบนท่อเหล็กที่มีฉนวนหุ้ม โดยการจัดสร้างโปรแกรมบน MATLAB version 5.3 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซ ผลแรงดันที่ได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับระบบที่ติดตั้งจริงมีค่าใกล้เคียงกันมาก

คำสำคัญ: การรบกวนเนื่องจากสายส่งแรงสูง,ท่อส่งก๊าซธรรมชาติ, แรงดันเหนี่ยวนำบนท่อ

Abstract

This paper presents the calculation model of induced voltage on underground natural gas pipeline due to magnetic fields from high voltage transmission lines which place in parallel with natural gas pipelines in the right-of-way width (R.O.W width). A mathematics model in based on transmission line theory. The program using MATLAB version 5.3 is implemented for analyzing various parameters effecting induced voltage on steel pipeline with coating insulation . The calculated voltage results are compared with the resistance measurement ones which are very close.

Keywords: Interference due to transmission line, natural gas pipelines, induce voltage on pipeline

1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันมีการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติขนานไปตามแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงซึ่งอยู่ในระยะปลอดภัยการเดินสายไฟฟ้า เนื่องจากปัญหาการรบกวนที่ดินและปัญหาด้านการ

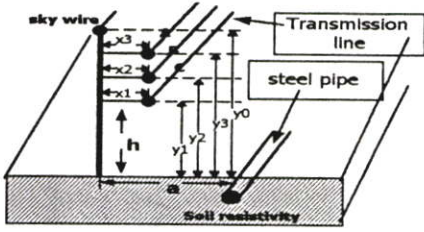
ทำลยธรรมชาติเมื่อเป็นเช่นนั้นปัญหาที่ตามมาคือปัญหาการรบกวนจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติซึ่งเป็นท่อเหล็ก และมีฉนวนหุ้ม แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อระบบป้องกันสนิม (Cathodic Protection) ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ด้านแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเกินกว่ามาตรฐานของ NACE (National Association of Corrosion Engineering Standard , RP0177-83 Item No.53039) กำหนด จะทำให้ท่อส่งก๊าซธรรมชาติเกิดการผุกร่อนเร็วขึ้น และ อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้สัมผัสท่อก๊าซธรรมชาติเนื่องจากแรงดันสัมผัส ปัญหาดังกล่าวสามารถทำการแก้ไขปัญหาได้โดยการวิเคราะห์หาแรงดันเหนี่ยวนำที่จะเกิดขึ้นก่อนที่จะทำการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติ หากพบว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่คำนวณ ได้มีค่ามากกว่ามาตรฐานกำหนด จำเป็นที่จะต้องทำการลดทอนแรงดันเหนี่ยวนำดังกล่าวเพื่อให้เป็นไปตามมาตรฐานของ NACE จากงานวิจัยของ F.P. Dawalibi และ R.D.Southey ได้ทำการวิเคราะห์หาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซ[1,2] โดยวิเคราะห์ตามสถานะแวดล้อมนั้นๆ ดังนั้นบทความนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อใช้ออกแบบตามสถานะแวดล้อมในประเทศ

2. หลักการและทฤษฎี

2.1 หลักการแรงดันเหนี่ยวนำ

การคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติเป็นผลมาจากสนามแม่เหล็กจากสายส่งแรงสูงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาตัดผ่านตัวนำ (ท่อก๊าซ) ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ท่อก๊าซธรรมชาติ ตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) จะเห็นได้ว่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันของสนามแม่เหล็กซึ่งในบทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการคำนวณในลักษณะของความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามแนวยาวของท่อ (Longitudinal electric field) เป็นการสร้างแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนและผลที่ได้รับมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมาก [1,2]

2.2 การหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติตามแนวยาว (Longitudinal electric field)



รูปที่ 1 แบบจำลองในการหาค่าสนามไฟฟ้าตามแนวยาวของท่อ

จากรูปที่ 1 แบบจำลองของท่อส่งก๊าซธรรมชาติระบบไฟฟ้า 3 เฟส ที่มีการจัดวางสายในแนวตั้ง (Vertical) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสายส่งกับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามแนวท่อส่งก๊าซธรรมชาติ [3]

$$\frac{E}{I_t} = C \sqrt{K_1^2 + K_2^2 - K_1 K_2} \text{ V/km/kA} \quad (1)$$

$$E = C \sqrt{K_1^2 + K_2^2 - K_1 K_2} \times I_t \text{ V/km} \quad (2)$$

กำหนดให้

$$K_1 = -\ln \left[\frac{\delta^2}{y_0^2 + a^2} \right] \times \ln \left[\frac{(y_0 - y_2)^2 + x_2^2}{(y_0 - y_1)^2 + x_1^2} \right] + 22 \times \ln \left[\frac{y_2^2 + (a - x_2)^2}{y_1^2 + (a - x_1)^2} \right] \quad (3)$$

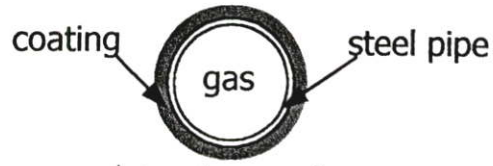
$$K_2 = -\ln \left[\frac{\delta^2}{y_0^2 + a^2} \right] \times \ln \left[\frac{(y_0 - y_3)^2 + x_3^2}{(y_0 - y_1)^2 + x_1^2} \right] + 22 \times \ln \left[\frac{y_3^2 + (a - x_3)^2}{y_1^2 + (a - x_1)^2} \right] \quad (4)$$

$$\delta = 658 \frac{\rho}{f} \quad (5)$$

E คือ สนามไฟฟ้าตามแนวยาวท่อ, C คือ ค่าคงที่ (1.4 สำหรับ 50 Hz) f คือ ความถี่, ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil resistivity) I_t คือ กระแสของสายส่ง, δ คือ Penetration depth, a คือ ระยะทางจากกึ่งกลางเสาไฟฟ้าถึงตำแหน่งท่อ, h คือ ความสูงของสายเฟสต่ำสุดถึงพื้นดิน

2.3 วงจรสมมูลย์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

จากรูปที่ 2 เป็น โครงสร้างโดยทั่วไปของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ มีลักษณะคล้ายกับสายส่งไฟฟ้าที่มีฉนวนหุ้มคือตัวท่อจะเป็นเปลือกและมีฉนวนหุ้มท่ออีกชั้น



รูปที่ 2 โครงสร้างของท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

ในการจำลองหาค่าพารามิเตอร์ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติให้เป็นพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ Impedance ของท่อส่งก๊าซธรรมชาติได้โดย [3]

$$Z = R + jXL, Y = G + jXC \quad (6)$$

$$R = \frac{\sqrt{\rho_{st} \mu_0 \mu_r \omega}}{\pi d \sqrt{2}} + \frac{\mu_0 \omega}{8} \quad (7)$$

$$XL = \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \times \ln \left[\frac{3.7}{d} \sqrt{\frac{\rho}{\omega \times \mu_0}} \right] + \frac{\sqrt{\rho_{st} \mu_0 \mu_r}}{\pi d \sqrt{2}} \quad (8)$$

$$G = \frac{\pi d}{r_u} \quad (9)$$

$$XC = \frac{\omega \pi d \epsilon_0 \epsilon_r}{s} \quad (10)$$

μ₀ คือ ค่า 4π × 10⁻⁷ (H/m)

