

การเปรียบเทียบผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้
สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

THE COMPARISON OF ELECTROMAGNETIC FIELD EFFECTS WHICH
INTERFERE TO ENVIRONMENT NEAR THE HVAC AND HVDC
TRANSMISSION LINE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2548

ISBN 974-15-1723-8

การเปรียบเทียบผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้
สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

THE COMPARISON OF ELECTROMAGNETIC FIELD EFFECTS WHICH
INTERFERE TO ENVIRONMENT NEAR THE HVAC AND HVDC
TRANSMISSION LINE



นุชิต ทิพย์เจริญ
NUCHIT TIPJAROEN

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 60874
วัน,เดือน,ปี..... - 6 ก.ค. 2549

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2548

ISBN 974-15-1723-8

**THE COMPARISON OF ELECTROMAGNETIC FIELD EFFECTS WHICH
INTERFERE TO ENVIRONMENT NEAR THE HVAC AND HVDC
TRANSMISSION LINE**



**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**

2005

ISBN 974-15-1723-8



COPYRIGHT 2005

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเปรียบเทียบผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อ สิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	
นักศึกษา	นายนุชิต	ทิพย์เจริญ
รหัสนักศึกษา	43061006	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า	
พ.ศ.	2548	
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศิริวัฒน์	โพธิเวชกุล

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเหนือพื้นดิน ตลอดจนผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้า โดยเลือกวิเคราะห์จากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 กิโลโวลต์ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 กิโลโวลต์ซึ่งเป็นระดับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในประเทศไทย และเนื่องจากคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระแสสลับมีความถี่ต่ำ จึงสามารถแยกวิเคราะห์เป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก รวมทั้งผลกระทบที่เกิดขึ้นแยกออกจากกันได้ โดยอาศัยโปรแกรมที่สร้างขึ้นจาก MATLAB มาใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสอง โดยพัฒนาขีดความสามารถของโปรแกรมให้สามารถแสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในรูปแบบ 3 มิติ และนำเสนอผลการวิเคราะห์ทางด้านกราฟฟิคให้แสดงกราฟแบบพื้นผิวและเส้นโครงร่าง หลังจากนั้นนำค่าสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่ได้นำไปสู่การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของการเหนี่ยวนำบนวัตถุขนาดใหญ่ ที่อยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง และเปรียบเทียบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าทั้งสองระบบสำหรับการวัดความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นจะสามารถพิจารณาได้จากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แรงดันไฟฟ้า และพลังงานสะสมที่เกิดจากการที่ร่างกายคนเข้าไปสัมผัสวัตถุขนาดใหญ่ภายใต้การวิเคราะห์ในเงื่อนไขต่าง ๆ สุดท้ายนำเสนอการศึกษาการลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเพื่อใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อไป

Thesis Title THE COMPARISON OF ELECTROMAGNETIC FIELD EFFECTS
WHICH INTERFERE TO ENVIRONMENT NEAR THE HVAC AND
HVDC TRANSMISSION LINE

Student Mr. Nuchit Tipjaroen

Student ID. 43061006

Degree Master of Engineering

Programme Electrical Engineering

Year 2005

Thesis Advisor Assoc. Prof. Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

This thesis presents an analysis of electromagnetic field effects which generated from HVAC and HVDC lines near overhead line area. The study will be focused on 500 HVAC and 300 HVDC. Transmission systems, which are currently the highest voltage level in Thailand. Because of low frequency range. The effects from electric and magnetic field can be separately analyzed, A program developed from MATLAB will be used to analyze the electric field and magnetic field from high voltage transmission line. Abilities of the program are enhanced in order to perform the analysis of electric and magnetic fields in 3 Longitudinal Profile to, and present the result of field intensities in form of surface graphic and contour graphic. The values of electric and magnetic field, then lead to the analysis of the induced effect on large object near the transmission lines. The comparison between HVDC and HVAC lines when some part of human body touched large objects under high voltage transmission line Investigated. The degree of effect are considered in term of induced current , voltage and stored energy for various condition. Finally, the study provides suggestion to reduce the electromagnetic field intensity as solution for this problem.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำสั่งสอนจากท่าน รศ. ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ตลอดระยะเวลาที่ศึกษาท่านอาจารย์ได้ช่วยและอธิบายถึงการมองและการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมให้กับผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณอย่างสูง คุณ พิทักษ์ ปิ่นอนงค์ กองวิศวกรรมสายส่ง ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ข้อมูลทั้งหมดเกี่ยวกับระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับ และ สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ตลอดจนคำที่ปรึกษาและการแก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยมิได้เห็นแก่เหน็ดเหนื่อยและราคาอันใจ

ขอขอบพระคุณอย่างสูง ท่านอาจารย์ นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และ STAFF ทุกท่าน(เอ๊ะ,นัท) และอีกหลายคนที่ไม่ได้เอ่ยชื่อ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยในการแนะนำและให้คำที่ปรึกษาในการทดสอบผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าทางปฏิบัติ

ขอขอบคุณ คุณคูสิต คงจิตงาม , คุณอดิกร เสรีพัฒนานนท์ , คุณพงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ , คุณทศพร พรหมสิทธิ์ , คุณรุ่งโรจน์ สมบูรณ์ทรัพย์ , คุณจักรพงษ์ กลิ่นสะอาด ในห้อง STAFF ทุกท่านที่คอยเป็นกำลังใจและช่วยเหลือให้ผู้วิจัยเสมอมา ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง มหาวิทยาลัยเวสเทิร์นที่ให้ใช้ในการทดสอบผลกระทบ

สุดท้ายขอขอบคุณาคีทั้งหมดให้กับ บิคา มาร์ดา ที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนให้ผู้วิจัย ได้มีความรู้และจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ

นุชิต ทิพย์เจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตการศึกษา.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
บทที่ 2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง.....	6
2.2.1 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ.....	6
2.2.2 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....	10
2.3 สนามแม่เหล็กสายส่งไฟฟ้าแรงสูง.....	17
2.3.1 สนามแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ.....	17
2.3.2 สนามแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง.....	19
บทที่ 3 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	20
3.1 บทนำ.....	20
3.2 โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	20
3.2.1 ข้อมูลอินพุต (Input Data).....	20
3.2.2 โปรแกรมคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การแสดงผล (Output Data).....	31
3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม.....	39
3.3.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ	39
3.3.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	43
3.4 บทสรุป	46
บทที่ 4 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	47
4.1 บทนำ	47
4.2 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสูงสุด.....	48
4.3 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับ	48
4.3.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV.....	49
4.3.2 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด.....	50
4.4 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ตำแหน่งดักทองช้าง.....	52
4.5 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า.....	59
4.5.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว.....	60
4.5.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่.....	62
4.6 สายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV.....	65
4.6.1 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด.....	66
4.6.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ตำแหน่งดักทองช้าง....	68
4.7 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า กระแสตรง.....	76
4.7.1 แบบ โม โน โพล่า (Monopolar).....	76
4.7.2 แบบ ไบ โพล่า (Bipolar).....	78
4.7.3 สนามแม่เหล็กกระแสตรง.....	82
4.8 การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณสายส่งไฟฟ้า 500 kV.....	84
4.9 บทสรุป.....	87

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลกระทบจากสนามไฟฟ้า	88
5.1 กล่าวนำ	88
5.2 ผลกระทบของสนามไฟฟ้ากับวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง.....	88
5.2.1 ภายใต้อายุสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ.....	88
5.2.2 ภายใต้อายุสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....	105
5.3 การทดสอบผลกระทบจากการเหนี่ยวนำทางปฏิบัติ.....	122
5.3.1 โมเดลที่ใช้ในการทดสอบ.....	122
บทที่ 6 การลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	143
6.1 กล่าวนำ.....	143
6.2 การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	143
6.2.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ.....	143
6.2.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....	164
6.2.3 การจัดวางตัวนำ.....	171
6.2.4 การจัดการ โหลด.....	173
6.2.5 การชิลด์.....	175
6.3 บทสรุป.....	177
บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	178
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	178
7.1.1 โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก.....	178
7.1.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	178
7.1.3 ผลกระทบจากสนามไฟฟ้า.....	180
7.1.4 สนามแม่เหล็ก.....	180
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	181

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	182
ภาคผนวก.....	183
ภาคผนวก ก ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Corona and Field Effect 230 kV.....	184
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Corona and Field Effect 500 kV.....	189
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Corona and Field Effect 230 kV.....	194
ภาคผนวก ง EPRI Comment on the IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Electromagnetic Field, 0 to 3 kHz(2002).....	201
ภาคผนวก จ การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ระบบต่าง ๆ ของสนามไฟฟ้า กระแสตรง.....	209
ภาคผนวก ฉ การเปรียบเทียบผลการทดสอบการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้า กระแสตรงทางปฏิบัติ.....	214
ภาคผนวก ช บทความที่ได้รับตีพิมพ์.....	233
ประวัติผู้เขียน.....	240

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ระดับโคโรน่าสำหรับสภาวะอากาศ.....15
3.1	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว.....31
3.2	ตัวอย่างผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่ง 300 kV HVDC (MONOPOLAR)36
3.3	ข้อมูลสายส่งไฟฟ้า 230 kV วงจรคู่.....41
4.1	พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด.....50
4.2	ผลการวิเคราะห์สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....52
4.3	ผลการวิเคราะห์สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....56
4.4	พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด.....67
4.5	ผลการวิเคราะห์สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV (MONOPOLAR).....68
4.6	การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กกระแสตรง+300 kV (BIPOlar).....72
4.7	ค่าภาระโหลดของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยว.....86
4.8	ค่าภาระโหลดของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่.....86
4.9	ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด.....87
5.1	สมการพื้นที่สมมูลย์ของบ้านพักอาศัย.....92
5.2	แสดงการคำนวณค่ากระแสเหนี่ยวนำบนรถบรรทุกที่สนามไฟฟ้าค่าต่าง ๆ103
5.3	แสดงการคำนวณค่ากระแสชอตเซอร์กิตบนรถบรรทุกภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....118
5.4	แสดงการคำนวณค่ากระแสชอตเซอร์กิตบนรถบรรทุกภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....119
5.5	แสดงการคำนวณพารามิเตอร์บนรถบรรทุกภายใต้สายส่งไฟฟ้ากระแสตรง.....121
5.6	การทดสอบที่ระยะเพลทที่ระยะ 40 ซม.....124
5.7	การทดสอบที่ระยะเพลทที่ระยะ 50 ซม.....125
5.8	การทดสอบที่ระยะเพลทที่ระยะ 60 ซม.....126
5.9	การทดสอบวัดรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 40 ซม.....128
5.10	การทดสอบวัดรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 50 ซม.....129
5.11	การทดสอบวัดรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 60 ซม.....130
5.12	การทดสอบเพลทที่ระยะ 40 ซม.....132

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.13 การทดสอบเพลาทที่ระยะ 50 ซม.....	133
5.14 การทดสอบเพลาทที่ระยะ 60 ซม.....	134
5.15 การทดสอบวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 40 ซม.....	135
5.16 การทดสอบวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 50 ซม.....	136
5.17 การทดสอบวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 60 ซม.....	137
5.18 เปรียบเทียบผลกระทบเมื่อบ้านพักอาศัยอยู่ภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....	139
5.19 เปรียบเทียบผลกระทบเมื่อรถบรรทุกอยู่ภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง มีพื้นที่สมมูลย์ (s)=123.12 m ²	141
6.1 รูปแบบของการจัดวางตัวนำและเฟสของเสาไฟฟ้า [2].....	144
7.1 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามข้อกำหนดของ กฟผ. และ การวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB.....	179
7.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง สูงสุดและการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB.....	179

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะของปัญหาที่พิจารณา.....	1
2.1 การคำนวณสนามไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวิธีสมมุติประจุ (ImageCharge).....	8
2.2 ลักษณะของไอออนที่กระจายรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบ ไบโพล่า.....	11
2.3 ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงตามวิธีของ HVTRC.....	12
2.4 การคำนวณสนามไฟฟ้ากระแสตรง โดยวิธีสมมุติประจุ (ImageCharge).....	13
2.5 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ.....	17
3.1 หน้าต่างแรกของโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้า กระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....	20
3.2 ตัวแปรแสดงรายละเอียดของสายตัวนำไฟฟ้าและตำแหน่งการวางสายส่งไฟฟ้า แรงสูงกระแสสลับ ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า.....	21
3.3 ตัวแปรแสดงรายละเอียดของสายตัวนำไฟฟ้าและตำแหน่งการวางของสายส่งในการ วิเคราะห์สนามแม่เหล็กทั้งสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและกระแสตรง.....	21
3.4 ตัวแปรแสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเมื่อคิดผลของโคโรน่า ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง.....	21
3.5 โพลีชาร์ตการทำงานของ โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้า กระแสสลับ 2 มิติ.....	23
3.6 โพลีชาร์ตการทำงานของ โปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า กระแสสลับ 3 มิติ.....	24
3.7 โพลีชาร์ตการทำงานของ โปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า กระแสสลับ 2 มิติ.....	25
3.8 โพลีชาร์ตการทำงานของ โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้า กระแสตรง 3 มิติ.....	26
3.9 โพลีชาร์ตการทำงานของ โปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้า กระแสตรง 2 มิติ.....	27
3.10 โพลีชาร์ตการทำงานของ โปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า กระแสตรง 3 มิติ.....	28
3.11 โพลีชาร์ตการทำงานของ โปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า กระแสตรง 2 มิติ.....	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 โพลีชาร์ตการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า กระแสตรง 3 มิติ.....	30
3.13 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	34
3.14 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็กกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	34
3.15 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสสลับ 3 มิติ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	35
3.16 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสสลับ 3 มิติ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	35
3.17 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV แบบ MONOPOLAR.....	37
3.18 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็กกระแสตรง 300 kV แบบ MONOPOLAR.....	38
3.19 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรง 3 มิติ 300 kV แบบ MONOPOLAR.....	38
3.20 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็กกระแสตรง 3 มิติ.....	39
3.21 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่าง MATLAB กับ Corona and Field Effect Program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV (วงจรคู่) DLTOWER.....	40
3.22 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่าง MATLAB กับ Corona and Field Effect Program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV (วงจรคู่) DLTOWER.....	40
3.23 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่าง MATLAB กับ Corona and Field Effect Program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV (วงจรคู่) DLTOWER.....	42
3.24 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กระหว่าง MATLAB กับ Corona and Field Effect Program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV (วงจรคู่) DLTOWER.....	43
3.25 ผลของสนามไฟฟ้ากระแสตรง แบบ Bipolar ± 300 kV.....	44
3.26 ผลของสนามไฟฟ้ากระแสตรง แบบ Monopolar 300Kv ของบริษัท TESHMONT.....	44
3.27 ผลของสนามไฟฟ้ากระแสตรง แบบ Bipolar ± 300 kV ของ MATLAB PROGRAM (จำลอง).....	45
3.28 ผลของสนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Bipolar ± 300 kV ของบริษัท TESHMONT (จำลอง).....	45
3.29 ผลของสนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Monopolar ± 300 kV ของบริษัท TESHMONT (จำลอง).....	46
4.1 ลักษณะของเสาส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน.....	47
4.2 ตำแหน่งการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด.....	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 ข้อมูลของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	49
4.4 ข้อมูลของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	49
4.5 ตำแหน่งของตัวนำในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สูงสุด 500 kV.....	50
4.6 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	55
4.7 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	55
4.8 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	58
4.9 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	59
4.10 ระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้า (SPAN LENGTH).....	59
4.11 ระยะหย่อนของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ ของสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	60
4.12 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	60
4.13 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	61
4.14 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว (CONTOUR).....	61
4.15 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว (CONTOUR).....	62
4.16 ระยะหย่อนของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ ของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่.....	62
4.17 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	63
4.18 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	63
4.19 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรคู่ (CONTOUR).....	64
4.20 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรคู่ (CONTOUR).....	64

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ข้อมูลของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ± 300 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย ประเทศไทย.....	65
4.22 ระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV.....	66
4.23 ตำแหน่งในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดบนสายส่งไฟฟ้า กระแสตรง ± 300 kV.....	66
4.24 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV(อากาศปกติ).....	70
4.25 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV(ฝนตก).....	71
4.26 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กกระแสตรง ± 300 Kv.....	71
4.27 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV BIPOLAR (อากาศปกติ).....	73
4.28 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV BIPOLAR (อากาศปกติ).....	74
4.29 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV BIPOLAR (ฝนตก).....	74
4.30 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV BIPOLAR (ฝนตก).....	75
4.31 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กกระแสตรง ± 300 kV BIPOLAR.....	75
4.32 ระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ ของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV.....	76
4.33 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมโนโพล่า(อากาศปกติ).....	76
4.34 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมโนโพล่า(ฝนตก).....	77
4.35 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมโนโพล่า (ฝนตก) (อากาศปกติ ; CONTOUR).....	77
4.36 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมโนโพล่า (ฝนตก ; CONTOUR).....	78
4.37 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่า (อากาศปกติ) ขั้วบวก.....	78
4.38 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่า (อากาศปกติ) ขั้วลบ.....	79
4.39 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่า (อากาศปกติ) ขั้วบวก CONTOUR.....	79
4.40 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่า (อากาศปกติ) ขั้วลบ CONTOUR..	80
4.41 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่า (ฝนตก) ขั้วบวก.....	80
4.42 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่า (ฝนตก) ขั้วลบ.....	81
4.43 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่า (ฝนตก) ขั้วบวก CONTOUR.....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.44 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่า (ฝนตก) ขั้วลบ CONTOUR	82
4.45 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมโนโพล่า.....	82
4.46 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมโนโพล่า CONTOUR.....	83
4.47 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสแม่เหล็ก ± 300 kV ไบโพล่า.....	83
4.48 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV ไบโพล่า (CONTOUR)	84
4.49 ตำแหน่งและทิศทางการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก 500 kV.....	84
4.50 ผลการวัดและคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	85
4.51 ผลการวัดและคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	85
4.52 ผลการวัดและคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	86
5.1 การเหนี่ยวนำภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ.....	89
5.2 ตำแหน่งในการพิจารณาผลกระทบต่อวัตถุตัวนำใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง.....	90
5.3 วงจรสมมูลย์ของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อไหลผ่านวัตถุตัวนำ.....	90
5.4 ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ณ ตำแหน่งที่วิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้า.....	91
5.5 ลักษณะของบ้านพักอาศัยที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	92
5.6 Shape factor ของบ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำ.....	93
5.7 Shape factor ของบ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน.....	93
5.8 Shape factor ของบ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ	94
5.9 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำ ($E=6.630$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	94
5.10 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำ ($E=1.219$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว.....	95
5.11 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้าน เป็นฉนวน($E=6.630$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว	95

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน($E=1.219$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว	96
5.13 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ($E=6.630$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว	96
5.14 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน($E=1.219$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว	97
5.15 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำ ($E=6.012$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	97
5.16 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำ ($E=0.764$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	98
5.17 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน($E=6.012$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	98
5.18 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน($E=0.764$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	99
5.19 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ($E=6.012$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	99
5.20 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ($E=0.764$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่.....	100
5.21 ลักษณะของรถบรรทุกที่วิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้า.....	101
5.22 Shape factor สำหรับวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยม.....	101
5.23 วงจรสมมูลระหว่างคนและรถบรรทุกในสภาวะ Steady state เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า.....	103
5.24 ผลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อขนาดพื้นที่ที่สมมูลของรถบรรทุก.....	104
5.25 ผลของพลังงานสะสมต่อขนาดพื้นที่ที่สมมูลของรถบรรทุกที่สนามไฟฟ้าสูงสุด.....	104
5.26 ผลของพลังงานสะสมต่อขนาดพื้นที่ที่สมมูลของรถบรรทุกของสนามไฟฟ้าที่ขอบ R.O.W.....	105
5.27 ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าเมื่อคิดผลของโคโรนาจากสายส่งไฟฟ้าแรง (ขั้วบวก).....	107
5.28 ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าเมื่อคิดผลของโคโรนาจากสายส่งไฟฟ้าแรง (ขั้วลบ).....	108

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.29 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นดั่วหน้าและดั่วบ้านเป็นดั่วหน้า (ขั้วบวก).....	110
5.30 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นดั่วหน้าและดั่วบ้านเป็นดั่วหน้า (ขั้วลบ)	110
5.31 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นดั่วหน้าและดั่วบ้านเป็นฉนวน (ขั้วบวก).....	111
5.32 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นดั่วหน้าและดั่วบ้านเป็นฉนวน (ขั้วลบ)	111
5.33 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและดั่วบ้านเป็นดั่วหน้า (ขั้วบวก).....	112
5.34 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและดั่วบ้านเป็นดั่วหน้า (ขั้วลบ)	112
5.35 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นดั่วหน้าและดั่วบ้านเป็นดั่วหน้า (ขั้วบวก) ที่ขอบ R.O.W ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV	113
5.36 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นดั่วหน้าและดั่วบ้านเป็นดั่วหน้า (ขั้วลบ) ที่ขอบ R.O.W ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV	114
5.37 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นดั่วหน้าและดั่วบ้านเป็นดั่วฉนวน (ขั้วบวก) ที่ขอบ R.O.W ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV	114
5.38 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นดั่วหน้าและดั่วบ้านเป็นดั่วฉนวน (ขั้วลบ) ที่ขอบ R.O.W ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV	115
5.39 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและดั่วบ้านเป็นดั่วหน้า (ขั้วบวก) ที่ขอบ R.O.W ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV	115

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.40 ผลของกระแสชอตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและ ตัวบ้านเป็นตัวนำ (ขั้วลบ) ที่ขอบ R.O.W ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV	116
5.41 ขนาดของรถบรรทุกภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง	116
5.42 Shape factor ของวัตถุตัวนำรูปทรงสี่เหลี่ยม	118
5.43 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนรถบรรทุกเมื่อมีพื้นที่สมมุทธ์เพิ่มขึ้น (ขั้วบวก)	119
5.44 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนรถบรรทุกเมื่อมีพื้นที่สมมุทธ์เพิ่มขึ้น (ขั้วลบ).....	120
5.45 วงจรสมมุทธ์ระหว่างคนและรถบรรทุกในสภาวะ Steady State อยู่ในภายใต้สายส่งไฟฟ้า กระแสตรง	120
5.46 ผลของพลังงานสะสมต่อขนาดพื้นที่สมมุทธ์ของรถบรรทุกของสายส่งไฟฟ้า กระแสตรง+300 kV.....	121
5.47 ลักษณะ โมเดลที่ใช้ในการทดสอบ	122
5.48 โมเดลจำลองผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปแบบการเหนี่ยวนำ.....	123
5.49 Stape factor ของวัตถุตัวนำที่ทำการทดสอบ	123
5.50 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุเพลทที่ระยะ 40 ซม.	127
5.51 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุเพลทที่ระยะ 50 ซม.	127
5.52 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุเพลทที่ระยะ 60 ซม.	127
5.53 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุสี่เหลี่ยมที่ระยะ 40 ซม.	131
5.54 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุสี่เหลี่ยมที่ระยะ 50 ซม.	131
5.55 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุสี่เหลี่ยมที่ระยะ 60 ซม.	131
5.56 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างแผ่นเพลทกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 40 ซม.	132
5.57 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างแผ่นเพลทกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 50 ซม.	133
5.58 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างแผ่นเพลทกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 60 ซม.	134
5.59 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างวัตถุสี่เหลี่ยมกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 40 ซม.	135

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.60 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างวัตถุสี่เหลี่ยมกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 50 ซม.	136
5.61 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างวัตถุสี่เหลี่ยมกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 60 ซม.	137
6.1 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่.....	146
6.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยว	146
6.3 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่.....	147
6.4 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยว.....	147
6.5 การเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยว และวงจรคู่.....	148
6.6 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของเสาวงจรเดี่ยว.....	149
6.7 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของเสาวงจรคู่.....	149
6.8 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของเสาวงจรเดี่ยว.....	150
6.9 ความความเข้มสนามแม่เหล็ก 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของเสาวงจรคู่.....	150
6.10 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเฟสของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสลับ 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยว และวงจรคู่	151
6.11 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟสวงจรเดี่ยว.....	152
6.12 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟสวงจรคู่.....	152
6.13 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟสวงจรเดี่ยว.....	153
6.14 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟสวงจรคู่.....	153
6.15 การจัดเรียงลำดับของเฟสในแบบ Low-reactance สายส่ง 500 kV วงจรคู่.....	154
6.16 การจัดเรียงลำดับของเฟสในรูปแบบต่าง ๆ	155
6.17 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามการจัดเรียงเฟส	155
6.18 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามการจัดเรียงเฟส.....	156
6.19 การใช้สายโอเวอร์เฮดกราวด์ลระดับความเข้มสนามไฟฟ้า	157
6.20 Shie lding efficiency of vetical grids of wires for different number of wires.....	159
6.21 Shie lding efficiency of vetical grids of wires for different number of wires.....	159
6.22 การติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยว.....	161

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.23 ผลการติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยว.....	162
6.24 การติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่.....	163
6.25 ผลการติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่.....	163
6.26 การเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน 300 kV แบบไบโพล่า.....	164
6.27 การเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน ± 300 kV แบบไบโพล่า.....	165
6.28 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบ โมโนโพล่า	165
6.29 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบ ไบโพล่า ขั้วบวก	166
6.30 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบ ไบโพล่า ขั้วลบ	166
6.31 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบ โมโนโพล่า	167
6.32 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบ ไบโพล่า	167
6.33 การเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำระบบแรงดันสูงกระแสตรง 300 kV.....	168
6.34 ความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV แบบ โมโนโพล่าที่เปลี่ยนแปลง ตามระยะห่างระหว่างตัวนำ	168
6.35 ความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV แบบไบโพล่า ที่เปลี่ยนแปลง ตามระยะห่างระหว่างตัวนำ (ขั้วบวก)	169
6.36 ความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV แบบไบโพล่า ที่เปลี่ยนแปลง ตามระยะห่างระหว่างตัวนำ (ขั้วลบ).....	169
6.37 ความเข้มสนามแม่เหล็กกระแสตรง ± 300 kV แบบ โมโนโพล่า ที่เปลี่ยนแปลง ตามระยะห่างระหว่างตัวนำ	170

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.38 ความเข้มสนามแม่เหล็กกระแสตรง ± 300 kV แบบโมโนโพล่า ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างตัวนำ	170
6.39 ลักษณะการจัดวางตัวนำแบบใหม่.....	171
6.40 ตำแหน่งการจัดวางตัวนำแบบใหม่ ± 300 kV แบบไบโพล่า.....	172
6.41 ความเข้มสนามไฟฟ้าสถิต (Corona free conditon) ± 300 kV ไบโพล่า.....	172
6.42 ความเข้มสนามแม่เหล็กแรงดันสูงกระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่า.....	173
6.43 ความเข้มสนามแม่เหล็กแรงดันสูงกระแสตรง ± 300 kV โมโนโพล่าตามลักษณะของการจัด โหลด	174
6.44 ความเข้มสนามแม่เหล็กแรงดันสูงกระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่าตามลักษณะของการจัด โหลด	174
6.45 การชิลด์สนาม ไฟฟ้าและความหนาแน่นของประจุ.....	175
6.46 ตำแหน่งการติดตั้งชุด โอเวอร์เฮดกราวด์เมื่อต้องการลดผลของสนามไฟฟ้าสถิตลดลงเท่ากับครึ่งเท่าที่ระยะขอบแนวเดินสายส่งไฟฟ้า	176
6.47 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสถิตลดลงเท่ากับครึ่งเท่าที่ระยะแนวทางเดินของสายส่งไฟฟ้า	176
6.48 ผลการวิเคราะห์ความเข้มสนาม ไฟฟ้ากระแสตรงตามวิธีของ EPRI เมื่อติดตั้งชุดโอเวอร์เฮดกราวด์ที่ระยะ 17 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของสายโอเวอร์เฮด 0.1195 เมตร จำนวน 3 เส้น บนสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV แบบไบโพล่า	177

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและกระแสตรง ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับระดับแรงดันสูงที่สุดที่มีใช้งานในประเทศไทย คือ 500 kV และระดับสูงที่สุดในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง คือ 300 kV โดยความรับผิดชอบของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2544 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้มีการนำระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง เข้าใช้ในโครงการเชื่อมโยงระบบไฟฟ้าระหว่างประเทศไทยกับมาเลเซีย ขนาด 300 MW เป็นการส่งจ่ายที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากกระแสสลับระบบ 3 ϕ 230 kV 50 Hz (EGAT SYSTEM / THAILAND) เป็นระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV ส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยสายส่งกระแสตรงชนิด MONOPOLAR และเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าจากกระแสตรงเป็นกระแสสลับเพื่อต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 3 ϕ 275kV 50 Hz(TNB/MALAYSIA) เป็นระยะทางรวม 110 km (EGAT 25 km / TNB 85 km) ผลที่ได้จากโครงการนี้สามารถลดระดับการสำรองกำลังผลิต ช่วยลดต้นทุนและสร้างความแข็งแกร่งให้กับระบบไฟฟ้าในบริเวณภาคใต้ของประเทศไทย ทั้งนี้ประเทศไทยตั้งอยู่ในภูมิศาสตร์ที่ได้เปรียบเสมือนประตูส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าโดยในอนาคตจะพัฒนาเป็นศูนย์กลางเชื่อมโยงโครงข่ายระบบส่งไฟฟ้าของอาเซียน (ASEAN POWER GRID)

ประการสำคัญ ที่วิศวกรต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้า นอกเหนือจากการออกแบบทางด้านเทคนิคเช่น Voltage Regulation , Reactive Power Balance ,Steady state ,Dynamic Stability แล้วนั้นคือ ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (ELECTROMAGNETIC FIELD)ที่เกิดจากการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบแรงดันสูงกระแสสลับและแรงดันสูงกระแสตรง ส่งผลต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าอย่างไร จากเอกสารอ้างอิง[4] ได้นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 3 ϕ 500 kV 50 Hz ซึ่งเป็นระดับแรงดันใช้งานสูงสุดในประเทศไทย ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์ในส่วนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง จึงเป็นที่มาของวิทยานิพนธ์นี้ซึ่งเป็นงานวิจัยต่อเนื่อง โดยจะนำเสนอบทวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV ประเทศไทย ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมบริเวณใกล้สายส่งไฟฟ้า และทำการเปรียบเทียบผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองระบบ ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้า อีกทั้งนำเสนอแนวทางการแก้ปัญหาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองระบบ เพื่อเป็นข้อมูลให้กับหน่วยงานและวิศวกรที่รับผิดชอบในการการออกแบบและก่อสร้างเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง ให้เห็นถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดจากการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า

ประเด็นที่น่าสนใจในการพิจารณา:

1. ลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเมื่อมีส่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง ทั้งสองระบบ
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ขอบแนวการเดินทางของสายส่ง (RIGHT OF WAY) อยู่ในค่ามาตรฐานตามหลักการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม
3. เมื่อสายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีการพาดผ่านชุมชน ผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า COUPLING กับ วัตถุตัวนำขนาดใหญ่ เช่น บ้าน รั้ว ส่งผลกระทบต่อคนเมื่อเข้าไป

สัมผัสนั่นที่เป็นโลหะ เป็นผลให้ผู้ออกแบบต้องพิจารณาออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีผลกระทบน้อยที่สุด เพื่อความปลอดภัยกับบ้านพักอาศัยที่อยู่ใกล้แนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง



รูปที่ 1.1 ลักษณะของปัญหาที่พิจารณา

1.2 ความมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อต้องการให้เข้าใจถึงการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงรวมถึงวิธีการแก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงทั้งสอง โดยมีวัตถุประสงค์การศึกษาดังนี้

1. สามารถอธิบายลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
2. สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยอาศัยโปรแกรมที่สร้างขึ้นจาก MATLAB โดยพัฒนาให้สามารถวิเคราะห์ใน LONGITUDINAL PROFILE
3. สามารถบอกถึงปัญหาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบของการ COUPLING กับวัตถุขนาดใหญ่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองระบบ
4. เปรียบเทียบผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อวัตถุขนาดใหญ่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองระบบว่ามีระดับความรุนแรงต่างกันเพียงใดเมื่อพิจารณาที่วัตถุตัวนำเดียวกัน
5. สามารถนำงานวิจัยใช้เป็นข้อมูลในการแก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ต้องมีความเข้าใจในพฤติกรรมของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้น การพัฒนาโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก LATERAL PROFILE LONGITUDINAL PROFILE ทำให้สามารถเข้าใจถึงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ซึ่งในส่วน of สายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ[4] ได้มีการนำเสนอไปแล้ว ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอเพิ่มเติมลักษณะสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยมีสมมติฐานการศึกษาดังนี้

1. การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าด้วยระบบแรงดันสูงกระแสตรง สนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเป็นผลมาจากประจุไฟฟ้าบนตัวนำและประจุค้างที่เกิดจากโคโรนา[3]
2. จากเอกสารอ้างอิง[3] ซึ่งทำการศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าต่อสิ่งแวดล้อมพบว่า การเคลื่อนที่ของประจุค้างตามเส้นทางเดินสนามไฟฟ้า (Electric Flux Line) ส่งผลให้เกิดกระแสไหล ถ้าประจุค้างมีการไหลเชื่อมต่อกับวัตถุตัวนำลงกราวด์ ค่ากระแสนั้นสามารถวัดได้ โดยจะพิจารณาเป็นค่าความหนาแน่นของกระแสไอออนสูงสุด (Ion Current Density ; J) มีค่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ในระดับ 100 nA/m^2 ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อพิจารณาผลของวัตถุขนาดใหญ่ อยู่ภายใต้

สายส่งไฟฟ้ากระแสตรง ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับมนุษย์เมื่อสัมผัสวัตถุดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าที่จะมนุษย์รับรู้ได้ โดยแนวโน้มผลกระทบที่เกิดขึ้นดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

1.4 ทฤษฎี หรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ได้มีการนำเสนอไปแล้วตามเอกสารอ้างอิงที่ [1],[3] อาศัยหลักการที่ว่าด้วย สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ณ จุดใดๆ ในอากาศจะมีค่าคงที่ตลอดเวลา (QUASI-STATIC FIELD) โดยใช้วิธีจำลองประจุ (CHARGE SIMULATION METHOD) และวิธีภาพเงา (IMAGE METHOD) และเนื่องจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้าเป็นความถี่ต่ำ 50 Hz จึงสามารถวิเคราะห์แยกระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ ส่วนการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการของ HVTRC (HIGH VOLTAGE TRANSMISSION RESEARCH CENTER) ซึ่งเป็นหน่วยงานในสังกัดของ EPRI (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE) การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตามวิธีของ HVTRC ประกอบไปด้วย

1. กำหนดสนามไฟฟ้าในกรณีสายส่งไม่อยู่ในสภาวะการเกิดโคโรน่า (CORONA FREE CONDITION) ซึ่งการวิเคราะห์เป็นวิธีการเดียวกับ การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ
2. หาค่าสนามไฟฟ้าเมื่อสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ในสภาวะการเกิดโคโรน่า (CORONA CONDITION) โดยพิจารณาจากค่าทางสถิติการเกิดโคโรน่าตามสภาพอากาศ โดยวิธีของ HVTRC ประยุกต์เข้ากับสภาพแวดล้อมและสภาพอากาศของ สายส่งไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งอยู่บริเวณภาคใต้ของประเทศไทย
3. ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง เป็นค่าที่อยู่ระหว่างสนามไฟฟ้าสภาวะการเกิดโคโรน่า และ สนามไฟฟ้า ไม่เกิดโคโรน่า

1.5 ขอบเขตการวิจัย

สำหรับขอบเขตการวิจัยในวิทยานิพนธ์สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทั้งระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยเลือกระดับการใช้งานสูงสุดในประเทศไทย โดยระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ คือ 500 kV และระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง คือ 300 kV
2. สร้างโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองระบบ ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยพัฒนาโปรแกรมให้สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กในรูปแบบ 3 มิติ ได้

3. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกระทบ ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า ภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ที่เกิดกับวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ โดยระบบแรงดัน กระแสสลับพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของการเหนี่ยวนำ (ELECTRIC INDUCTION EFFECT) ส่วนแรงดันสูงกระแสตรง พิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของ OBJECT CHARGING กับวัตถุ ตัวนำขนาดใหญ่ใกล้สายส่งไฟฟ้า

4. เสนอแนะวิธีการแก้ปัญหาและลดทอนผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยพิจารณาจากการลด ระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เกิดจากการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองระบบ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ส่วนหนึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จาก โปรแกรมที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์สนาม ไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก จากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ไปศึกษาผลกระทบ ที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าในรูปของการเหนี่ยวนำบนวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ตลอดจนศึกษาแนวทางการลดทอนผลกระทบ โดยมีส่วนขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. นำวิทยานิพนธ์จากเอกสารอ้างอิง[4]ทำการศึกษาและทดสอบ โดยจัดสร้าง โปรแกรม วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจาก MATLAB โดยส่วนระดับแรงดันสูงกระแสสลับตรวจสอบ ความถูกต้องจาก โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่ง ประเทศไทยและค่าที่ได้จากการวัดจริง ส่วนแรงดันสูงกระแสตรงทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ไม่มีโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงจึงจัดสร้างโปรแกรม MATLAB วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กโดย พิจารณาผลของสนามไฟฟ้าเทียบกับผล การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของบริษัท TESHMONT ซึ่งเป็นบริษัทที่ปรึกษาของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย

2. พัฒนาขีดความสามารถของโปรแกรมให้สามารถวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็ก LONGITUDINAL PROFILE ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้ง 2 ระบบ เพื่อชดเชย ความสามารถจากโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่ง ประเทศไทยใช้งานอยู่ซึ่งไม่สามารถแสดงผลใน LONGITUDINAL PROFILE

3. เลือกวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้า ที่เหนี่ยวนำกับวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองระบบจาก MATLAB PROGRAM ที่สร้างขึ้น และทดสอบผลกระทบ ที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง

4. ศึกษาแนวทางการแก้ปัญหาและลดทอนผลกระทบที่ขึ้น โดยพิจารณาที่การลดระดับ ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองระบบ

บทที่ 2

สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1 บทนำ

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพลังงานไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง และเมื่อมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กกระจายอยู่โดยรอบในอากาศส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมานั้นขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมานั้นเราสามารถหาได้จากการคำนวณและการวัด

2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

ลักษณะของการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแรงสูงที่มีอยู่ในปัจจุบันมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าอยู่ 2 ระบบ คือ สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ซึ่งการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทั้งสองระบบเป็นแหล่งกำเนิดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วง 50-60 Hz ซึ่งจัดว่าเป็นความถี่ต่ำ (Extreme Low Frequency ELF) และมีช่วงความยาวคลื่นที่ยาวมาก ดังนั้นในการพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงสามารถแยกพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแยกจากกันได้ ระบบไฟฟ้ากระแสตรงก็ลักษณะเดียวกับระบบไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถแยกพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กออกจากกันได้

2.2.1 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ

สนามไฟฟ้าเป็นแรงในการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่มีทั้งขนาดและทิศทางเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ E และถูกวัดออกมาในหน่วยของแรงดันต่อระยะทาง (kV/m) โดยที่ขนาดของสนามไฟฟ้าเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างสองจุดใด ๆ ในสนามไฟฟ้า ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และจะแปรผกผันกับระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สนามไฟฟ้า ณ จุดใด ๆ ในอากาศจะประกอบด้วยองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ สำหรับค่าของสนามไฟฟ้าในสภาวะคงที่ (Steady-State) เราสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบตามแนวแกน X, Y และ Z ได้ดังนี้ [1],[3]

$$E = e_x(t)u_x + e_y(t)u_y + e_z(t)u_z \quad (2.1)$$

เมื่อ u_x, u_y, u_z คือ ยูนิตเวกเตอร์ตามแนวแกน X, Y และ Z ตามลำดับ และ $e_x(t), e_y(t), e_z(t)$ คือขนาดของสนามไฟฟ้าในทิศทางตามแนวแกน x, y และ z ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x แล้วสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ซึ่งอยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลาได้ดังนี้

$$e_x(t) = E_x \cos(\omega t + \phi_x) \quad (2.2)$$

$$e_x(t) = E_{x,r} \cos \omega t + E_{x,i} \sin \omega t \quad (2.3)$$

เมื่อ E_x เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x และ ϕ_x เป็นทิศทางของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา $e_x(t)$ สำหรับค่าของ $E_{x,r}$ และ $E_{x,i}$ เป็นค่าสนามไฟฟ้าในส่วนที่เป็นจำนวนจริง และในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพตามลำดับ

2.2.1.1 การคำนวณค่าสนามไฟฟ้า (Electric Field Calculation)

การคำนวณหาสนามไฟฟ้าที่กระจายอยู่บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สมมติฐานในการคำนวณ คือ

1. ไม่มีประจุไฟฟ้าใด ๆ นอกจากประจุไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
2. พื้นดินบริเวณที่พิจารณานั้นราบเรียบสม่ำเสมอและมี ค.ต.ท. ดินน้อยมาก
3. ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant) มีค่าเท่ากับค่าคงตัวไดอิเล็กตริก

สูญญากาศ

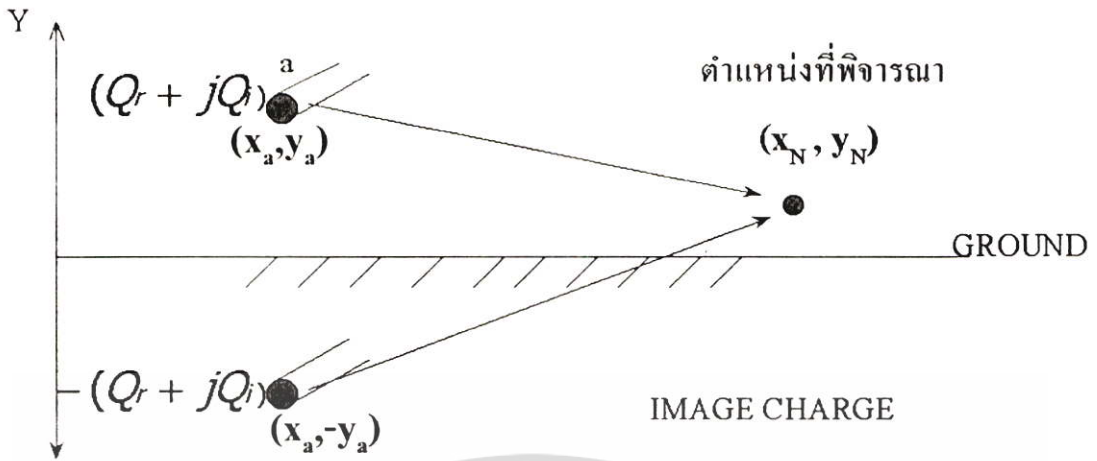
$$(\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r) \quad \text{โดยที่ } \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F / m}$$