μ_r คือ ค่า Relative Permeability ของวัสดุตัวนำ

ε_r คือ ค่า Relative permittivity ของตัวกลาง

ε₀ คือ ค่า 8.85 × 10⁻¹² (F/m)

ω คือ ค่า 2πf ; f = 50Hz

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω - m)

s คือ ความหนาของฉนวนท่อ (mm)

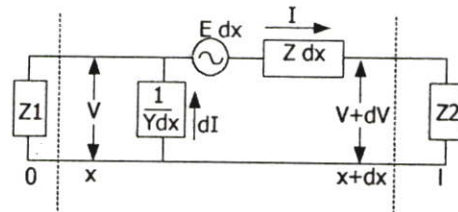
Z คือ อิมพีแดนซ์ของท่อ (Ω)

Y คือ แอดมิตแตนซ์ของฉนวนหุ้มท่อ (S)

d คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (m)

r_u คือ ค่าความต้านทานของฉนวนหุ้มท่อ (kΩ - m²)

นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณเขียนเป็นวงจรสมมูลย์ทางไฟฟ้าโดยอาศัยทฤษฎีของสายส่งได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงจรสมมูลย์ที่ใช้ในการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำ

สมการของแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสที่เกิดขึ้นที่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง [3]

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \gamma^2 V, \quad \frac{d^2I}{dx^2} = \gamma V \quad (11)$$

จากสมการที่ 11 สามารถหาแรงดันเหนี่ยวนำและกระแสที่ท่อ ได้ดังสมการที่ 12 และ 13

$$V = -Z_0 [Ae^{\gamma x} - Be^{-\gamma x}] \quad V \quad (12)$$

$$I = Ae^{\gamma x} + Be^{-\gamma x} + \frac{E}{Z} \quad A \quad (13)$$

$$A = \frac{E}{2Z} \frac{(1+r_1)r_2 - (1+r_2)e^{\gamma l}}{e^{2\gamma l} - r_1 r_2} \quad (14)$$

$$B = \frac{E}{2Z} \frac{(1+r_2)r_1 - (1+r_1)e^{\gamma l}}{e^{2\gamma l} - r_1 r_2} \times e^{\gamma l}$$

$$(15) \quad r_{1,2} = \frac{Z_0}{Z_{1,2} + Z_0}, \quad \gamma = \sqrt{YZ}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \frac{Z}{\gamma} \quad (16)$$

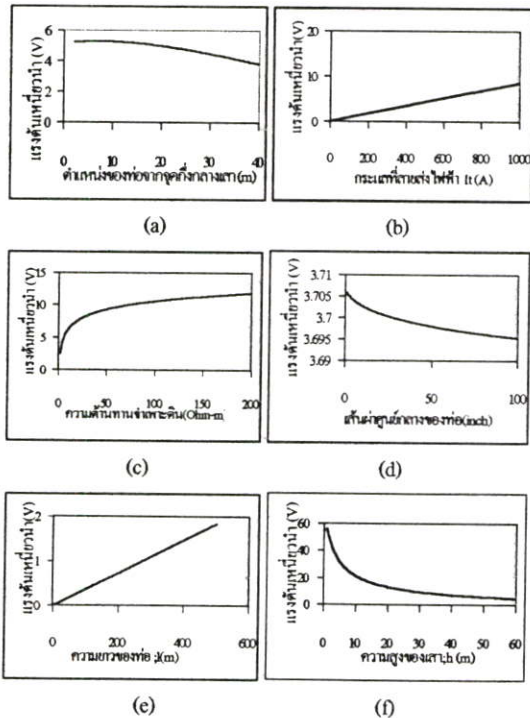
- V คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่ท่อส่งก๊าซ (V)
- I คือ กระแสที่ท่อส่งก๊าซ (A)
- E คือ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ท่อตามแนวยาว(V/km)
- Z₀ คือ Characteristic impedance(Ω)
- γ คือ สัมประสิทธิ์ของการส่งผ่าน (Transfer coefficient)
- x คือ ตำแหน่งที่ต้องการหาแรงดันเหนี่ยวนำ (km)
- l คือ ความยาวของท่อที่ขนานกับสายส่ง (km)
- Z₁ คือ อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย(Ω)
- Z₂ คือ อิมพีแดนซ์ของโหลด(Ω)

ในการวัดแรงดันเหนี่ยวนำจะวัดจากผิวท่อเทียบกับกราวด์

3.1 ทดสอบแบบจำลอง

จากเทคนิคที่ได้นำเสนอจัดทำเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปใช้ในการวิเคราะห์หาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติ โดยแสดงการทำงานของโปรแกรมดังรูปที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่ได้จัดทำขึ้นในการหาแรงดันเหนี่ยวนำที่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติในการคำนวณกำหนดให้ท่อขนานกับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในการคำนวณขึ้นอยู่กับลักษณะของท่อที่ไม่ต่อเนื่อง

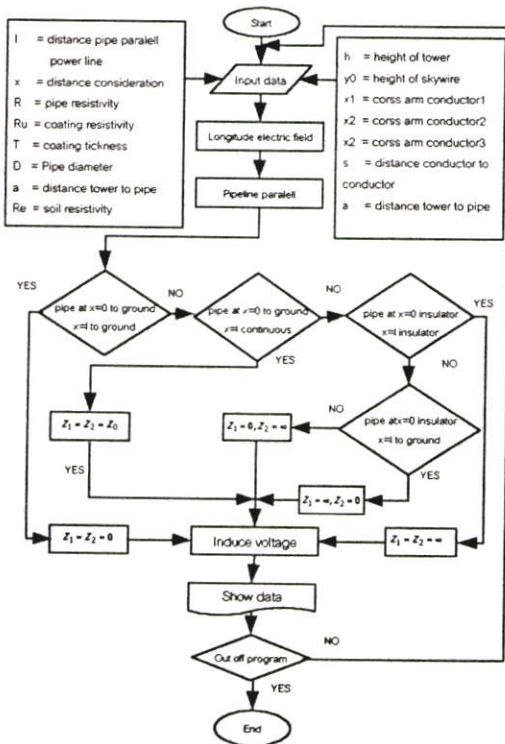
ในการทดสอบแบบจำลองที่ได้นำเสนอเพื่อวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับผลของแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 1 ในการวิเคราะห์จะใช้ท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง(d) = 34 inches, ความต้านทานจำเพาะของดิน(ρ) = 20 Ohm-m, ความต้านทานจำเพาะของเหล็ก(ρ_s) = 1.6 × 10⁻⁵ Ohm-m, ความหนาของฉนวนท่อ(s) = 3 mm. ความต้านทานจำเพาะของฉนวนท่อ(ρ_i) = 1,000 kΩ - m², μ_r ของท่อเหล็ก = 200, ε_r ของท่อ = 5, ความยาวของท่อ(l) = 1 km และกระแสของสายส่ง(I₁) = 753 A/ phase ความสูงของเสา(h) = 53.5 m



รูปที่ 5 ผลของแรงดันเหนี่ยวนำกับ(a)ตำแหน่งท่อ,(b)กระแส, (c) ความต้านทานจำเพาะของดิน,(d)ขนาดท่อ,(e)ความยาวท่อ,(f)ความสูงเสา

จากรูปที่ 5 แบบจำลองที่นำเสนอแสดงให้เห็นว่าเมื่อกระแสของสายส่ง,ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและความยาวของท่อเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำมากขึ้นดังรูปที่ 5(b),5(c) และ 5(e) ตามลำดับ ผลของระยะทางระหว่างเสาและท่อที่เพิ่มขึ้น, ความยาวของท่อและความสูงเสาเพิ่มขึ้น,ขนาดของท่อใหญ่ขึ้นจะทำให้แรงดันเหนี่ยวนำลดลงดังรูปที่ 5(a),5(d)และ5(f)

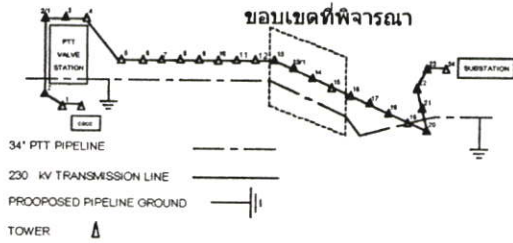
3. การทดสอบและวิเคราะห์ผล



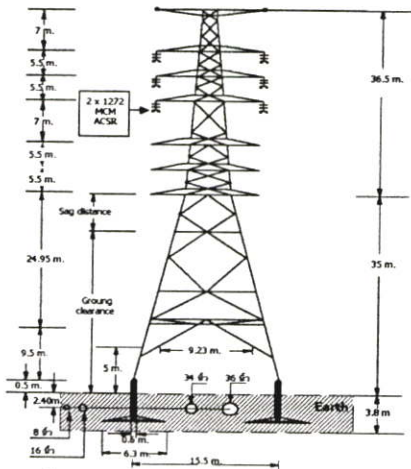
รูปที่ 4 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจากเทคนิคที่นำเสนอ

3.2 การทดสอบกับโครงสร้างจริง

ในการคำนวณหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติในบทความนี้ได้นำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกรณีที่เกิดขึ้นตามความเป็นจริงจากการสำรวจรูปที่ 1 สายส่งระบบ 3 phase 230 kV, 300 MW, 753 A/phase มีท่อก๊าซวางขนานอยู่กับแนวสายส่งไฟฟ้าโดยท่อส่งก๊าซมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 34 inches หุ้มด้วยฉนวนชนิด PE สำหรับโครงสร้างของเสาและค่าพารามิเตอร์ต่างๆแสดงไว้ดังรูปที่ 7 โดยช่วงที่มีค่าแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุด คือช่วงเสาหมายเลข 13-16 ตามการวัดสำรวจจริง [4]



รูปที่ 6 กรณีที่ใช้ในการศึกษา



รูปที่ 7 ลักษณะของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV

จากตารางที่ 1 เสาหมายเลข 16 เป็นจุดที่น่าสนใจมาก เนื่องจากเป็นจุดที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำสูงสุด และเป็นจุดที่ท่อตัดผ่านแนวสายส่ง จากการคำนวณด้วยโปรแกรมและนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดจากโครงสร้างที่ติดตั้งจริง เกิดค่าผิดพลาดอยู่ที่ 4.88% เป็นผลจากค่าของกระแสที่ใช้ในการคำนวณ เพราะขณะที่ทำการตรวจวัดกระแสของระบบที่ใช้งานขณะนั้นไม่ใช่กระแสที่ปกติของระบบจริงๆ และค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นบางส่วนอาจเกิดจากค่าความต้านทานของดินที่เปลี่ยนแปลงไปตามสถานะของดิน แต่ค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั้งหมดนี้มีค่าต่ำอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยของ NACE

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากการคำนวณและตรวจวัด

หมายเลขเสา	ขนาดของท่อ 34 inches		
	ค่าที่ได้จากการตรวจวัด (V)	ค่าที่ได้จากการคำนวณ (V)	Error (%)
13	1.865	1.935	3.75
13/1	1.954	2.04	4.40
15	1.873	1.985	5.98
16	3.006	3.169	5.419

4. สรุป

จากผลที่ได้จากการทดสอบจะพบว่าค่าที่คำนวณจากแบบจำลองที่ได้นำเสนอเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ทำการตรวจวัดจริงมีค่าใกล้เคียงกันมาก และผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทำให้พบว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมากที่สุด คือ ผลของกระแสในสายส่งและความยาวท่อส่งก๊าซ รองลงมาคือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน จากเทคนิคที่ได้นำเสนอจะเป็นแนวทางให้ผู้ออกแบบท่อส่งก๊าซธรรมชาติได้นำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและวิจัยที่จะนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้ในการจัดทำเป็นโปรแกรมในการออกแบบและลดทอนผลกระทบที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ในการออกแบบภายในประเทศ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทบิเนท จำกัด และ การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย (PTT) ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] F.P. Dawalibi ,R.D.Southey "Analysis of Electrical Interference from Power Line to Gas Pipelines Part I: Computation Methods" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4 ,No.3,July 1989 pp. 1840-1846.
- [2] F.P. Dawalibi ,R.D.Southey " Analysis of Electrical Interference from Power Line to Gas Pipelines Part II: Parametric Analysis " IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5 ,No.1, January 1990 pp. 415-421.
- [3] W. von BaekmannW. Schwenk, and W.Prinz " Handbook of Cathodic Corosion Protection"Gulf Publishing Company Houston texas , 1997, p. 505-521.
- [4] BEE NET CO.,TLD. " Commissioning Test Procedure for COCO3 Transmission line Energized at 300 MW " COCO3 AC Mitigation Project Commissioning Test Procedure 08 May, 2000.

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 24

24th Electrical Engineering Conference (EECON-24)



Volume 2

สารบัญ

- ✓ วิศวกรรม (CVO)
- ✓ วิศวกรรม (E-I)
- ✓ วิศวกรรม (E-I) (DS)
- ✓ วิศวกรรม (E-I) (CP)



EECON

จัดโดย คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

22-23 พฤศจิกายน 2544

โทร : 0-2730-3300 โทรสาร : 0-2730-6905
<http://www.ladkrabang.com>

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตามแนวยาวเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ที่มีผลต่อแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่ใต้ดิน

Analysis of Longitudinal Electric Field due to High Voltage Transmissions Lines Affecting on Induced Voltage on Buried Natural Gas Pipeline.