ค่าประจุ $[Q]$ บนตัวนำสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สามารถหาได้จากค่าของแรงดันไฟฟ้า $[V]$ และค่าสัมประสิทธิ์ของ Maxwell potential Coefficient $[P]$ จากเอกสารอ้างอิงที่ [1],[3] สมการสามารถหาได้ดังนี้

$$[Q] = [P]^{-1} [V] \quad (2.4)$$

ในการคำนวณได้พิจารณาผลของประจุเงา (Image Charge) ค่าประจุไฟฟ้าประกอบด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริงและส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ

$$[Q] = [Q_r] + j [Q_i] \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.1 การคำนวณสนามไฟฟ้ากระแสสลับโดยวิธีสมมติประจุเงา (Image Charge)

$$[Q_r] = [P]^{-1} [V_r] \quad (2.6)$$

$$[Q_i] = [P]^{-1} [V_i] \quad (2.7)$$

โดยที่

$[V_r]$ = ส่วนจำนวนจริงของแรงดันไฟฟ้า

$[V_i]$ = ส่วนจำนวนจินตภาพของแรงดันไฟฟ้า

ค่าเอลิเมนต์ภายในเมตริกซ์ $[P]$ สามารถหาได้จาก

$$P_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{4y_a}{D_{cq}(a)} \right] \quad (2.8)$$

$$P_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{(x_a - x_b)^2 + (y_a + y_b)^2}{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

เมื่อ $D_{cq}(a)$ = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางสมมูลของสายไฟควบเฟส a (m)

$$= D \sqrt{\frac{nd}{D}}$$

D = ระยะห่างของสายควบ (m)

n = จำนวนของสายควบ (m)

- d = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของสายตัวนำย่อย (m)
 x_a, x_b = ระยะห่างจากแนวกึ่งกลางสายส่งของสายไฟฟ้าเฟส a, b (m)
 y_a, y_b = ระยะความสูงสายส่งไฟฟ้าเฟส a, b (m)

ค่าสนามไฟฟ้า (E_a) ที่เกิดจากสายไฟฟ้าเฟส a ณ จุด x, y ใด ๆ (x_n, y_n) ในแนวแกน X และ Y จะหาได้จากสมการ

$$E_{x,a} = \frac{(Q_{ra} + jQ_{ia})(x_n - x_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_n)^2 + (y_a - y_n)^2]} - \frac{(Q_{ra} + jQ_{ia})(x_n - x_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_n)^2 + (y_a + y_n)^2]} \quad (2.10)$$

$$E_{y,a} = \frac{(Q_{ra} + jQ_{ia})(y_n - y_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_n)^2 + (y_a - y_n)^2]} - \frac{(Q_{ra} + jQ_{ia})(y_n - y_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_n)^2 + (y_a + y_n)^2]} \quad (2.11)$$

$$E_x = E_{x,a} + E_{x,b} + E_{x,c} + \dots \quad (2.12)$$

$$E_y = E_{y,a} + E_{y,b} + E_{y,c} + \dots \quad (2.13)$$

ค่าสนามไฟฟ้ารวม (E) ณ จุด x, y ใด ๆ (x_n, y_n) คือ

$$E^2 = E_x^2 \cos^2(\omega t + \theta) + E_y^2 \cos^2(\omega t + \phi) \quad (2.14)$$

เมื่อ

$$E_x^2 = E_{rx}^2 + E_{ix}^2 \quad (2.15)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{E_{ix}}{E_{rx}} \quad (2.16)$$

$$E_y^2 = E_{ry}^2 + E_{iy}^2 \quad (2.17)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{E_{iy}}{E_{ry}} \quad (2.18)$$

ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเมื่อ $\frac{dE^2}{dt} = 0$ ดังนั้น

$$\tan(2\omega t) = \frac{-E_x^2 \sin 2\theta + E_y^2 \sin 2\phi}{E_x^2 \cos 2\theta + E_y^2 \cos 2\phi} \quad (2.19)$$

$$\text{เมื่อ } \omega t_1 = \omega t + \frac{\pi}{2}$$

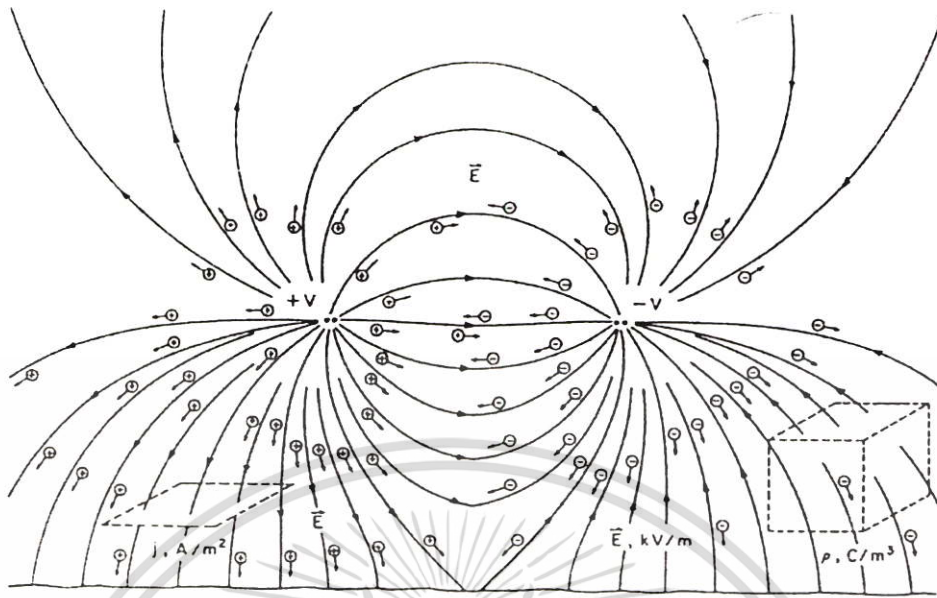
$$E_{\max} = \sqrt{(E_x \cos(\omega t_1 + \theta))^2 + (E_y \cos(\omega t_1 + \phi))^2} \quad (2.20)$$

มุมเฟสของสนามไฟฟ้าสูงสุด

$$\text{angle} = \tan^{-1} \left[\frac{E_y \cos(\omega t_1 + \phi)}{E_x \cos(\omega t_1 + \theta)} \right] \quad (2.21)$$

2.2.2 สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

สนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทำให้เกิดประจุไฟฟ้ากระจายอยู่ทั่วบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง อะตอมหรือโมเลกุลของอากาศที่เป็นกลางเมื่อได้รับพลังงานมากเพียงพอ[5] จะทำให้อิเล็กตรอนสามารถหลุดจากอะตอมหรือโมเลกุลได้ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าการเกิดไอออนไนเซชัน (Ionization) ทำให้โมเลกุลของอากาศเป็นไอออนบวกหรือมีสภาพเป็นประจุไฟฟ้าบวก ในลักษณะเดียวกันหากมีพลังงานมากเพียงพอที่ทำให้อิเล็กตรอนอิสระไปเกาะบน โมเลกุลหรืออะตอมที่เป็นกลาง ทำให้กลายเป็นอนุภาคประจุไฟฟ้าลบที่มีมวลเพิ่มขึ้นได้ ไอออนที่เกิดมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ขั้วเดียวกับตัวนำก็จะถูกผลักออกไป ส่วนไอออนที่มีขั้วตรงข้ามก็จะถูกดูดเข้าไปหาตัวนำค้ำรูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์นี้ก็เกิดขึ้นในสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับเช่นเดียวกันโดยสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงทุกๆ ครึ่งไซเคิล (ทุกๆ 10 ms, ความถี่ 50 Hz) ส่งผลให้ประจุที่กระจายอยู่รอบบริเวณสายส่งจะประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบ เคลื่อนที่จากตัวนำยากมาก ในทางตรงกันข้ามสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงประจุที่กระจายอยู่รอบบริเวณสายส่งจะมีเพียงไอออนบวกหรือไอออนลบ หรือทั้งไอออนบวกและไอออนลบในเวลาเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของการส่งจ่ายว่าเป็นแบบโมโนโพล่า (Monopolar) หรือเป็นแบบไบโพล่า (Bipolar) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางส่งผลทำให้อิออนที่มีขั้วเดียวกับตัวนำบนสายส่งไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ไปได้

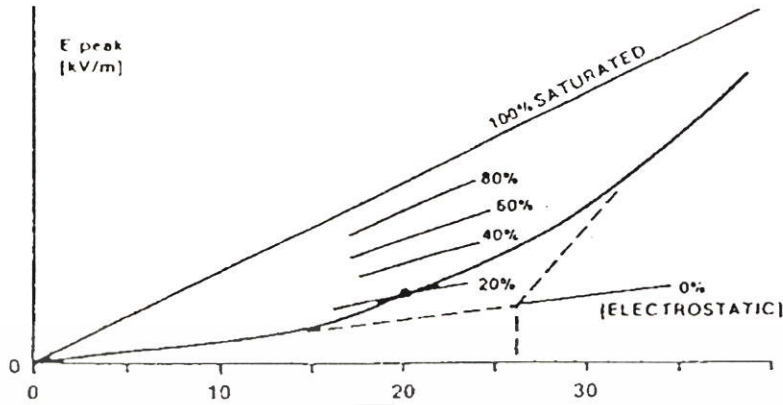


รูปที่ 2.2 ลักษณะของไอออนที่กระจายรอบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์

2.2.2.1 การคำนวณสนามไฟฟ้าบนสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะพิจารณาประจุไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าของระบบ และประจุไฟฟ้าเมื่อสายส่งอยู่ภายใต้สภาวะการเกิดโคโรน่า ซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นได้ง่ายสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าตามวิธีการของ HVTRC (High Voltage Transmission Research Center) โดยเฉพาะในส่วนของสนามไฟฟ้าซึ่งเป็นลักษณะพิเศษของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง การวิเคราะห์ประกอบไปด้วย

1. คำนวณสนามไฟฟ้าในกรณีที่สายส่งไม่อยู่สภาวะการเกิดโคโรน่าซึ่งใช้วิธีการเดียวกับการคำนวณสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ
2. ประมาณค่าสนามไฟฟ้าเมื่อสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ในสภาวะของการเกิดโคโรน่าตามวิธีของ HVTRC (พิจารณา) จากค่าสถิติของการเกิดโคโรน่าตามฤดูกาล
3. หาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นซึ่งมีค่าอยู่ระหว่างการเกิดโคโรน่าสูงสุดและไม่เกิดโคโรน่า (Electrostatic field)



รูปที่ 2.3 ค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงตามวิธีของ HVTRC

2.2.2.2 สนามไฟฟ้าไม่อยู่ในสถานะของการเกิดโคโรนา (Corona free Condition)

สนามไฟฟ้าไม่อยู่ในสถานะการเกิดโคโรนาของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะพิจารณาจากประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของระบบดังนี้

ประจุไฟฟ้า (Q)

จำนวนประจุไฟฟ้าบนสายตัวนำที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า [V] และสัมประสิทธิ์ของ

Maxwell Potential coefficient

$$[Q] = [P]^{-1} [V] \quad (2.22)$$

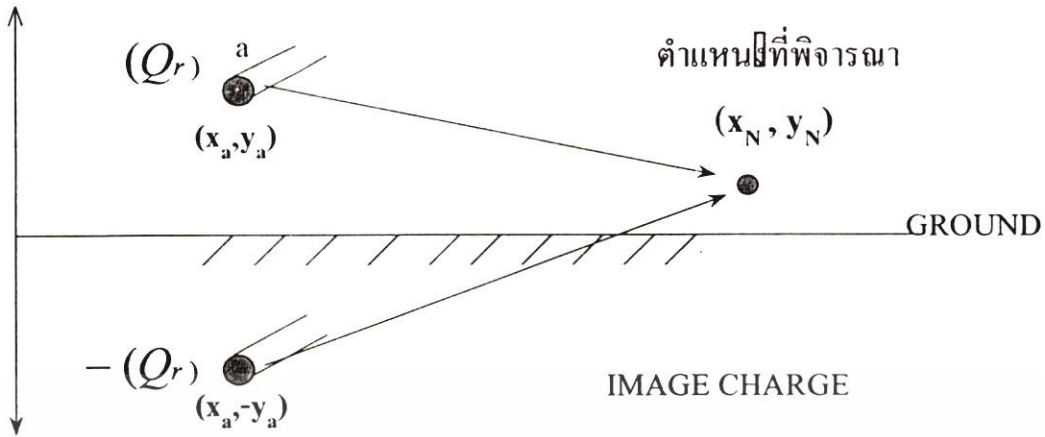
เนื่องจากระบบแรงดันกระแสตรงไม่ใช่ปริมาณคอมเพล็กนัมเบอร์ซึ่งมีแต่ *real part*

$$[Q_r] = [P]^{-1} [V] \quad , \quad [Q_i] = 0 \quad (2.23)$$

ค่าปริมาณเมตริก [P] ใช้วิธีการเดียวกับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับคือ

$$P_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{4y_a}{D_{eq}(a)} \right] \quad (2.24)$$

$$P_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{(x_a - x_b)^2 + (y_a + y_b)^2}{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.4 การคำนวณสนามไฟฟ้ากระแสตรงโดยวิธีสมมติประจุ (Image Charge)

สมมติฐานในการคำนวณค่าของสนามไฟฟ้านั้นคล้ายกับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับค่าสนามไฟฟ้า ณ จุด (x_n, y_n) มีดังนี้

$$E_{x,a} = \frac{(Q_{ra})(x_n - x_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_n)^2 + (y_a - y_n)^2]} - \frac{(Q_{ra})(x_n - x_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_n)^2 + (y_a + y_n)^2]} \quad (2.26)$$

$$E_{y,a} = \frac{(Q_{ra})(y_n - y_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_n)^2 + (y_a - y_n)^2]} - \frac{(Q_{ra})(y_n - y_a)}{2\pi\epsilon[(x_a - x_n)^2 + (y_a + y_n)^2]} \quad (2.27)$$

$$E_x = E_{x,a} + E_{x,b} + E_{x,c} + \dots \quad (2.28)$$

$$E_y = E_{y,a} + E_{y,b} + E_{y,c} + \dots \quad (2.29)$$

ค่าสนามไฟฟ้ารวม ณ จุด x, y ใดๆ (X_N, Y_N) คือ

$$E^2 = E_x^2 + E_y^2 \quad (2.30)$$

2.2.2.3 สนามไฟฟ้าในสถานะของการเกิดโคโรน่า (Corona Saturation)

สนามไฟฟ้าในสถานะของการเกิดโคโรน่าภายในแนวทางเดินของสายส่งไฟฟ้า (R.O.W)[3] สามารถหาได้สมการ

$$E_s = 1.46 \times \left[1 - e^{-2.5 \frac{P_H}{H}} \right] \times \left[e^{-0.7 \frac{(X - \frac{P_H}{2})}{H}} \right] \times \frac{V}{H} \quad (2.29)$$

และสนามไฟฟ้าแรงสูงสุดในสภาวะของการเกิดโคโรน่า (*corona saturation*) สามารถหาได้จากสมการ

$$E_s = 1.31 \left[1 - e^{-1.7 \frac{P_H}{H}} \right] \frac{V}{H} \quad (2.30)$$

เมื่อ

- E_s = ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะโคโรน่า (kV/m)
- P_H = ระยะห่างของสายตัวนำ (m)
- H = ความสูงของสายตัวนำเหนือพื้นดิน (m)
- V = แรงดันไฟฟ้าของระบบ (kV)

2.2.2.4 ระดับการเกิดโคโรน่าสูงสุด (Degree of Corona Saturation)

ระดับของการเกิดโคโรน่าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะขึ้นอยู่กับการกระจายของสนามไฟฟ้าแรงสูงที่ผิวของสายตัวนำและจากฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลง [3] ส่งผลให้อากาศรอบสายตัวนำมีสภาพการเป็นฉนวนแตกต่างกันออกไป ระดับของการเกิดโคโรน่าเมื่อพิจารณาจากค่าสถิติของการเกิดเกรเดียนท์โวลต์เตจ

$$S_c = 1 - e^{-K(G - G_0)} \quad (2.31)$$

เมื่อ

- S_c = ระดับโอกาสของการเกิดโคโรน่า
- G_0 = ค่าเกรเดียนท์โวลต์เตจเมื่อเริ่มเกิดแรงดันโคโรน่า
- G = ค่าเกรเดียนท์ที่ผิวตัวนำ
- K = ค่าสัมประสิทธิ์ในการทดสอบดัง ตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ระดับโคโรนาสำหรับสภาวะอากาศ

ระดับโคโรนาสำหรับสภาวะอากาศ		
$S_c = 1 - e^{-K(G-i_c)}$		
ฤดูร้อนอากาศปกติ (Summer fair Weather)		
Positive (field and Current) peaks		
50 % Value	Go = 9 kv / cm	K = 0.037
95 % Value	Go = 3 kv / cm	K = 0.067
Negative (field and Current) peak		
50 % Value	Go = 9 kv / cm	K = 0.015
95% Value	Go = 3 kV/cm	K = 0.032
ฤดูฝน (Rain)		
Positive (field and Current) peak		
50 % Value	Go = 6 kv / cm	K = 0.058
90 % Value	Go = 6 kv / cm	K = 0.087
negative (field and Current) peak		
50 % Value	Go = 6 kv / cm	K = 0.058
95 % Value	Go = 6 kv / cm	K = 0.087
หิมะ (Snow)		
Positive (field and Current) peak		
50 % Value	Go = 12 kv / cm	K = 0.030
95 % Value	Go = 11 kv / cm	K = 0.045
negative (field and Current) peak		
50 % Value	Go = 12 kv / cm	K = 0.030
95 % Value	Go = 11 kv / cm	K = 0.045

*แหล่งที่มาจากเอกสารอ้างอิง[3]

ตารางที่ 2.1 (ต่อ)

ระดับโคโรน่าสำหรับสภาวะอากาศ		
$S_c = 1 - e^{-K(G-i_0)}$		
ฤดูร้อนมีความชื้นสูง (Summer Humidity / Fog)		
Positive (field and Current) peak		
50 % Value	Go = 7.5 kv / cm	K = 0.060
95 % Value	Go = 3 kv / cm	K = 0.086
ฤดูใบไม้ผลิ (Spring fair weather)		
Positive (field and Current) peak		
50 % Value	Go = 14.5 kv / cm	K = 0.041
95 % Value	Go = 11.0 kv / cm	K = 0.086
negative (field and Current) peak		
50 % Value	Go = 14.5 kv / cm	K = 0.021
95 % Value	Go = 11.0 kv / cm	K = 0.065
Fall fair Weather		
Positive (field and Current) peak		
50 % Value	Go = 12.0 kv / cm	K = 0.039
95 % Value	Go = 10.0 kv / cm	K = 0.092
negative (field and Current) peak		
50 % Value	Go = 12.0 kv / cm	K = 0.017
95 % Value	Go = 11.0 kv / cm	K = 0.070

ระดับของการเกิดโคโรน่า (S_c) เป็นแฟกเตอร์ที่บอกขอบเขตของปริมาณทางไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงตามวิธีของ HVTRC เช่น สนามไฟฟ้า ความหนาแน่นของกระแสปริมาณของความหนาแน่นประจุไฟฟ้า ว่าปริมาณดังกล่าวมีค่าอยู่ระหว่าง SATURATED VALUE หรือ ELECTROSTATIC VALUE ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึง ดังสมการที่ 2.32 และรูปที่ 2.3 โดยที่

S_c (50%) หมายถึง ค่าระดับการเกิดโคโรนาที่ค่ากลาง (Median) ระหว่างค่าสูงสุด

Saturated Value และ Electrostatic Value

S_c (95%) หมายถึง ค่าระดับการเกิดโคโรนาที่ระดับสูงสุดจากการทดสอบ[3]

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้ค่าระดับการเกิดโคโรนา S_c (50%) ในการวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงสามารถหาได้ดังสมการ

$$E = E_c + S_c [E_s - E_c] \tag{2.32}$$

เมื่อ

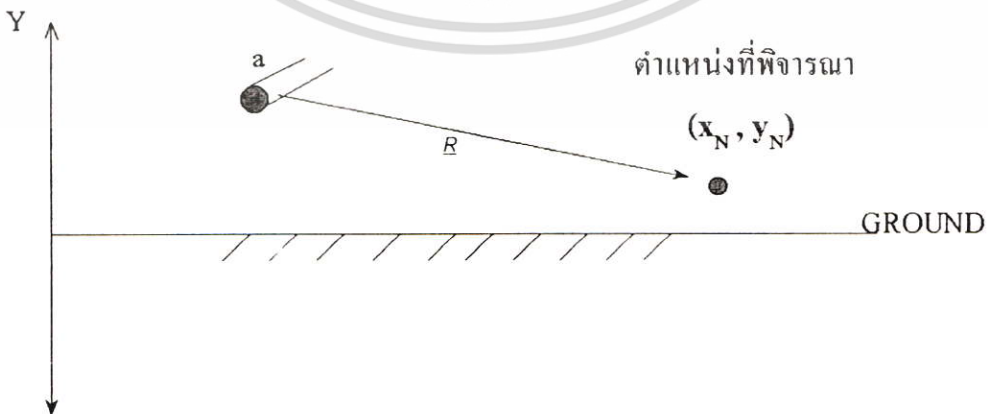
- E = สนามไฟฟ้าที่เกิดบนสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง
- E_s = สนามไฟฟ้าเมื่อสายส่งเกิดโคโรนา
- E_c = สนามไฟฟ้าในกรณีสายส่งไม่เกิดโคโรนา(Electrostatic field)
- S_c = ระดับของการเกิดโคโรนา

2.3 สนามแม่เหล็กสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

2.3.1 สนามแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้พิจารณาจากความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) และระยะห่างจากสายไฟฟ้าไปยังจุดที่พิจารณา(R)

$$H = \frac{I}{2\pi R} \tag{2.33}$$



รูปที่ 2.5 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ

กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริง และส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ ดังนั้น $I = I_{real} + I_{image}$ และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายไฟและ a, b, c ณ จุด x, y ใดๆ (X_n, y_n) สามารถหาได้จาก

$$H_x = \sum_{i=1}^n \frac{I_{real(i)}(y_i - y_n)}{2\pi R_m^2} + j \sum_{i=1}^n \frac{I_{image(i)}(y_i - y_n)}{2\pi R_m^2} \quad (2.34)$$

$$H_y = \sum_{i=1}^n \frac{I_{real(i)}(X_i - X_n)}{2\pi R_m^2} + j \sum_{i=1}^n \frac{I_{image(i)}(X_i - X_n)}{2\pi R_m^2} \quad (2.35)$$

$$R_m = \sqrt{(X_n - X_i)^2 + (y_n - y_i)^2} \quad (2.36)$$

ค่าสนามแม่เหล็กรวม ณ จุด x_n, y_n ใดๆ คือ

$$H^2 = H_x^2 \cos^2(\omega t + \theta) + H_y^2 \cos^2(\omega t + \phi) \quad (2.37)$$

$$H_x^2 = H_{rx}^2 + H_{ix}^2 \quad (2.38)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{H_{ix}}{H_{rx}} \quad (2.39)$$

$$H_y^2 = H_{ry}^2 + H_{iy}^2 \quad (2.40)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{H_{iy}}{H_{ry}} \quad (2.41)$$

ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเมื่อ $\frac{dH^2}{dt} = 0$ ดังนั้น

$$\tan(2\omega t) = -\frac{H_x^2 \sin 2\theta + H_y^2 \sin 2\phi}{H_x^2 \cos 2\theta + H_y^2 \cos 2\phi} \quad (2.42)$$

หาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มสนามแม่เหล็ก (\vec{H}) และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (\vec{B}) ตามสมการ

$$B = \mu H \quad (2.43)$$

เมื่อ

B = ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (wb / m^2), (Tesla)

μ = ค่าเพอร์มิติวิตีของอากาศมีค่า $4\pi \times 10^{-7}$ (H / m)

H = ความเข้มสนามแม่เหล็ก (A / m)

2.3.2 สนามแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง

สนามแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงมีลักษณะคล้ายกับสนามแม่เหล็กโลก บนสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงค่าสนามแม่เหล็กส่วนใหญ่จะมีค่าไม่เกินค่าของสนามแม่เหล็กโลกและมีปริมาณความเข้มไม่เพียงพอที่จะทำอันตรายต่อมนุษย์หรือพืชได้ สนามแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงในการคำนวณก็พิจารณาคล้ายกับสนามแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับเพียงแต่การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าไม่มีส่วนของ จำนวนจินตภาพ

$$H_x = \sum_{i=1}^n \frac{I_{real(i)}(y_i - y_n)}{2\pi R_m^2} \quad (2.44)$$

$$H_y = \sum_{i=1}^n \frac{I_{real(i)}(X_i - X_n)}{2\pi R_m^2} \quad (2.45)$$

$$R_m = \sqrt{(X_n - X_i)^2 + (y_n - y_i)^2} \quad (2.46)$$

ค่าสนามแม่เหล็กรวม ณ จุด x_n, y_n คือ

$$H^2 = H_x^2 + H_y^2 \quad (2.47)$$

หาความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มสนามแม่เหล็ก (\vec{H}) และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (\vec{B}) ตามสมการ 2.43 เช่นเดียวกัน

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงนั้นจะเพิ่มหรือจะลดนั้นขึ้นอยู่กับทิศทางการไหลของกำลังไฟฟ้า (Power flow) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับสนามแม่เหล็กโลก (earth' field) ซึ่งอย่างไรก็ดีการเพิ่มหรือการลดส่วนใหญ่ก็จะกระทำอยู่ในแนวเขตการเดินสายไฟ ROW ค่าสนามแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงจะไม่มีลักษณะแปรเปลี่ยนตามเวลาเหมือนไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งเป็นผลทำให้ “จะไม่มีกรเหนียวนำบนวัตถุตัวนำ” เพราะฉะนั้นสนามแม่เหล็กที่มีแหล่งกำเนิดมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง สามารถที่จะไม่พิจารณาผลกระทบที่มีต่อวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้

บทที่ 3

โปรแกรมการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

3.1 บทนำ

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ความสามารถของโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน 5.3 วิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับและกระแสตรงซึ่งสามารถแสดงใน Lateral Profile Longitudinal Profile

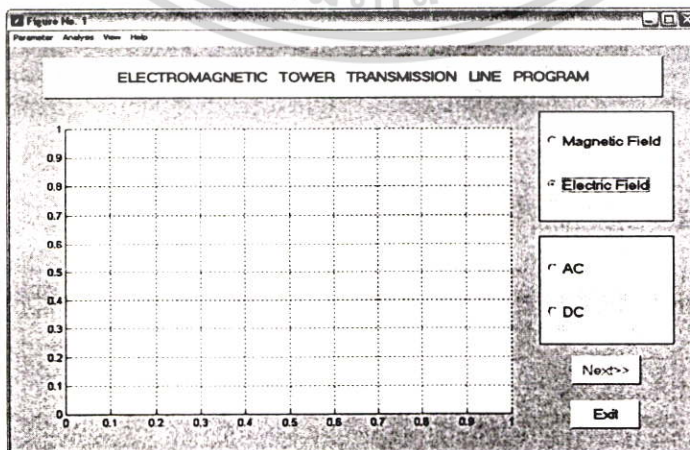
3.2 โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

โปรแกรม MATLAB เราสามารถเขียนโปรแกรมให้ช่วยต่อการใช้งาน โดยใช้ความสามารถในส่วนของ GUI (Graphic User Interface) ซึ่งในส่วนของโปรแกรมที่ใช้คำนวณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ

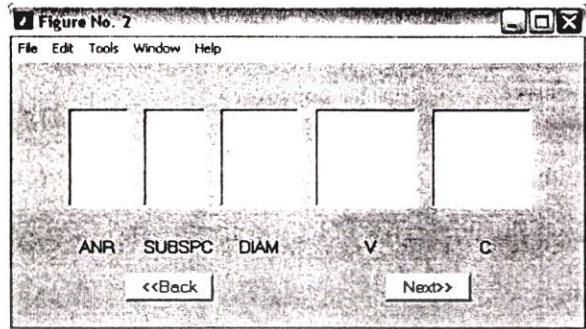
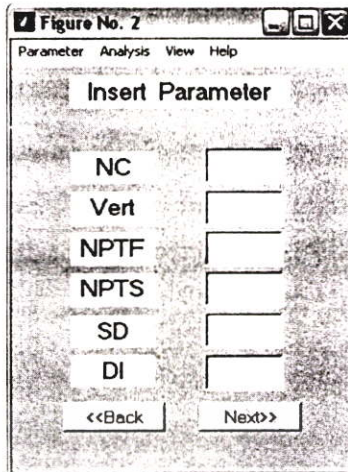
1. ส่วนของข้อมูลอินพุต (Input Data)
2. ส่วนของโปรแกรมคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
3. ส่วนของการแสดงผล (Output)

3.2.1 ข้อมูลอินพุต (Input Data)

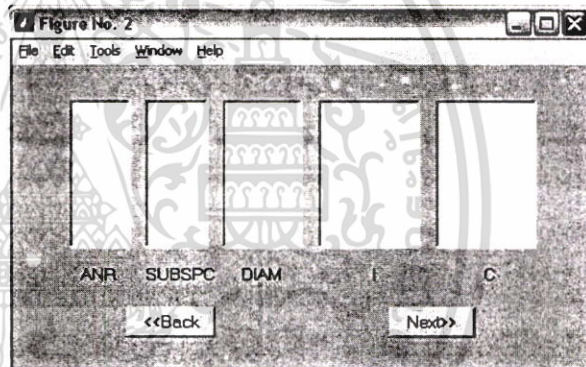
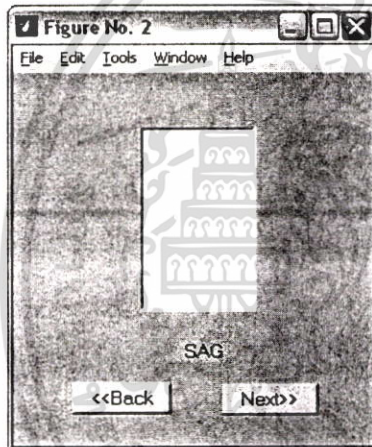
ข้อมูลอินพุตที่ใช้สำหรับเป็นตัวแปรให้โปรแกรมทำการประมวลผลจะประกอบไปด้วย ข้อมูลเกี่ยวกับรายละเอียดของสายตัวนำไฟฟ้า, ตำแหน่งการวางสายตัวนำเทียบกับระบบ X,Y 2 มิติ, ข้อมูลแรงดันไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งกระแสสลับและกระแสตรงซึ่งลักษณะข้อมูลอินพุต ในส่วนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและกระแสตรงเป็นต้น



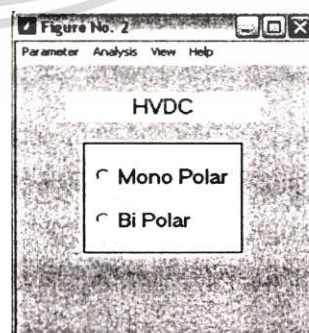
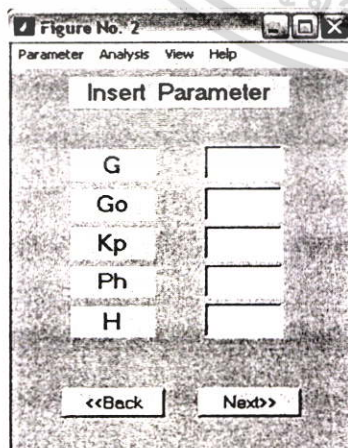
รูปที่ 3.1 หน้าต่างแรกของโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้า กระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง



รูปที่ 3.2 ตัวแปรแสดงรายละเอียดของสายตัวนำไฟฟ้าและตำแหน่งการวางของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.3 ตัวแปรแสดงรายละเอียดของสายตัวนำไฟฟ้าและตำแหน่งการวางของสายส่งในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กทั้งสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและกระแสดตรง



รูปที่ 3.4 ตัวแปรแสดงรายละเอียดของพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเมื่อคิดผลของโคโรนาของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสดตรง

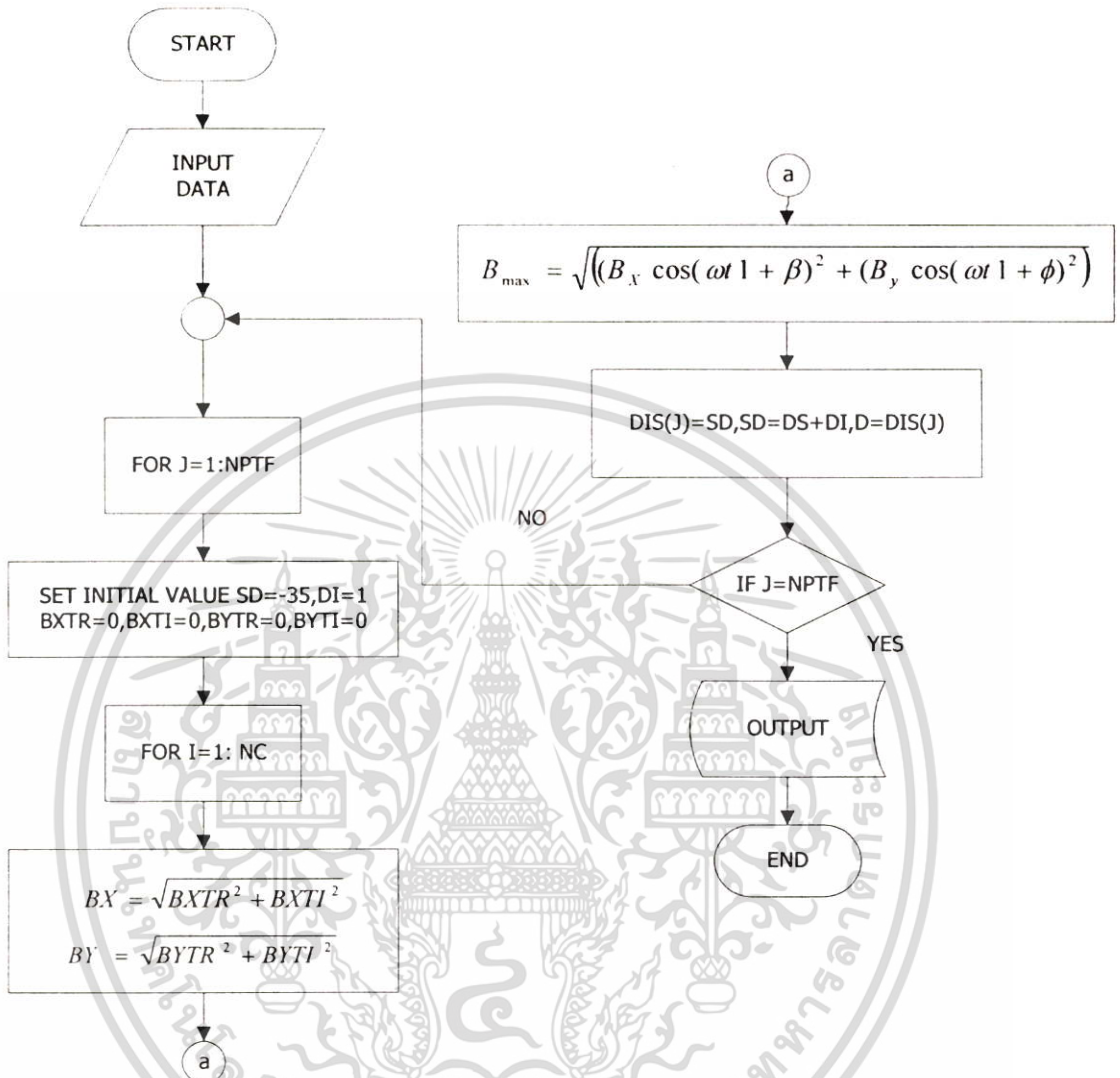
3.2.1.1 ตัวแปรแสดงรายละเอียดตัวแปรโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

NC	=	จำนวนของสายตัวนำบนสายส่งไฟฟ้า(สายตัวนำ+สายโอเวอร์เฮดกราวด์)
ANR	=	จำนวนBUNDLE ในสายตัวนำและสายโอเวอร์เฮดกราวด์
SUBSPC	=	ระยะห่างของสายตัวนำย่อยในBUNDLE (ถ้าไม่มีBUNDLE ให้ใส่ค่าเท่ากับศูนย์)
DIAM	=	เส้นผ่าศูนย์กลางของสายตัวนำย่อยในBUNDLE (m)
C	=	ตำแหน่งการวางของสายตัวนำและสายโอเวอร์เฮดกราวด์ในระนาบ XY โดยตำแหน่งกึ่งกลางเสาที่ระดับพื้นดินเป็นจุดเริ่มต้น (ORIGIN COORDINATE) (m)
SAG	=	ระยะห้อยตัวของสายตัวนำ (m)
V	=	ระดับแรงดันไฟฟ้า (ขนาด ,มมเฟส ; กรณีมมเฟสสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงให้กำหนดเท่ากับศูนย์) (kV)
I	=	กระแสไฟฟ้าบนสายส่งไฟฟ้าแรงสูง (ขนาด ,มมเฟส ; กรณีมมเฟสสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงให้กำหนดเท่ากับศูนย์) (kA)
SD	=	ตำแหน่งเริ่มต้นบนแกน X ที่ใช้ในการวิเคราะห์
NPTF	=	จำนวนจุดทั้งหมดบนแกน X ที่ใช้ในการวิเคราะห์
DI	=	ระยะห่างระหว่างจุดบนแกน X (สัมพันธ์กับตัวแปร NPTF)
VERT	=	ระยะความสูงที่ระดับพื้นดินในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ตามมาตรฐานIEEE มีค่าเท่ากับ 1 เมตร
NPTS	=	จำนวนการคำนวณระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากรณี 3 D ซึ่งสัมพันธ์กับตัวแปร SAG
G	=	ค่าเกรเดียนท์บนสายส่งไฟฟ้า (เฉพาะสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง)
G ₀	=	ค่าการทดสอบจากรางที่ 2.1 (เฉพาะสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง)
Kp	=	ค่าการทดสอบจากรางที่ 2.1 (เฉพาะสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง)
Ph	=	ระยะห่างระหว่างตัวนำ (เฉพาะสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง)
H	=	ความสูงของสายตัวนำ (เฉพาะสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง)

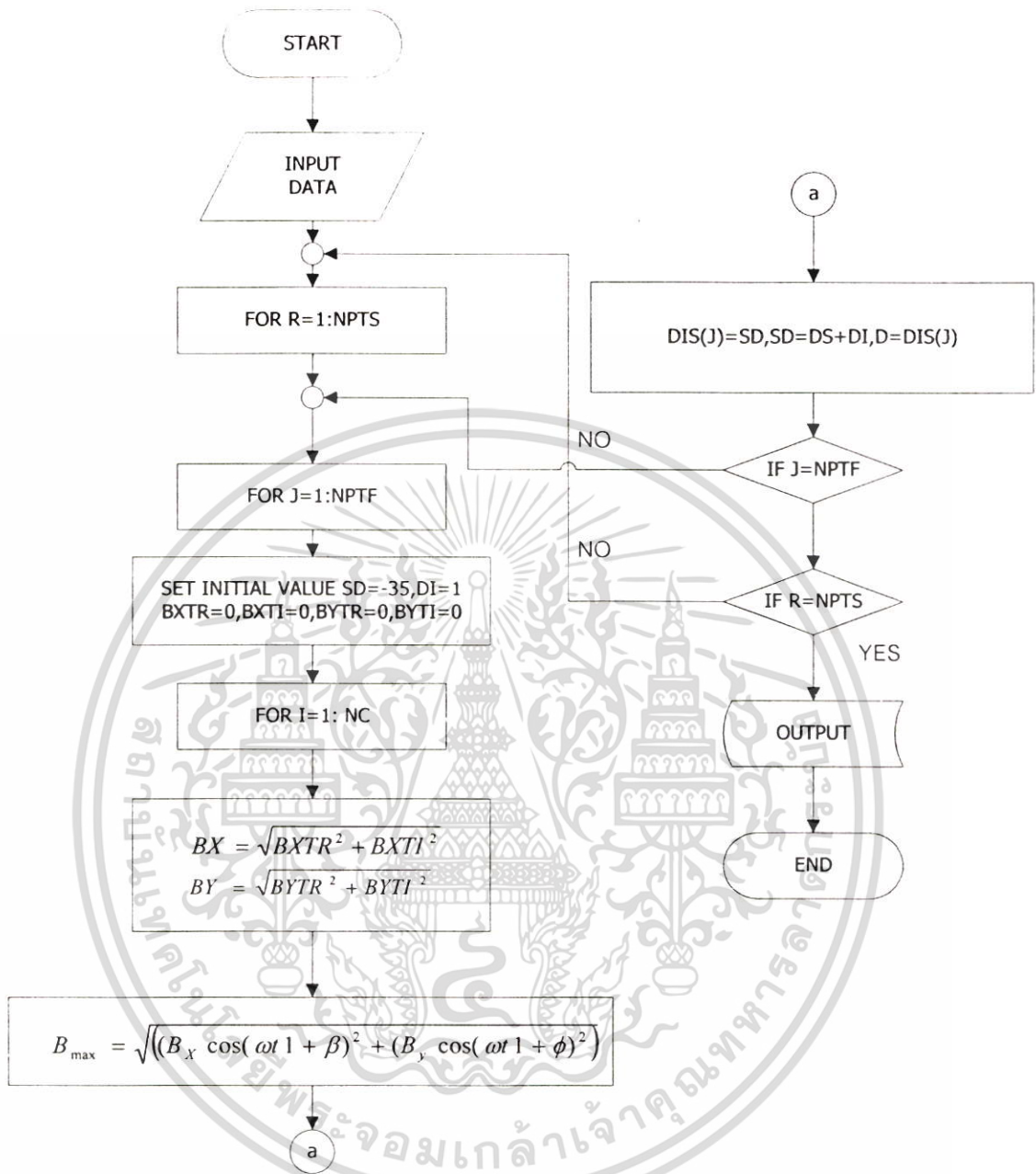
3.2.2 โปรแกรมคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

จะประกอบไปด้วยส่วนของโปรแกรมสำหรับคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กใน Lateral Profile Longitudinal Profile ที่มาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ในส่วนของการสนามแม่เหล็กวิเคราะห์ออกมาในรูปของหน่วยความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก (B) ตามสมการที่ 2.43 ซึ่งมีหน่วยเป็น GAUSS (1 TESLA= 10⁴ GAUSS)