พัฒนา อินทนิ ศิริวัฒน์ โพธิ์เวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร/โทรสาร: (02)326-9902 ต่อ 3518 E-mail: s2061134@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่ใต้ดินภายในระยะปลอดภัยของการเดินสาย(Right-of-Way) โดยที่แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันของสนามไฟฟ้าตามแนวยาว (Longitudinal Electric Field: LEF) ที่เปลี่ยนแปลงตามกระแสของสายส่ง ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ค่า LEF โดยแบ่งตามลักษณะรูปทรงของเสาส่ง ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปแบบของกราฟ LEF ต่อ กระแสเฟส พร้อมทั้งแสดงให้เห็นว่าระบบที่มีการส่งจ่ายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปสามารถลดค่า LEF ได้โดยการจัดลำดับของเฟสให้เหมาะสม และในการพิจารณาค่า LEF กับเสาส่งที่ใช้ภายในประเทศ คือเสาส่งของระบบ 69kV 115kV 230kV และ 500 kV พบว่าโครงสร้างเสาส่งในระบบ 500 kV ที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอน สร้างค่า LEF มากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอื่น

Abstract

An induced voltage at the buried natural gas pipeline can occur due to the effect of magnetic fields from high voltage transmission lines within the Right - of - Way (ROW). The Induced voltage is functions of the longitudinal electric field(LEF) which depends on the transmission line current. The paper presents the analysis of the LEF by configuration of tower . Results are showed in a form of LEF per phase current. It is found that transmission line systems consist of more than single circuits can reduce LEF by suitable of phase arrangement. Also consideration of LEF applied to realistic application of tower in Thailand such as 69kv, 115kV, 230kV and 500kV system are performed. The analysis shows that the horizontal 500kV towers generates the highest LEF compared with other configurations.

Keywords: Longitudinal Electric fields, Induce Voltage, High Voltage, Transmission Line

1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันมีการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติขนานไปตามแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายในระยะปลอดภัยการเดินสายไฟฟ้า ซึ่งโครงสร้างของท่อส่งก๊าซด้านในเป็นท่อเหล็กและด้านนอกมีฉนวนหุ้มท่อไว้ไม่ให้ท่อสัมผัสกับดินเพื่อป้องกันปัญหาการผุกร่อน ปัญหาที่ตามมา คือปัญหาการรบกวนของสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ท่อส่งก๊าซธรรมชาติ แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นก่อให้เกิดอันตรายถึงชีวิตแก่ผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวข้องกับการติดตั้ง การใช้งาน และการบำรุงรักษาท่อส่งก๊าซ แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่าของ LEF และค่าของความยาวของท่อส่งก๊าซ[1-5] ซึ่งค่า LEF เปลี่ยนแปลงตามค่าของกระแสในสายส่ง เหตุผลที่พิจารณาระบบเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในรูปแบบของ LEF แทนการพิจารณาจากค่าสนามแม่เหล็ก โดยตรง เนื่องจากการสร้างแบบจำลองโดยใช้กลไกของสนามแม่เหล็กยุ่งยากกว่าการสร้างแบบจำลองในรูปแบบของ LEF จากงานวิจัยของ J. Dabkowski และ M. Frazier ได้ทำการคำนวณหา LEF ที่เกิดขึ้นตามลักษณะของเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้งและในแนวนอนวงจรเดี่ยว[6,8] โดยใช้พารามิเตอร์ตามสภาวะแวดล้อมภายในประเทศนั้นๆ และในอุตสาหกรรมค่า LEF ที่ใช้ในการออกแบบการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซทำได้โดยการใช้อรรถาพินิตราฐาน[9] ซึ่งก่อให้เกิดค่าความผิดพลาดขึ้น ดังนั้นบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์หา LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยแบ่งตามลักษณะของเสาส่งที่ทำการพิจารณาออกเป็น 5 แบบ ซึ่งแสดงให้เห็นลักษณะการกระจายของ LEF ของเสาส่งแต่ละแบบ พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบค่า LEF ที่เกิดขึ้นตามลักษณะโครงสร้างของเสาส่งทั้ง 5 แบบ และแสดงให้เห็นว่าระบบที่มีการส่งจ่ายมากกว่าหนึ่งวงจรสามารถลดค่า LEF ได้โดยการจัดลำดับเฟสให้เหมาะสม ท้ายสุดของบทความได้นำค่าพารามิเตอร์ของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีการติดตั้งจริงในประเทศพิจารณาผลของ LEF โดยแบ่งตามระบบแรงดันการส่งจ่าย เพื่อนำผลที่ได้ไปประกอบในการพิจารณาในการออกแบบติดตั้งการวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติเพื่อให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นให้เป็นไปตามมาตรฐาน NACE กำหนด คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นต้องไม่เกิน

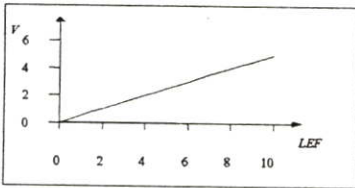
15 โวลท์ [7] เพื่อเป็นการป้องกันอันตรายที่เกิดขึ้นกับผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับ การติดตั้ง การใช้งาน และการบำรุงรักษาที่ส่งก๊าซเป็นหลัก

2. ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าตามแนวยาวกับแรงดันเหนี่ยวนำบนท่อส่งก๊าซ

เนื่องจากแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซที่ฝังอยู่ใต้ดินที่แนวท่อขนานกับสายส่งตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงจุดสิ้นสุดแนวท่อสามารถหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำ (V) ที่จุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดแนวท่อได้จาก [1]

$$V = \frac{LEF * Z_1 * L}{Z_1 + Z_2} \tag{1}$$

เมื่อกำหนดให้ ค่าอิมพีแดนซ์ที่จุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดแนวท่อมีค่าเท่ากัน ($Z_1 = Z_2$) พร้อมทั้งค่าความยาวท่อ (L) มีค่าคงที่สามารถหาค่าแรงดันเหนี่ยวนำต่อ 1หน่วยความยาวได้จากรูปที่ 1



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับ LEF

จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันเหนี่ยวนำกับ LEF เป็นเชิงเส้นจากความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า LEF เป็นปัจจัยหลักที่ก่อให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนท่อส่ง ดังนั้นบทความนี้จึงได้หยิบยกราค่า LEF มาพิจารณาตามลักษณะของเสาส่ง

3 สนามไฟฟ้าตามแนวยาว :LEF

ในการพิจารณาค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงที่เป็นปัจจัยในการทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่ใต้ดิน สามารถพิจารณาได้จากอนุกรมของคาร์สัน

$$LEF = I_A Z_A + I_B Z_B + I_C Z_C + I_{s1} Z_{s1} + I_{s2} Z_{s2} \tag{2}$$

LEF คือสนามไฟฟ้าตามแนวยาว $\left(\frac{V/km}{A}\right)$

I_A, I_B และ I_C คือกระแสสายส่ง (A)

I_{s1} และ I_{s2} คือกระแสของสายป้องกันฟ้าผ่า (A)

Z_A, Z_B และ Z_C คือมิววลอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งในแต่ละเฟสกับจุดที่พิจารณา (Ω)

Z_{s1} และ Z_{s2} คือมิววลอิมพีแดนซ์ของสายป้องกันฟ้าผ่าแต่ละเฟสกับจุดที่พิจารณา (Ω)

ค่า LEF ที่คำนวณได้จะให้ความถูกต้องที่ระยะระหว่างสายส่งถึงจุดที่พิจารณาไม่เกิน 150 เมตร[6] ซึ่งถือว่ามีความเพียงพอในการนำมาสมการมาใช้ในการพิจารณาหาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับท่อส่งก๊าซที่ฝังอยู่ภายในเขตปลอดภัยของการเดินสาย ในกรณีที่ไม่คิดผลของกระแสในสายป้องกันฟ้าผ่า

$$LEF = I_A Z_A + I_B Z_B + I_C Z_C \tag{3}$$

จากสมการที่3 แสดงให้เห็นว่าค่า LEF ที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับค่าของกระแสในสายส่งและค่ามิววลอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งกับจุดที่ทำการพิจารณา ดังนั้นในการพิจารณาจะแยกการพิจารณาออกเป็น 2 ส่วนคือการพิจารณาทางด้านกระแสของสายส่งและการพิจารณาค่าของมิววลอิมพีแดนซ์ได้ดังนี้

3.1 ลำดับกระแส (Current Sequence)

ในการพิจารณาผลของกระแสในระบบส่งจ่ายสามเฟสที่มีมุมเฟสห่างกันอยู่ 120 องศา สามารถแบ่งกระแสของสายส่งในแต่ละเฟสที่ต้องการพิจารณาออกเป็นกระแสองค์ประกอบย่อยๆตามหลักขององค์ประกอบสมมาตร (Symmetrical Component) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

กำหนดให้ $a = 1 \angle 120$ และ $1 + a + a^2 = 0$

I_0 คือ กระแสลำดับศูนย์ (Zero Sequence Current)

I_1 คือ กระแสลำดับบวก (Positive Sequence Current)

I_2 คือ กระแส ลำดับลบ (Negative Sequence Current)

3.2 คาร์สันมิววลอิมพีแดนซ์(Carson's Mutual Impedance)

ในการพิจารณาค่ามิววลอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับท่อส่งก๊าซที่ภายนอกมีฉนวนหุ้มและมีตัวนำอยู่ภายใน สามารถประยุกต์ใช้สมการของคาร์สัน ได้ดังนี้

$$Z_i = \frac{\mu\omega}{8} + j \frac{\omega\mu}{2\pi} \ln \frac{D_e}{D_i} \tag{5}$$

$$D_e = 660 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \text{ (m) ; f = ความถี่ (Hz)}$$

$$\omega = 2\pi f ; \mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m ;}$$

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน ($\Omega - m$)

i คือ A, B, and B

Z_i คือ มิววลอิมพีแดนซ์ระหว่างสายส่งกับท่อส่งก๊าซ (Ω)

D_i คือ ระยะทางจากสายส่งถึงท่อส่งก๊าซ (m)

จากสมการที่ 6 แสดงให้เห็นว่าค่ามิวชวลอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างสายส่งกับท่อน้ำฟ้า ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสายส่งกับท่อน้ำฟ้าของระบบส่งจ่าย และค่าความต้านทานจำเพาะของดินเป็นหลัก

3.3 ลำดับอิมพีแดนซ์ (Impedance Sequence)

ในระบบส่งจ่ายโดยทั่วไปเป็นการส่งจ่ายแบบ 3 เฟส ดังนั้นในการคำนวณหาค่ามิวชวลอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสของสายส่งที่กระทำกับจุดที่ต้องการพิจารณาจำเป็นต้องคำนึงถึงลำดับเฟสด้วยจาก สมการที่ 5 พิจารณาให้อยู่ในรูปของมิวชวลอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสในแต่ละลำดับได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Z_0 \\ Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{bmatrix} \tag{6}$$

- Z_0 คือ มิวชวลอิมพีแดนซ์เนื่องจากกระแสลำดับศูนย์
- Z_1 คือ มิวชวลอิมพีแดนซ์เนื่องจากกระแสลำดับบวก
- Z_2 คือ มิวชวลอิมพีแดนซ์เนื่องจากกระแสลำดับลบ

จากสมการที่ 6 แสดงให้เห็นค่าความสัมพันธ์ของมิวชวลอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสลำดับศูนย์,กระแสลำดับบวก และกระแสลำดับลบ จากสมการ 3 และ 4 สามารถหาค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสของสายส่งในแต่ละลำดับได้ดังสมการที่ 7

$$LEF = \begin{bmatrix} Z_A \\ Z_B \\ Z_C \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

จากสมการที่ 7 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของ LEF ที่เกิดขึ้นให้อยู่ในรูปของลำดับต่างๆได้ดังนี้

$$LEF = I_0 Z_0 + I_1 Z_1 + I_2 Z_2 \tag{8}$$

สมการที่ 8 แสดงให้เห็นว่าค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าสามเฟสประกอบด้วยค่าของ LEF ในลำดับศูนย์ ลำดับบวก และลำดับลบเพื่อนำสมการดังกล่าวมาพิจารณาค่า LEF เมื่อเกิดสภาวะสมดุลและไม่สมดุลขึ้นที่ระบบไฟฟ้า

3.4 กระแสสมดุล (Balance Phase Current)

จากสมการที่ 8 ในสภาวะสมดุลค่าของ LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสลำดับศูนย์และ LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสลำดับลบมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากค่ากระแสลำดับลบ และค่าของกระแสลำดับศูนย์มีค่าเท่ากับศูนย์ดังนั้นค่า LEF ที่เกิดขึ้นในกรณีกระแสสมดุลจะเกิดขึ้นเฉพาะ LEF เนื่องจากกระแสลำดับบวกเท่านั้น ซึ่งสามารถหาค่า LEF ได้ดังนี้

$$LEF = I_1 Z_1 \tag{9}$$

ในการพิจารณาค่าของ LEF ที่ระยะทางออกจากแนวสายส่งในแนวตั้งฉากพบว่าค่าของ $Z_A = Z_B = Z_C$ จะทำให้พจน์ขวาของสมการที่ 9 มีค่าเท่ากับศูนย์และทำให้ค่าของ LEF มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย

3.5 กระแสไม่สมดุล(Unbalance Phase Current)

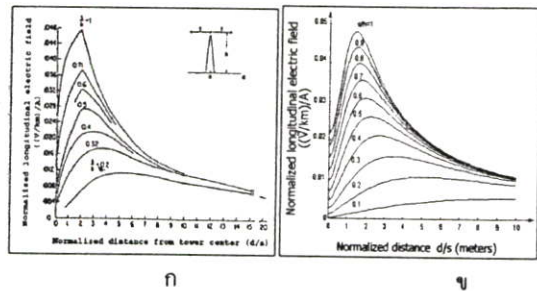
ในกรณีที่เกิดความไม่สมดุลขึ้นที่ระบบ สามารถพิจารณาค่า LEF ที่ระยะไม่เกิน 150 เมตรให้ใช้สมการที่ 8 ในการพิจารณาจะให้ค่าที่ถูกต้องมาก ที่ระยะทางระหว่างสายส่งกับจุดที่พิจารณาห่างหลายร้อยเมตรค่าของ $Z_A = Z_B = Z_C$ ทำให้ค่าของ LEF ลำดับบวกและลำดับลบเข้าใกล้ศูนย์สามารถหาค่า LEF ได้จาก