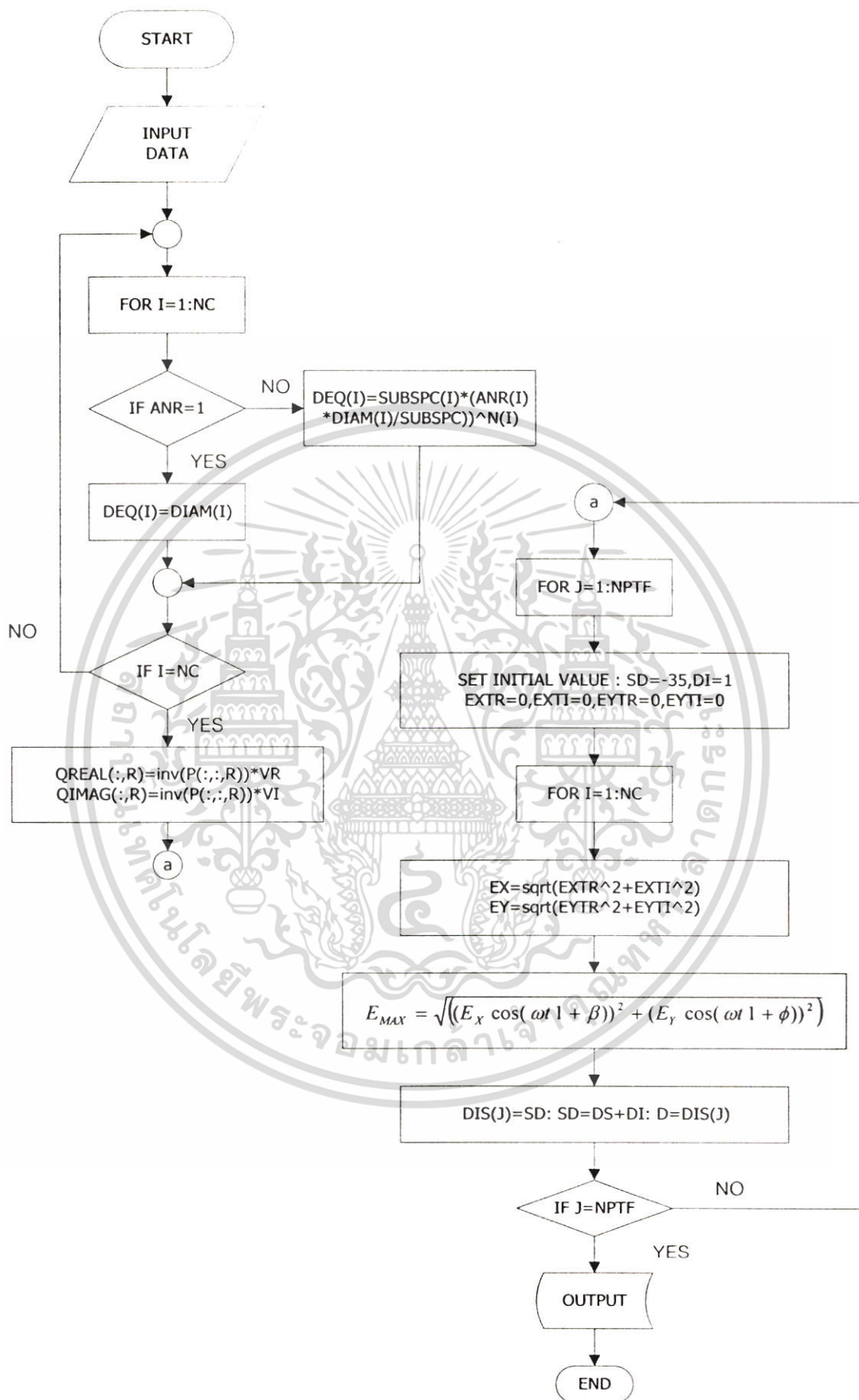
3.2.2.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ



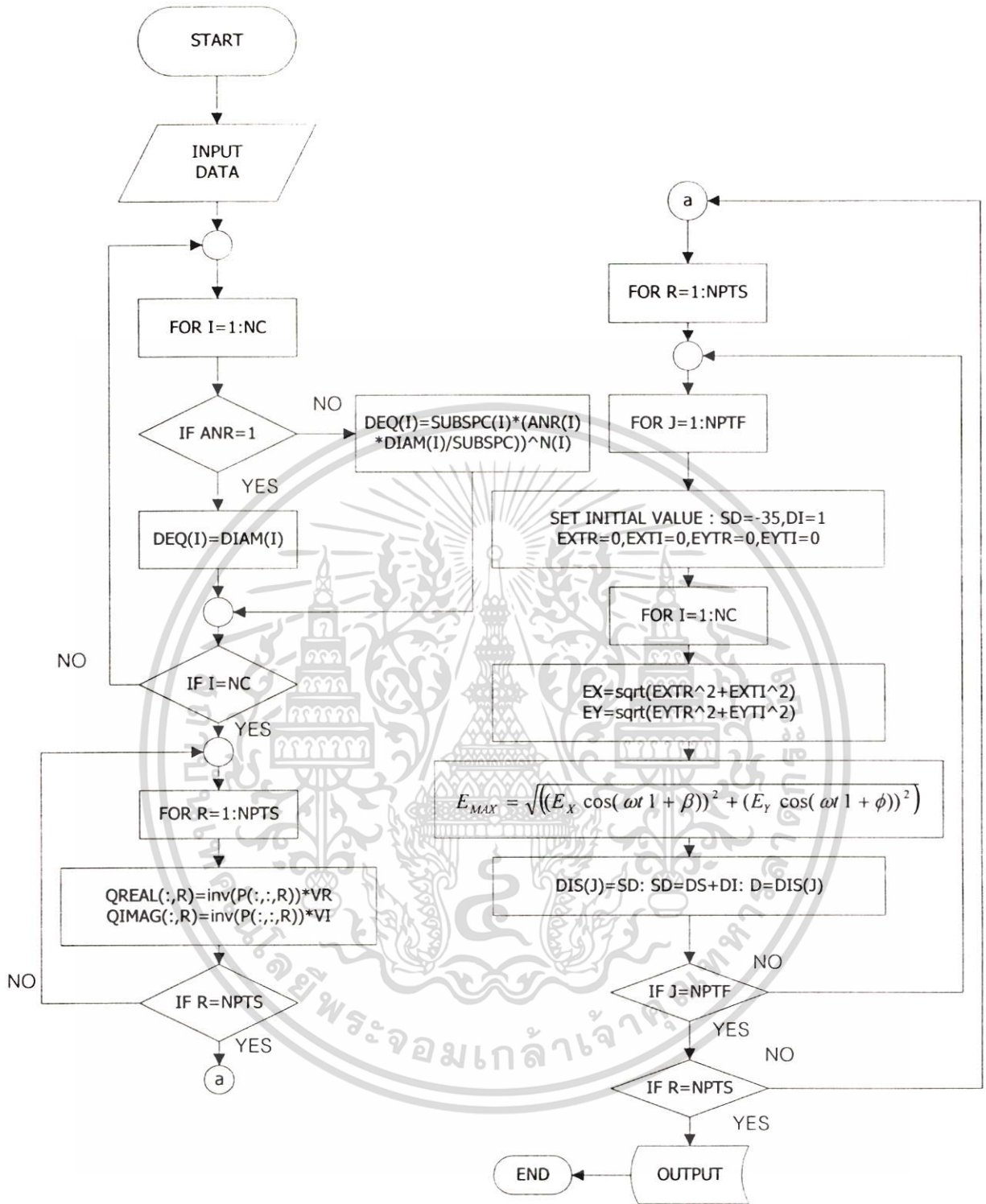
รูปที่ 3.5 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 2 มิติ



รูปที่ 3.6 โพล์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 3 มิติ

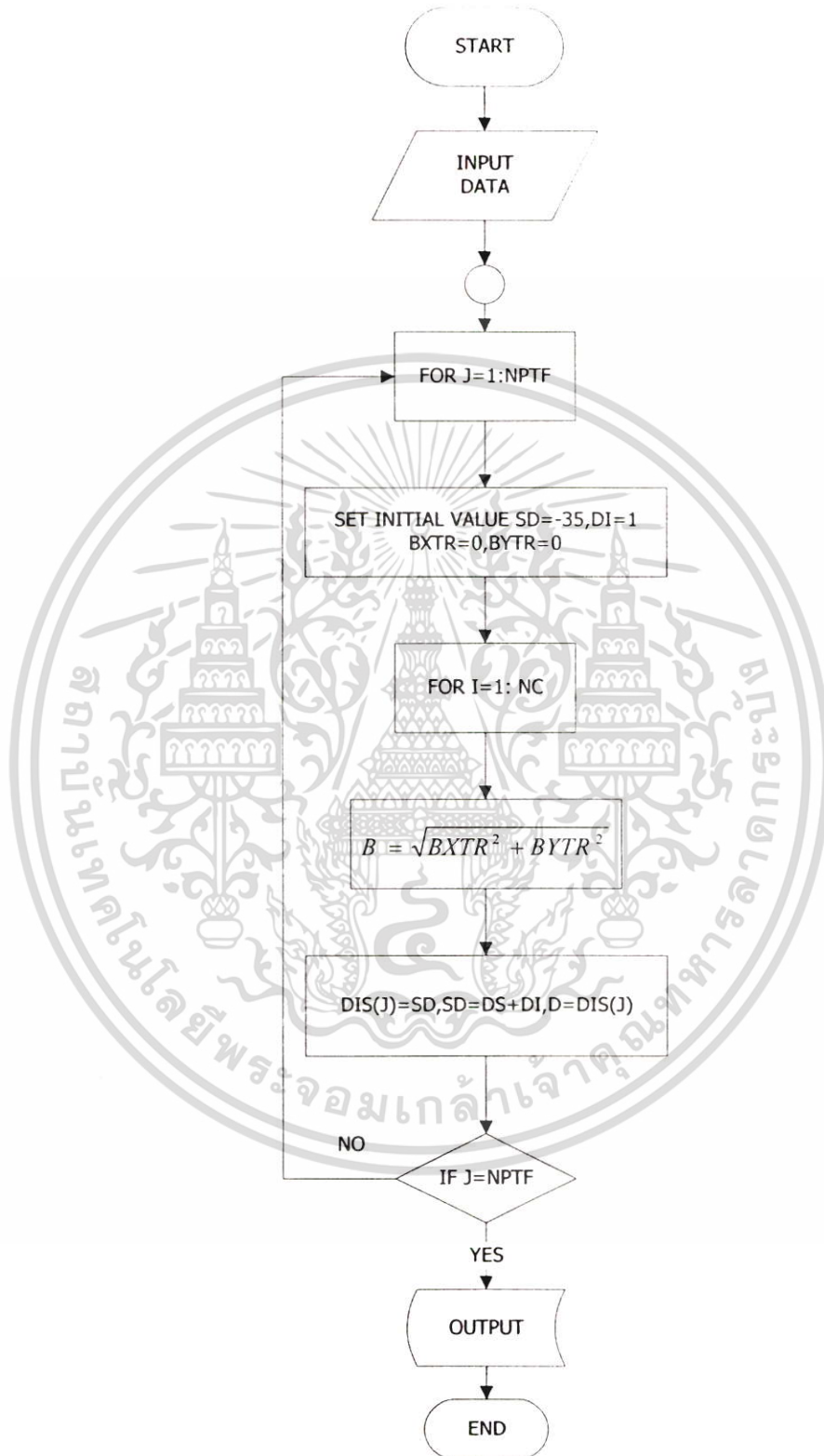


รูปที่ 3.7 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าไฟฟ้ากระแสสลับ 2 มิติ



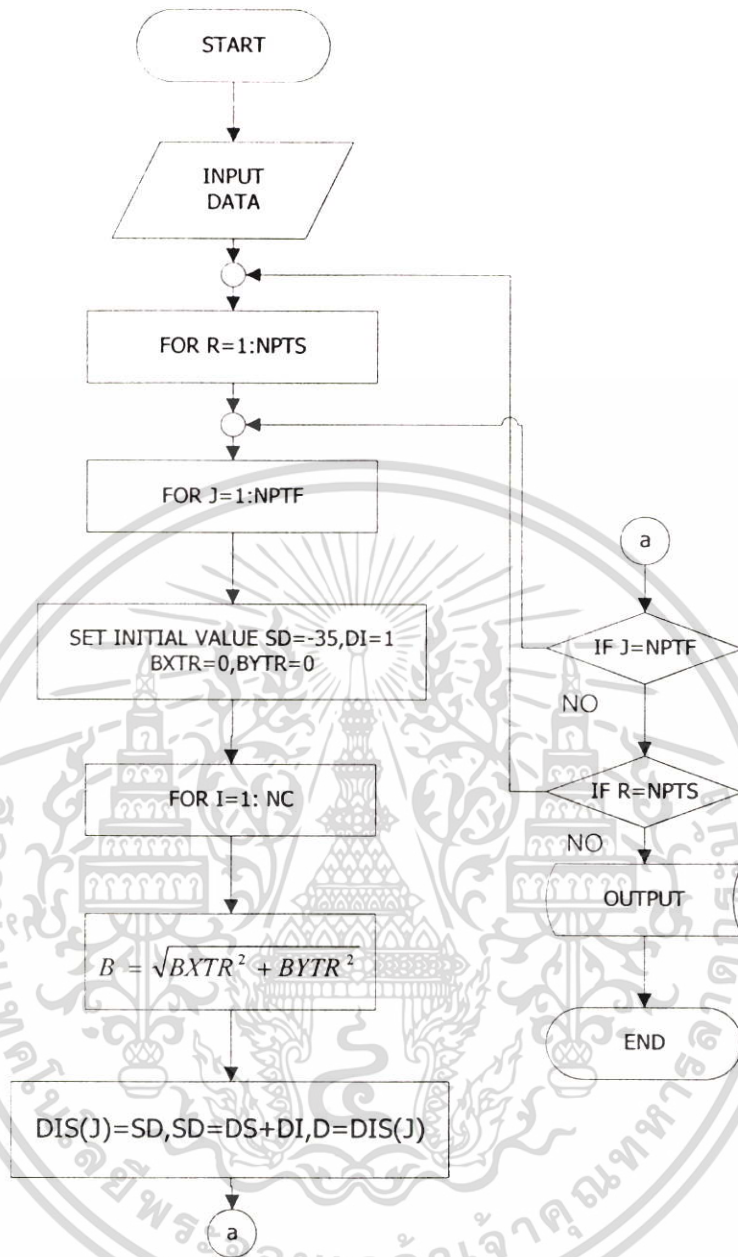
รูปที่ 3.8 โพลาร์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 3 มิติ

3.2.2.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

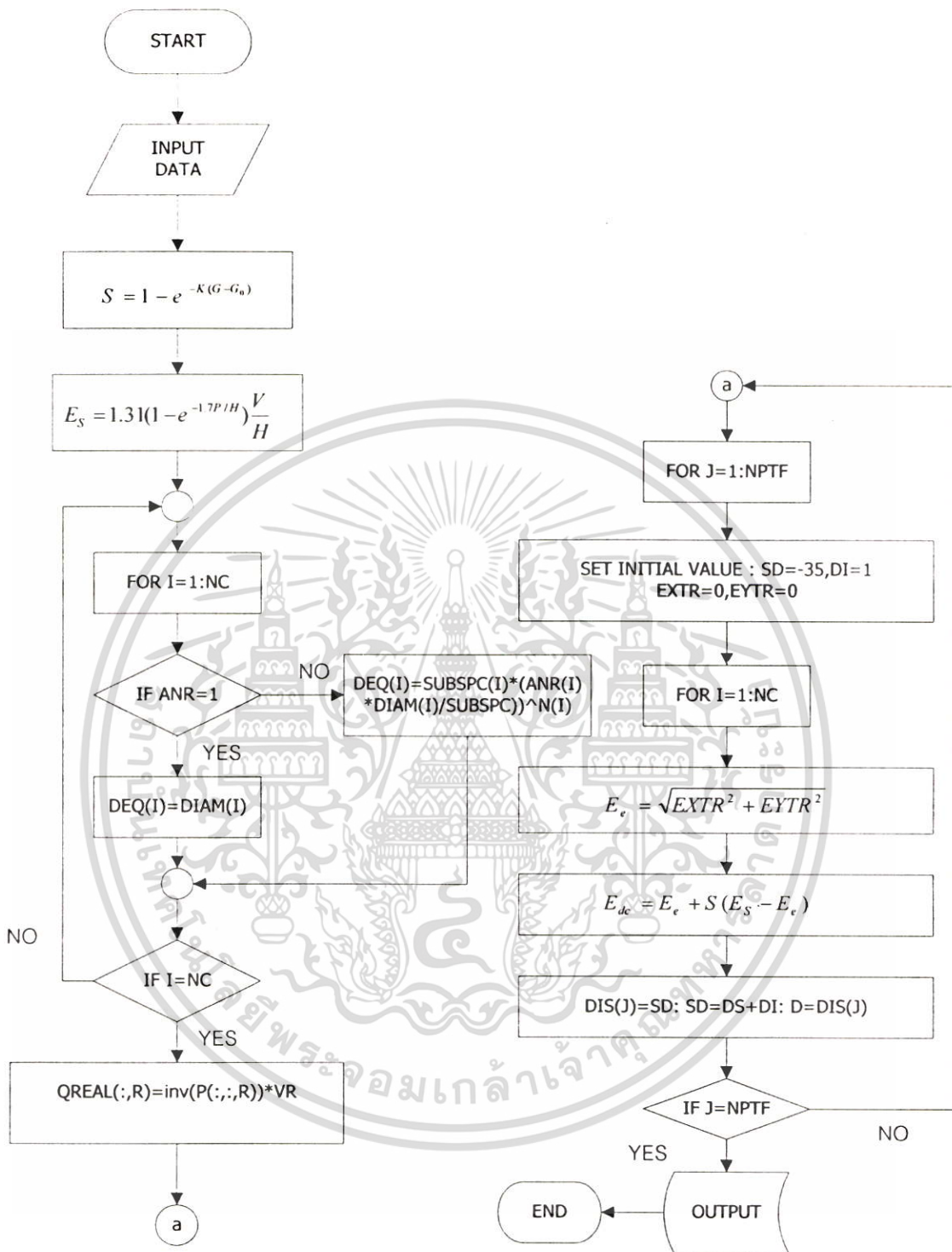


รูปที่ 3.9 โพลีชาร์ตการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง

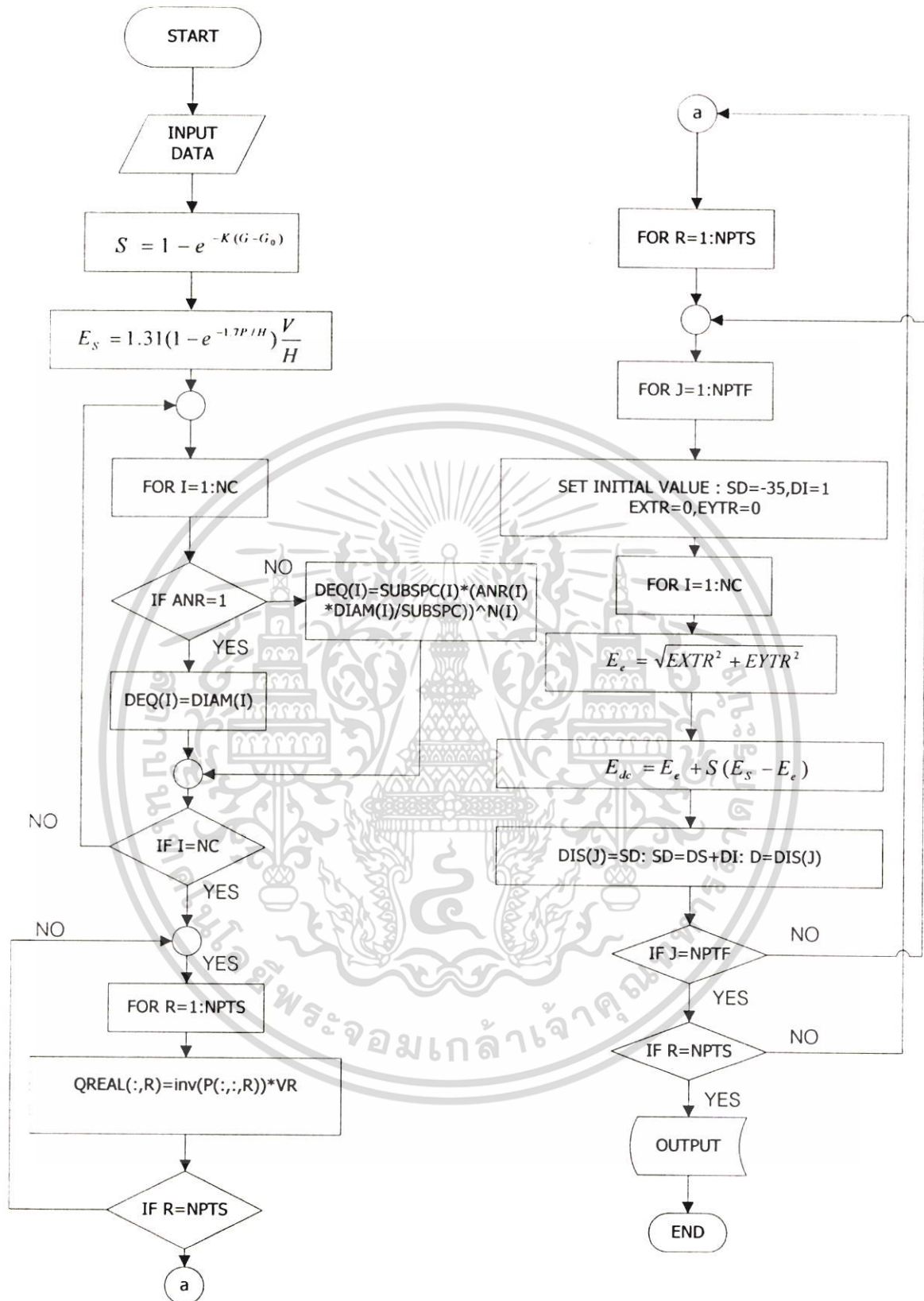
2 มิติ



รูปที่ 3.10 โพล်ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 3 มิติ



รูปที่ 3.11 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 2 มิติ



รูปที่ 3.12 โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมคำนวณสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 3 มิติ

3.2.3 การแสดงผล(Output Data)

เนื่องจากความสามารถของโปรแกรม MATLAB ในส่วนของการแสดงผลสามารถที่จะแสดงผลลัพธ์ในรูปแบบของตัวเลข แบบกราฟฟิคใน Lateral Profile Longitudinal Profile และสามารถแสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแบบเส้น โครงร่าง(CONTOUR) ดังแสดงตามตัวอย่าง

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่ง 500 kV วงจรเดียว

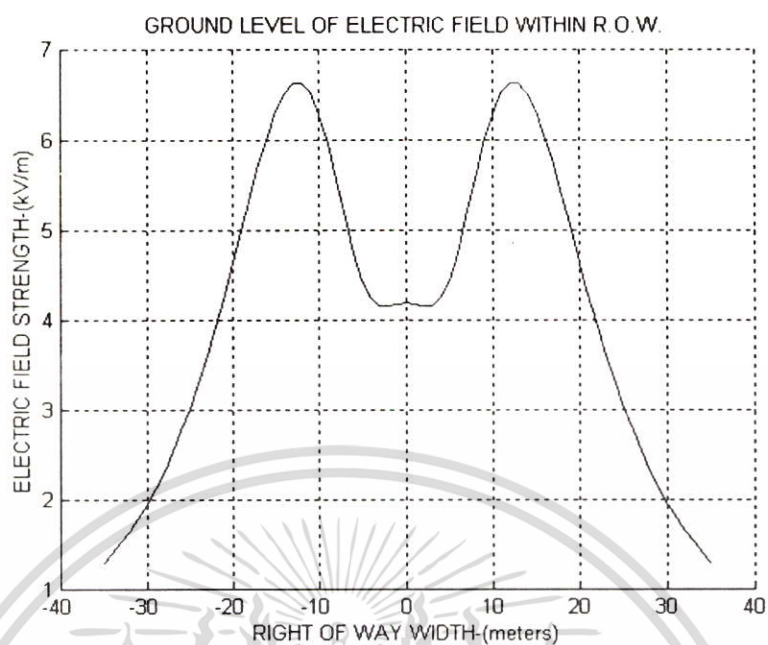
เขตเดินสายไฟฟ้า (เมตร)	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mG)
-35	1.219	91.813
-34	1.397	96.977
-33	1.515	102.562
-32	1.645	108.612
-31	1.788	115.173
-30	1.946	122.296
-29	2.121	130.038
-28	2.314	138.458
-27	2.526	147.622
-26	2.760	157.598
-25	3.016	168.454
-24	3.295	180.259
-23	3.598	193.078
-22	3.923	206.962
-21	4.268	221.949
-20	4.629	238.045
-19	5.000	255.218
-18	5.369	273.378
-17	5.724	292.368
-16	6.048	311.946
-15	6.321	331.781
-14	6.522	351.454

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

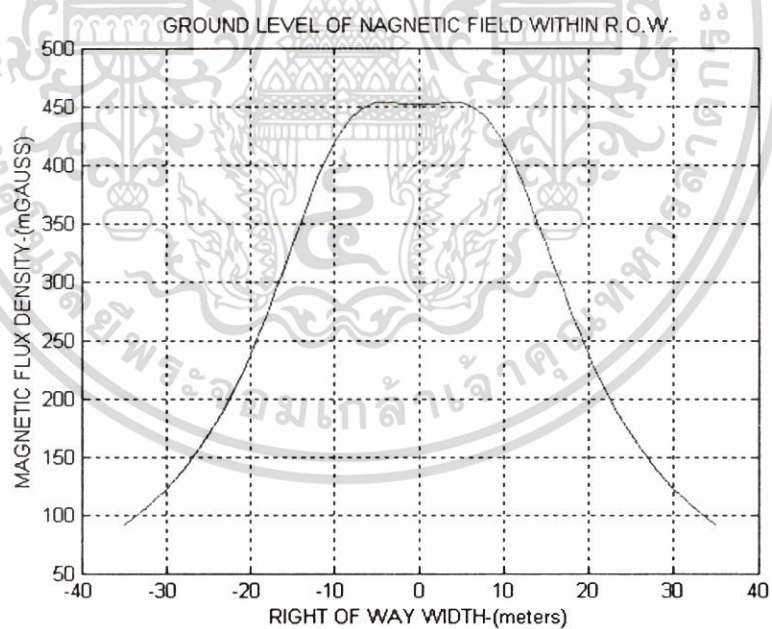
เขตเดินสายไฟฟ้า (เมตร)	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mG)
-13	6.630	370.483
-12	6.629	388.352
-11	6.511	404.568
-10	6.278	418.710
-9	5.947	430.479
-8	5.549	439.725
-7	5.128	446.461
-6	4.736	450.850
-5	4.425	453.193
-4	4.230	453.909
-3	4.149	453.521
-2	4.145	452.618
-1	4.169	451.779
0	4.181	451.444
1	4.169	451.779
2	4.145	452.618
3	4.149	453.521
4	4.230	453.909
5	4.425	453.193
6	4.736	450.850
7	5.128	446.461
8	5.549	439.725
9	5.947	430.479
10	6.278	418.710
11	6.511	404.568
12	6.629	388.352
13	6.630	370.482
14	6.522	351.454
15	6.321	331.781

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

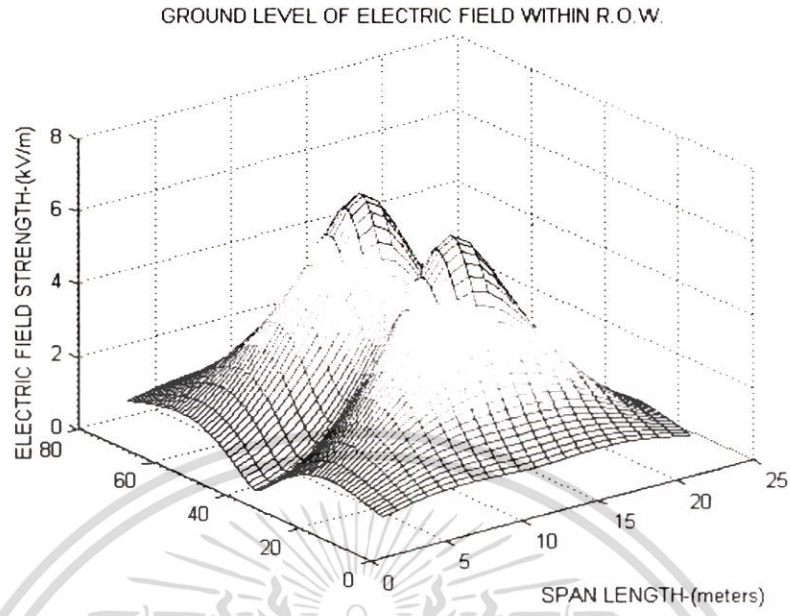
เขตเดินสายไฟฟ้า (เมตร)	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mG)
16	6.048	311.946
17	5.724	292.368
18	5.369	273.378
19	5.000	255.218
20	4.629	238.045
21	4.268	221.949
22	3.923	206.962
23	3.598	193.077
24	3.295	180.259
25	3.016	168.454
26	2.760	157.598
27	2.526	147.622
28	2.314	138.458
29	2.121	130.038
30	1.946	122.296
31	1.788	115.173
32	1.645	108.612
33	1.151	102.562
34	1.397	96.977
35	1.219	91.813



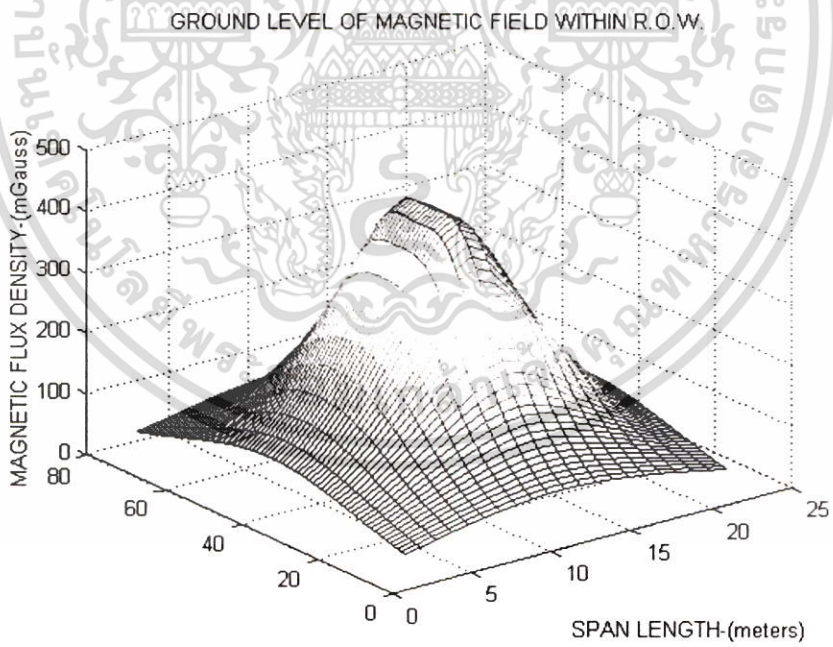
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็กกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว



รูปที่ 3.15 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสสลับ 3 มิติ 500 kV วงจรเดี่ยว



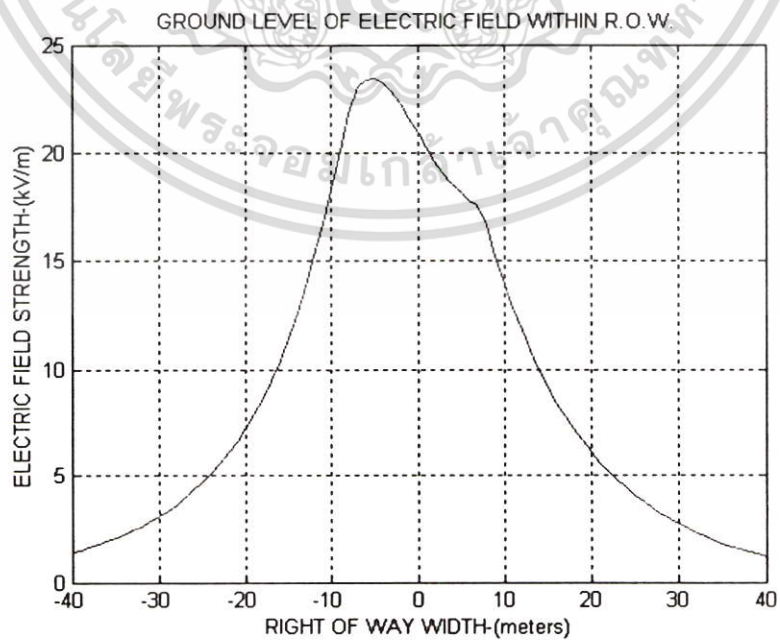
รูปที่ 3.16 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสสลับ 3 มิติ 500 kV วงจรเดี่ยว

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่ง 300 kV HVDC
(MONOPOLAR)

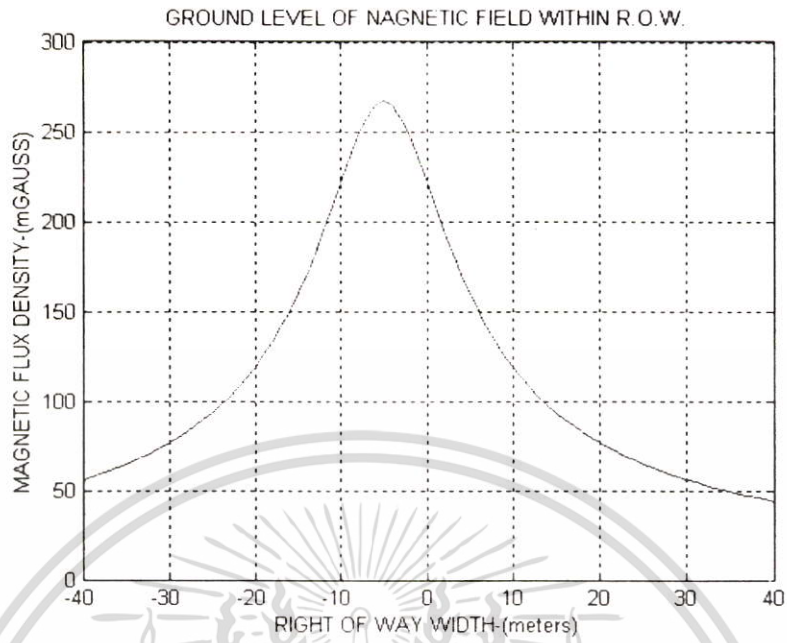
เขตเดินสายไฟฟ้า (เมตร)	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mG)
-20	7.2453	119.26
-19	7.9223	125.93
-18	8.6715	133.26
-17	9.5016	141.33
-16	10.4220	150.22
-15	11.4444	160
-14	12.5770	170.72
-13	13.83	182.38
-12	15.21	194.95
-11	16.719	208.23
-10	18.346	221.88
-9	20.069	235.29
-8	21.851	247.59
-7	23.058	257.66
-6	23.341	264.33
-5	23.406	266.67
-4	23.234	264.33
-3	22.844	257.66
-2	22.289	247.59
-1	21.636	235.29
0	20.946	221.88
1	20.268	208.23
2	19.635	194.95
3	19.068	182.38
4	18.577	170.72
5	18.166	160

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

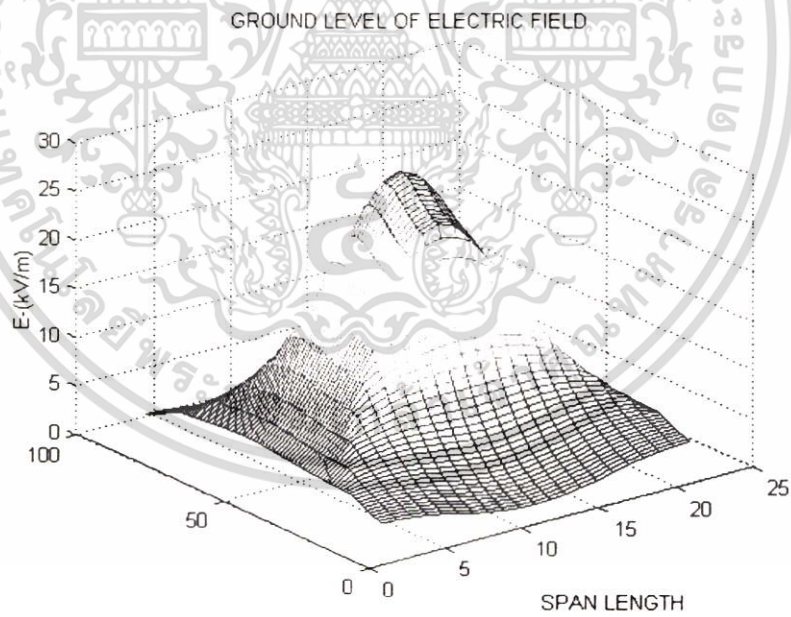
เขตเดินสายไฟฟ้า (เมตร)	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mG)
6	17.832	150.22
7	17.567	141.33
8	16.605	133.26
9	15.215	125.93
10	13.959	199.26
11	12.82	113.13
12	11.783	107.64
13	10.837	102.56
14	9.9709	97.911
15	9.1779	93.633
16	8.4505	89.69
17	7.7829	86.046
18	7.1695	82.672
19	6.6057	79.54
20	6.0874	76.626



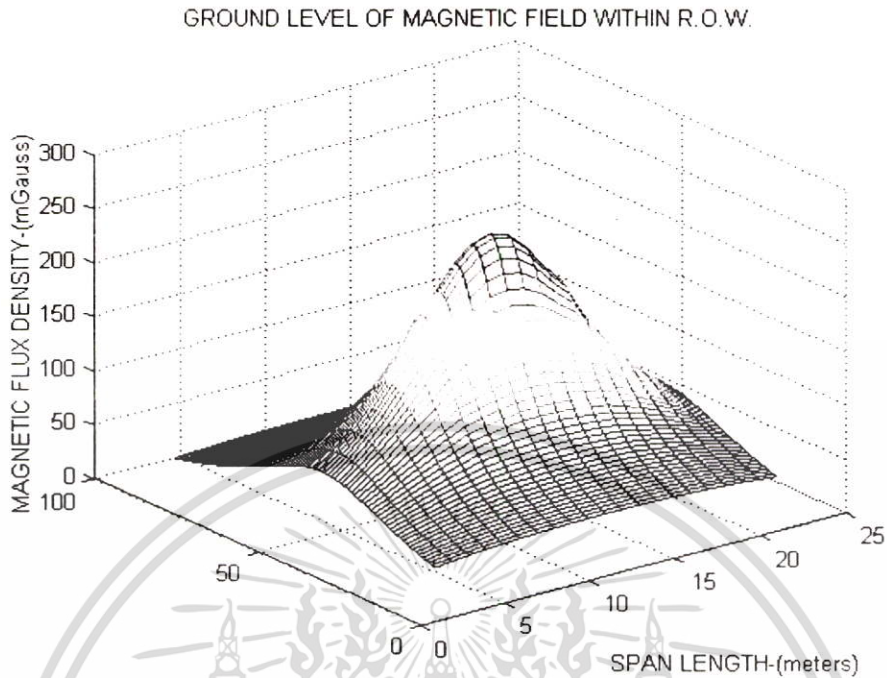
รูปที่ 3.17 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV แบบ MONOPOLAR



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็กกระแสตรง 300 kV แบบ MONOPOLAR



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรง 3 มิติ 300 kV แบบ MONOPOLAR

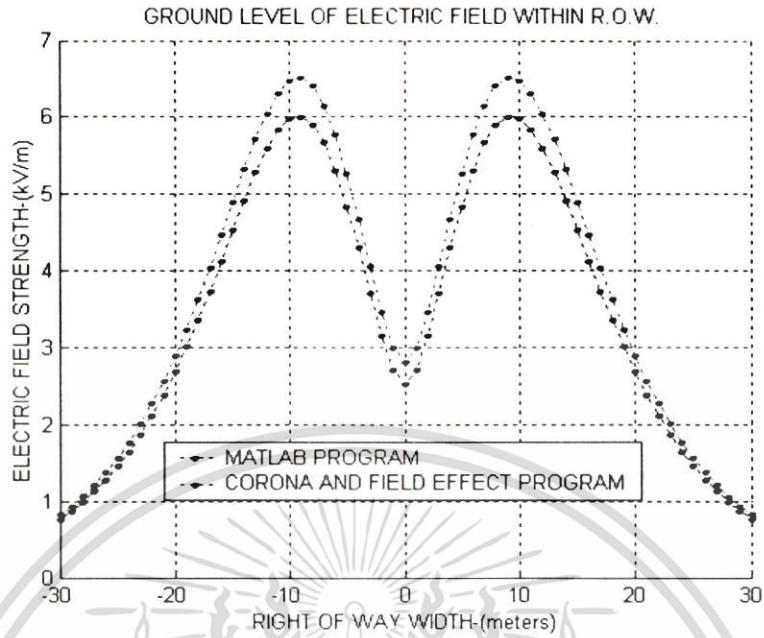


รูปที่ 3.20 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็กกระแสตรง 3 มิติ

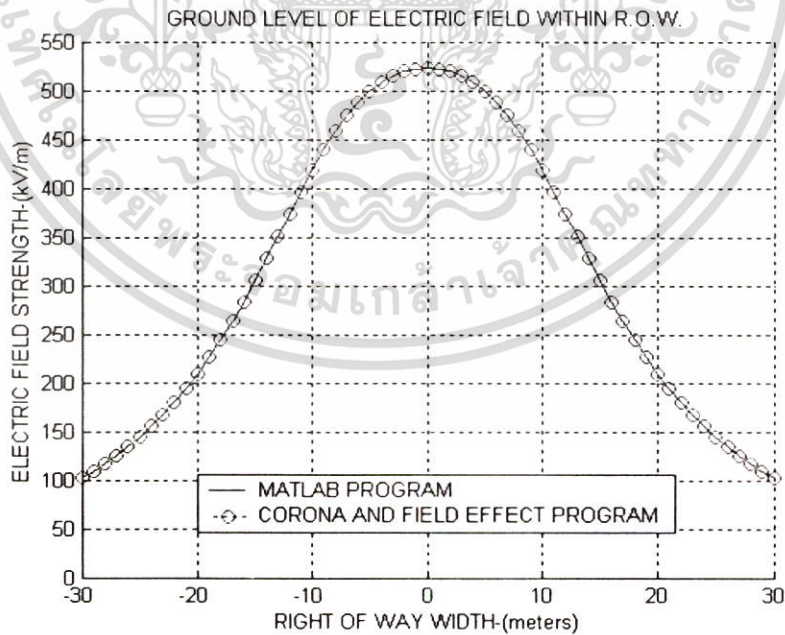
3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

3.3.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสลับ

ในขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่สร้างขึ้นจาก MATLAB ได้ดำเนินการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับโปรแกรมที่มีชื่อว่า “Corona and field effect” ซึ่งเป็นโปรแกรมที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หลากหลายรูปแบบทั้งการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500, 230 kV ชนิดวงจรคู่ จากการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในหลายรูปแบบดังกล่าวพบว่า ในส่วนที่เป็นการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่คำนวณจากโปรแกรม MATLAB จะมีค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์จากโปรแกรม Corona and field effect เมื่อใส่ค่าอินพุตเท่ากันตามตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.21 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างMATLAB กับ Corona and Field Effect Program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง500 kV (วงจรคู่) DL TOWER



รูปที่ 3.22 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างMATLAB กับ Corona and field effect program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง500kV (วงจรคู่) DL TOWER