$$LEF = I_0 Z_0 \tag{10}$$

4 การวิเคราะห์ค่า LEF

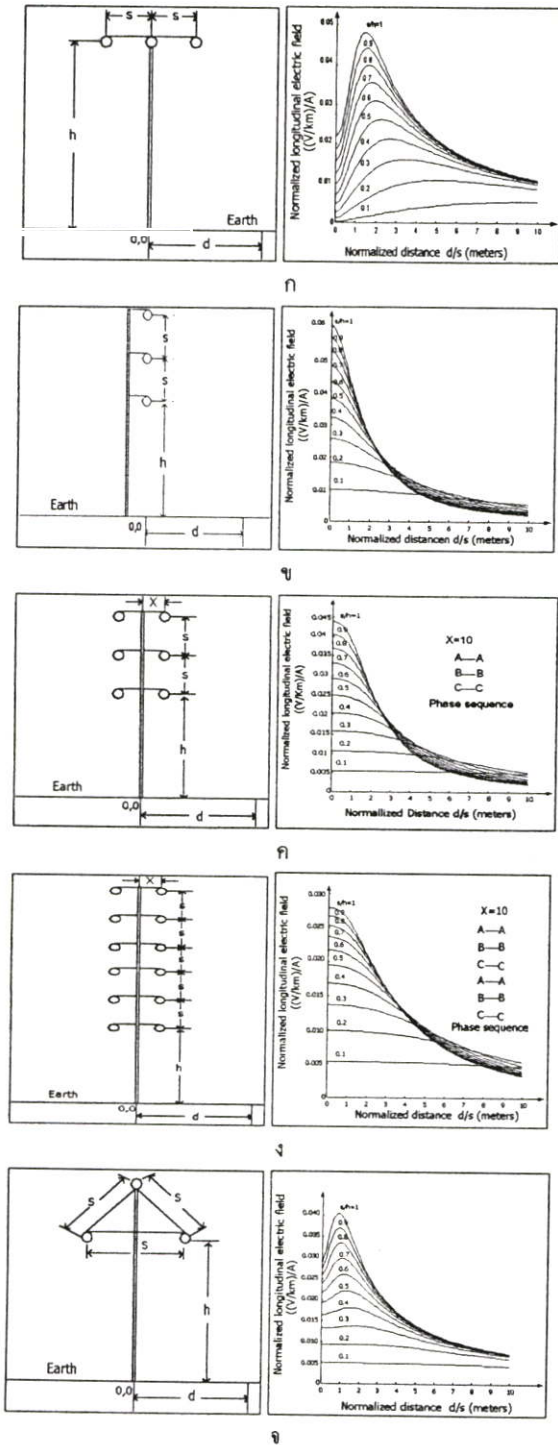
4.1 การพิจารณา LEF ตามลักษณะโครงสร้างเสาตั้ง

ในการหาค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งจะพิจารณาเฉพาะระบบส่งจ่ายแบบสมดุลดังนั้นจะใช้สมการที่ 9 ในการคำนวณหาค่า LEF เพื่อแสดงให้เห็นว่าสมการที่นำมาใช้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบได้จริง โดยนำค่า LEF ที่ได้จากสมการที่ 9 เปรียบเทียบกับค่า LEF ที่ใช้ในการออกแบบในอุตสาหกรรม โดยกำหนดให้โครงสร้างของเสาตั้งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวนอนจะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายของ LEF มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ถ้าพิจารณาที่จุด d/s คือระยะจากกึ่งกลางเสาถึงจุดที่พิจารณาต่อระยะระหว่างตัวนำเฟสถึงตัวนำเฟส ที่จุดเดียวกันค่า LEF ที่เกิดขึ้นจะมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ก) ค่า LEF มาตรฐาน ข) ค่า LEF ที่ได้จากสมการที่ 9

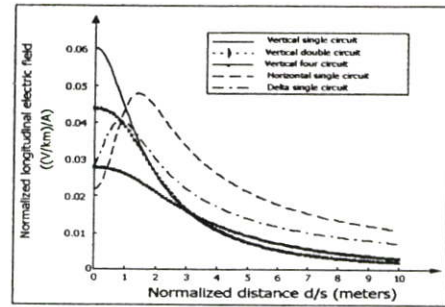
จากรูปที่ 2 แสดงการเปรียบเทียบค่า LEF ที่ใช้ในการออกแบบในอุตสาหกรรม(9) กับ LEF ที่ได้จากสมการที่ 9 จากนั้นได้นำสมการที่ 9 มาพิจารณาค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากลักษณะของเสาตั้งโดยการแบ่งตามลักษณะโครงสร้างของเสาตั้งแบ่งออกได้เป็น 5 แบบ ดังรูปที่ 3 กำหนดให้ $x = 10m$. และค่าความต้านทานจำเพาะของดิน $100 \Omega - m$. ระยะทางจากสายส่งถึงสายส่งต่อความสูงของเสาตั้ง(s/h) และค่าระยะทางจากเสาตั้งถึงแนวท่อน้ำฟ้าต่อระยะจากสายส่งถึงสายส่ง (d/s) เปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3 ลักษณะของเสาส่ง และการกระจาย LEF ของเสาส่งแต่ละแบบ

จากการทำนอมอลไลซ์สมการคือทำให้ค่าของ LEF ต่อกระแสฟลักซ์กราฟที่ได้แสดงดังรูปที่ 3) ก ข ค ง และ จ จะเห็นว่าค่า LEF ที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตามลักษณะโครงสร้างเสาส่ง จำนวนวงจรในการส่งจ่าย จากผลการคำนวณ LEF เมื่อนำมาเปรียบเทียบตามลักษณะ

ของเสาส่งโดยกำหนดให้ความสูงของเสาส่ง(h) ระยะระหว่างคาน้ำ(s) และกระแสในสายส่งเท่ากัน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 เปรียบ LEF ตามลักษณะโครงสร้างเสาส่ง

ผลจากการเปรียบเทียบค่า LEF แสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นว่าลักษณะของเสาส่งที่มีการจัดวางคาน้ำในแนวตั้งวงจรถวาย LEF มากกว่าลักษณะของเสาส่งที่มีการจัดวางคาน้ำในแนวนอนหรือแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าวงจรถวายและเมื่อทำการเพิ่มจำนวนวงจรของระบบส่งจ่ายค่า LEF จะมีค่าลดลง

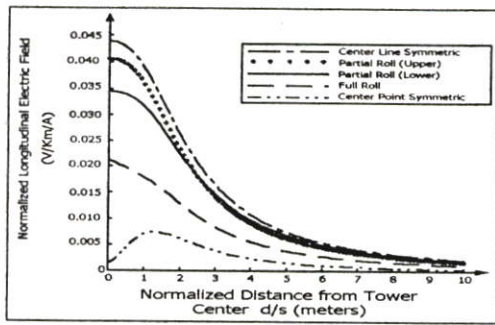
4.2 การพิจารณา LEF ตามการจัดลำดับเฟสของสายส่ง

ระบบที่มีการส่งจ่ายตั้งแต่ 2 วงจรขึ้นไปการจัดลำดับเฟสจะส่งผลกระทบต่อค่า LEF ที่เกิดขึ้น ดังนั้นในบทความนี้จะพิจารณาเฉพาะระบบส่งจ่ายที่มีการส่งจ่ายแบบ 2 วงจร เพื่อแสดงให้เห็นว่าการจัดลำดับเฟสจะส่งผลต่อค่า LEF ที่เกิดขึ้น โดยการแบ่งการจัดลำดับเฟสของระบบส่งจ่ายออกเป็น 5 แบบ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจัดลำดับเฟสสายส่ง

	ลำดับเฟส (Phase sequence)					
Center Line Symmetric	A—A	A—A	B—B	B—B	C—C	C—C
	C—C	B—B	C—C	A—A	B—B	A—A
	B—B	C—C	A—A	C—C	A—A	B—B
Partial Roll (Lower)	A—A	B—B	C—C			
	B—C	A—C	A—B			
	C—B	C—A	B—A			
Partial Roll (Upper)	A—B	A—C	B—C			
	B—A	C—A	C—B			
	C—C	B—B	A—A			
Full Roll	A—B	A—C	B—C	B—C	C—A	C—A
	B—C	C—A	A—B	C—A	A—B	B—C
	C—A	B—C	C—A	A—B	B—C	A—B
Center Point Symmetric	A—C	A—B	B—C			
	B—B	C—C	A—A			
	C—A	B—A	C—B			

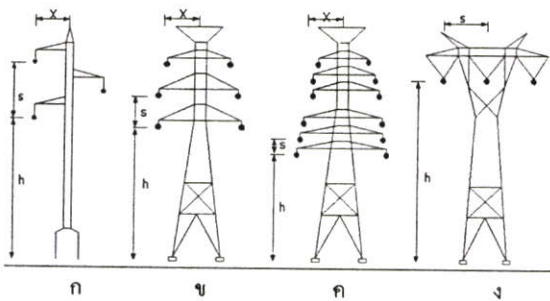
จากการจัดลำดับเฟสของระบบส่งจ่ายผลที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 5 พบว่าการจัดลำดับเฟสแบบ Center line symmetric ก่อให้เกิดค่า LEF สูงสุดและการจัดลำดับเฟสแบบ Center point symmetric เป็นระบบที่ก่อให้เกิดค่า LEF ต่ำที่สุดเนื่องจากสนามแม่เหล็กบางส่วนเกิดการหักล้างกัน ดังนั้นในการคำนวณหาค่า LEF จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการพิจารณาการจัดลำดับเฟสของการส่งจ่ายด้วย



รูปที่ 5 LEF ที่เปลี่ยนแปลงตามการจัดลำดับเฟส

5 การวิเคราะห์ค่า LEF กับเสาสูงที่มีการใช้งานในประเทศไทย

จากสมการที่ได้นำมาคำนวณหา LEF ที่เกิดขึ้นจากลักษณะของเสาสูงที่มีการติดตั้งจริงในประเทศไทย ซึ่งลักษณะโครงสร้างของเสาสูงแสดงดังรูปที่ 6 ค่าความสูงของเสาสูงที่ใช้ในการคำนวณ คือความสูงจากพื้นดินถึงตัวนำเฟสของสายส่งต่ำสุด ในการคำนวณไม่คิดถึงผลของระยะหย่อนของสายส่ง และผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระแสในสายป้องกันฟ้าผ่า



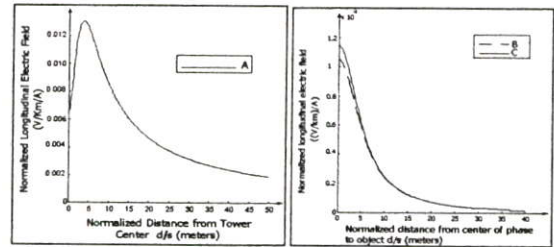
รูปที่ 6 ลักษณะของเสาสูงที่ใช้ในประเทศไทย

โดยค่าพารามิเตอร์ของเสาสูงแสดงดังตารางที่ 2 ในการคำนวณหา ค่า LEF ที่เกิดขึ้นกำหนดให้ค่ากระแสที่ไหลในสายส่ง 1 แอมป์ และระบบที่มีการส่งจ่ายตั้งแต่ 2 วงจรขึ้นไปได้มีการจัดลำดับเฟสเป็นแบบ Center point symmetric ตามลักษณะโครงสร้างเสาสูงที่ติดตั้งจริง

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของเสาสูงในประเทศไทย

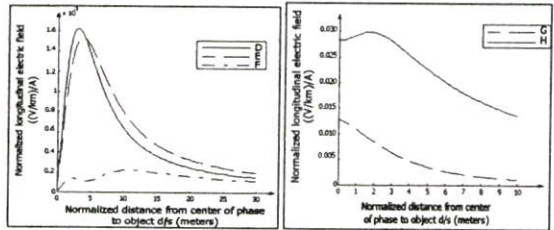
ระบบไฟฟ้า	ชนิดของเสา	ลักษณะของเสาสูง	ความสูงเสา (m)	ระยะ S (m)	ระยะ X เหนือ (m)	กราฟ LEF
69 kV	SP	รูปที่ 6 ก	10.1	2.65	2	A
115 kV	DA1	รูปที่ 6 ข	17.95	3.4	2.85	B
	WA1	รูปที่ 6 ข	20.91	4.2	3.43	C
230 kV	DQA1	รูปที่ 6 ข	27.45	7.3	5.78	D
	WA1	รูปที่ 6 ข	26.1	5.5	4.15	E
	QWA1	รูปที่ 6 ค	26.1	5.5	5.84	F
500 kV	DL,DT60,DM,DH DT20,DT40 DT60	รูปที่ 6 ข	29	11	11.21	G
	SLV,SMV,SHV,T4 0,T60 ATR	รูปที่ 6 ง	32.5	10.65	-	H

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ของเสาสูงโดยแบ่งตามระดับแรงดันที่ส่งจ่าย และชนิดของเสาสูงที่มีใช้อยู่ภายในประเทศ จะเห็นได้ว่าการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ระดับแรงดันเดียวกันค่าความสูงของเสาสูง ค่าระยะห่างระหว่างเฟส และระยะจากจุดกึ่งกลางของเสาสูงถึงตัวนำเฟสมีค่าใกล้เคียงกัน ที่ระดับแรงดันในการส่งจ่ายมีค่าเพิ่มขึ้น ความสูงของเสาสูง ระยะห่างระหว่างเฟส และระยะจากจุดกึ่งกลางของเสาสูงถึงตัวนำเฟส จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับสายส่ง อุปกรณ์หรือสิ่งมีชีวิตที่อยู่ภายใต้สายส่ง



ก

ข



ค

ง

รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่า LEF ตามลักษณะเสาสูงภายในประเทศ

จากค่าพารามิเตอร์ของเสาสูงเมื่อนำมาวิเคราะห์ค่า LEF ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 7 จากการศึกษา LEF ที่เกิดขึ้นตามลักษณะของโครงสร้างเสาสูงในระบบที่มีพิกัดแรงดันแตกต่างกันสามารถพิจารณาได้ดังนี้