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลสายส่งไฟฟ้า 230 kV วงจรคู่

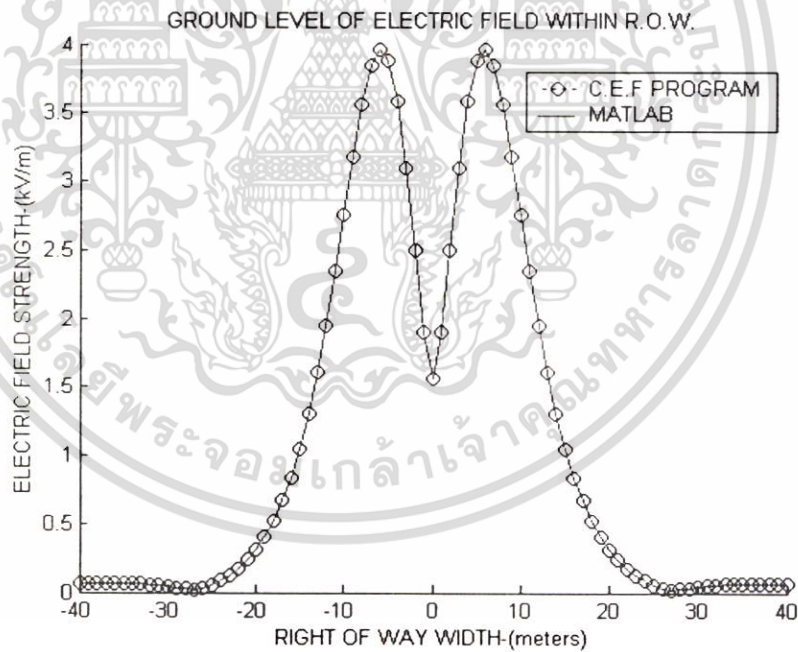
ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 230 kV (วงจรคู่)		
		X	Y
1. ตำแหน่งของสายตัวนำ	A	-4.67	20.80
	B	-4.78	14.60
	C	-5.10	8.40
	C'	4.67	20.80
	B'	4.78	14.60
	A'	5.10	8.40
	OHG1	-4.30	33.37
	OHG2	4.30	33.37

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 230 kV (วงจรคู่)		
		ระดับ	มุมเฟส
2. แรงดันของสายส่ง	A	241.5	0
	B	241.5	120
	C	241.5	-120
	C'	241.5	-120
	B'	241.5	120
	A'	241.5	0
	OHG1	0	0
	OHG2	0	0

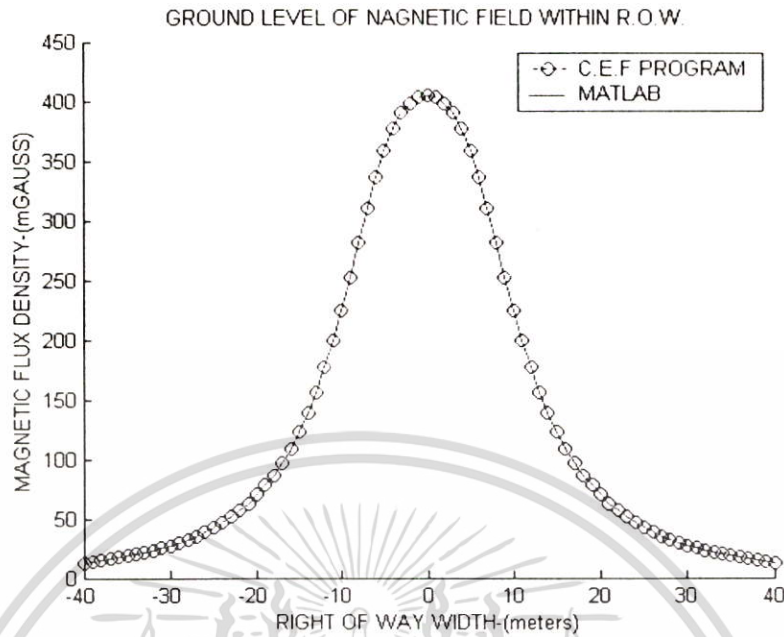
3. ข้อมูลสายไฟฟ้า (2 Bundle)	เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง 0.03391 m
4. ข้อมูลสาย โอเวอร์เฮด	เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง 0.009144 m

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 230 kV (วงจรคู่)		
	ระดับ	มุมเฟส	
2. กระแสไฟฟ้าของสายส่ง	A	2.25 kA	0
	B	2.25 kA	120
	C	2.25 kA	-120
	C'	2.25 kA	-120
	B'	2.25 kA	120
	A'	2.25 kA	0
	OHG1	0 kA	0
	OHG2	0 kA	0



รูปที่ 3.23 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่าง MATLAB กับ Corona and field effect program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV (วงจรคู่)

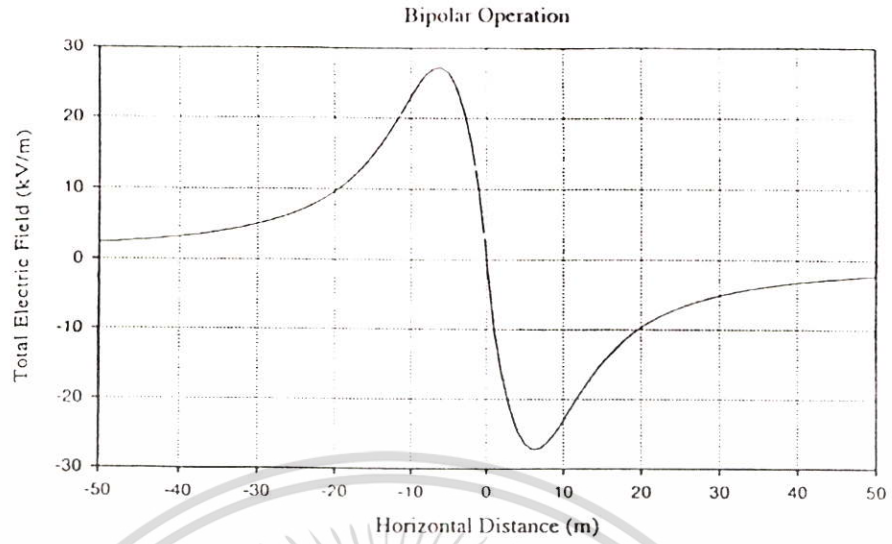


รูปที่ 3.24 ตัวอย่างเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กระหว่าง MATLAB กับ Corona and field effect program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV (วงจรคู่)

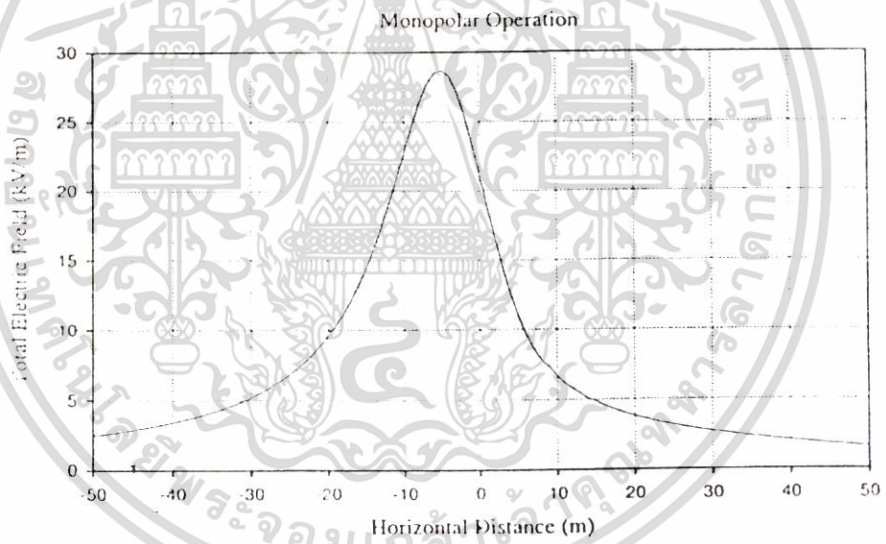
เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อระยะทางแล้ว จะเห็นว่ามีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่ไปในทิศทางเดียวกันซึ่งสามารถตรวจสอบได้ในภาคผนวก ก สำหรับสนามแม่เหล็กผลของการคำนวณจาก โปรแกรมทั้งสองจะ ไม่มีความแตกต่างกันเลยทั้งขนาด และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงต่อระยะทาง โปรแกรมที่สร้างขึ้นมาจาก MATLAB มีความน่าเชื่อถือพอที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อไป

3.3.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

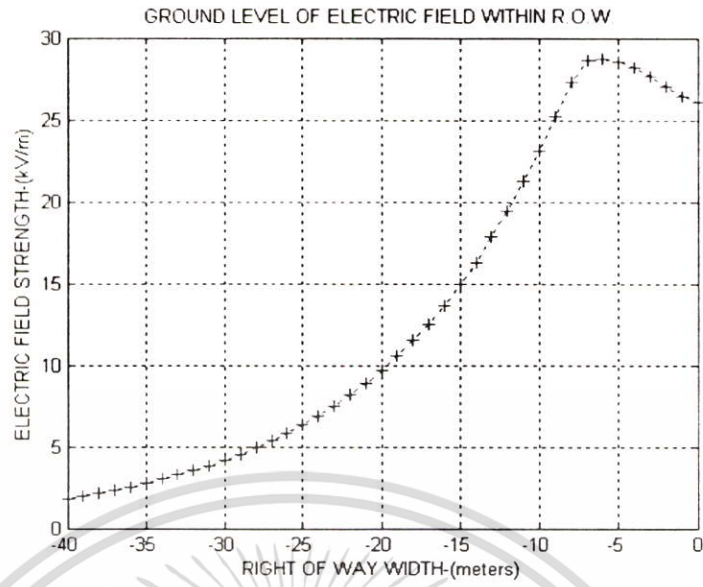
ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของ โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจาก MATLAB ได้ดำเนินการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับบริษัท TESHMONT ประเทศแคนาดา ซึ่งเป็นบริษัทที่ปรึกษาของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ทำ การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการสร้างสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงในประเทศไทย บริษัท TESHMONT ได้ทำการวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้าทั้งในรูปแบบ MONOPOLAR และ BIPOLAR ส่วนสนามแม่เหล็กทางบริษัท TESHMONT ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ไว้ ซึ่งในส่วนของการวิเคราะห์ผลของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่เกิดขึ้นสามารถดูผลเปรียบเทียบ ได้ในบทที่ 4



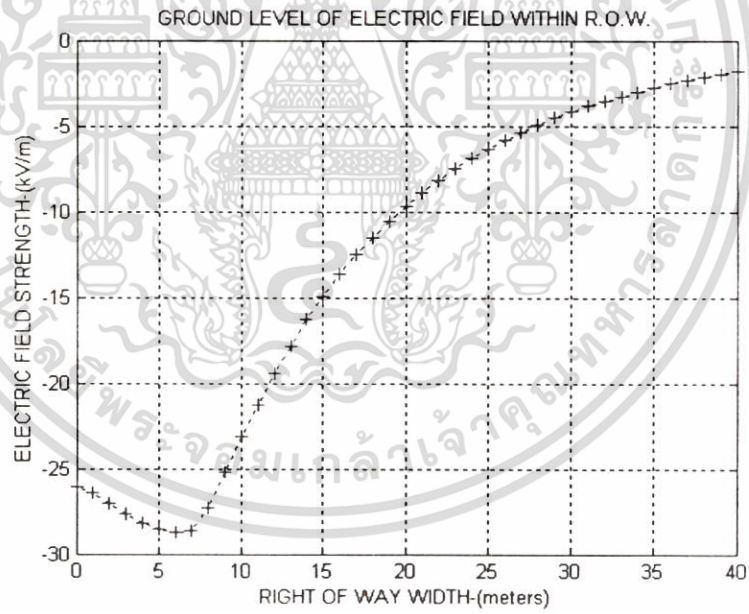
รูปที่ 3.25 ผลของสนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Bipolar ± 300 kV ของบริษัท TESHMONT



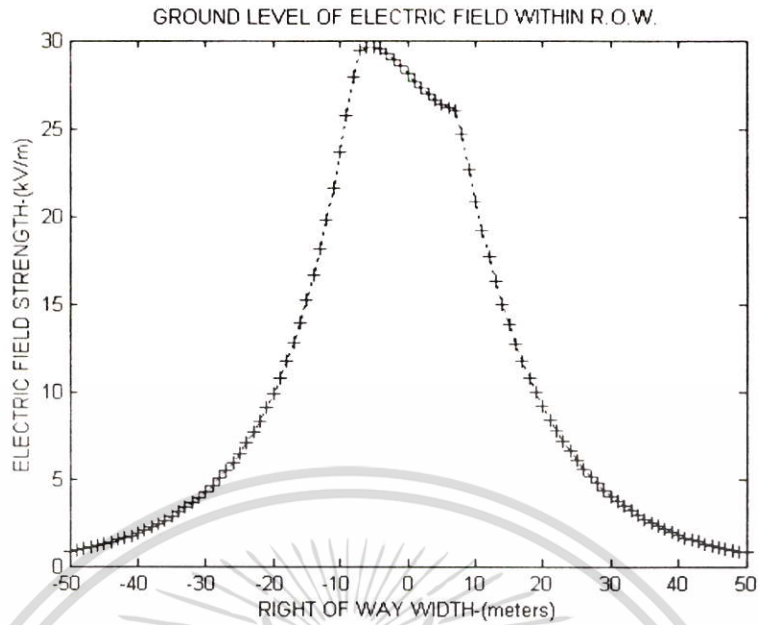
รูปที่ 3.26 ผลของสนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Monopolar 300 kV ของบริษัท TESHMONT



รูปที่ 3.27 ผลของสนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Bipolar ± 300 kV ของ MATLAB PROGRAM (ขั้วบวก)



รูปที่ 3.28 ผลของสนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Bipolar ± 300 kV ของบริษัท TESHMONT (ขั้วลบ)



รูปที่ 3.29 ผลของสนามไฟฟ้ากระแสตรงแบบ Monopolar ± 300 kV ของบริษัท TESHMONT (ซ้ายลบน)

ผลจากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าจากโปรแกรม MATLAB มีค่าใกล้เคียงกับผลจากวิเคราะห์ของบริษัท TESHMONT เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อระยะทางแล้วจะเห็นว่ามิลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่ไปในทิศทางเดียวกัน

3.4 บทสรุป

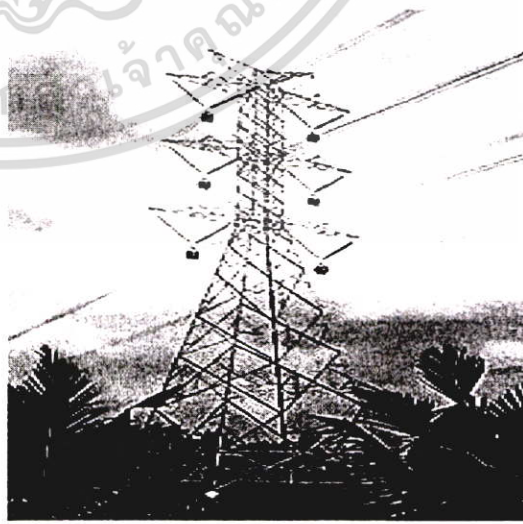
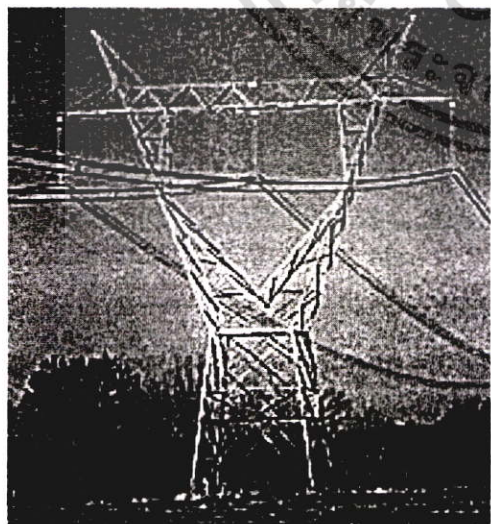
โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สร้างจาก MATLAB นี้เป็นการพัฒนาให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กใน Longitudinal Profile ซึ่งจากการตรวจสอบค่าความถูกต้องของตัวโปรแกรมด้วยการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในส่วน of กระแสสลับมีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการนำไปวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ส่วนสนามไฟฟ้ากระแสตรงจากการคำนวณด้วย MATLAB เปรียบเทียบกับผลของ TESHMONT ในแนวระยะที่ขอบ R.O.W มีค่าใกล้เคียงกัน

บทที่ 4

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

4.1 บทนำ

ระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยทั่วไปจะรับกำลังไฟฟ้าจากระบบผลิตผ่านเครือข่ายระบบไฟฟ้ากำลังเพื่อนำกำลังไฟฟ้าส่งต่อไปยังผู้ใช้ในบริเวณต่างๆ การส่งกำลังไฟฟ้าไปเป็นระยะทางไกลๆ นั้นจำเป็นต้องมีระบบการส่งกำลังไฟฟ้าต่างๆ เข้าด้วยกัน ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าของ กฟผ. ที่มีอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเป็นระบบสายอากาศ (OVERHEAD ARIAL LINE) มีการใช้งานอยู่ 2 ระบบคือระบบแรงดันสูงกระแสสลับ และระบบแรงดันสูงกระแสตรง ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับจะส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส 50 Hz ด้วยระดับแรงดันสูง 4 ระดับ คือ 500, 230, 115, 69 kV ระบบไฟฟ้ากระแสตรงปัจจุบัน กฟผ. มีการใช้งานอยู่แห่งเดียวคือใช้ในการเชื่อมระบบกำลังไฟฟ้าระหว่างประเทศไทยกับมาเลเซียที่ระดับแรงดัน 300 kV แบบ MONOPOLAR โดยปกติระดับความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้านั้นในระบบไฟฟ้ากระแสสลับระดับแรงดันไฟฟ้า 500 kV จึงมีค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงกว่าสายส่งไฟฟ้าที่ระดับแรงดันอื่น ส่วนระบบไฟฟ้ากระแสตรงระดับแรงดัน 300 kV เป็นระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแห่งเดียวในประเทศไทย ในวิทยานิพนธ์นี้จึงขอนำระดับแรงดันสูงสุดของทั้งสองระบบมาวิเคราะห์เพื่อคุณลักษณะการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ระดับพื้นดินตามมาตรฐาน IEEE จะพิจารณาที่ระดับความสูง 1 เมตรเหนือพื้นดิน ซึ่งจะเป็นหลักการที่จะนำไปวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ระดับพื้นดินต่อไป



รูปที่ 4.1 ลักษณะของเสาส่งไฟฟ้าเหนือพื้นดิน

4.2 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสูงสุด

ตามลักษณะโครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง (OVERHEAD LINE) สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระดับพื้นดินจะมีระดับความเข้มสูงสุดในบริเวณที่ตำแหน่งของสายตัวนำอยู่ใกล้กับพื้นดิน มากที่สุด นั่นก็คือตำแหน่งคกท้องช้างของสายส่ง หรือ ที่เราเรียกว่า MID SPAN ที่ตำแหน่งคกท้องช้างของสายส่ง หรือ ที่ตำแหน่งนี้สายตัวนำจะมีระยะหย่อนตัวสูงสุด (MAXIMUM SAG)

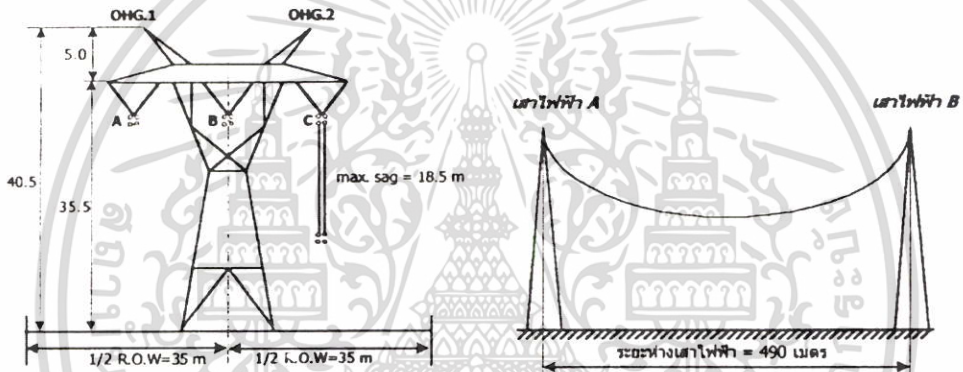


4.3 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนสายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับ

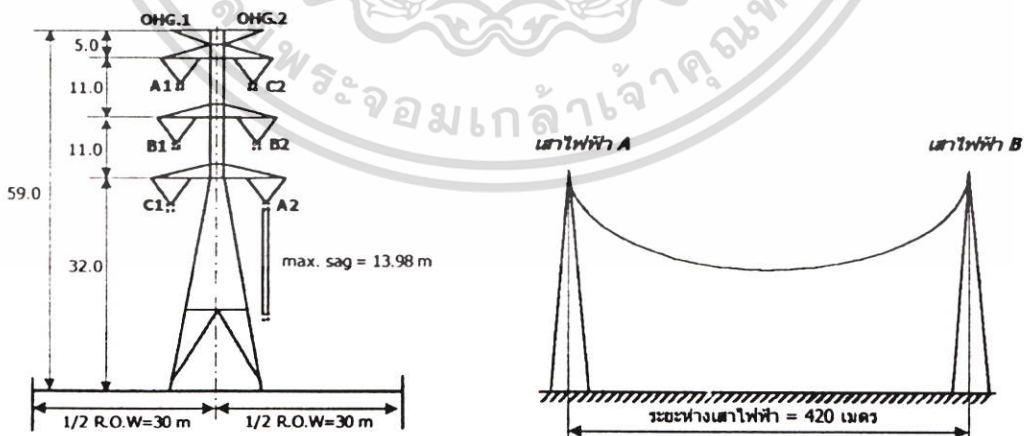
สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับที่ใช้งานในประเทศไทยมีหลายระดับคือ 500,230,115,69 kV เนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แปรผันตรง กับ แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าตามลำดับ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกสายส่ง 500 kV เป็นโมเดลในการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่ระดับความสูงต่างๆ ในเขตแนวการเดินสาย (ROW) และระยะระหว่างเสาส่ง (Span Length) โดยเฉพาะที่ตำแหน่งคกท้องช้างคือตำแหน่งที่มีค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด

4.3.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV

ปัจจุบันสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV ในประเทศไทยมีจำนวนมากกว่า 2,200 วงจร-กิโลเมตร ในจำนวนนี้แบ่งออกเป็นสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV ที่ใช้สายตัวนำคอบ 4 เส้น ขนาด 795 MCM ACSR/GA และสายส่งคอบ 4 เส้น ขนาด 1272 MCM ACSR/GA สำหรับที่เลือกวิเคราะห์จะเป็นสายส่ง 500 kV ที่ใช้สายตัวนำคอบ 4 เส้นขนาด 795 MCM ACSR/GA ซึ่งมีทั้งชนิดวงจรเดี่ยว (SINGLE CIRCUIT) และ วงจรคู่ (DOUBLE CIRCUIT) ซึ่งลักษณะของวงจรทั้งสองนอกจากจะมีความแตกต่างกันทางโครงสร้างแล้วยังมีความแตกต่างกันในเรื่องของระยะความกว้างของเขตแนวการเดินสาย (ROW.) และระยะห่างเสาไฟฟ้า (Span Length) ตามรายละเอียดดังรูป 4.2 และ 4.3



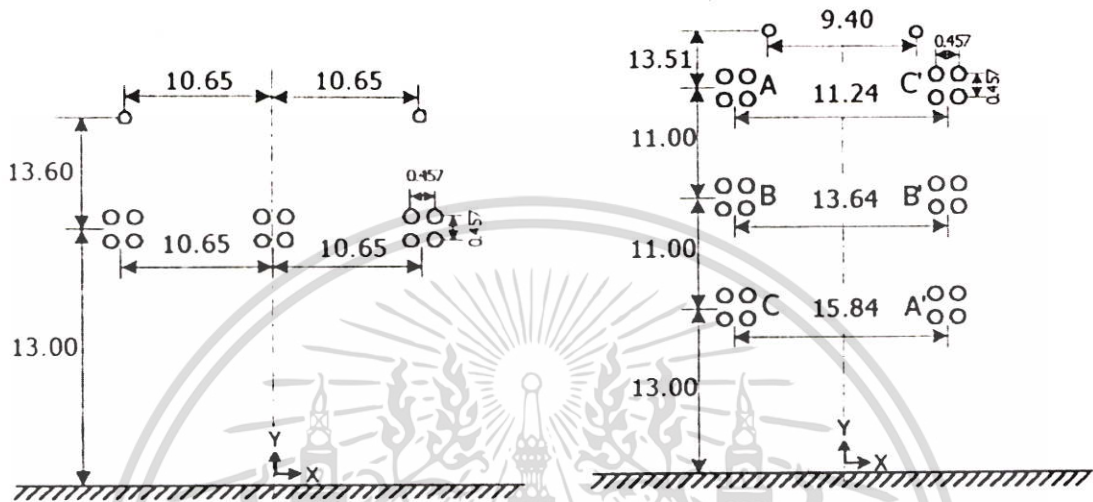
รูปที่ 4.3 ข้อมูลของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว



รูปที่ 4.4 ข้อมูลของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่

4.3.2 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสูงสุด จะใช้การวิเคราะห์ที่ตำแหน่งตักทองช้าง โดยตำแหน่งตักทองช้างนี้จะพิจารณาให้ตัวนำไฟฟ้าอยู่สูงจากพื้นดินเป็นระยะเท่ากับระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้าต่ำสุด (500 kV เท่ากับ 13 เมตร)



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งของตัวนำตัวนำในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด 500 kV

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรเดี่ยว)			สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรถู)		
		X	Y		X	Y
1. ตำแหน่งของสายตัวนำ						
	A	-10.65	13.00	A	-5.620	35.00
	B	0.00	13.00	B	-6.820	24.00
	C	10.65	13.00	C	-7.920	13.00
	-	-	-	C'	5.620	35.00
	-	-	-	B'	6.820	24.00
	-	-	-	A'	7.920	13.00
	OHG1	-10.65	26.60	OHG1	-4.70	48.51
	OHG2	10.65	26.60	OHG2	4.70	48.51

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรเดี่ยว)			สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรรู)		
		ระดับ	มุมเฟส		ระดับ	มุมเฟส
2. แรงดันของสายส่ง	A	525 kV	0	A	525	0
	B	525 kV	120	B	525	120
	C	525 kV	-120	C	525	-120
	-	-	-	C'	525	-120
	-	-	-	B'	525	120
	-	-	-	A'	525	0
	OHG1	0 kV	0	OHG1	0	0
	OHG2	0 kV	0	OHG2	0	0

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรเดี่ยว)			สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรรู)		
		ระดับ	มุมเฟส		ระดับ	มุมเฟส
2. กระแสไฟฟ้าของสายส่ง	A	3.15 kA	0	A	3.15 kA	0
	B	3.15 kA	120	B	3.15 kA	120
	C	3.15 kA	-120	C	3.15 kA	-120
	-	-	-	C'	3.15 kA	-120
	-	-	-	B'	3.15 kA	120
	-	-	-	A'	3.15 kA	0
	OHG1	0 kA	0	OHG1	0 kA	0
	OHG2	0 kA	0	OHG2	0 kA	0

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรเดี่ยว)		สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรรู)	
3. ข้อมูลสายไฟฟ้า (795 MCM ACSR/GA)	เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02772 m		เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02772 m	
4. ข้อมูลสายโอเวอร์เฮด (3/8 INCH (EHS))	เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.009144 m		เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.009144 m	

4.4 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ตำแหน่งตักห้องข้าง

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว

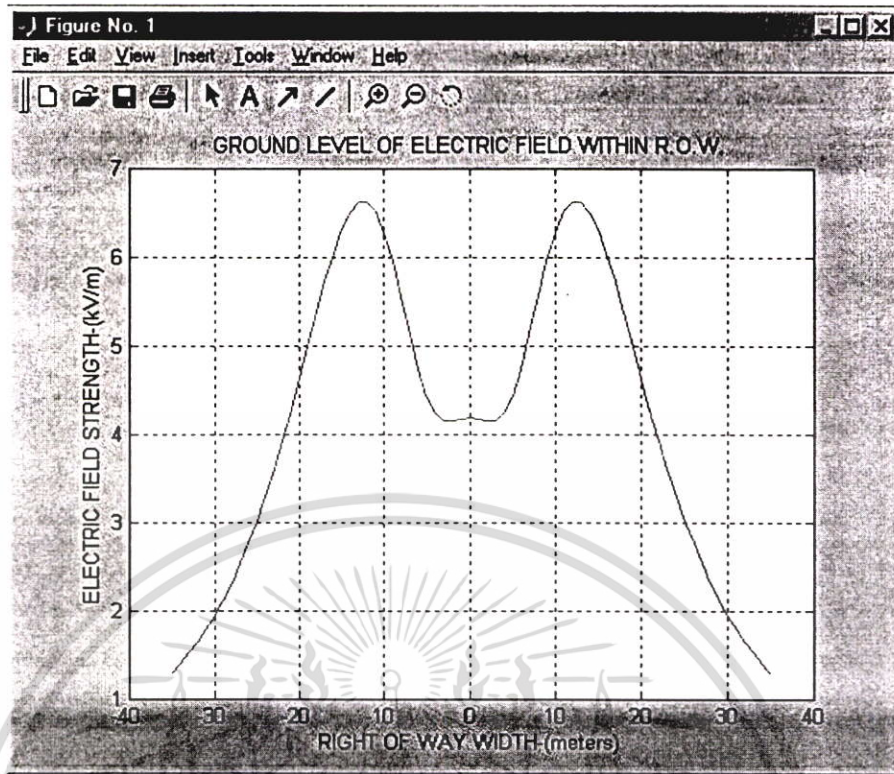
เขตเดินสายไฟฟ้า (เท่ากับ 70 เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV	
	วงจรเดี่ยว (SINGLE CIRCUIT)	
	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก(mGauss)
-35	1.219	91.813
-34	1.397	96.977
-33	1.515	102.562
-32	1.645	108.612
-31	1.788	115.173
-30	1.946	122.296
-29	2.121	130.038
-28	2.314	138.458
-27	2.526	147.622
-26	2.760	157.598
-25	3.016	168.454
-24	3.295	180.259
-23	3.598	193.078
-22	3.923	206.962
-21	4.268	221.949
-20	4.629	238.045
-19	5.000	255.218
-18	5.369	273.378
-17	5.724	292.368
-16	6.048	311.946
-15	6.321	331.781
-14	6.522	351.454
-13	6.630	370.483
-12	6.629	388.352
-11	6.511	404.568
-10	6.278	418.710

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

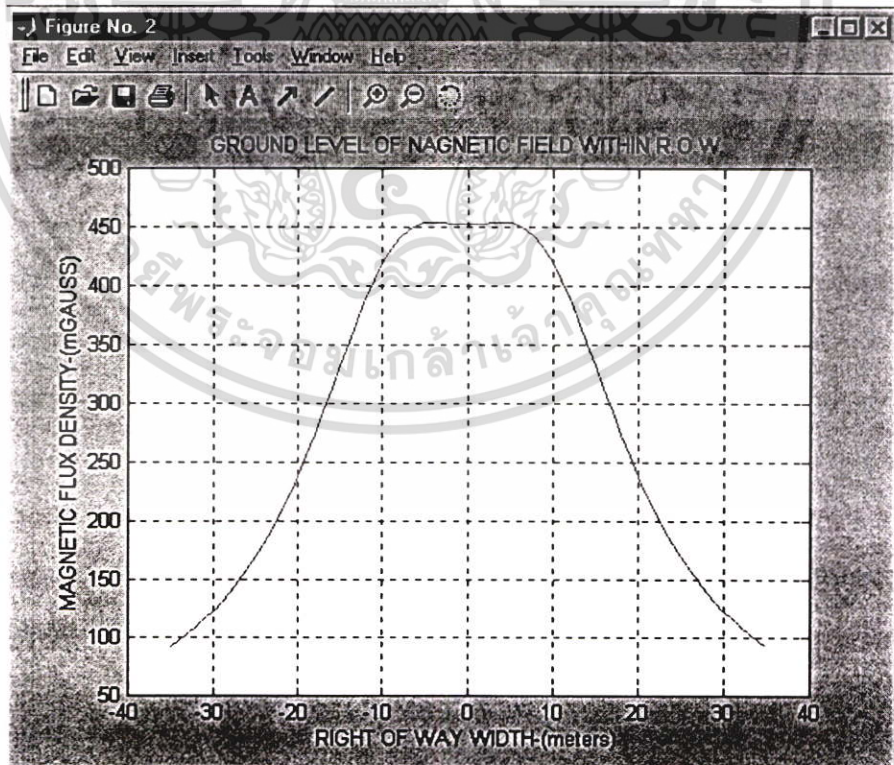
เขตเดินสายไฟฟ้า (เท่ากับ 70 เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV	
	วงจรเดี่ยว (SINGLE CIRCUIT)	
	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก(mGauss)
-9	5.947	430.479
-8	5.549	439.725
-7	5.128	446.461
-6	4.736	450.850
-5	4.425	453.193
-4	4.230	453.909
-3	4.149	453.521
-2	4.145	452.618
-1	4.169	451.779
0	4.181	451.444
1	4.169	451.779
2	4.145	452.618
3	4.149	453.521
4	4.230	453.909
5	4.425	453.193
6	4.736	450.850
7	5.128	446.461
8	5.549	439.725
9	5.947	430.479
10	6.278	418.710
11	6.511	404.568
12	6.629	388.352
13	6.630	370.482
14	6.522	351.454
15	6.321	331.781
16	6.048	311.946
17	5.724	292.368
18	5.369	273.378

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

เขตเดินสายไฟฟ้า (เท่ากับ 70 เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV	
	วงจรเดี่ยว (SINGLE CIRCUIT)	
	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก(mGauss)
19	5.000	255.218
20	4.629	238.045
21	4.268	221.949
22	3.923	206.962
23	3.598	193.077
24	3.295	180.259
25	3.016	168.454
26	2.760	157.598
27	2.526	147.622
28	2.314	138.458
29	2.121	130.038
30	1.946	122.296
31	1.788	115.173
32	1.645	108.612
33	1.151	102.562
34	1.397	96.977
35	1.219	91.813



รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว



รูปที่ 4.7 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่

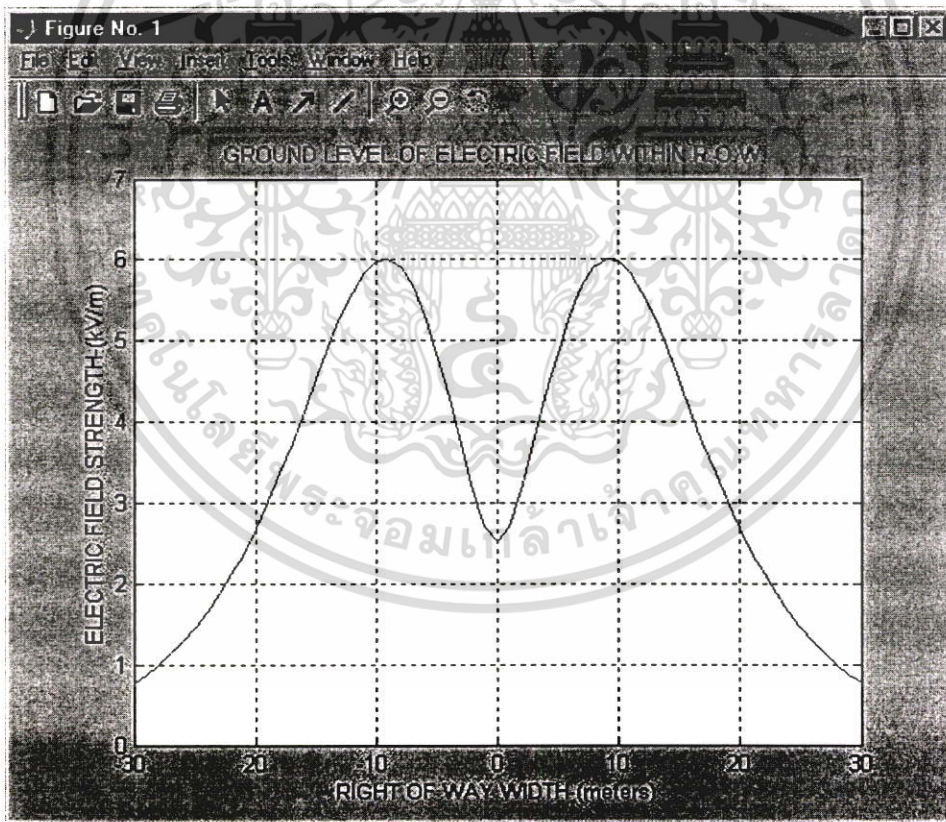
เขตเดินสายไฟฟ้า (เท่ากับ 60 เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV	
	วงจรคู่ (DOUBLE CIRCUIT)	
	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก(mGauss)
-30	0.764	72.120
-29	0.871	77.092
-28	0.991	82.503
-27	1.126	88.396
-26	1.280	94.818
-25	1.453	101.820
-24	1.648	109.456
-23	1.866	117.780
-22	2.111	126.849
-21	2.382	136.716
-20	2.682	147.429
-19	3.010	159.025
-18	3.365	171.524
-17	3.741	184.921
-16	4.134	199.174
-15	4.531	214.194
-14	4.290	229.833
-13	5.2823	245.879
-12	5.596	262.0501
-11	5.837	278.008
-10	5.982	293.374
-9	6.012	307.767
-8	5.912	320.844
-7	5.678	332.337
-6	5.318	342.085
-5	4.848	350.042
-4	4.300	356.261

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

เขตเดินสายไฟฟ้า (เท่ากับ 70 เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV	
	วงจรเดี่ยว (DOUBLE CIRCUIT)	
	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mGauss)
-3	3.715	360.863
-2	3.155	364.003
-1	2.714	365.820
0	2.535	366.414
1	2.714	365.820
2	3.155	364.003
3	3.715	360.864
4	4.300	356.261
5	4.848	350.042
6	5.318	342.086
7	5.678	332.337
8	5.912	320.844
9	6.012	307.767
10	5.982	293.374
11	5.837	278.008
12	5.596	262.051
13	5.282	245.879
14	4.920	229.834
15	4.531	214.195
16	4.134	199.175
17	3.741	184.922
18	3.365	171.525
19	3.010	159.025
20	2.682	147.429
21	2.382	136.716
22	2.111	126.846
23	1.866	117.781

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

เขตเดินสายไฟฟ้า (เท่ากับ 60 เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV	
	วงจรคู่ (DOUBLE CIRCUIT)	
	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก(mGauss)
24	3.295	109.456
25	3.016	101.821
26	2.760	94.818
27	2.526	88.396
28	2.314	82.503
29	2.121	77.092
30	1.946	72.120



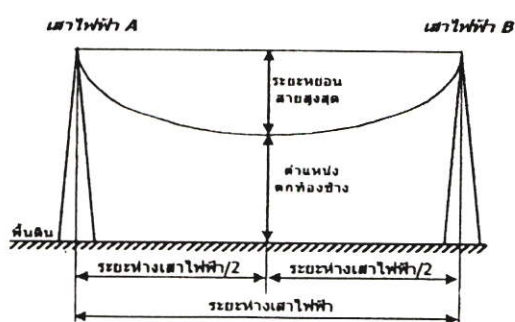
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรคู่



รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่

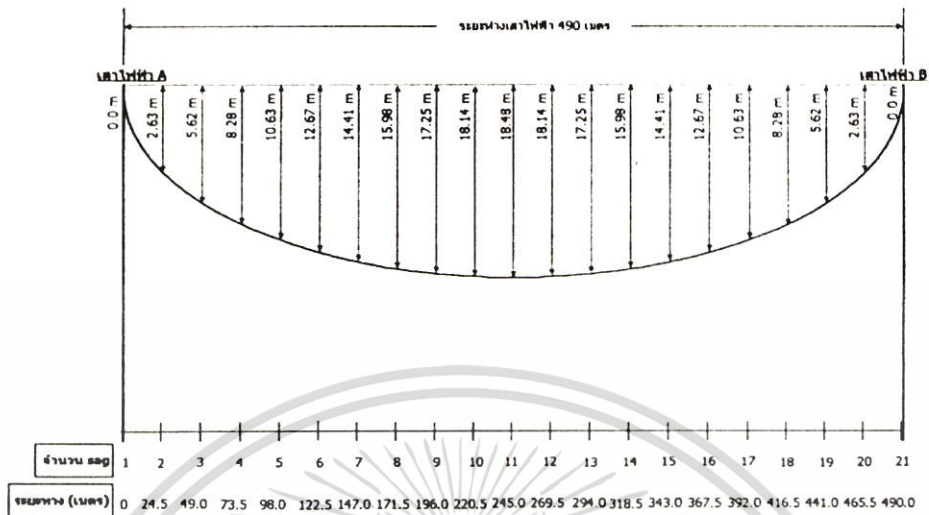
4.5 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า

จากโครงสร้างลักษณะของเสาส่งไฟฟ้าโดยทั่วไป ตำแหน่งของสายตัวนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้า (Sag) โดยระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุด (Maximum Sag) ที่ตำแหน่งตรงกลางของระยะห่างเสาไฟฟ้า ถ้าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตลอดระยะห่างระหว่างเสาทำให้ทราบถึงการกระจายตัว และการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ผลของการเปลี่ยนแปลงสามารถวิเคราะห์ให้เห็น ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อวิเคราะห์ใน LONGITUDINAL PROFILE

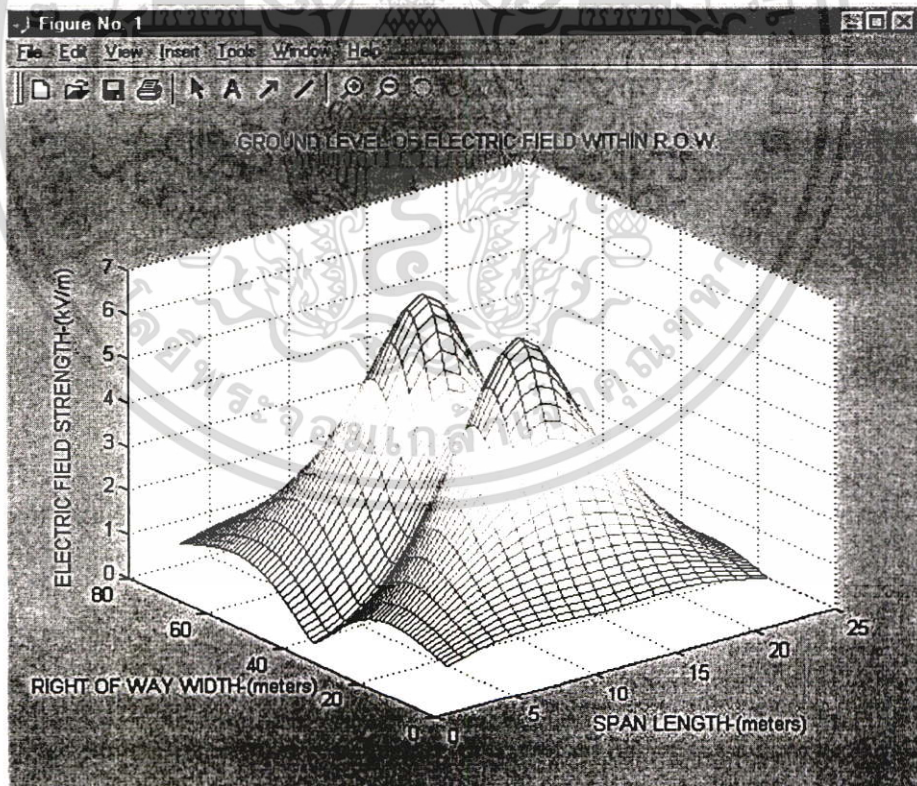


รูปที่ 4.10 ระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้า (SPAN LENGTH)