ระบบ 69 kV	เป็นระบบที่โครงสร้างเสาสูงมีการจัดวางตัวนำเป็นแบบสามเหลี่ยม ค่าของ LEF ที่เกิดขึ้นสูงสุดอยู่ในช่วง 3-4 เท่าของระยะระหว่างเฟสแสดงดังรูป 7ก).
ระบบ 115 kV	เสาสูงชนิด WA1 สร้าง LEF สูงกว่า DA1 เนื่องจากค่า อัตราส่วนระหว่าง ระยะระหว่างเฟสต่อความสูงของเสาสูง (s/h) ของเสาสูง WA1 มีค่ามากกว่า DA1 ดังรูป 7ข).
ระบบ 230 kV	เสาสูงชนิด DQA1 สร้าง LEF สูงกว่าโครงสร้างเสาสูงชนิด WA1 และ QWA1 เนื่องจากโครงสร้างเสาสูง WA1 มีค่า s/h ต่ำกว่า DQA1 และ QWA1 มีจำนวนวงจรมากกว่า DQA1 เมื่อวงจรในการส่งจ่ายมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า LEF ลดลงเนื่องจากค่าระยะทางเฉลี่ยระหว่างเฟสถึงจุดที่พิจารณา มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ค่ามิชวลทิมทีแดนซ์มีค่าลดลงทำให้ค่า LEF ลดลงดังแสดงดังรูป 7ค).

ระบบ 500 kV	เสาส่งที่มีการจัดวางในแนวขนานคือเสาส่งชนิด SLV SMV SHV ,T40T60 และ DTR ก่อให้เกิดค่า LEF สูงกว่าเสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง คือเสาส่งชนิด DL,DM,DT40,DH,DT20 และDT60 แสดงดังรูปที่ 7)ง. เนื่องจากมีการจัดลำดับเฟสเพื่อให้เกิดค่า LEF ที่เกิดขึ้นมีการหักล้างกัน เมื่อทำการพิจารณาโดยรวมระบบ 500 kV ที่มีการจัดวางตัวนำในแนวขนานจะก่อให้เกิดค่า LEF สูงกว่าระบบอื่นๆ
------------------------	--

6 บทสรุป

จากการวิเคราะห์ค่า LEF ที่เกิดขึ้นเนื่องจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง แสดงให้เห็นว่า LEF ขึ้นอยู่กับลักษณะของเสาส่งเป็นหลัก จากการวิเคราะห์พบว่าความสูงของเสาส่ง กระแสในการส่งจ่าย และระยะระหว่างเฟสมีค่าเท่ากัน เสาส่งที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้งวางระเคียวก่อให้เกิดค่า LEF สูงสุด ในระบบที่มีการส่งจ่ายตั้งแต่สองวงจรขึ้นไปสามารถลดค่า LEF ได้โดยการจัดลำดับเฟสเป็นแบบ Center point symmetric และจากการวิเคราะห์ค่า LEF กับเสาส่งที่ใช้ในประเทศ แสดงให้เห็นว่าลักษณะของเสาส่งระบบ 500 kV ที่มีการจัดวางสายส่งในแนวขนานจะสร้างค่า LEF สูงกว่าเสาส่งในระบบ 500 kV ที่มีการจัดวางตัวนำในแนวตั้ง และเสาส่งในระบบอื่นๆ จากงานที่นำเสนอจะเป็นประโยชน์สำหรับวิศวกรที่ทำการออกแบบติดตั้งท่อส่งก๊าซธรรมชาติ เพื่อควบคุมแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ให้เป็นไปตามมาตรฐาน NACE RP0177-83 Item No.53039 และลดอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ทำงานเกี่ยวข้องกับการติดตั้งท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

7 กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท บี-เนท จำกัด และ การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย (PTT) ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการตรวจวัดแรงดันเหนี่ยวนำ และ คุณ พิทักษ์ ปิ่นอนงค์ วิศวกรระดับ 7 กฟผ. เอื้อเฟื้อข้อมูลลักษณะโครงสร้างเสาส่งที่มีการติดตั้งจริงภายในประเทศไทย

8 เอกสารอ้างอิง

- [1] Allen Taflove and John Dabkowski "Preduce Method for Buried Pipeline Voltages due to 60 Hz AC Induction coupling PartI-Analysis" *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol.PAS-98, No.3, May/June 1979 ,pp.780-787
- [2] Allen Taflove and John Dabkowski "Preduce Method for Buried Pipeline Voltages due to 60 Hz AC Induction coupling PartII-Field Test Verification" *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol.PAS-98, No.3, May/June 1979 ,pp.788-794
- [3] Kent C. Jaffa, John B.Stewart "Magnetic Field Induction from Overhead Transmission and Distribution power Lines on Buried irrigation pipelines" *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol.PAS-100, No.3, March 1981 ,pp.990-1000
- [4] Kent C. Jaffa "Magmetic Field Induction from Overhead Transmisson and Distribution Power Lines on Parallel Fences" *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol.PAS-100, No.4, April 1981 ,pp.780-787
- [5] พัฒนา อินทนิ, สุเมธ เจนองกต, นราคน ไขติววรรณพร และ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล "การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นบนท่อส่งก๊าซธรรมชาติเนื่องจากสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูง ", *การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23* , มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ หน้า 45 – 48 พฤศจิกายน 2543
- [6] John Dabkowski "The Calculation of Magnetic Coupling from Overhear Transmission Lines" *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol.PAS-100, No.8, August 1981 pp.3850-3860.
- [7] National Association of Corrosion Engineers"Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structure and Corrosion Control Systems" *NACE Standard* RP0177-83 1983
- [8] M. Frazier "Power Line-Induce AC Potential on Natural Gas Pipelines for Complex Rights-of-Way Configuration Volume1: Engineering Analysis " *EPR/A.G.A Project* 742-2,EL-3106PR-151-127 May/ Novemer, 1983
- [9] BEE NET CO.,TLD. " Commissioning Test Procedure for COCO3 Transmission line Energized at 300 MW " COCO3 AC Mitigation Project Commissioning Test Procedure 08 May,2000.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นายพัฒนา อินทนิ จบการศึกษา วศ.บ. ไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2540 ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยด้านการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง.



นายศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล จบการศึกษา วศ.บ. ไฟฟ้า และ วศ.ม. ไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นรอง

ศาสตราจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, โดยทำงานวิจัยด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง,การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลัง,การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังและคุณภาพของระบบไฟฟ้า.

ประวัติผู้เขียน



นายพัฒนา อินทนิ เกิดเมื่อวันที่ 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2517 ที่อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้ากำลัง จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ปีการศึกษา 2540

ปีการศึกษา 2541 - ปลายปี พ.ศ. 2542 เข้าทำงานในตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

ปี พ.ศ. 2543 เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้า โดยดูแลงานในด้านการตรวจสอบและการวิเคราะห์การใช้พลังงานของอาคารควบคุม ที่ บริษัท ฮันนี่เวลต์ ซิสเต็มส์ (ไทยแลนด์) จำกัด