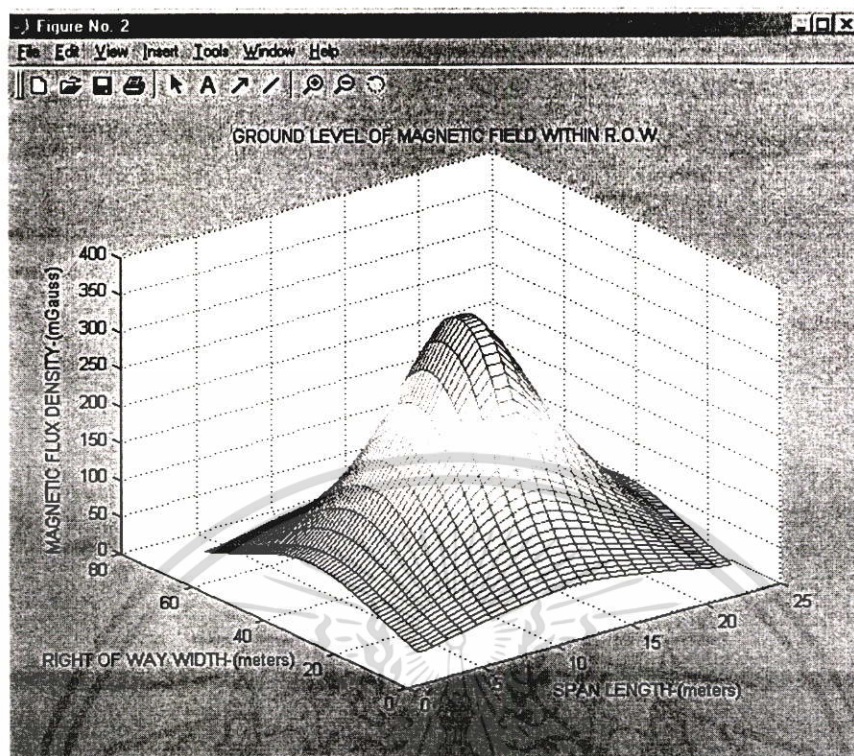
4.5.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดียว



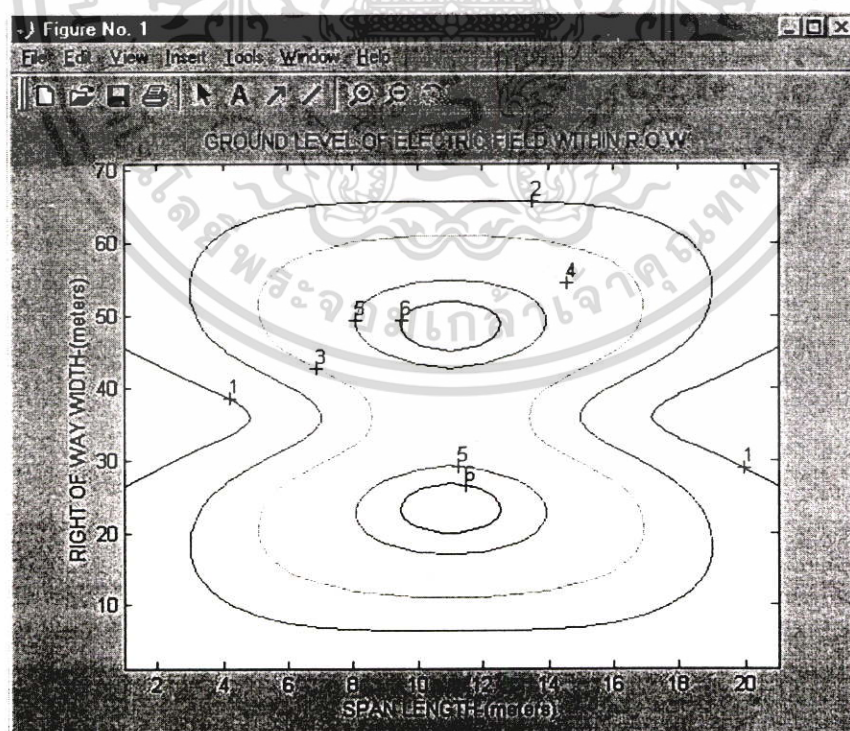
รูปที่ 4.11 ระยะหอนของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่างๆ ของสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดียว



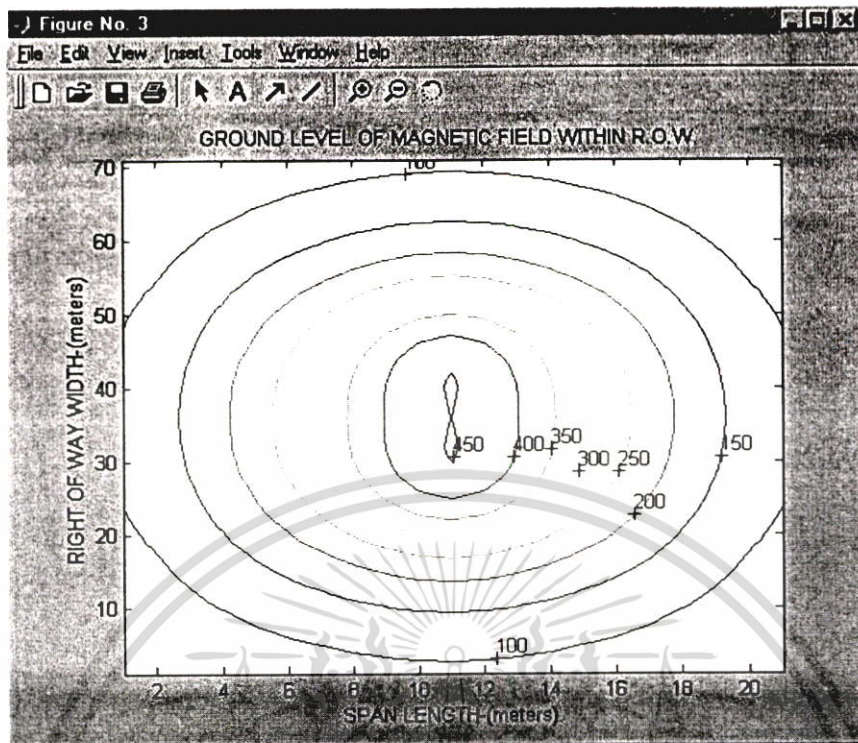
รูปที่ 4.12 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดียว



รูปที่ 4.13 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV
วงจรเดียว

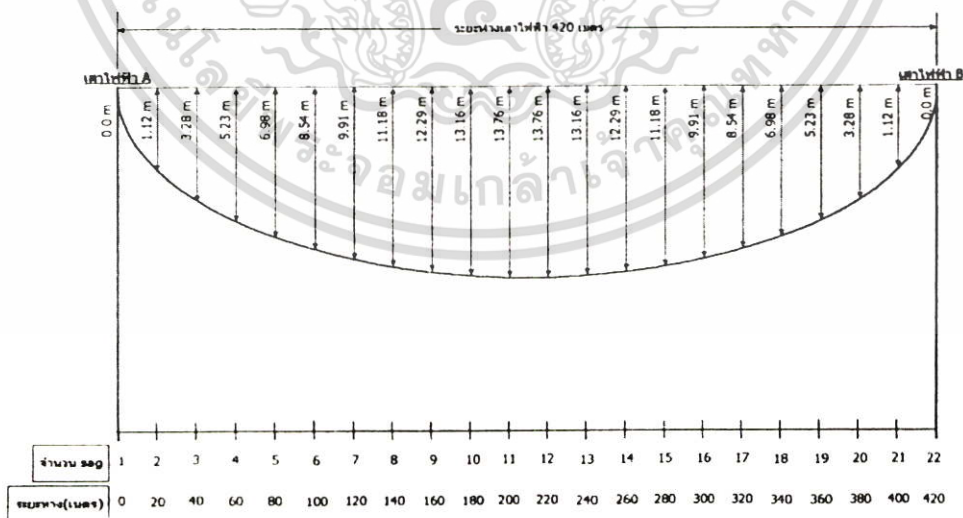


รูปที่ 4.14 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV
วงจรเดียว (CONTOUR)

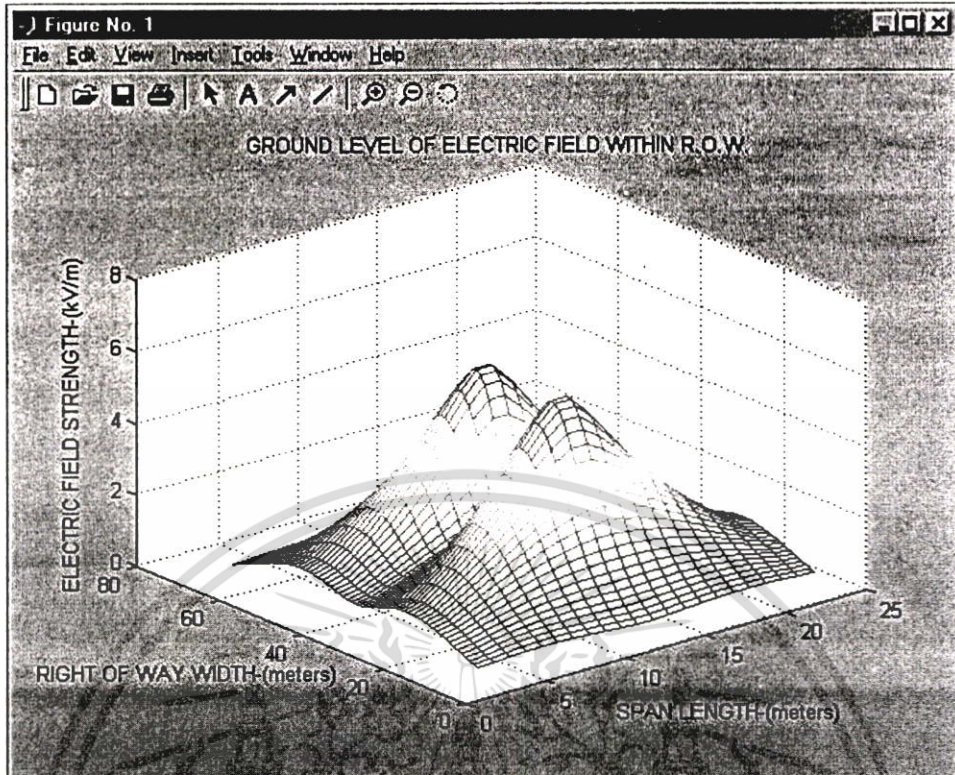


รูปที่ 4.15 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว (CONTOUR)

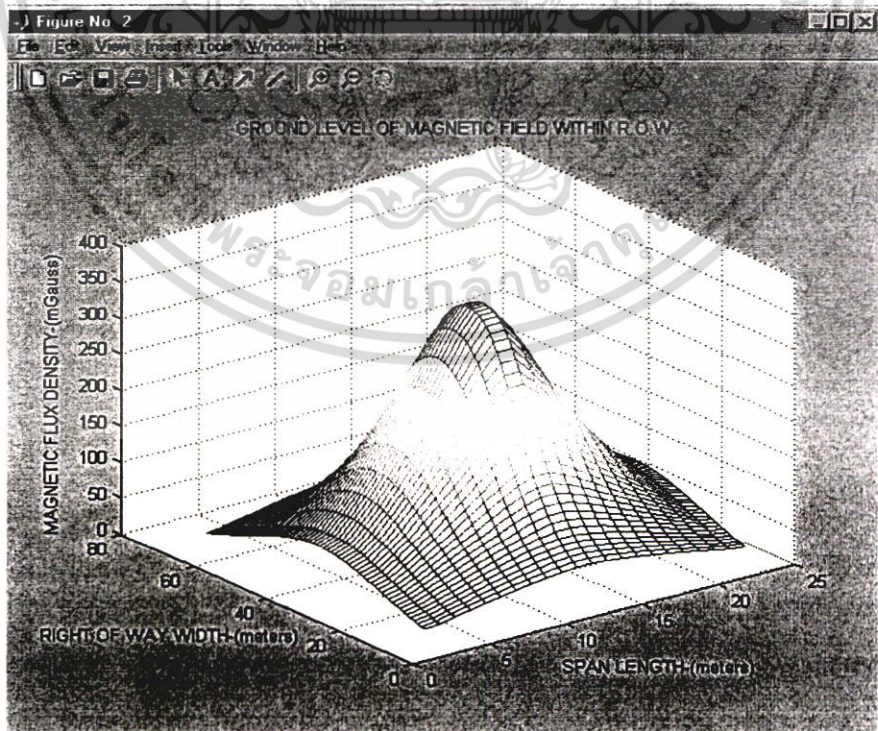
4.5.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่



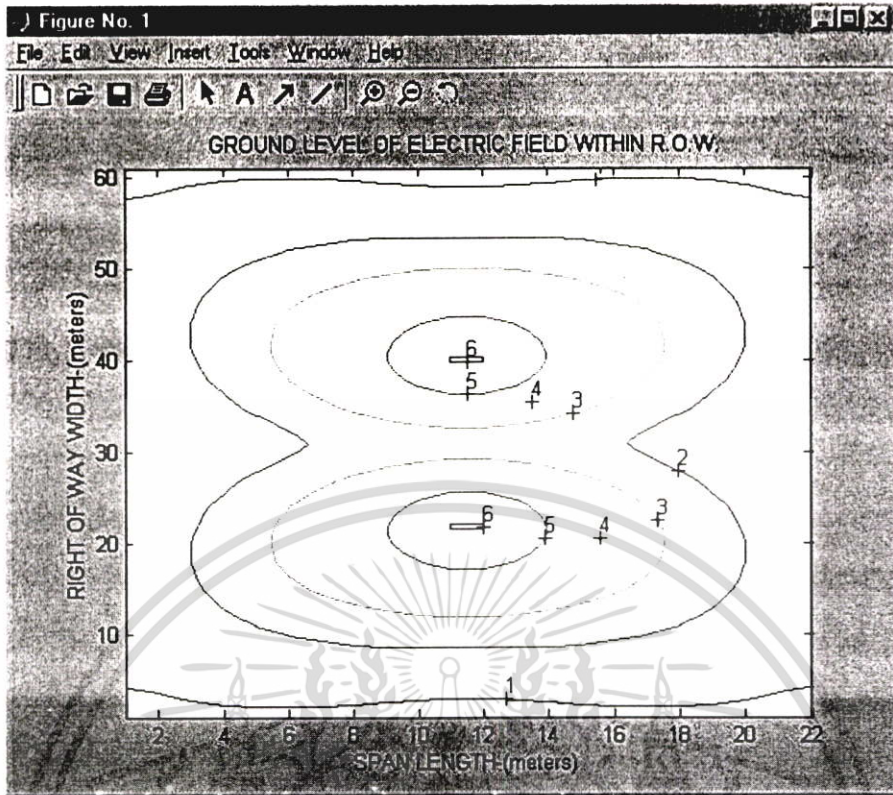
รูปที่ 4.16 ระยะห้อยของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่างๆของสายส่งไฟฟ้า 500kV วงจรคู่



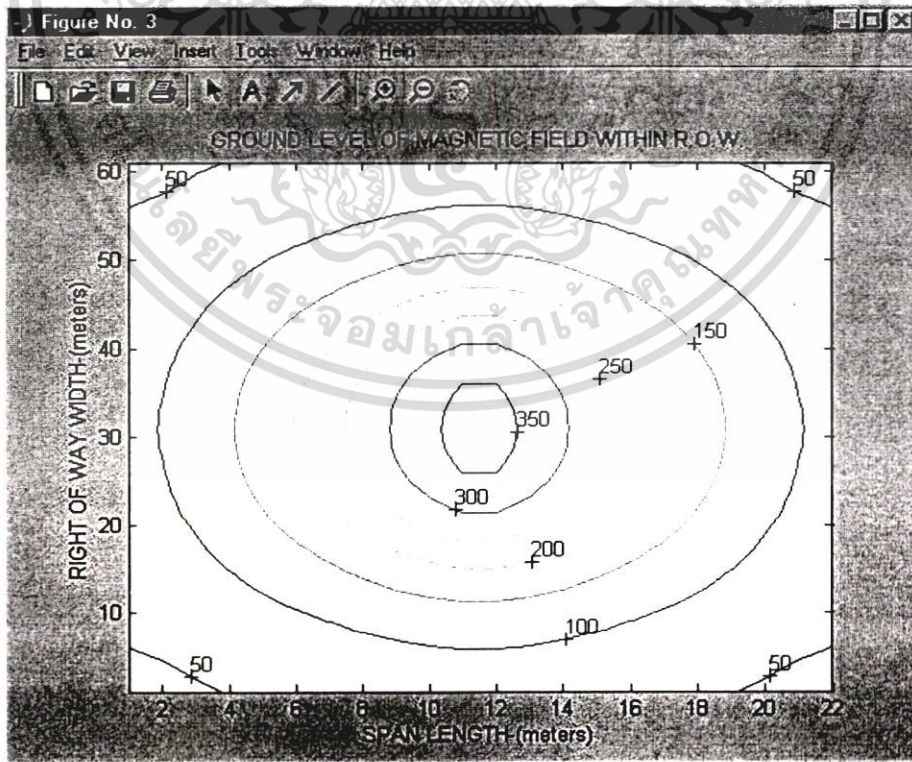
รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV
วงจรคู่



รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV
วงจรถู



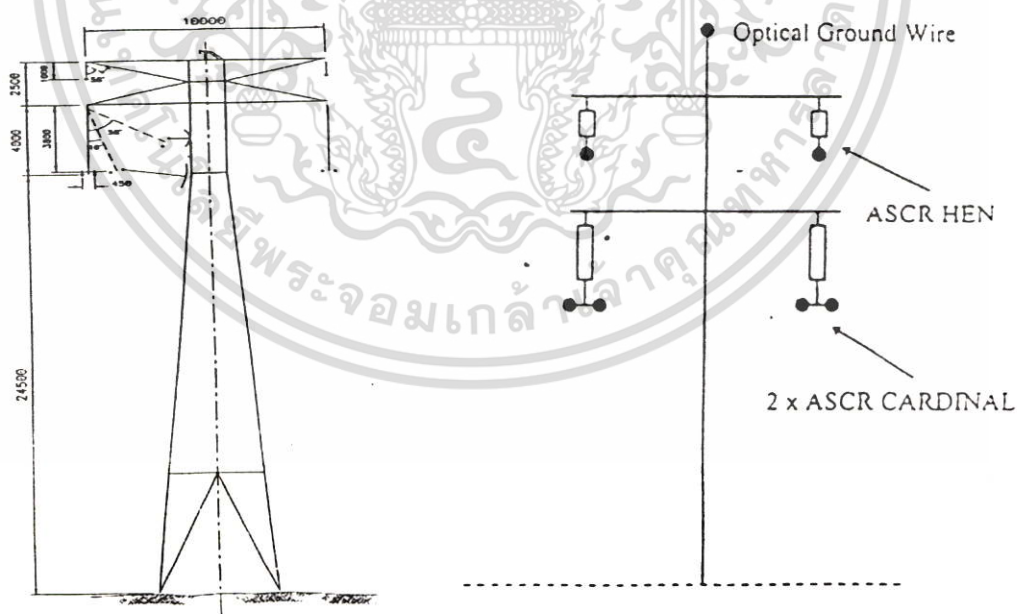
รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรคู่ (CONTOUR)



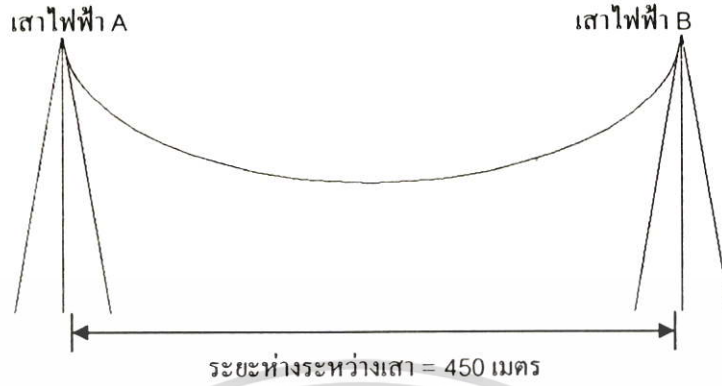
รูปที่ 4.20 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กตลอดระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสสลับ 500 kV วงจรคู่ (CONTOUR)

4.6 สายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV

โครงการระบบส่งไฟฟ้า เชื่อมโยงไทย – มาเลเซีย ระยะที่ 2 ได้รับอนุมัติจากคณะกรรมการ กฟผ เมื่อวันที่ 8 ธันวาคม 2536 เป็นระบบส่งไฟฟ้าขนาดแรงดัน 300 kV กระแสตรง (HVDC) แบบ Point to Point สามารถแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าได้ 300 MW ระหว่างสถานีไฟฟ้าแรงสูง คลองแจ๊ะ อำเภอสะเดา จังหวัดสงขลา ห่างจากชายแดนไทย-มาเลเซีย ประมาณ 24 กิโลเมตร กับ สถานีไฟฟ้าแรงสูง กูรุน (GURUN) ของไฟฟ้ามมาเลเซีย (TNB) ตั้งอยู่ที่รัฐเคดาห์ (KEDAH) อยู่ห่าง จากชายแดน ไทย-มาเลเซีย ประมาณ 86 กิโลเมตร โดยก่อสร้างแบบ MONOPOLAR เพื่อ แลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า 300 MW สองทาง ระหว่าง กฟผ. และการไฟฟ้ามมาเลเซีย และยังได้ เตรียมการสำหรับขยายระบบในอนาคตให้ เป็นแบบสองวงจร (Bipolar) เพื่อเพิ่มความสามารถใน การแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็น 600 MW สายส่ง HDVC จึงก่อสร้างโดยใช้ ค้วนำ แบบสอง วงจร (BIPOlar) เพื่อรองรับพลังงานไฟฟ้าอีก 300 MW BIPOlar ต่อไป ระบบ MONOPOLAR สามารถรองรับพลังงานต่อเนื่อง 300 MW ที่ 300 kV 1000 A ที่ DC Terminal ของสถานีแปลง ระบบปลายทาง (Rectifier Station) ทั้งยังมีความสามารถรองรับ Overload ได้สูงถึง 450 MW นาน 10 นาที สำหรับการใช้งานในสภาวะที่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าฉุกเฉิน โดยสามารถใช้ได้ หนึ่งครั้งต่อวัน เมื่อนำระบบหล่อเย็นทั้งหมดเข้าใช้งาน

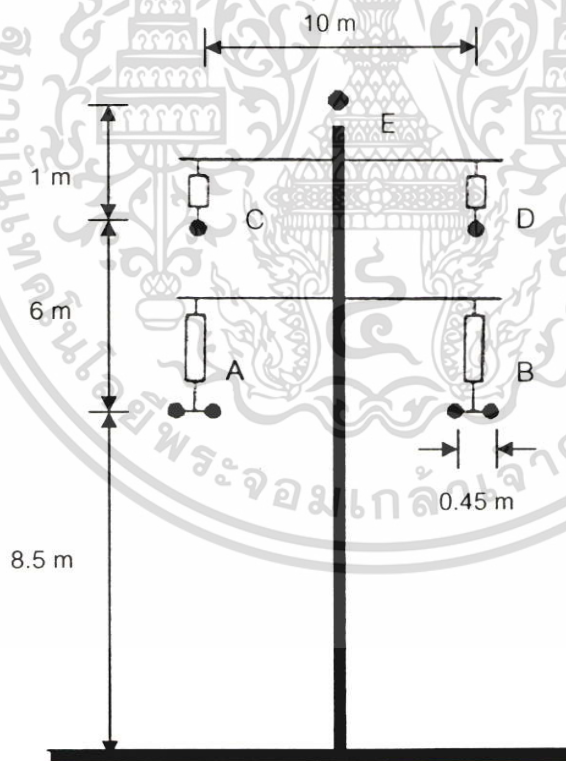


รูปที่ 4.21 ข้อมูลของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ± 300 kV การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ประเทศไทย



รูปที่ 4.22 ระยะห่างระหว่างเสาส่งไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV

4.6.1 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด



รูปที่ 4.23 ตำแหน่งในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดบนสายส่งไฟฟ้า
กระแสตรง ± 300 kV

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 300 kV (MONOPOLAR)			สายส่งไฟฟ้า \pm 300 kV (BIPOLAR)		
		X	Y		X	Y
1. ตำแหน่งของสายตัวนำ	A	-5	8.5	A	-5	8.5
	B	5	8.5	B	5	8.5
	C	-5	14.5	C	-5	14.5
	D	5	14.5	D	5	14.5
	E	0	15.5	E	0	14.5

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 300 kV (MONOPOLAR)			สายส่งไฟฟ้า \pm 300 kV (BIPOLAR)		
		ระดับ	มุมเฟส		ระดับ	มุมเฟส
2. แรงดันของสายส่ง	A	+300kV	0	A	+300kV	0
	B	0	0	B	-300 kV	0
	C	0	0	C	0	0
	D	0	0	D	0	0
	E	0	0	E	0	0

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 300 kV (MONOPOLAR)			สายส่งไฟฟ้า \pm 300 kV (BIPOLAR)		
		ระดับ	มุมเฟส		ระดับ	มุมเฟส
3. กระแสไฟฟ้าของสายส่ง	A	1000 A	0	A	+1000A	0
	B	0	0	B	-1000 A	0
	C	0	0	C	0	0
	D	0	0	D	0	0
	E	0	0	E	0	0

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 300 kV (MONOPOLAR)	สายส่งไฟฟ้า \pm 300 kV (BIPOLAR)
4. ข้อมูลสายไฟฟ้า 2 BUNDLE (ACSR/GA CARDINAL)	เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.0303 m	เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.0303 m
5. NEUTRAL CONDUCTOR (477 MCM ,ACSR/GA HEN)	เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.022	เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.022
6. OPGW (12 CORES SINGLE - MODE DISPERSION -SHIFTED	เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.012 m	เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.012 m
7. แรงดันเกรเดียนท์ที่ตัวนำ(G) (GRADIENT VOLTAGE)	23.2 kV/cm	

4.6.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ตำแหน่งดกห้องข้าง

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV MONOPOLAR

เขตเดินสายไฟฟ้า (เท่ากับ 40 เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV MONOPOLAR		
	สนามไฟฟ้า (kV/m)		สนามแม่เหล็ก(mGauss)
	อากาศปกติ	ฝนตก	
-20	7.2453	9.8595	119.26
-19	7.9223	10.74	125.93
-18	8.6715	11.705	133.26
-17	9.5016	12.763	141.33
-16	10.422	13.925	150.22
-15	11.444	15.199	160
-14	12.577	16.597	170.72
-13	13.83	18.131	182.38

หมายเหตุ อากาศปกติ(SUMMER FAIR WEATHER) K(+) = 0.037และ Go(+)=9 kV/cm

K(-) = 0.015และ Go(-)=9 kV/cm ฝนตก(RAINNING) K = 0.058 และ

Go=6 kV/m

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

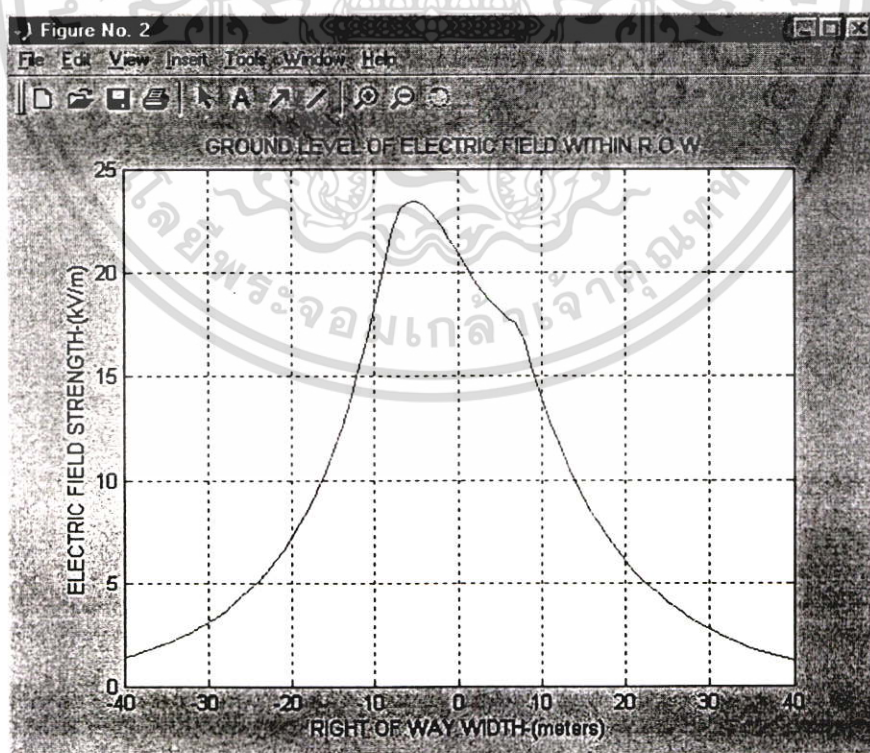
เขตเดินสายไฟฟ้า (เท่ากับ 40 เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV		
	MONOPOLAR		
	สนามไฟฟ้า (kV/m)		สนามแม่เหล็ก(mGauss)
	อากาศปกติ	ฝนตก	
-12	15.21	19.807	194.95
-11	16.719	21.634	208.23
-10	18.346	23.611	221.88
-9	20.069	25.73	235.29
-8	21.851	27.976	247.59
-7	23.058	29.426	257.66
-6	23.341	29.603	264.33
-5	23.406	29.643	266.67
-4	23.234	29.536	264.33
-3	22.844	29.293	257.66
-2	22.289	28.947	247.59
-1	21.636	28.539	235.29
0	20.946	28.109	221.88
1	20.268	27.686	208.23
2	19.635	27.292	194.95
3	19.068	26.938	182.38
4	18.577	26.632	170.72
5	18.166	26.375	160
6	17.832	26.167	150.22
7	17.567	26.002	141.33
8	16.605	24.704	133.26
9	15.215	22.703	125.93

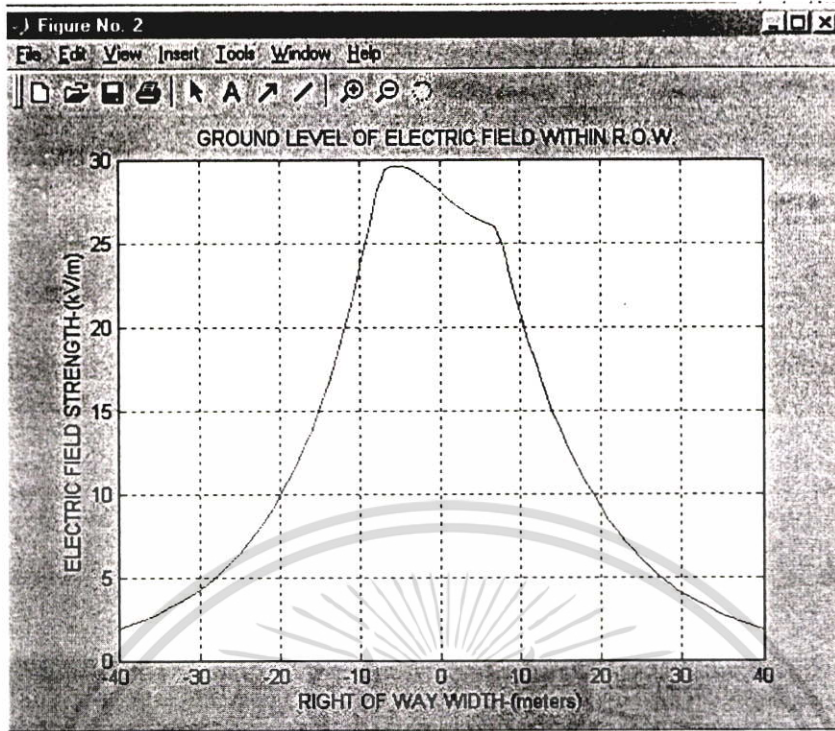
หมายเหตุ อากาศปกติ(SUMMER FAIR WEATHER) K(+) = 0.037และ Go(+)=9 kV/cm

K(-) = 0.015และ Go(-)=9 kV/cm ฝนตก(RAINNING) K = 0.058 และ Go=6 kV/m

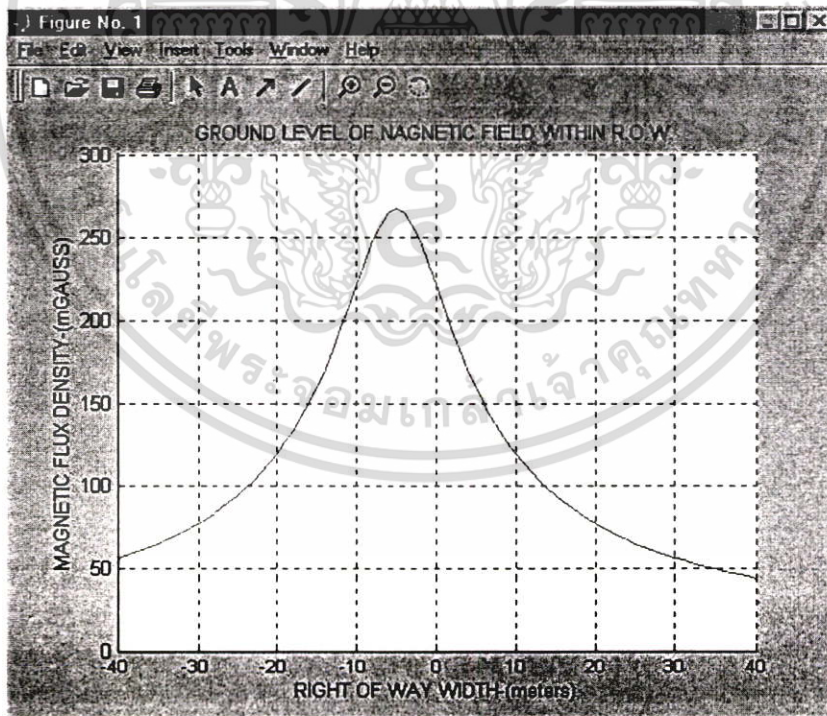
ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

เขตเดินสายไฟฟ้า (เท่ากับ 40 เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV		
	MONOPOLAR		
	สนามไฟฟ้า (kV/m)		สนามแม่เหล็ก(mGauss)
	อากาศปกติ	ฝนตก	
10	13.959	20.875	119.26
11	12.82	19.203	113.18
12	11.783	17.67	107.64
13	10.837	16.264	102.56
14	9.9709	14.972	97.911
15	9.1779	13.786	93.633
16	8.4505	12.695	89.69
17	7.7829	11.692	86.046
18	7.1695	10.769	82.672
19	6.6057	9.9191	79.54
20	6.0874	9.1373	76.626

รูปที่ 4.24 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV (อากาศปกติ)



รูปที่ 4.25 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV (ผนตค)



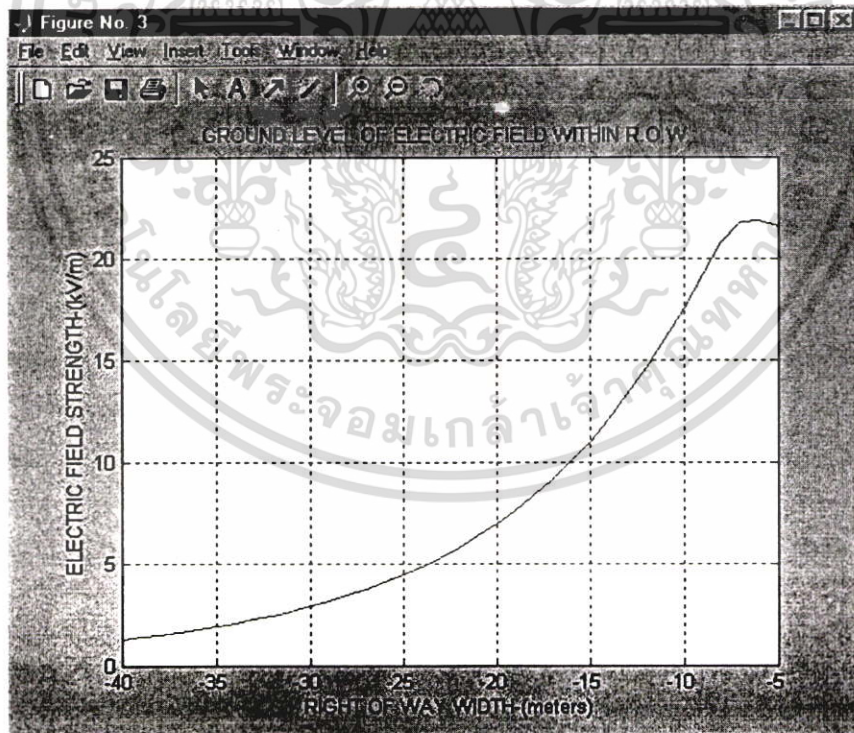
รูปที่ 4.26 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กกระแสตรง ± 300 kV

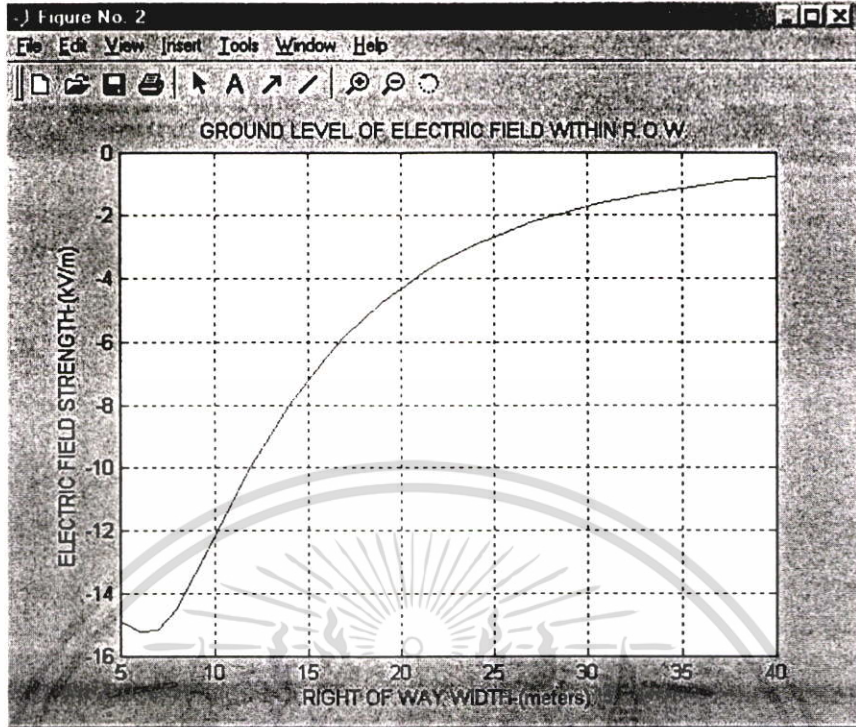
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กกระแสตรง ± 300 kV BIPOLAR

เขตเดินสายไฟฟ้า (เท่ากับ 40 เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV		
	BIPOLAR		
	สนามไฟฟ้า (kV/m)		สนามแม่เหล็ก(mGauss)
	อากาศปกติ	ฝนตก	
-20	6.9579	9.6803	45.6910
-19	7.6145	10.5482	50.0807
-18	8.3405	11.4987	55.0842
-17	9.1441	12.5405	60.8060
-16	10.0345	13.6827	67.3674
-15	11.0207	14.9351	74.9063
-14	12.1119	16.3077	83.5749
-13	13.3155	17.8077	93.5304
-12	14.6354	19.4488	104.9185
-11	16.0685	21.2286	117.8408
-10	17.6014	23.1466	132.3037
-9	19.2049	25.1913	148.1479
-8	20.8323	27.3405	164.9709
-7	21.8419	28.6878	182.0812
-6	21.8755	28.6888	198.5405
-5	21.6319	28.5369	213.3333
5	-14.9044	-28.5369	213.3333
6	-15.2373	-28.6888	198.5405
7	-15.1914	-28.6678	182.0812
8	-14.4915	-27.3405	164.9709
9	-13.3725	-25.1912	148.1479
10	-12.1987	-23.1466	132.3037
11	-11.0411	-21.2286	117.8408
12	-9.9456	-19.4488	104.9185

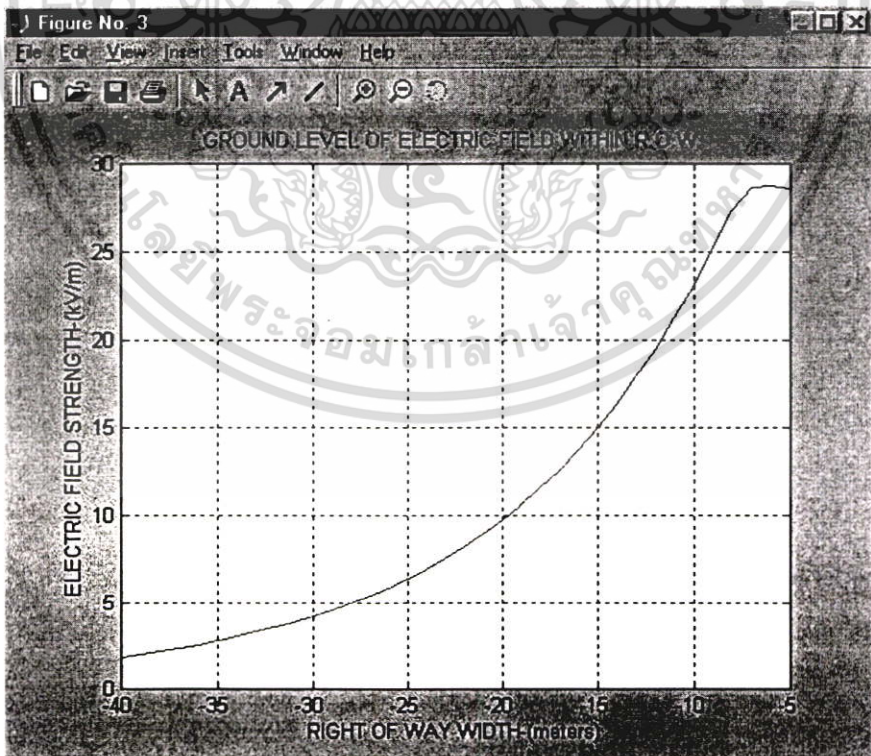
ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

เขตเดินสายไฟฟ้า (เท่ากับ 40 เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV		
	BIPOLAR		
	สนามไฟฟ้า (kV/m)		สนามแม่เหล็ก(mGauss)
	อากาศปกติ	ฝนตก	
13	-8.9367	-17.8097	93.5304
14	-8.0239	-16.3077	83.5749
15	-7.2069	-14.9351	74.9063
16	-6.04799	-13.6827	67.3674
17	-5.8350	-12.5405	60.8060
18	-5.2633	-11.4987	55.0842
19	-4.7561	-10.5482	50.0807
20	-4.3055	-9.6803	45.6910

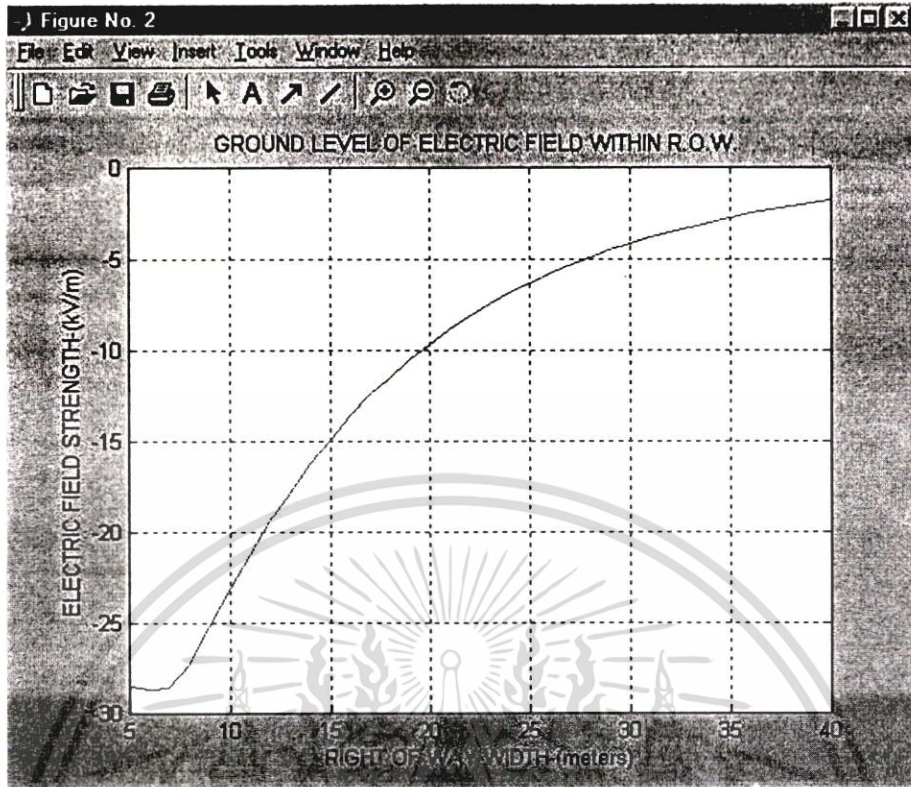
รูปที่ 4.27 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV BIPOLAR (อากาศปกติ)



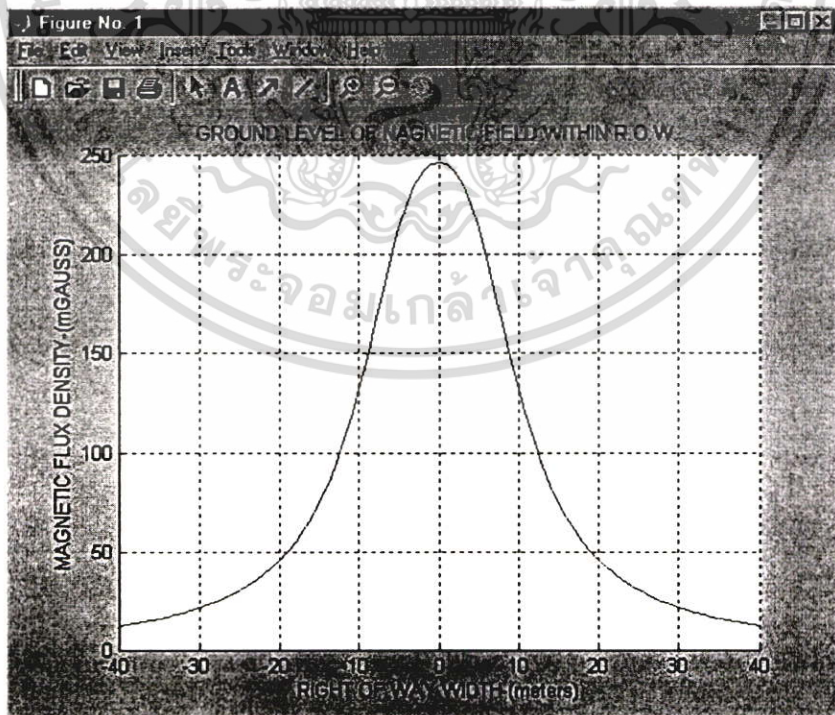
รูปที่ 4.28 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV BIPOLAR (อากาศปกติ)



รูปที่ 4.29 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV BIPOLAR (ฝนตก)

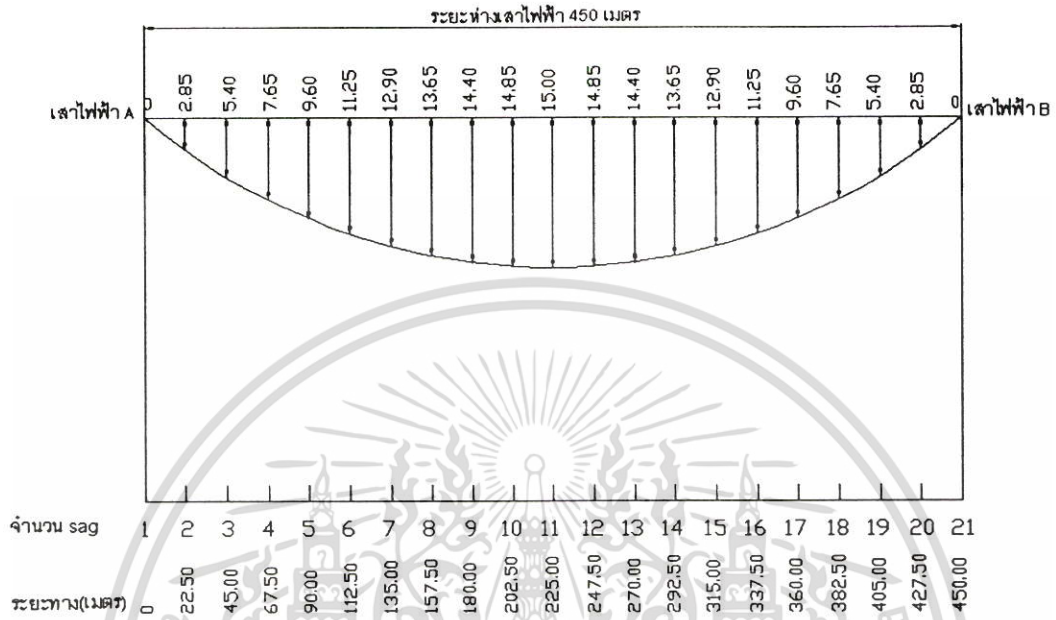


รูปที่ 4.30 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV BIPOLAR (ฝนตก)



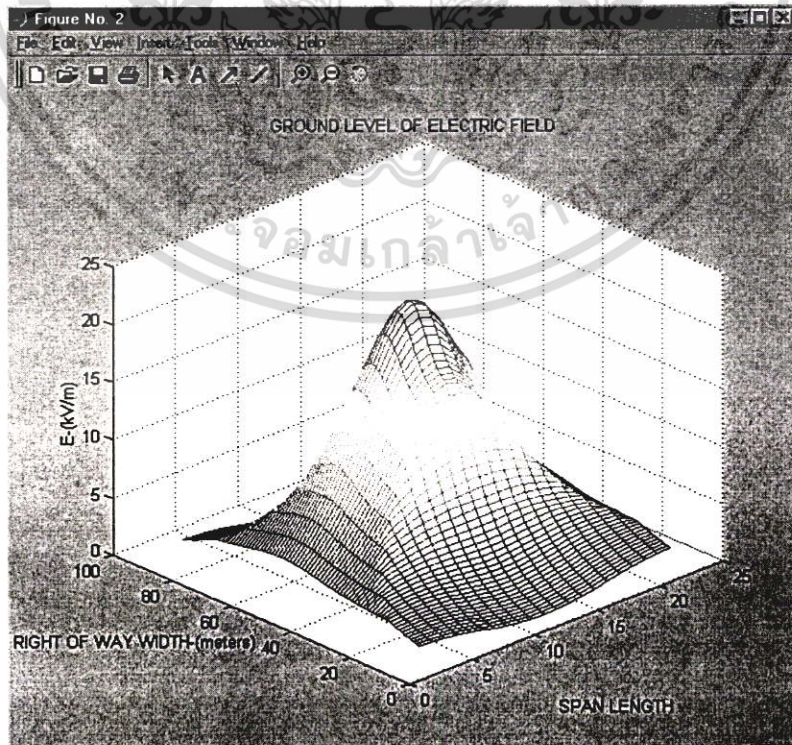
รูปที่ 4.31 การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กกระแสตรง ± 300 kV BIPOLAR

4.7 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า กระแสตรง

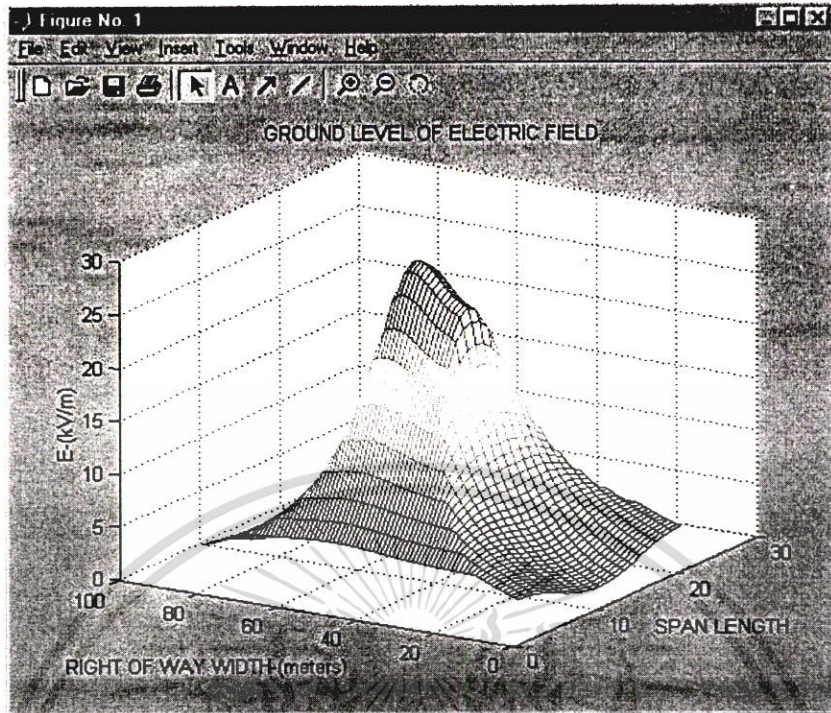


รูปที่ 4.32 ระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าตำแหน่งต่างๆ ของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV

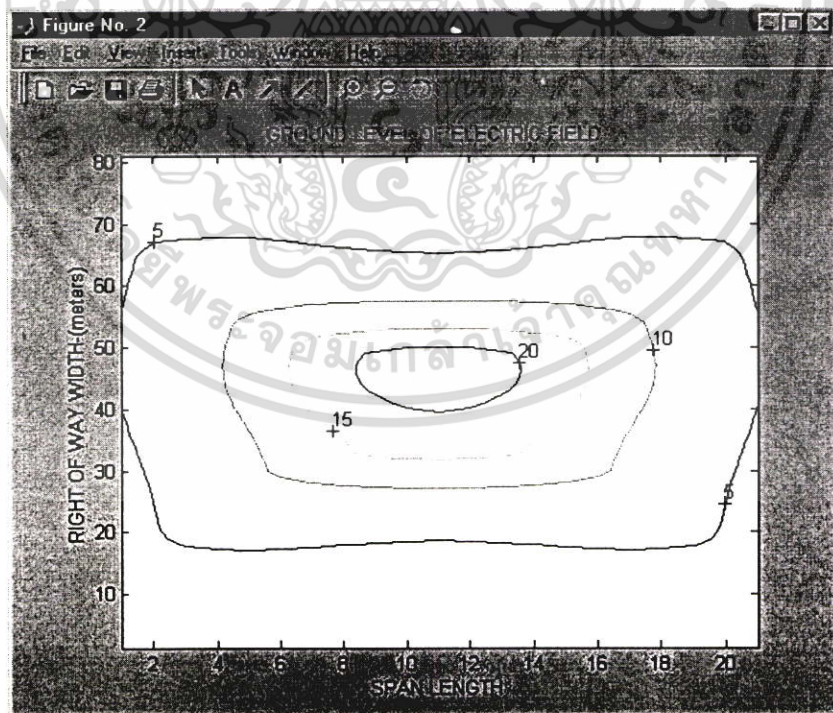
4.7.1 แบบโมนโพล่า (MONOPOLAR)



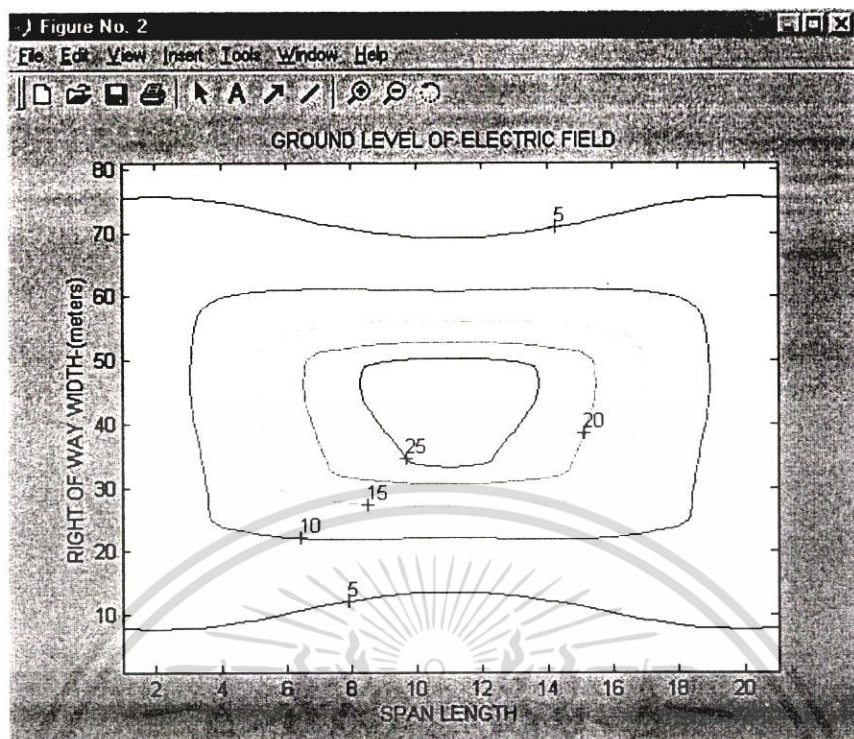
รูปที่ 4.33 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมนโพล่า(อากาศปกติ)



รูปที่ 4.34 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมโนโพล่า(ผนคค)

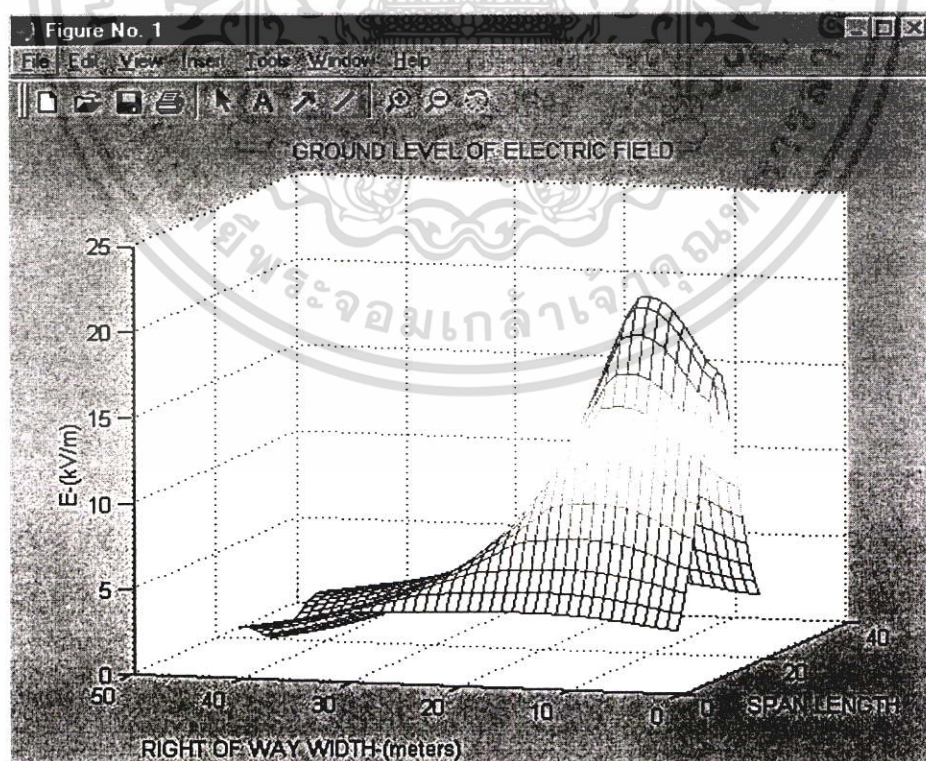


รูปที่ 4.35 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมโนโพล่า(อากาศปกติ ; CONTOUR)

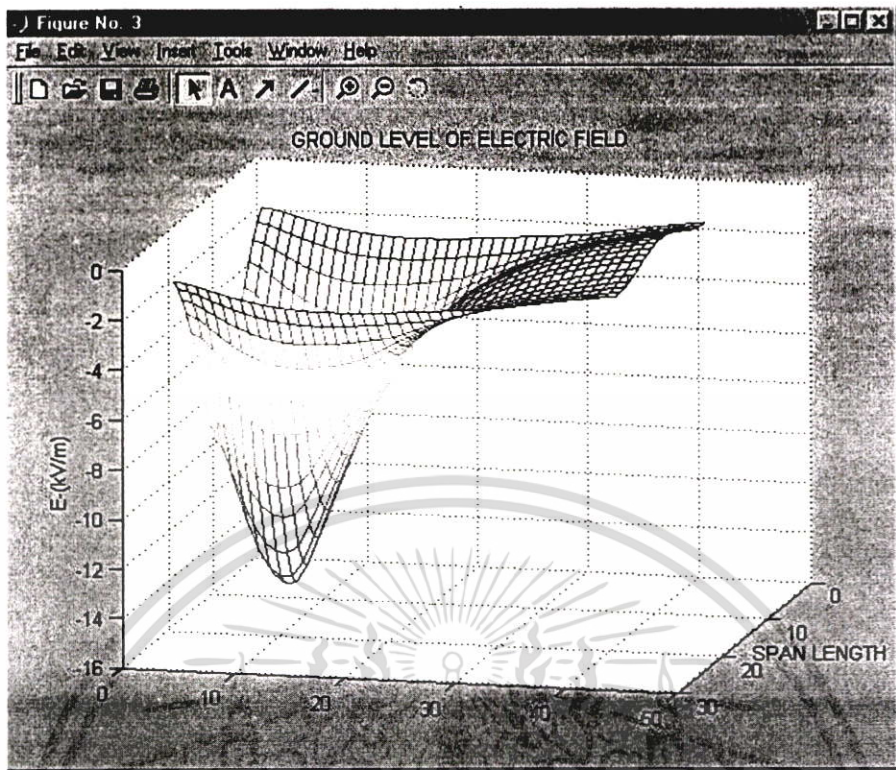


รูปที่ 4.36 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมโนโพล่า (แผนตัก; CONTOUR)

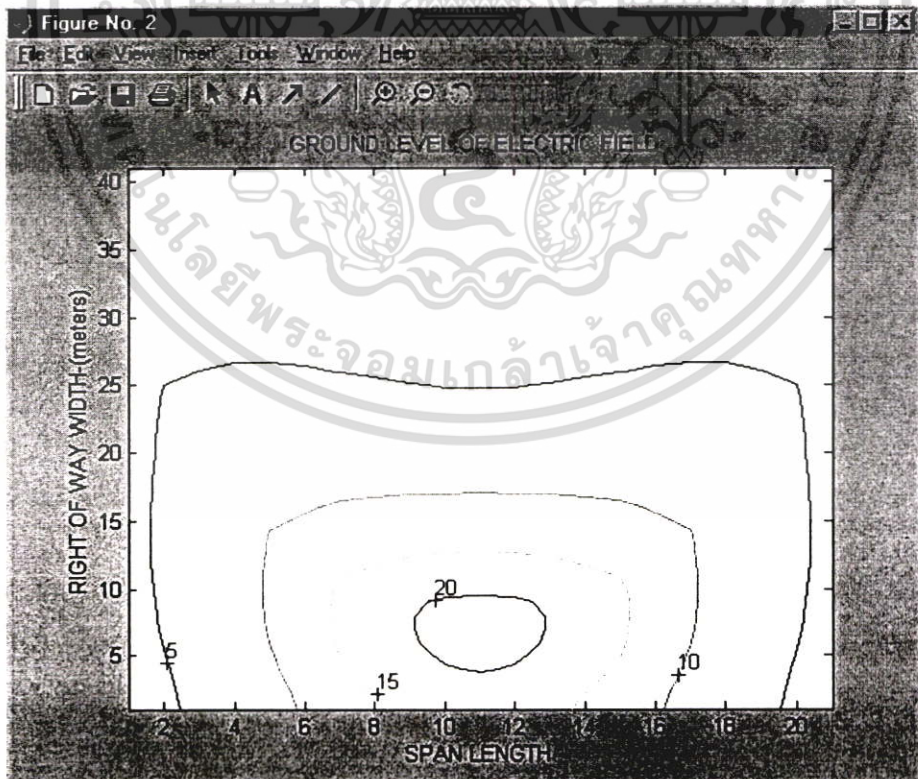
4.7.2 แบบไบโพล่า (BIPOLAR)



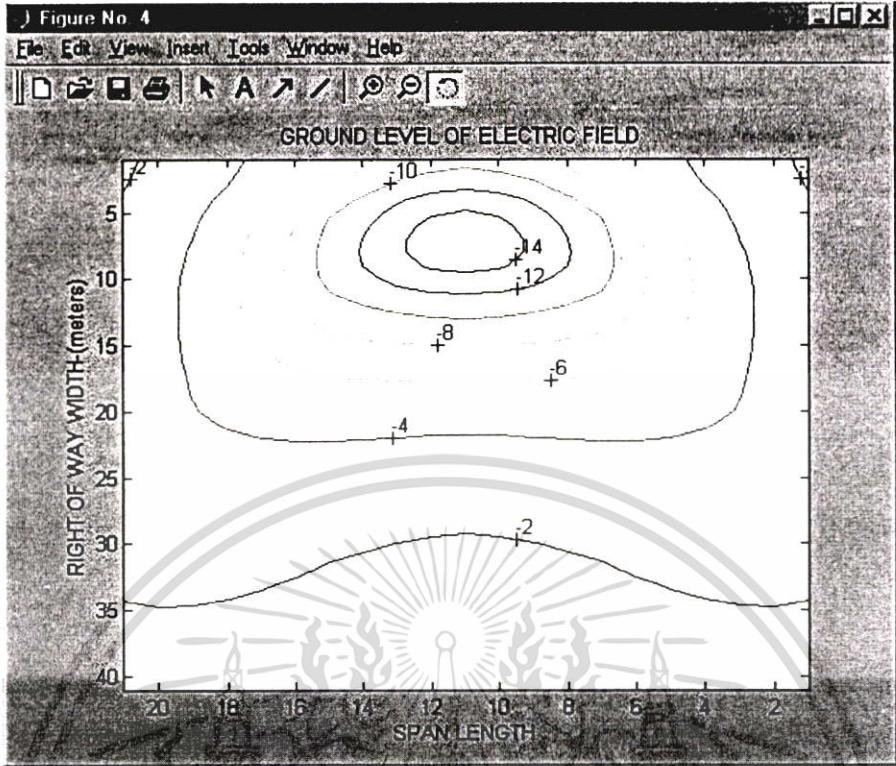
รูปที่ 4.37 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่า (อากาศปกติ) ขั้วบน



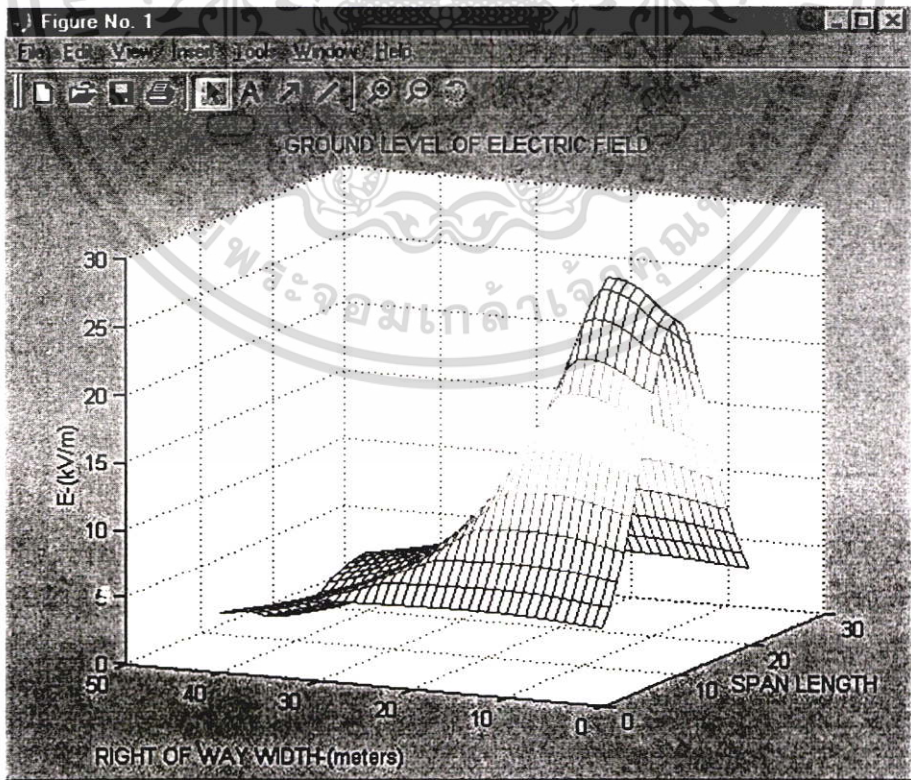
รูปที่ 4.38 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไบโพลาร์(อากาศปกติ) ขั้วลบ



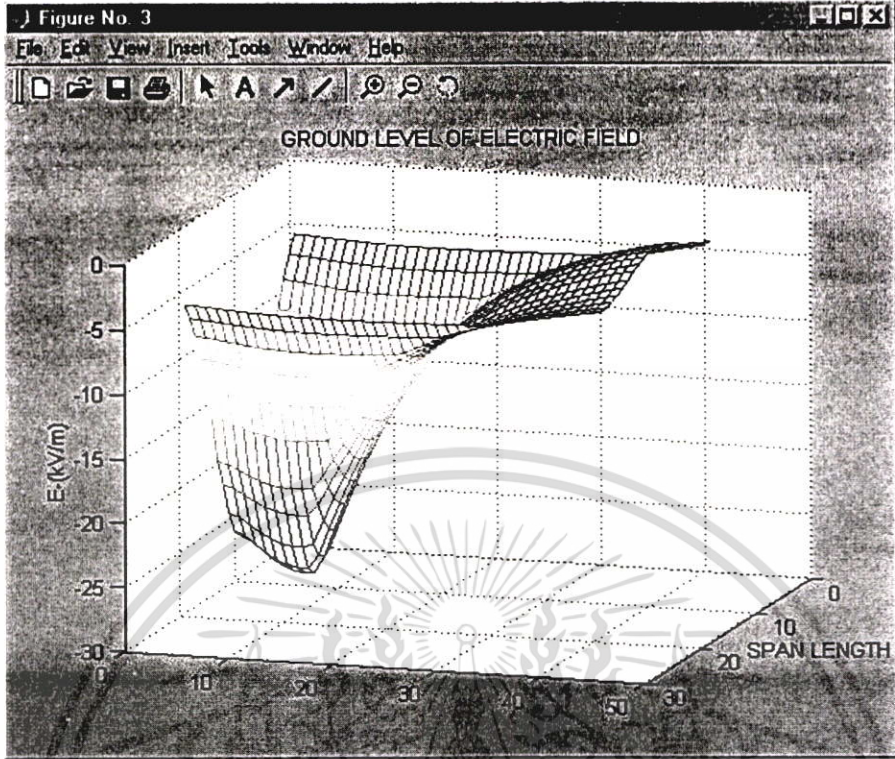
รูปที่ 4.39 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไบโพลาร์(อากาศปกติ) ขั้วบวก
CONTOUR



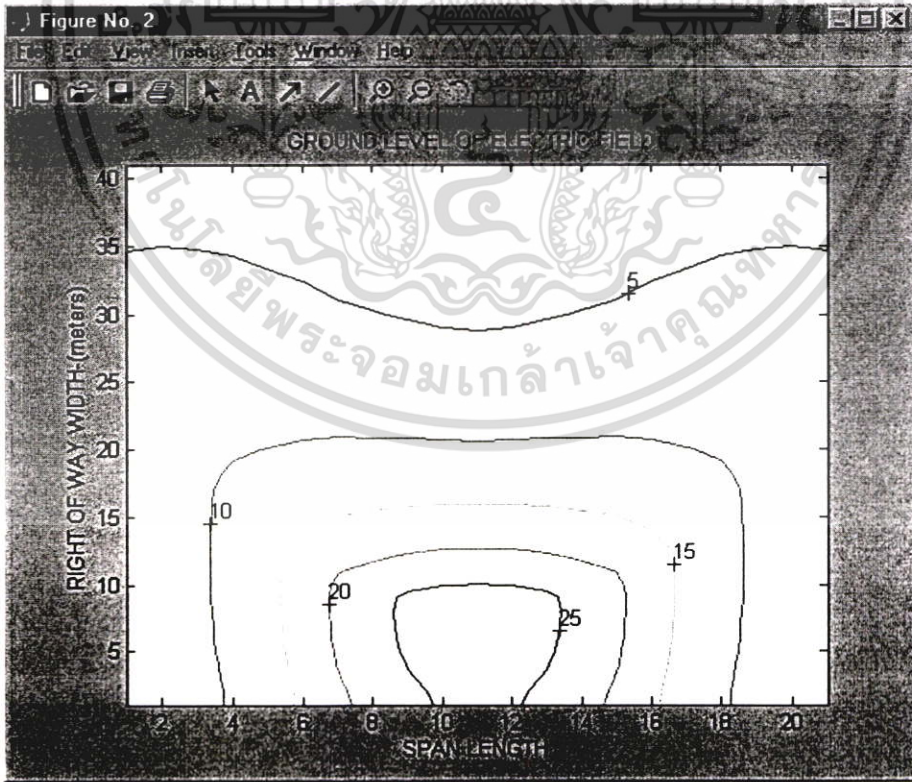
รูปที่ 4.40 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ใบบัโพล่า(อากาศปกติ) ขั้วลบบ CONTOUR



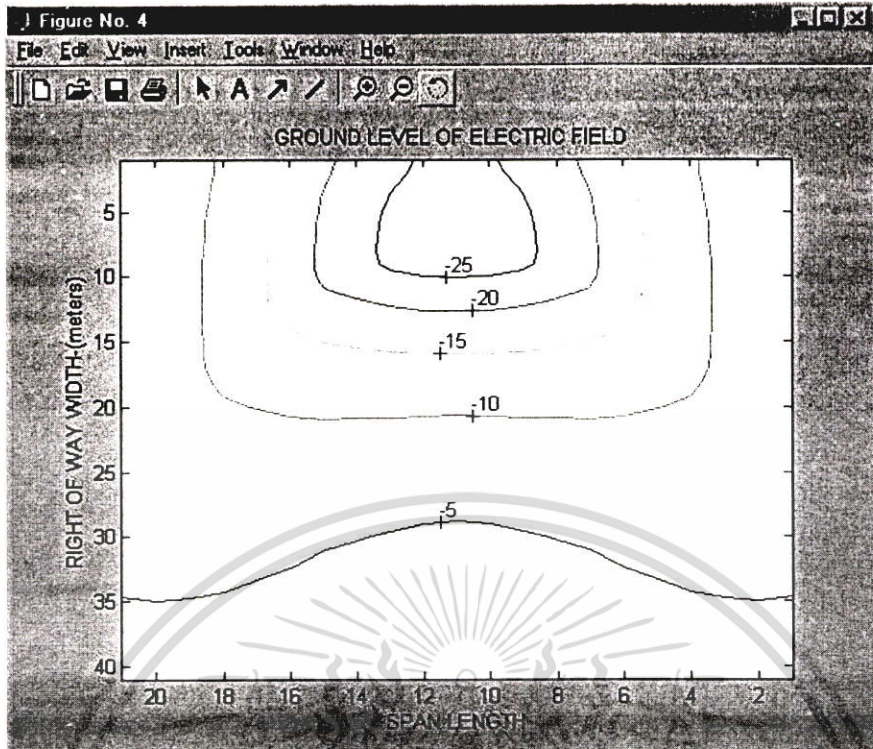
รูปที่ 4.41 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ใบบัโพล่า(ฝนตก) ขั้วบวค



รูปที่ 4.42 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไขโพลา(ฝนตก) ขั้วลบน

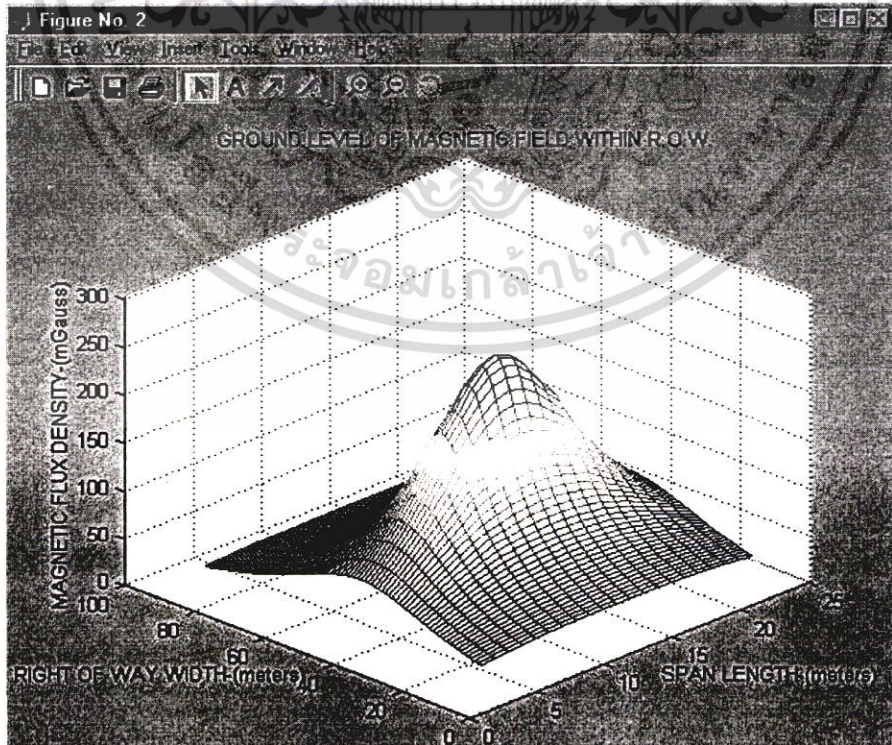


รูปที่ 4.43 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไขโพลา(ฝนตก) ขั้วบน
CONTOUR

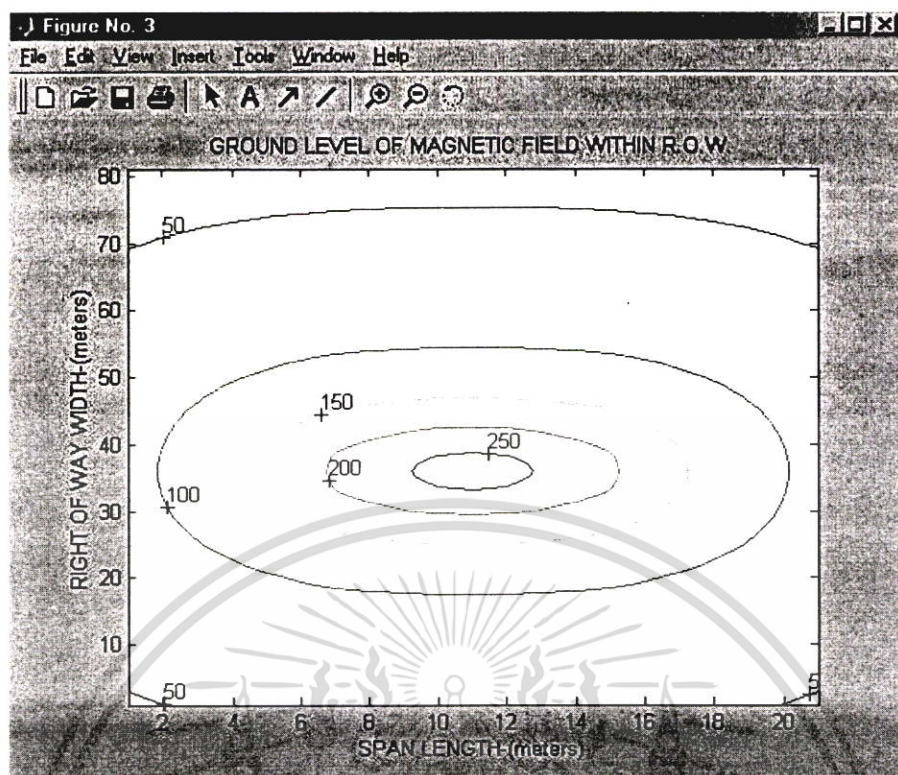


รูปที่ 4.44 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV ไขโพลา (ฝนตก) ขั้วลบ
CONTOUR

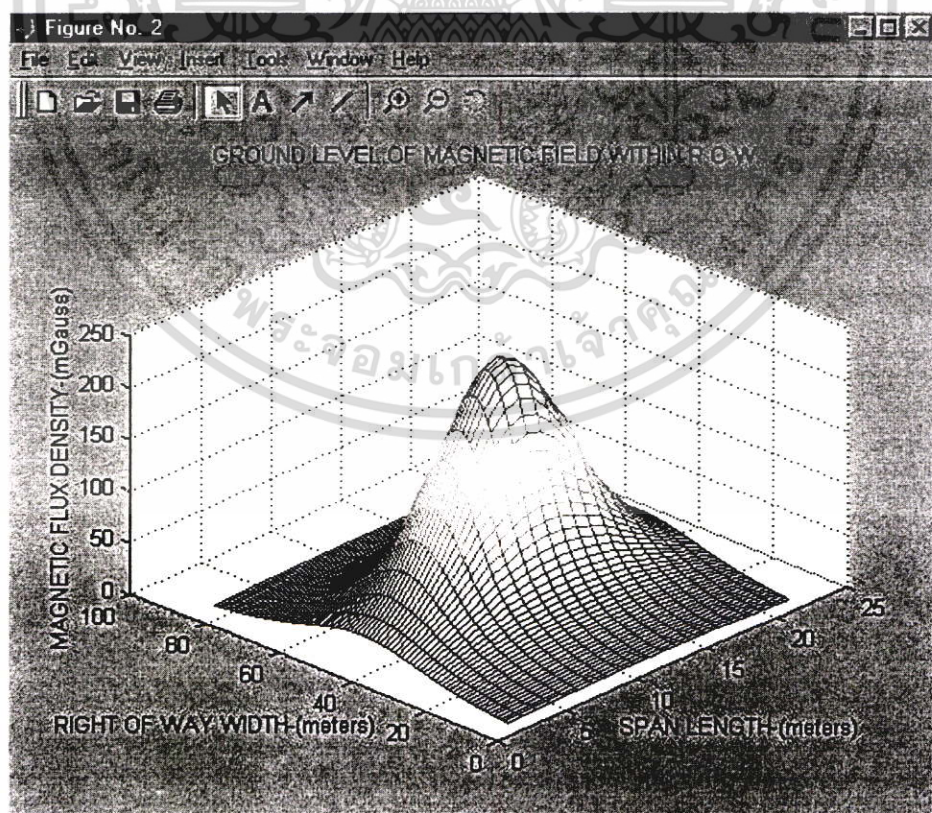
4.7.3 สนามแม่เหล็กกระแสตรง



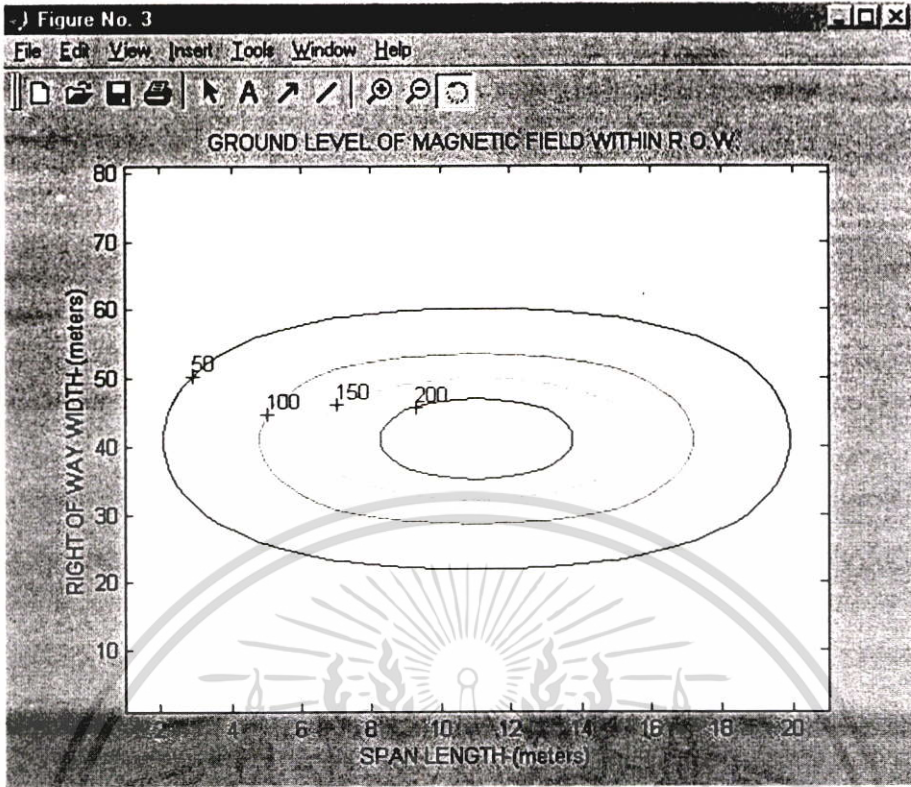
รูปที่ 4.45 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมโนโพล่า



รูปที่ 4.46 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โมโนโพล่า (CONTOUR)



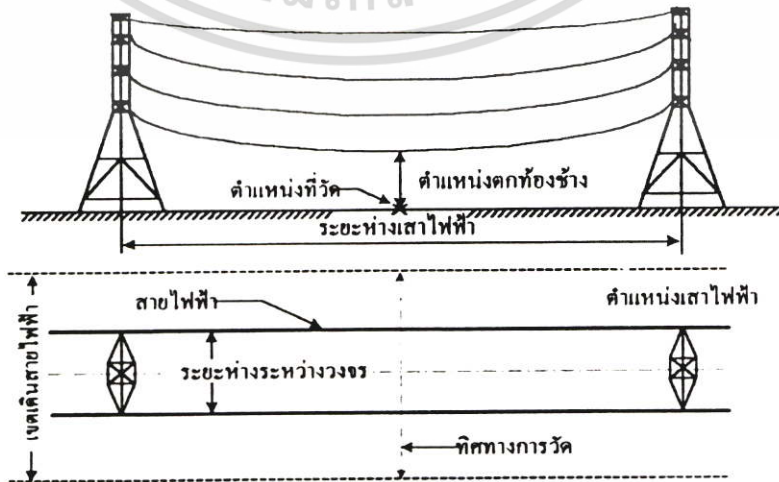
รูปที่ 4.47 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแม่เหล็ก ± 300 kV ไบโพล่า



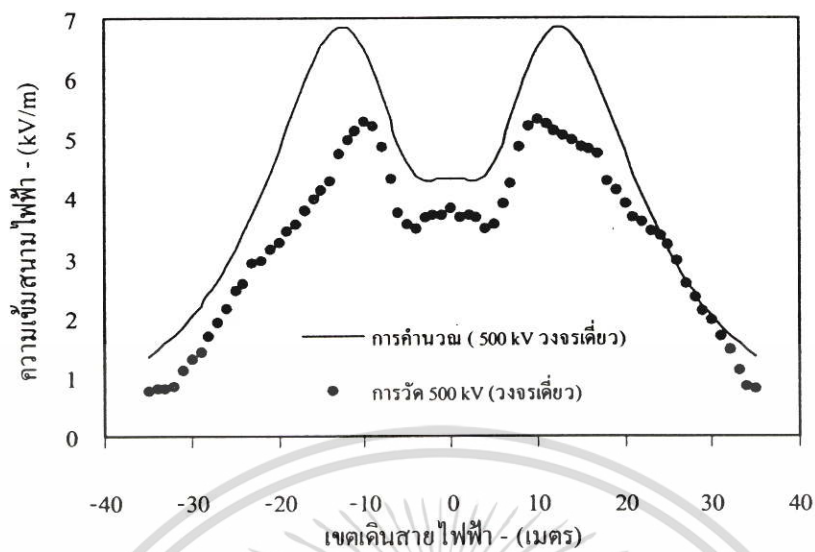
รูปที่ 4.48 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV โใบ โพล่า (CONTOUR)

4.8 การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณสายส่งไฟฟ้า 500 kV

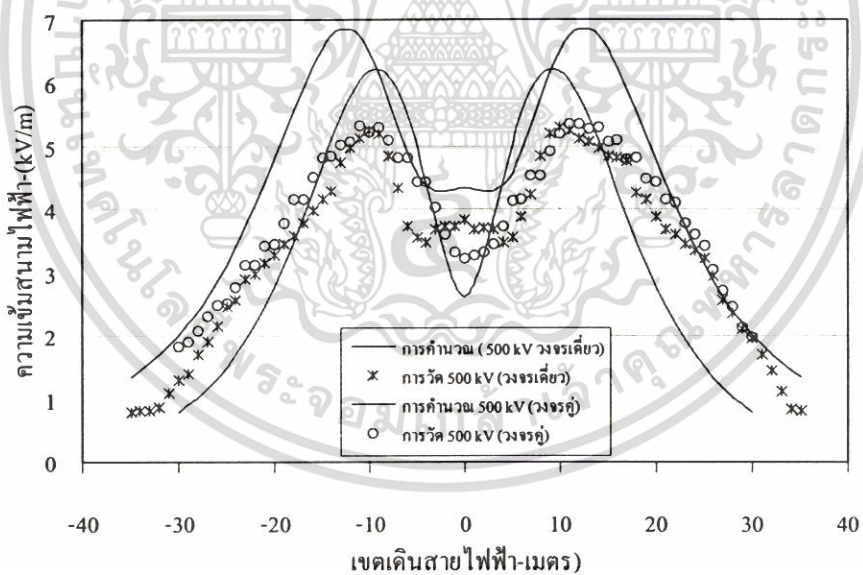
ข้อกำหนดในการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง คือกำหนดให้ตำแหน่งของการวัดอยู่สูงจากระดับพื้นดิน 1 เมตร [2] โดยการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในเขตแนวการเดินสายไฟฟ้าจะทำการวัดที่ตำแหน่งตักทองช้างและวัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวสายส่งไฟฟ้าดังรูปที่ 4.33 ซึ่งสามารถค่าได้ภาคผนวก ค



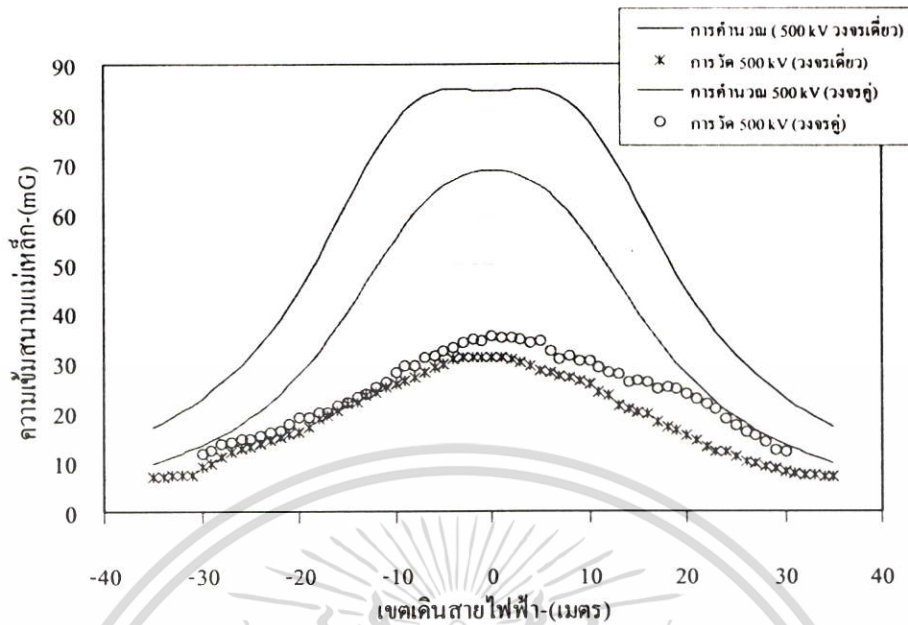
รูปที่ 4.49 ตำแหน่งและทิศทางกรวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก 500 kV



รูปที่ 4.50 ผลการวัดและคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว



รูปที่ 4.51 ผลการวัดและคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่



รูปที่ 4.52 ผลการวัดและคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดียว

เป็นข้อมูลจากการวัดเป็นผลที่ได้มาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยทำการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ซึ่งค่าที่ได้จากการวัดจะมีค่าแตกต่างไปจากการคำนวณเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าบนสายส่งไฟฟ้าขณะทำการวัด และภาระกระแสไหลดที่แตกต่างกันในขณะทำการวัด ซึ่งสามารถดูค่าผลจากการวัดได้ในภาคผนวก ก โดยค่าพารามิเตอร์ขณะทำการวัดเป็นไปดังตารางที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.7 ค่าภาระไหลดของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรเดียว

500 kV THA TAGO – NONG CHOK		
วงจรเดียว	BUS VOLTAGE(kV)	CURRENT (A)
	517.02	590

ตารางที่ 4.8 ค่าภาระไหลดของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่

500 kV MAEMOH- THA TAKO				
วงจรคู่	BUS VOLTAGE(kV)		CURRENT(A)	
	วงจรที่1	วงจรที่2	วงจรที่1	วงจรที่2
	517.81	517.81	592	590

4.9 บทสรุป

จากการวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองชนิด พบว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุดบริเวณตำแหน่งคกห้องข้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และในการวิเคราะห์ Longitudinal Profile ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การเปลี่ยนแปลงไปตามระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้า

ตารางที่ 4.9 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง	สนามไฟฟ้า(kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mG)
1. 500 kV วงจรเดี่ยว	6.630	453.909
2. 500 kV วงจรคู่	6.012	366.414
3. 300 kV โมโนโพล่า (อากาศปกติ)	23.406	266.670
4. 300 kV โมโนโพล่า (ฝนตก)	29.643	266.670
5. \pm 300 kV ไบโพล่า(อากาศปกติ)	21.875(ขั้วบวก) -14.904(ขั้วลบ)	246.154
6. \pm 300 kV ไบโพล่า(ฝนตก)	28.688(ขั้วบวก) -28.688(ขั้วลบ)	246.154

ในส่วนของการวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงไม่มีผลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เนื่องจากไม่มีเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

บทที่ 5

ผลกระทบจากสนามไฟฟ้า

5.1 กล่าวนำ

วัตถุตัวนำขนาดใหญ่เช่น บ้านพักอาศัย ช่างฉาบ รถยนต์ รั้วโลหะ เป็นต้น เมื่ออยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ลักษณะปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับวัตถุตัวนำที่เกิดขึ้นมาจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มีความแตกต่างกันอย่างมากในการพิจารณา เราสามารถแยกพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ใกล้สายส่งไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้

5.2 ผลกระทบของสนามไฟฟ้ากับวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง

5.2.1 ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

การเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามไฟฟ้ากับวัตถุตัวนำภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ หรือเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Electrostatic Effect” ซึ่งเราสามารถพิจารณาค่าพารามิเตอร์ในปรากฏการณ์นี้ได้เป็น กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Current) แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวัตถุ (Potential of the object) พลังงานสะสมในวัตถุ (Stored Energy)

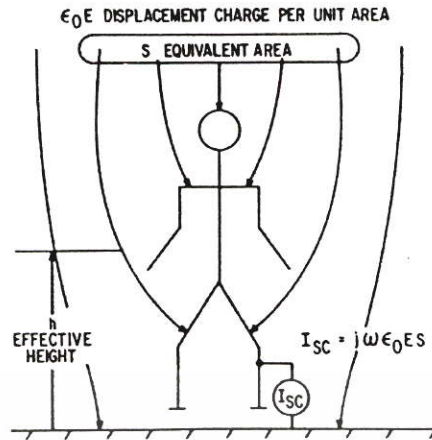
5.2.1.1 ความสัมพันธ์ ระหว่างกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและสนามไฟฟ้าที่ระดับ

พื้นดิน

เมื่อวัตถุตัวนำวางอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า เส้นแรงไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำ ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าสะสมบนวัตถุตัวนำ ดังแสดงได้ดังสมการ 5.1

$$q = E.H.C_{og} \quad (5.1)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้าที่ระดับพื้นดิน ณ ตำแหน่งที่พิจารณา (เมื่อไม่มีวัตถุตัวนำ)
 $E.H$ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวัตถุ
 C_{og} คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างวัตถุกับพื้นดิน



รูปที่ 5.1 การเหนี่ยวนำภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับ

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Current) ซึ่งเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับวัตถุสามารถพิจารณาในรูปของกระแสชอร์ตเซอร์กิต (Short-Circuit Current) ที่ไหลจากวัตถุตัวนำลงสู่พื้นดิน

$$I_{SC} = j\omega q \quad (5.2)$$

$$I_{SC} = j\omega EHC_{og} \quad (5.3)$$

$$I_{SC} = (j\omega\epsilon_0 E)(H)(C_{og} / \epsilon_0) \quad (5.4)$$

$$I_{SC} = (j\omega E_0 E S) \quad (5.5)$$

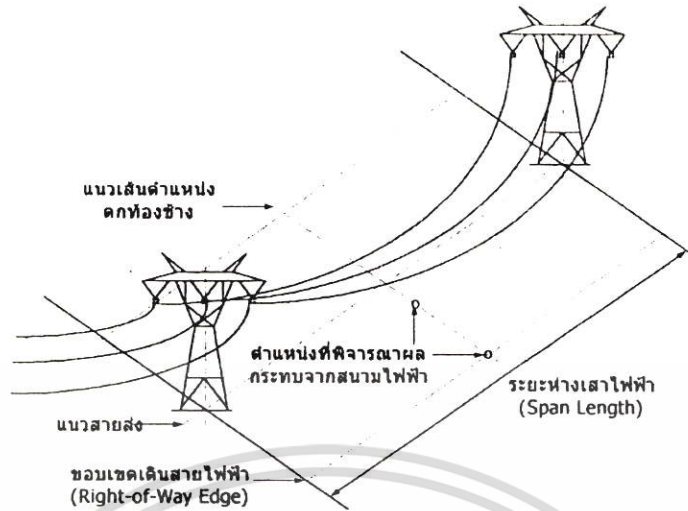
เมื่อ I_{SC} คือ กระแสชอร์ตเซอร์กิต (แอมป์ :A)

$j\omega\epsilon_0 E$ คือ ดิสเพลสเมนต์ของกระแสไฟฟ้า (แอมป์ ต่อ ตารางเมตร: A/m²)

$(H)(C_{og} / \epsilon_0), S$ คือ พื้นที่สมมูลย์ของวัตถุตัวนำ (ตารางเมตร: m²)

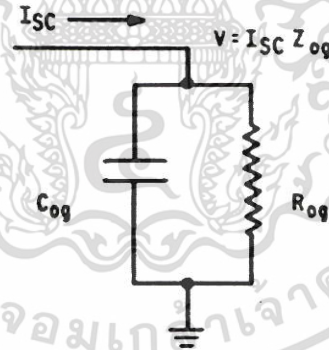
ขั้นตอนการคำนวณหาค่ากระแสชอร์ตเซอร์กิตมีขั้นตอนดังนี้

1. หาค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่วัตถุตัวนำตั้งอยู่ ซึ่งสามารถหาได้จากคำนวณหรือการวัด
2. หาพื้นที่สมมูลย์ของวัตถุตัวนำ
3. คำนวณหาค่ากระแสชอร์ตเซอร์กิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้างกล่าว



รูปที่ 5.2 ตำแหน่งในการพิจารณาผลกระทบต่อวัตถุตัวนำใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง

เราสามารถหาแรงดันไฟฟ้าระหว่างวัตถุตัวนำกับพื้นดินซึ่งเป็นความสัมพันธ์กันระหว่างกระแสช็อตเซอร์กิต (Induced Current) และอิมพีแดนซ์ของวัตถุตัวนำ ก็คือ ความต้านทานและคาปาซิแตนซ์เทียบกับพื้นดิน



รูปที่ 5.3 วงจรสมมูลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อไหลผ่านวัตถุตัวนำ

$$V = \frac{I_{sc}}{j\omega C_{og} + \frac{1}{R_{og}}} \tag{5.5}$$

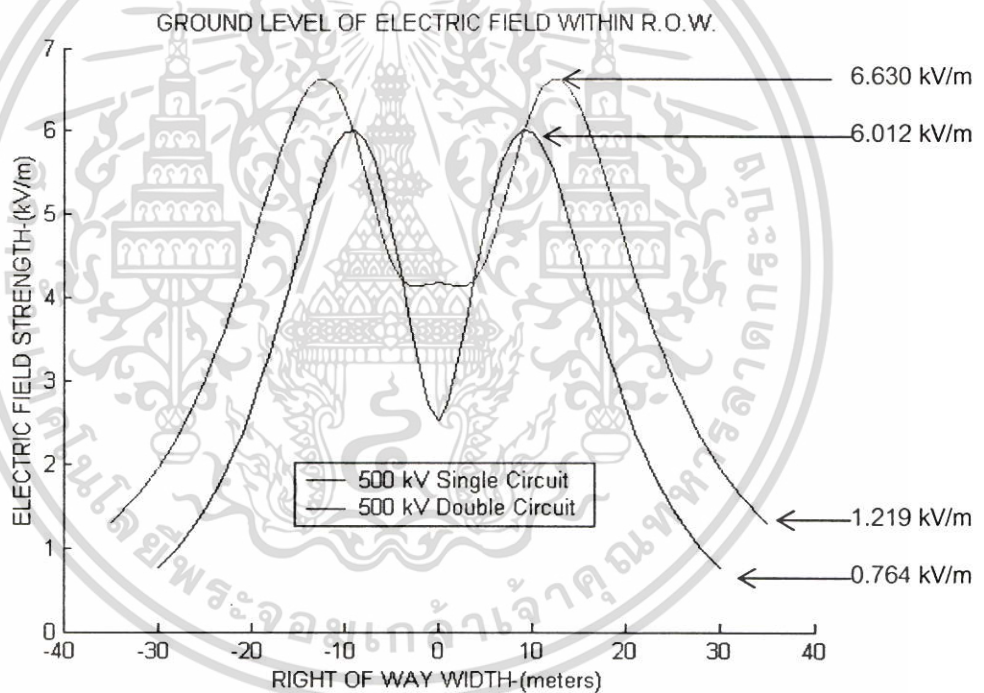
และพิจารณาในรูปของพลังงานสะสม (Stored Energy)

$$Energy = \frac{1}{2} C_{og} (V_{oc})_{peak}^2 \tag{5.6}$$

$$Energy = C_{og} (V_{oc})_{r.m.s.}^2 \tag{5.7}$$

ในรูปที่ 5.3 เป็นการแสดงให้เห็นตำแหน่งในการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV และกำหนดตำแหน่งในการวิเคราะห์ไว้ 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งขอบเขตเดินสายไฟฟ้าและตำแหน่งใต้สายไฟฟ้า (ซึ่งเมื่อพิจารณาที่จุดตัดที่ข้างแล้วจะเป็นตำแหน่งที่มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด) โดยที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งดังกล่าวของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและชนิดวงจรคู่จะมีค่าตามที่กำหนดไว้ในรูปที่ 5.2 และความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เราสามารถคำนวณหาค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีวัตถุที่เป็นตัวนำขนาดใหญ่ตั้งอยู่ ซึ่งค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่คำนวณได้นี้จะสามารถบอกให้ทราบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นจะมีอันตรายมากหรือน้อยเท่าใดต่อคนที่เข้ามาสัมผัส

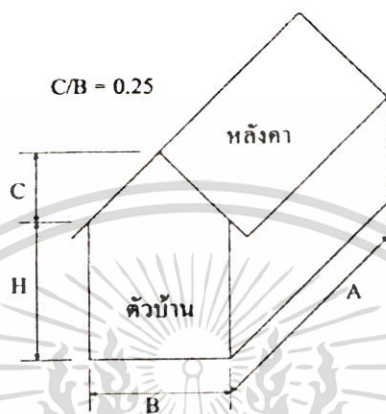
ในการวิเคราะห์ให้เห็นผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในรูปกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้วิเคราะห์กับวัตถุที่มีขนาดใหญ่และตั้งอยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งจากหลายพื้นที่ที่มีสาย



รูปที่ 5.4 ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด ณ ตำแหน่งที่วิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้า

ส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดผ่านพบว่าวัตถุขนาดใหญ่เหล่านั้น ได้แก่ บ้านพักอาศัยที่อาจจะมีโครงสร้างบางส่วนที่ทำมาจากโลหะ หรือรถยนต์ที่จอดอยู่ใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อวัตถุขนาดใหญ่บางชนิดเท่านั้น โดยแสดงเป็นตัวอย่างการคำนวณดังรายละเอียดดังนี้

ตัวอย่างที่ 5.1 การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัยภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้า ในรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าความเข้มสนามไฟฟ้าขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV โดยใช้ค่าพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัยตามสมการที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.5 ลักษณะของบ้านพักอาศัยสำหรับการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

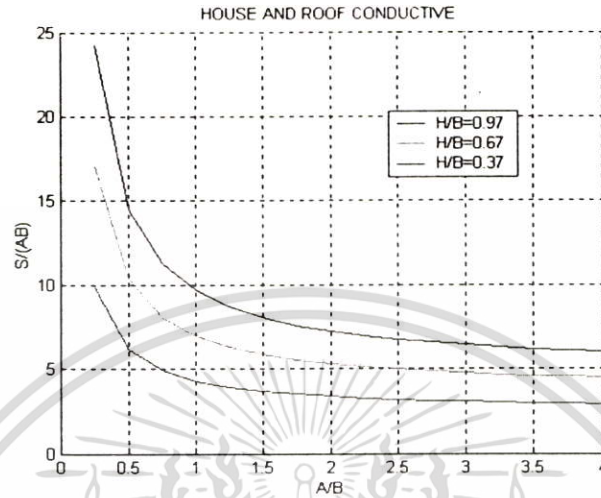
ตารางที่ 5.1 สมการพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัย

ลักษณะของบ้านพักอาศัย	สมการพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัย
1. บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำ	$S = AB \left[1 + (3.94 + 5 / (\frac{A}{B})) \frac{H}{B} \right]$
2. บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน	$S = AB \left[1 + (4.7 + 0.64 / (\frac{A}{B})) \frac{H}{B} \right]$
3. บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ	$S = AB \left[1 + (1.92 + 4.6 / (\frac{A}{B})) \frac{H}{B} \right]$

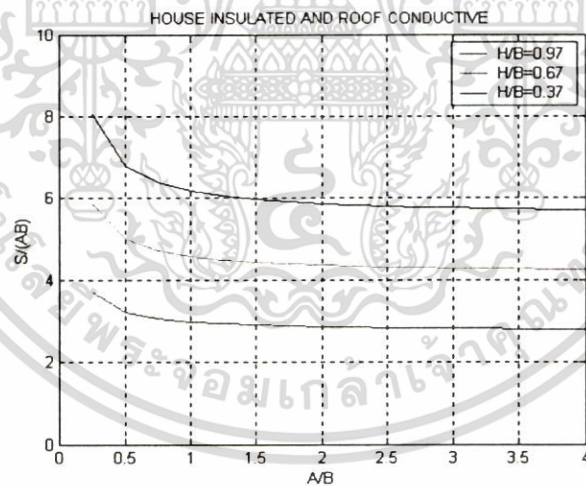
หมายเหตุ *เป็นสมการพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัยตามภาคผนวก xx

ในรูปที่ 5.6-5.8 เป็น Shape factor ที่อัตราส่วน H/B เท่ากับ 0.37, 0.67, 0.97 [1] ของบ้านพักอาศัยที่ได้จากการพล็อตกราฟตามสมการในตารางที่ 5.1 โดยมีแกน y แทนอัตราส่วนของ $S/(AB)$ และแกน x แทนค่าของ A/B ซึ่ง Shape factor จะเป็นตัวบอกให้รู้ว่าเมื่ออัตราส่วนของ H/B และ A/B มีการเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลอย่างไรต่อพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัย (S) ดังนั้นถ้าต้องการคำนวณค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัย ก็สามารถคำนวณได้ด้วยการหาพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัยจาก Shape factor และค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่

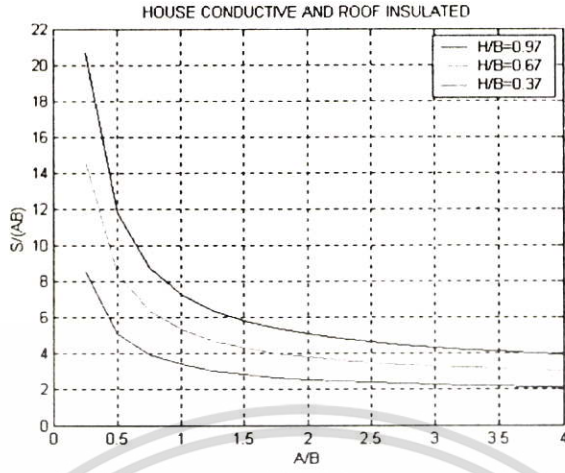
บ้านพักอาศัยตั้งอยู่เราสามารถวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัยที่มีลักษณะโครงสร้างและพื้นที่ต่าง ๆ ได้โดยแสดงให้เห็นดังในรูปที่ 5.9-5.14



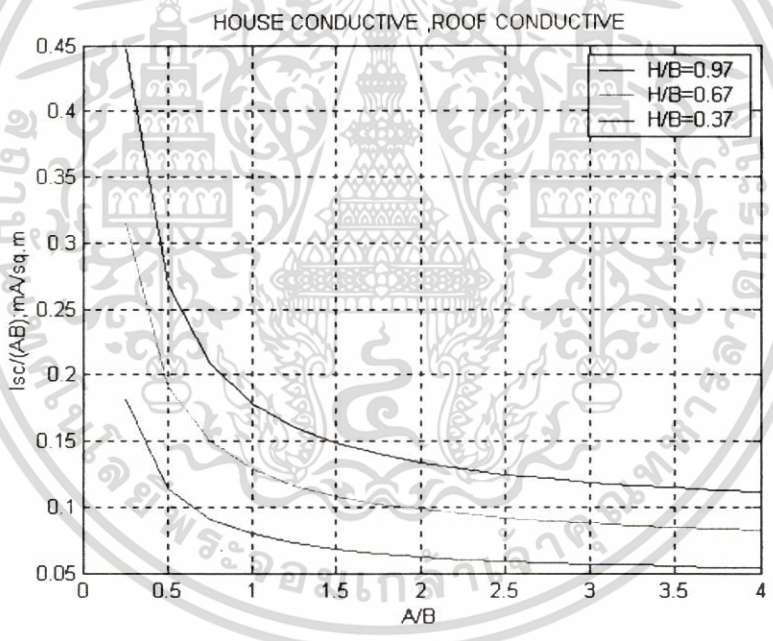
รูปที่ 5.6 Shape factor ของบ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำ



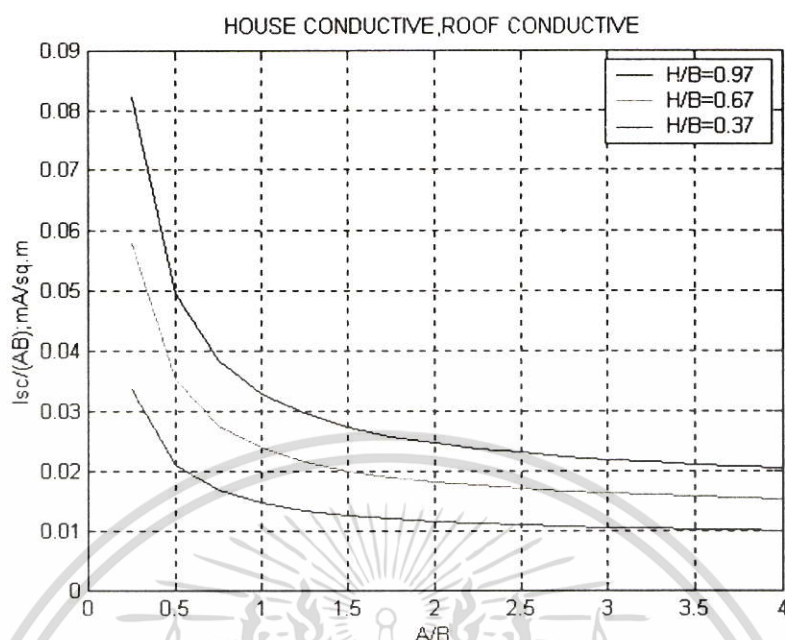
รูปที่ 5.7 Shape factor ของบ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน



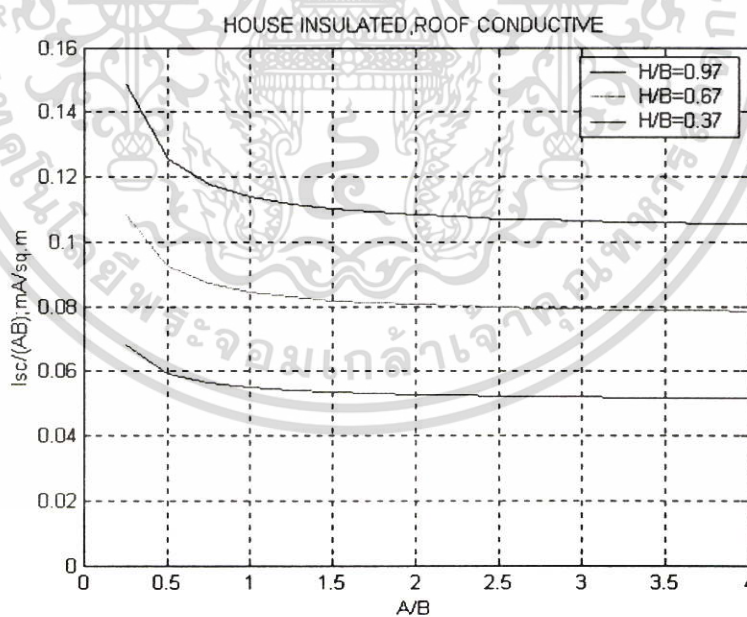
รูปที่ 5.8 Shape factor ของบ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ



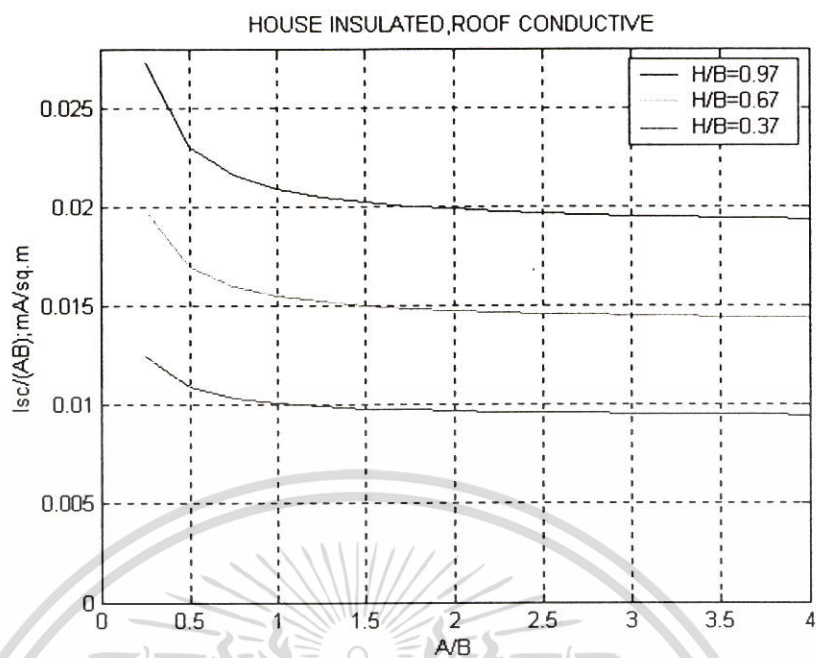
รูปที่ 5.9 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำ
($E = 6.630 \text{ kV/m}$) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดียว



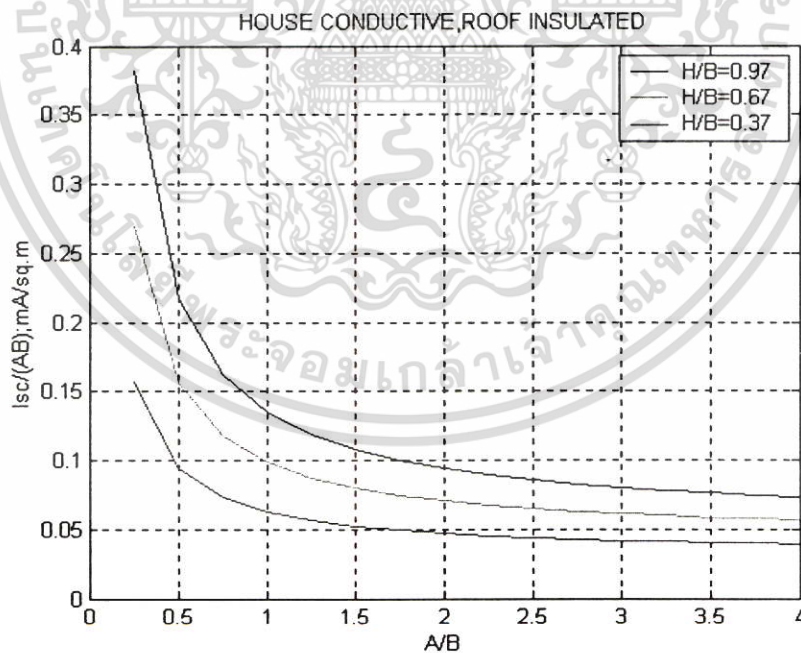
รูปที่ 5.10 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำ
($E = 1.219 \text{ kV/m}$) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดียว



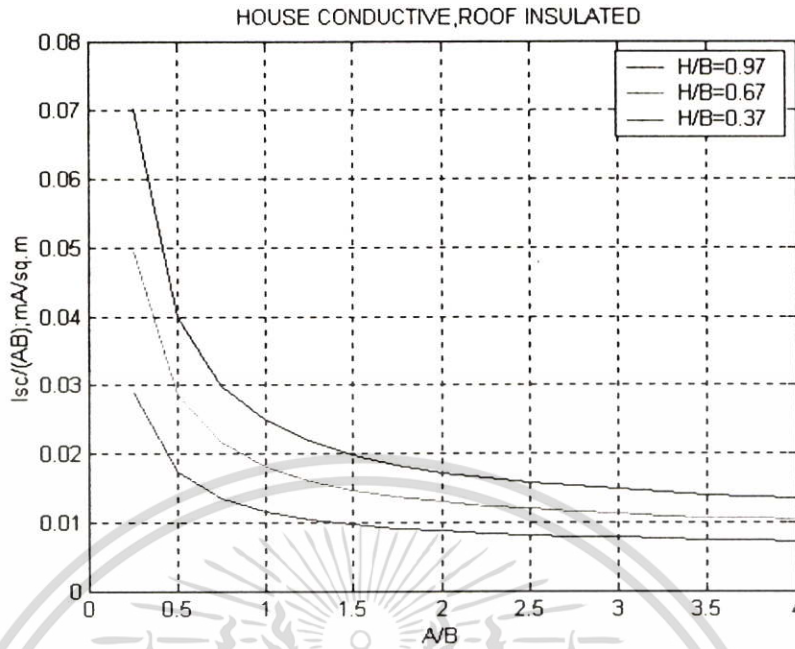
รูปที่ 5.11 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน
($E = 6.630 \text{ kV/m}$) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดียว



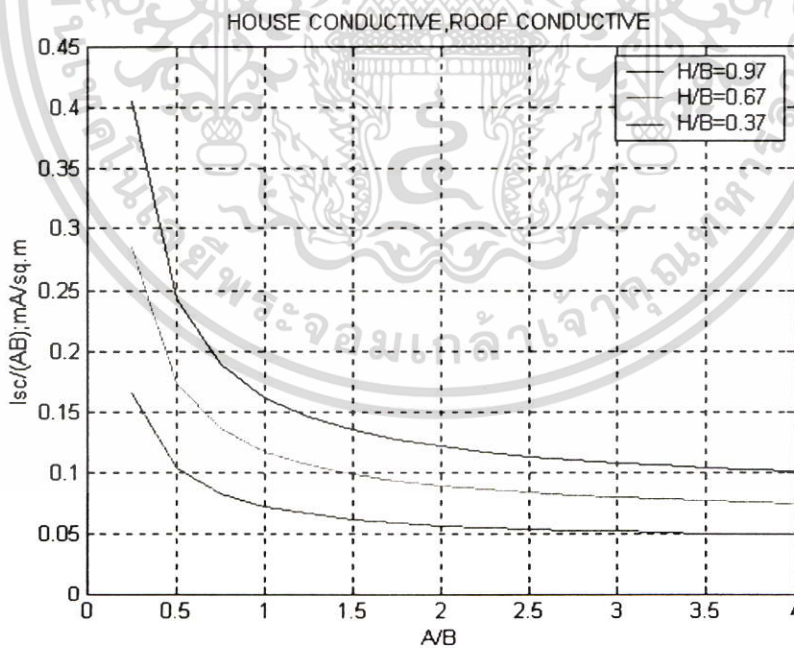
รูปที่ 5.12 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน ($E = 1.219 \text{ kV/m}$) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว



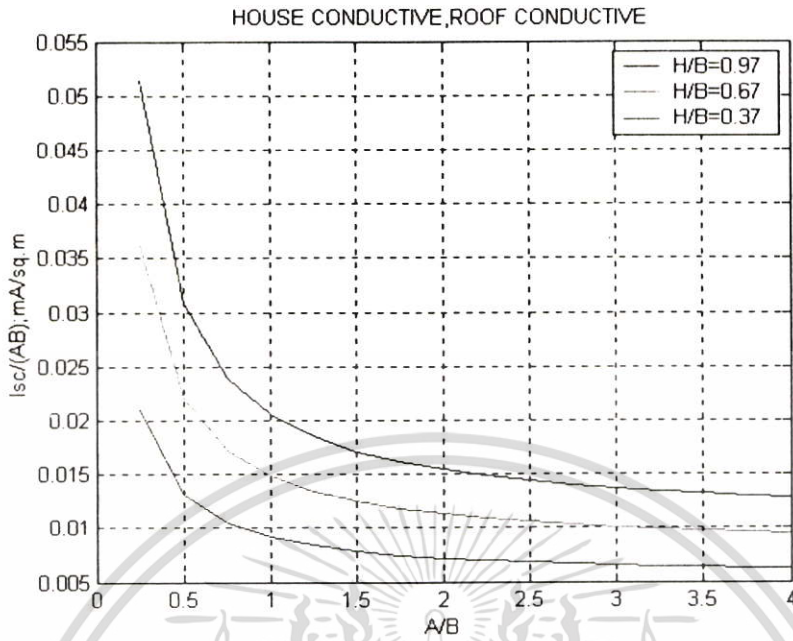
รูปที่ 5.13 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ ($E = 6.630 \text{ kV/m}$) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว



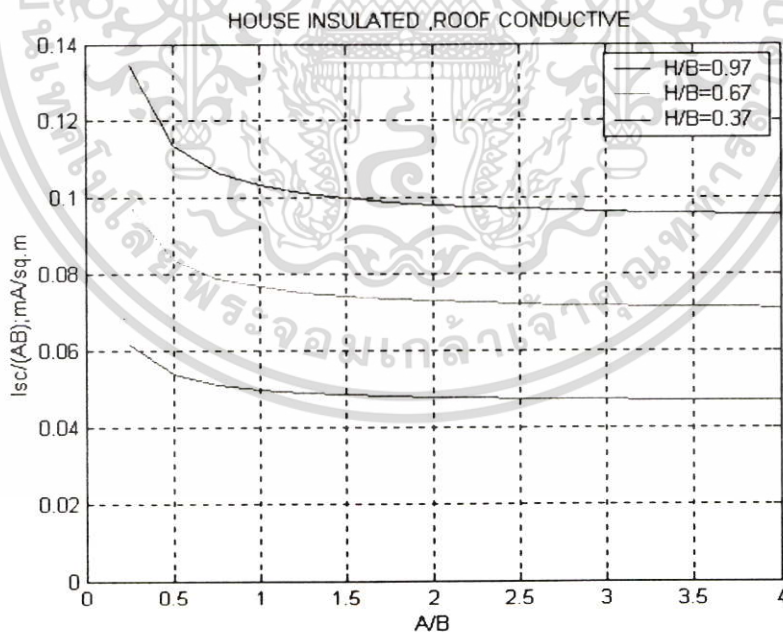
รูปที่ 5.14 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นฉนวน
($E = 1.219$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว



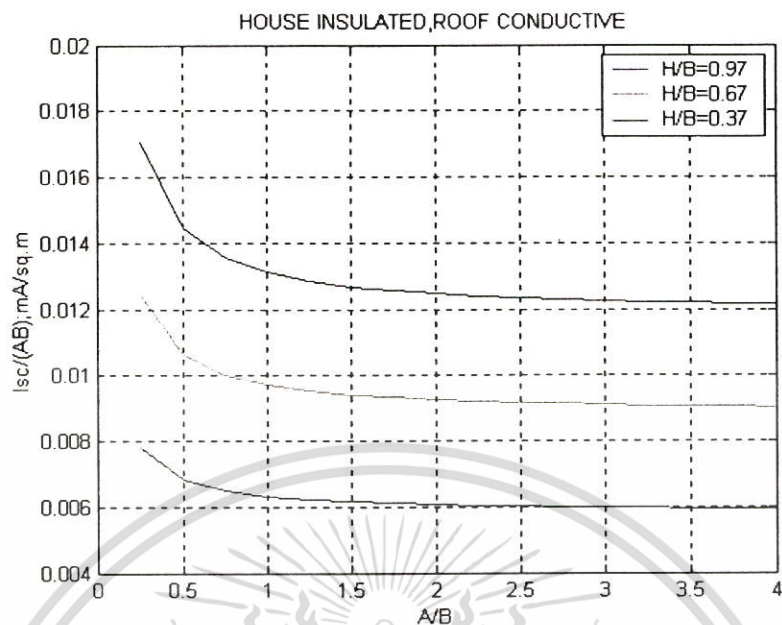
รูปที่ 5.15 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำ
($E = 6.012$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่



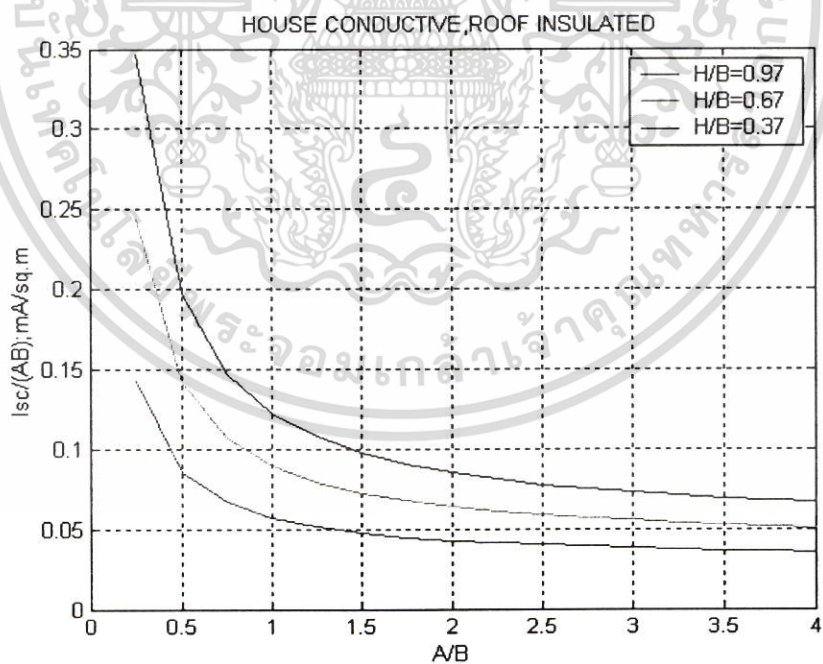
รูปที่ 5.16 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำ
($E = 0.764$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่



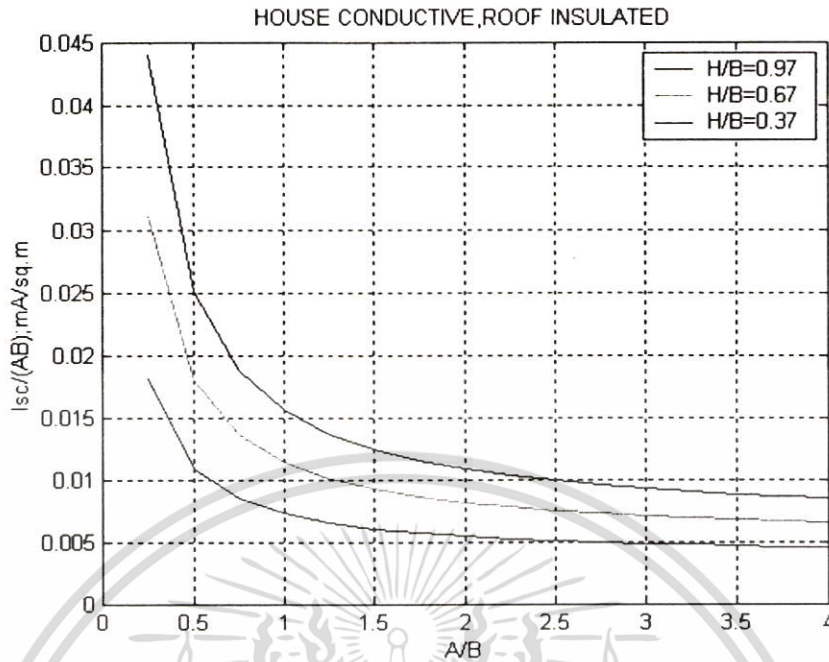
รูปที่ 5.17 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน
($E = 6.012$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่



รูปที่ 5.18 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน ($E = 0.764$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่



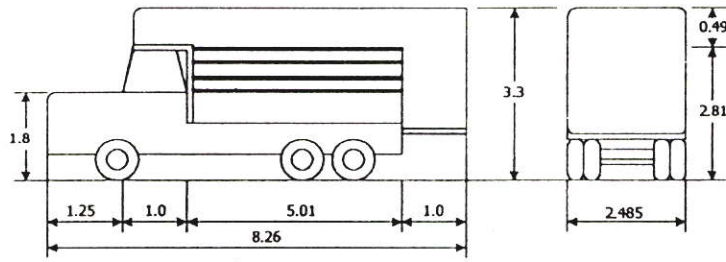
รูปที่ 5.19 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ ($E = 6.012$ kV/m) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่



รูปที่ 5.20 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ ($E = 0.764 \text{ kV/m}$) สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่

ในตัวอย่างที่ 5.1 เป็นการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัย ซึ่งตัวของบ้านพักอาศัยก็จะมีโครงสร้างที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนผสมกับวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า หรือเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างเดียว ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ก็เหมือนกับการวิเคราะห์วัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า หรือเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างเดียว ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ก็คือขนาดของบ้านพักอาศัยและค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัย แต่เนื่องจากในกรณีของบ้านพักอาศัยขนาดของบ้านพักอาศัยจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ A/B และ H/B ซึ่งในตัวอย่างนี้ได้แสดงการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนของ $H/B=0.97, H/B=0.67$ และ $H/B=0.37$ โดยเปรียบเทียบให้เห็นว่ายิ่งขนาดของบ้านพักอาศัยมีค่าเพิ่มขึ้น (H/B เพิ่มขึ้น) ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัยก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

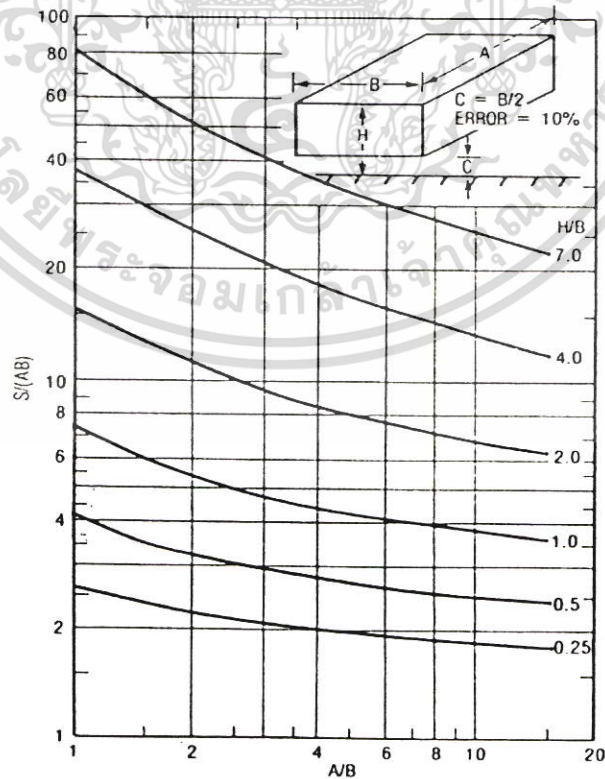
ตัวอย่างที่ 5.2 การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับรถบรรทุกที่มีลักษณะดังรูปที่ 5.21 เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้า ในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV



รูปที่ 5.21 ลักษณะของรถบรรทุกที่วิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้า

เนื่องจากรถบรรทุกไม่มีลักษณะเป็นรูปทรงเลขาคณิตที่แน่นอน จึงต้องคำนวณหาค่าของพื้นที่สมมูล โดยที่รูปทรงของรถบรรทุกจะเทียบเท่ากับทรงสี่เหลี่ยมทึบที่ไม่สัมผัสกับพื้นดิน (เนื่องจากยางของรถบรรทุกมีสภาพเป็นฉนวน) ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาพื้นที่สมมูลของรถบรรทุกได้โดยพิจารณาจากขนาดของรถบรรทุกได้ดังนี้

1. ความยาวของตัวรถ (A) 8.26 เมตร
2. ความกว้างของตัวรถ (B) 2.485 เมตร
3. ความสูงของตัวรถด้านหน้า 1.80 เมตร
4. ความสูงของรถเมือบรรทุกของ 3.3 เมตร



รูปที่ 5.22 Shape factor สำหรับวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยม

ความสูงเฉลี่ย(H)

$$H=[1.25 \times 1.8)+(1.0+5.01+1.0) \times 3.3] / 8.26$$

$$H=3.07 \text{ เมตร}$$

จาก Shape Factor

$$A/B=(8.26/2.485) = 3.32$$

$$AB = 8.26 \times 2.485 = 20.52 \text{ m}^2$$

$$H/B = (3.07/2.485) = 1.24$$

พิจารณาจากรูปที่ 5.22 เมื่อ $H/B = 1.24$ และ $A/B = 3.32$ จะได้ $S/(AB) = 6.0$ ดังนั้น

$$S = 6.0 \times (AB)$$

$$S = 6.0 \times 20.52 = 123.12 \text{ m}^2$$

เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้า มีค่าเป็น 6.63 kV/m

$$I_{sc} = 2.270 \text{ mA}$$

เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้า มีค่าเป็น 1.219 kV/m

$$I_{sc} = 0.417 \text{ mA}$$

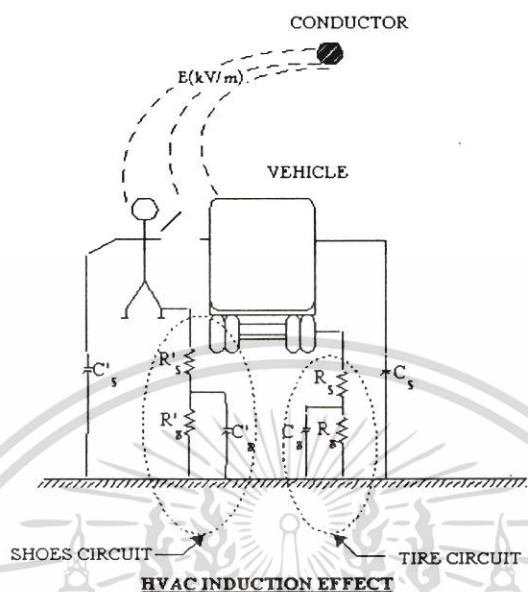
เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้า มีค่าเป็น 6.012 kV/m

$$I_{sc} = 2.060 \text{ mA}$$

เมื่อความเข้มสนามไฟฟ้า มีค่าเป็น 0.764 kV/m

$$I_{sc} = 0.262 \text{ mA}$$

เราสามารถวิเคราะห์ในรูปแบบของพลังงานสะสมที่เกิดขึ้น



รูปที่ 5.23 วงจรสมมูลระหว่างคนและรถบรรทุกในสถานะ Steady state เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้า

$$V_{oc} = I_{sc} / (j\omega C_s) \quad (5.8)$$

$$\text{พลังงานสะสมสูงสุด} = C_s V_{oc}^2 \quad (5.9)$$

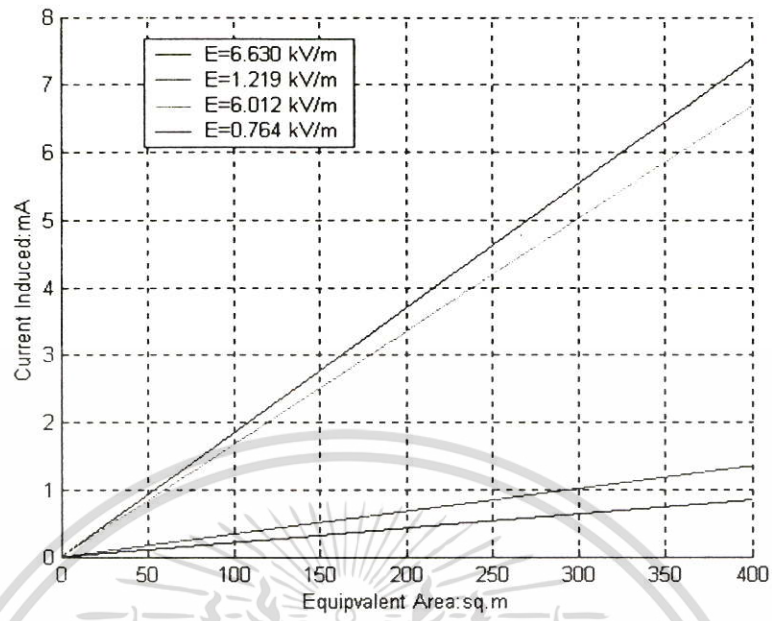
เมื่อ

V_{oc} = แรงดันไฟฟ้าระหว่างวัตถุตัวนำเทียบกับพื้นดินขณะเปิดวงจร
(open-circuit voltage)

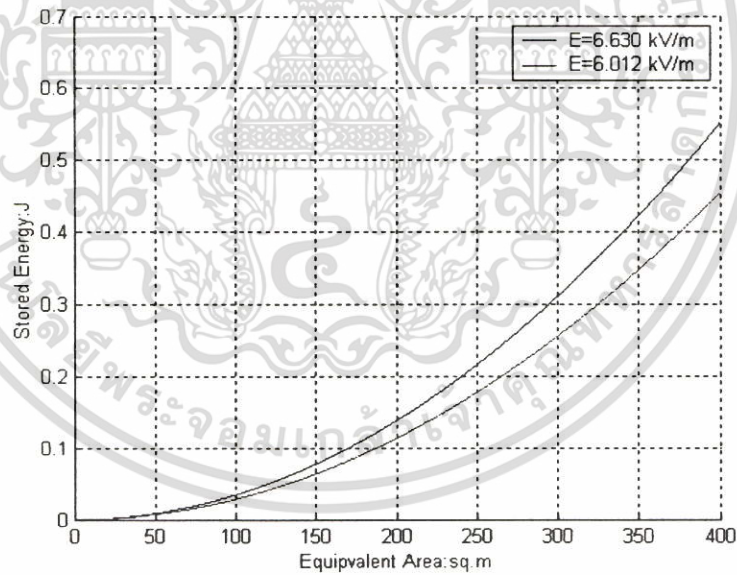
C_s = ค่าคาปาซิแตนซ์ของวัตถุเทียบกับกราวด์[1]

ตารางที่ 5.2 แสดงการคำนวณค่ากระแสเหนี่ยวนำบนรถบรรทุกที่สนามไฟฟ้าค่าต่างๆ

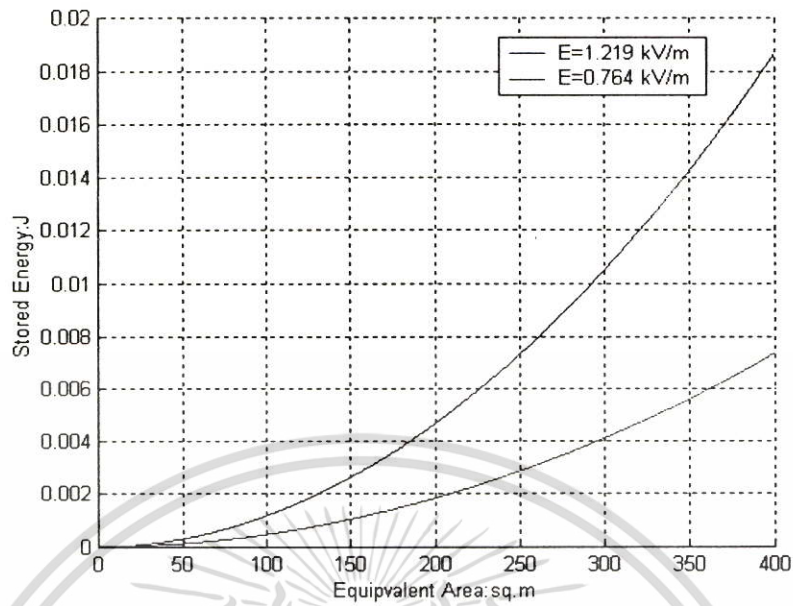
สนามไฟฟ้า	I_{sc}	V_{oc}	พลังงานสะสม	เมื่อรถบรรทุกมี $C_s = 1000 \text{ pF}$ [1]
E=6.63 kV/m	2.27 mA	7225 V	52.20 mJ	
E=1.219 kV/m	0.417 mA	1327 V	1.76 mJ	
E=6.012 kV/m	2.06 mA	6557 V	42.99 mJ	
E=0.764 kV/m	0.262 mA	833.97 V	0.695 mJ	



รูปที่ 5.24 ผลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำต่อขนาดพื้นที่สมมูลของรถบรรทุก



รูปที่ 5.25 ผลของพลังงานสะสมต่อขนาดพื้นที่สมมูลของรถบรรทุกที่สนามไฟฟ้าสูงสุด



รูปที่ 5.26 ผลของพลังงานสะสมต่อขนาดพื้นที่สมมูลของรถบรรทุกของสนามไฟฟ้า

5.2.2 ภัยได้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

ในส่วนของการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าจากความหนาแน่นประจุไฟฟ้า (ion current density, J) มีหน่วยเป็น A/m^2 ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการ ดังนี้

$$E_{DC} = -\nabla V \quad (5.10)$$

$$\epsilon \cdot \nabla V = \rho \quad (5.11)$$

$$\rho = \frac{J}{\mu E_{DC}} \quad (5.12)$$

$$J = \rho \cdot \mu E_{DC} \quad (5.13)$$

เมื่อ

E_{DC}	คือ	สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
V	คือ	แรงดันไฟฟ้าของระบบ
ρ	คือ	ความหนาแน่นประจุไฟฟ้า
μ	คือ	อัตราการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า (ion mobility)

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาหาค่าความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าโดยใช้วิธี HVTRC [3] เช่นเดียวกันกับการหาค่าสนามไฟฟ้า นั่นคือพิจารณาจากสถานะการเกิดโคโรนาของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยสมมติฐานคือไม่มีประจุไฟฟ้าที่ตัวนำคังนั้นสนามไฟฟ้าที่ตัวนำมีค่าเป็นศูนย์ ค่าความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้า ณ ที่ตำแหน่ง X ใดๆ จากตำแหน่งกึ่งกลางเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง

$$J(+)=1.54 \cdot 10^{-15} (1-e^{-P/H})(e^{-1.75(X-P/2)/H}) \cdot V^2 / H^3 \quad (5.14)$$

$$J(-)=-2 \cdot 10^{-15} (1-e^{-1.5P/H})(e^{-1.75(X-P/2)/H}) \cdot V^2 / H^3 \quad (5.15)$$

เงื่อนไขของสมการ[3]ที่ 5.12 และ 5.13 $1 < \frac{X - \frac{P}{H}}{H} < 4$

ค่าความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าสูงสุด เมื่อสายส่งอยู่ในสถานะที่เกิดโคโรนา คือ

$$J_s(+)=1.65 \times 10^{-15} [1-e^{-0.7P/H}] \cdot \frac{V^2}{H^3} \quad (5.16)$$

$$J_s(-)=-2.15 \times 10^{-15} [1-e^{-0.7P/H}] \cdot \frac{V^2}{H^3} \quad (5.17)$$

เมื่อ $\mu(+)=1.5 \times 10^{-4} m^2 / v \cdot s$ และ $\mu(-)=1.15 \times 10^{-4} m^2 / v \cdot s$

ค่าของความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่มีการส่งจ่ายในแบบไบโพลาร์ คือ

$$J_{DC}(+)=J_e+S_e(+)[J_s-J_e] \quad (5.18)$$

$$J_{DC}(-)=J_e+S_e(-)[J_s-J_e] \quad (5.19)$$

เมื่อ

$J_{DC}(+)$ = ความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วบวก

$J_{DC}(-)$ = ความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบ

S_e = ระดับการเกิดโคโรนา

J_s = ความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าขณะเกิดโคโรนาสูงสุด

J_e = ความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าขณะไม่เกิดโคโรนา

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาหาค่าความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าโดยใช้วิธี HVTRC [3] เช่นเดียวกันกับการหาค่าสนามไฟฟ้า นั่นคือพิจารณาจากสภาวะการเกิดโคโรน่าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยสมมติฐานคือไม่มีประจุไฟฟ้าที่ตัวนำ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่ตัวนำมีค่าเป็นศูนย์ ค่าความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้า ณ ที่ตำแหน่ง X ใดๆ จากตำแหน่งกึ่งกลางเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง

$$J(+)=1.54 \cdot 10^{-15} (1-e^{-P/H})(e^{-1.75(X-P/2)/H}) \cdot V^2 / H^3 \quad (5.14)$$

$$J(-)=-2 \cdot 10^{-15} (1-e^{-1.5P/H})(e^{-1.75(X-P/2)/H}) \cdot V^2 / H^3 \quad (5.15)$$

เงื่อนไขของสมการ[3]ที่ 5.12 และ 5.13 $1 < \frac{X - \frac{P_H}{2}}{H} < 4$

ค่าความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าสูงสุด เมื่อสายส่งอยู่ในสภาวะที่เกิดโคโรน่า คือ

$$J_s(+)=1.65x10^{-15} [1-e^{-0.7P/H}] \cdot \frac{V^2}{H^3} \quad (5.16)$$

$$J_s(-)=-2.15x10^{-15} [1-e^{-0.7P/H}] \cdot \frac{V^2}{H^3} \quad (5.17)$$

เมื่อ $\mu(+)=1.5x10^{-4} m^2 / v.s$ และ $\mu(-)=1.15x10^{-4} m^2 / v.s$

ค่าของความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่มีการส่งจ่ายในแบบไบโพลาร์ คือ

$$J_{DC}(+)=J_e+S_e(+)[J_s-J_e] \quad (5.18)$$

$$J_{DC}(-)=J_e+S_e(-)[J_s-J_e] \quad (5.19)$$

เมื่อ

$J_{DC}(+)$ = ความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วบวก

$J_{DC}(-)$ = ความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขั้วลบ

S_e = ระดับการเกิดโคโรน่า

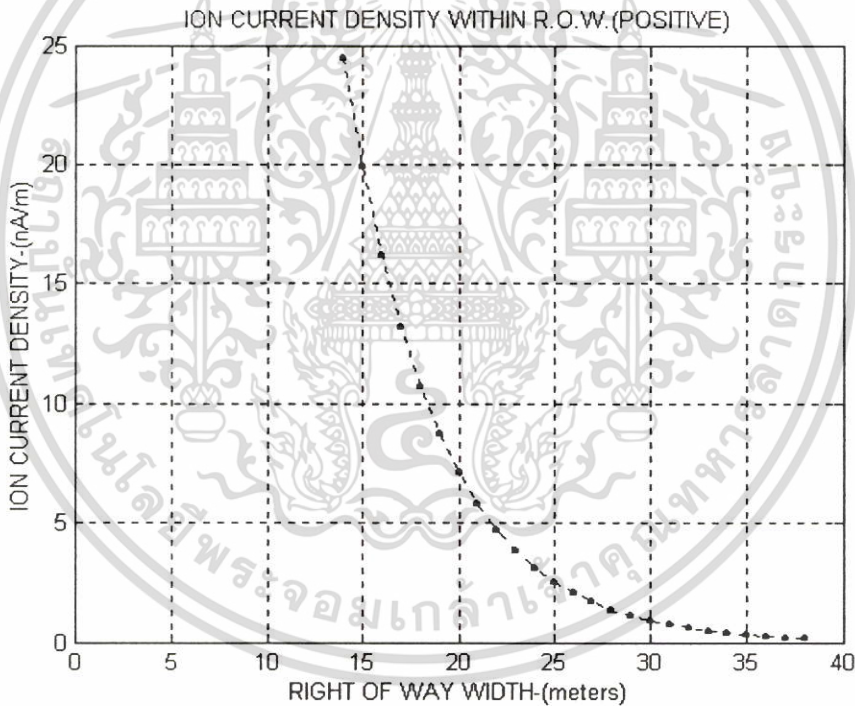
J_s = ความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าขณะเกิดโคโรน่าสูงสุด

J_e = ความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าขณะไม่เกิดโคโรน่า

หมายเหตุ ในขณะที่เกิดโคโรน่าสูงสุดสมมุติฐานก็คือ ไม่มีประจุใดๆอยู่ที่สายตัวนำ ดังนั้น $J_c = 0$

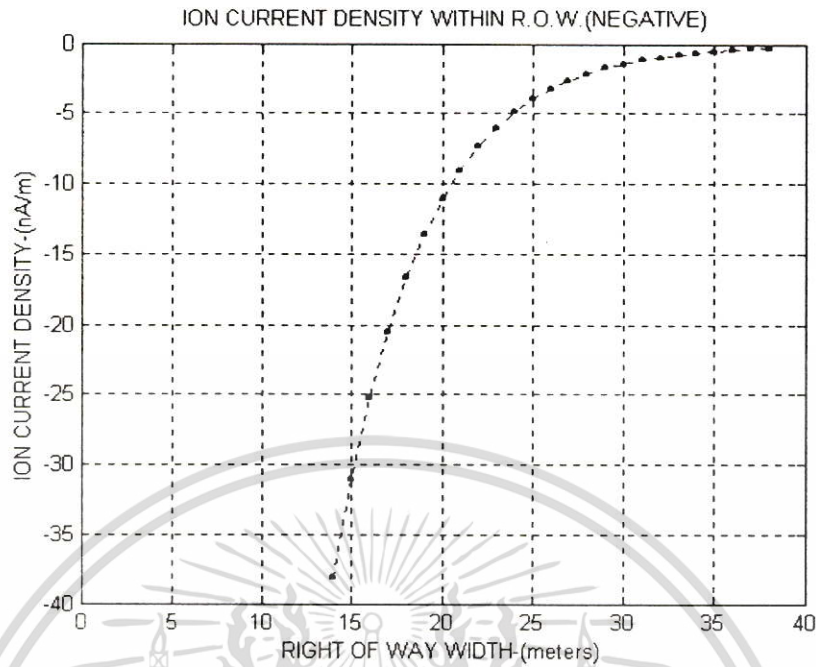
ดังนั้นในการพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง กับวัตถุตัวนำ พิจารณาในรูปของกระแสชอตเซอร์กิตที่ไหลผ่านวัตถุตัวนำลงกราวด์ ($I_{sc} (DC)$) ได้ขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้า(ต่อพื้นที่) และ พื้นที่สมมูลย์ของวัตถุตัวนำ

จากสมการที่ 5.12 และ 5.13 ทำการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าขณะเกิดโคโรน่าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบไบโพล่าและโมนโพล่าได้ เพื่อให้ค่ามีความถูกต้องตามเอกสารอ้างอิงที่[3]ต้องพิจารณาตามเงื่อนไข พิจารณาค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าขั้วบวกที่ขอบระยะแนวเดินสาย (R.O.W) X เท่ากับ 20 เมตร มีค่าเท่ากับ 7.1151 nA/m^2 และค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าขั้วลบ X เท่ากับ -11.072 nA/m^2



รูปที่ 5.27 ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าเมื่อเกิดผลของโคโรน่า จากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

$$300 \text{ kV ตามเงื่อนไข } 1 < \frac{X - \frac{P_H}{2}}{H} < 4 \text{ ขั้วบวก}$$



รูปที่ 5.28 ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าเมื่อคิดผลของโคโรนา จากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

$$300 \text{ kV} \text{ ตามเงื่อนไข } 1 < \frac{X - \frac{P_H}{2}}{H} < 4 \text{ ขั้วลบ}$$

ตัวอย่างที่ 5.3 การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัยภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบไบโพลาร์ โดยพิจารณาผลของกระแสของความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าสูงสุดกระทำกับพื้นที่สมมูลย์ของบ้านพักอาศัย

กระแสฮอตเซอร์กิตที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงสามารถวิเคราะห์ได้ดังสมการ

$$I_{SC}(DC) = J \cdot S \quad (5.20)$$

เมื่อ $I_{SC}(DC)$ = กระแสฮอตเซอร์กิตลงกราวด์ที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (nA)

J = ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (nA/m²)

S = พื้นที่สมมูลย์ของวัตถุตัวนำที่พิจารณา (m²)

ดังนั้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดต่อพื้นที่ เมื่อสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมีระยะห่างของสายตัวนำ (Phase Spacing) เท่ากับ 10 เมตร ความสูง (H) เท่ากับ 8.5 เมตร เราสามารถใช้สมการที่ 5.14-5.17 คำนวณได้โดยขณะเกิดโคโรนาสมมุติฐานก็คือไม่มีประจุใดๆ อยู่ที่สายตัวนำ ดังนั้น $J_c = 0$

จากสมการที่ 5.12 และ 5.13

$$J_{S,MAX}(+) = 1.65 \times 10^{-15} (1 - e^{-0.7 \frac{10}{8.5}}) (300 \times 1000)^2 / 8.5^3$$

$$J_{S,MAX}(+) = 135.67 \quad \text{nA/m}^2$$

$$J_{S,MAX}(-) = -2.15 \times 10^{-15} (1 - e^{-0.7 \frac{10}{8.5}}) (300 \times 1000)^2 / 8.5^3$$

$$J_{S,MAX}(-) = -176.79 \quad \text{nA/m}^2$$

ค่าระดับการเกิดโคโรน่า(Degree Corona Saturation)ในสภาพอากาศที่มีฝนตก

$$S_e = 1 - e^{-0.058(23.2-9)}$$

$$S_e = 0.6312$$

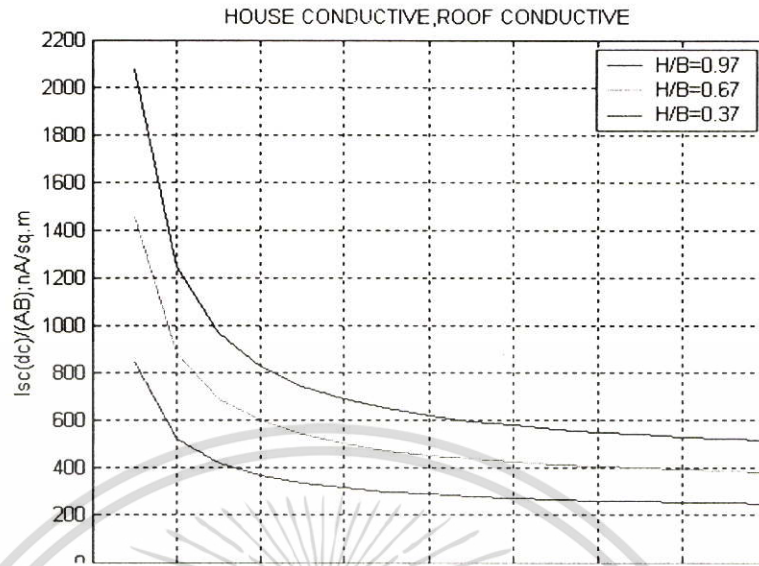
ไม่มีประจุอยู่ผิวของตัวนำ $J_e = 0$ ดังนั้นค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่ง
ไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงสมการที่ 5.16 และ 5.17

$$J_{DC}(+) = 0 + 0.6312 (135.67 + 0)$$

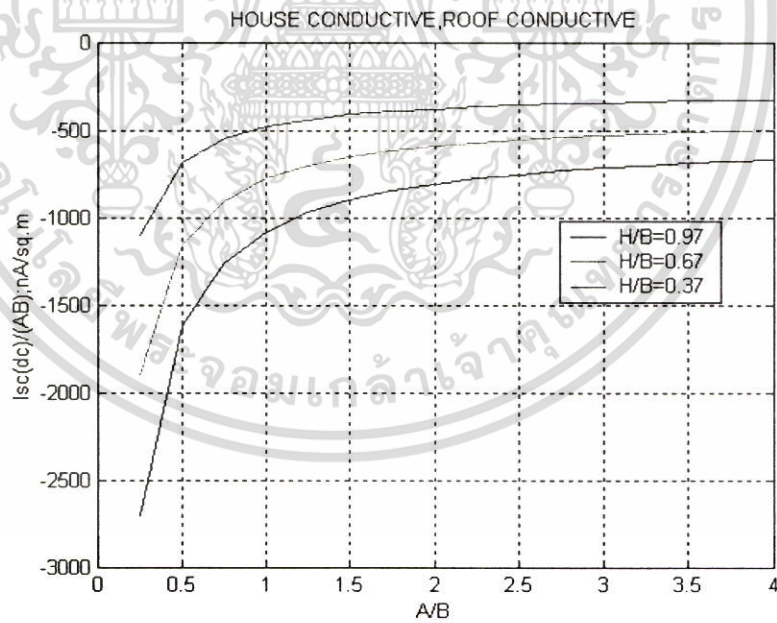
$$J_{DC}(+) = 85.63 \quad \text{nA/m}^2$$

$$J_{DC}(-) = 0 + 0.6312 (-176.79 + 0)$$

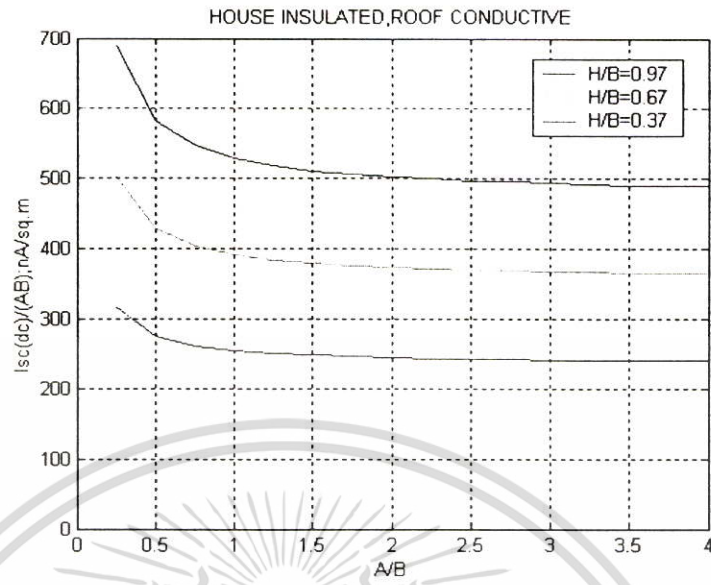
$$J_{DC}(-) = -111.589 \quad \text{nA/m}^2$$



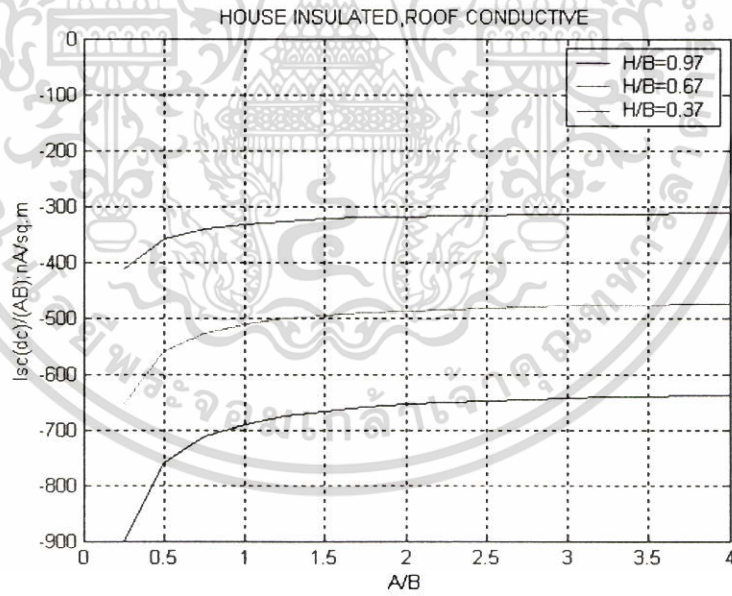
รูปที่ 5.29 ผลของกระแสชอร์ตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตั่วน้ำและตั่วบ้านเป็นตั่วน้ำ (ข้าวบวก)



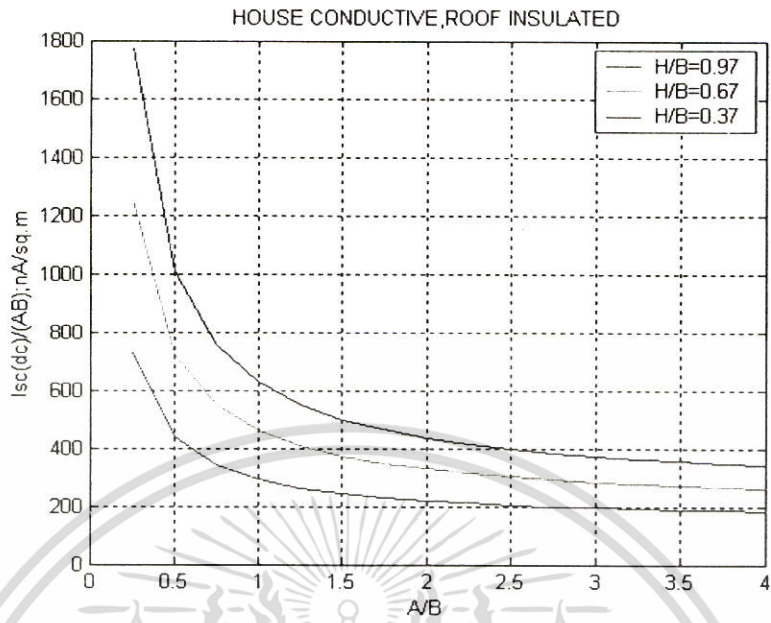
รูปที่ 5.30 ผลของกระแสชอร์ตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตั่วน้ำตั่วบ้านเป็นตั่วน้ำ (ข้าวลบ)



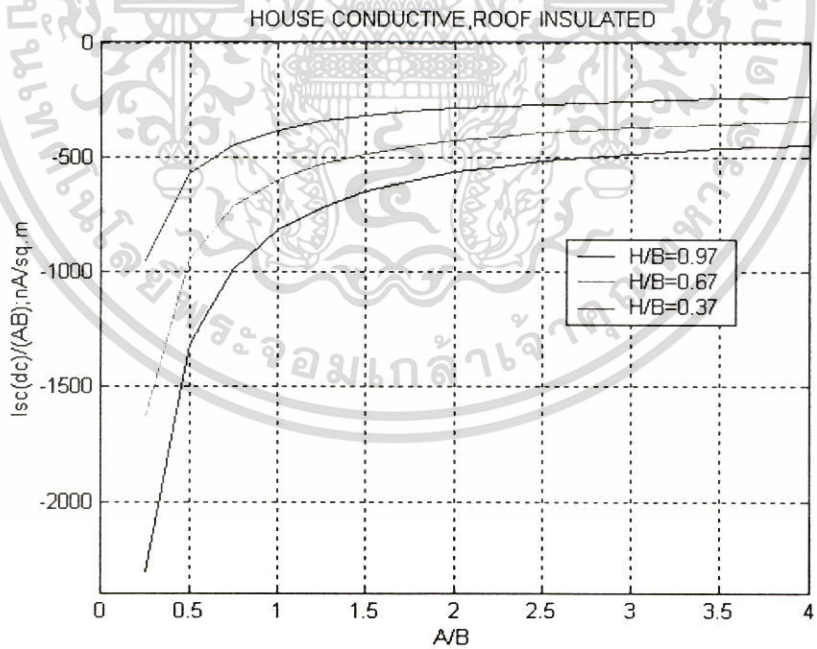
รูปที่ 5.31 ผลของกระแสฮอตเซอร์กิตนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นต้วน้ำและต้วบ้านเป็นฉนวน (ขั้วบวก)



รูปที่ 5.32 ผลของกระแสฮอตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นต้วน้ำและต้วบ้านเป็นฉนวน (ขั้วลบ)



รูปที่ 5.33 ผลของกระแสชอร์ตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ (ขั้วบวก)



รูปที่ 5.34 ผลของกระแสชอร์ตเซอร์กิตต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ (ขั้วลบ)

เมื่อพิจารณาที่ขอบแนวการเดินสายของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (Edge of right of way) ซึ่งเป็นบริเวณที่อาจมีสิ่งปลูกสร้าง บ้านเรือน สามารถพิจารณาหาค่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้าและกระแสชอตเซอร์กิต จากสมการที่ 5.12 และ 5.13 ที่ระยะ $X = 20$ m

$$J_S (+) = 7.1151 \quad \text{nA/m}^2$$

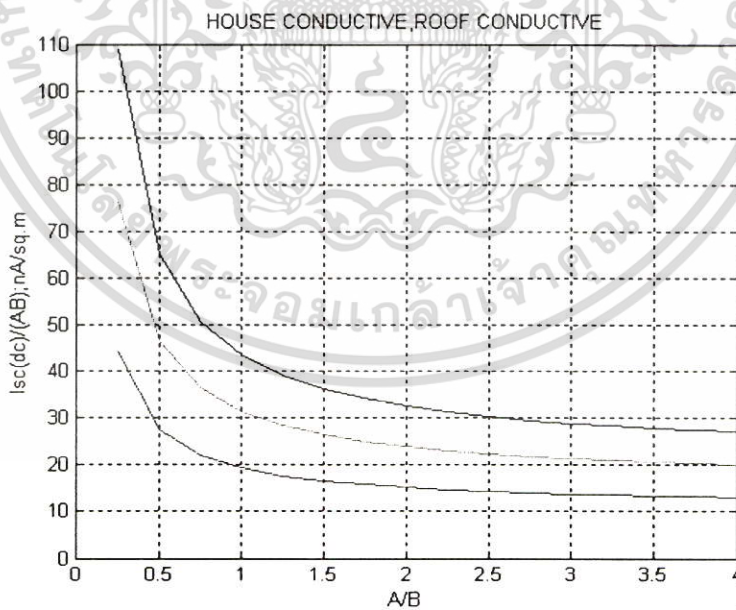
$$J_S (-) = -11.072 \quad \text{nA/m}^2$$

$$J_{DC} (+) = 0 + 0.6312 (7.1151 + 0)$$

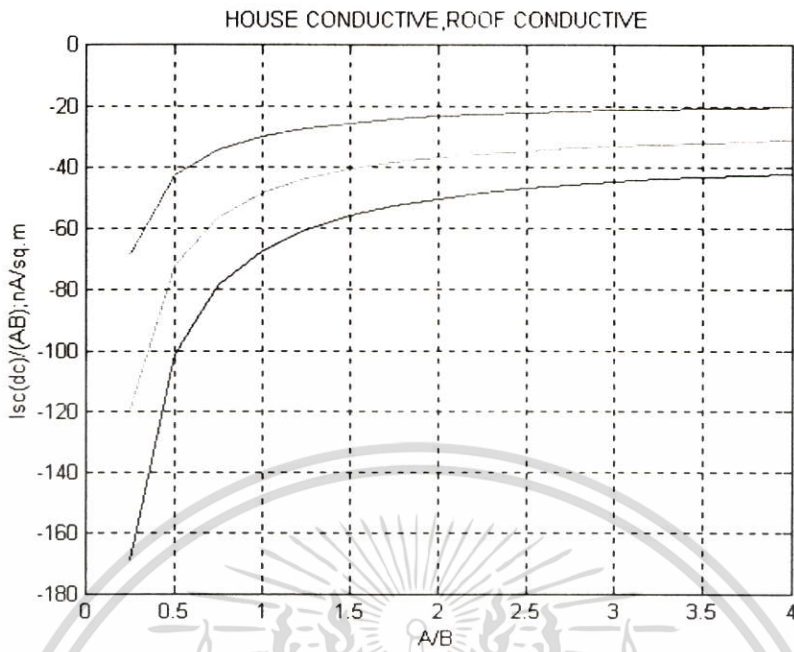
$$J_{DC} (+) = 4.491 \quad \text{nA/m}^2$$

$$J_{DC} (-) = 0 + 0.6312 (-11.072 + 0)$$

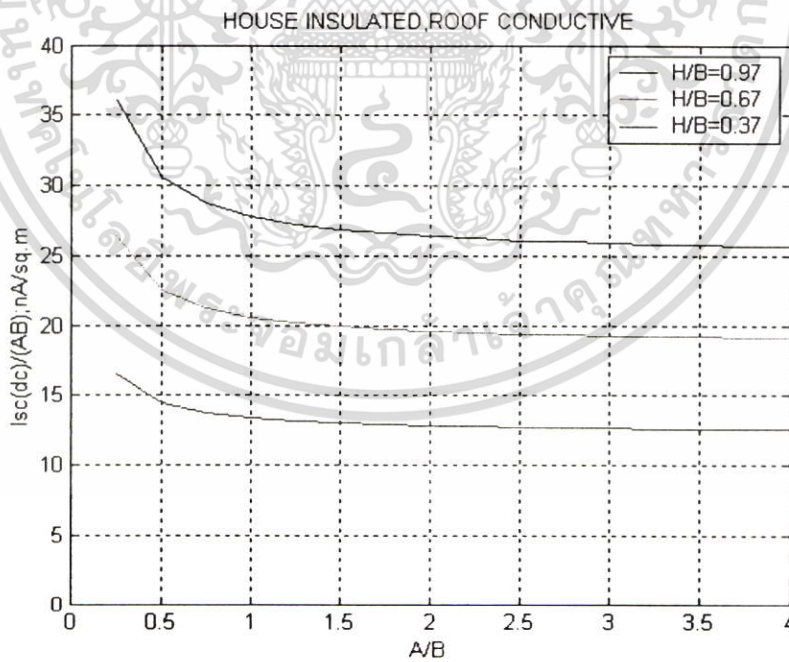
$$J_{DC} (-) = -6.988 \quad \text{nA/m}^2$$



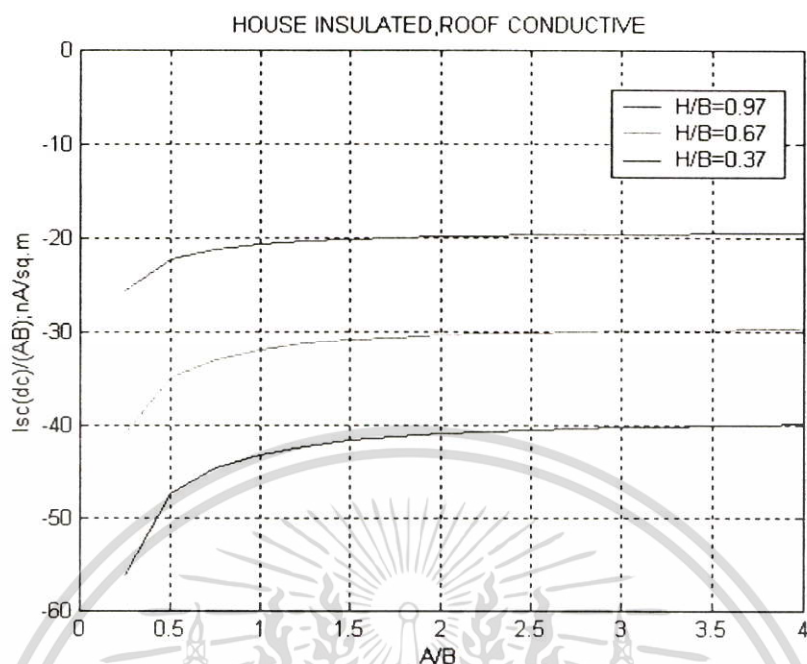
รูปที่ 5.35 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นตัวนำ (जूबवक) ที่ขอบ R.O.W. ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV



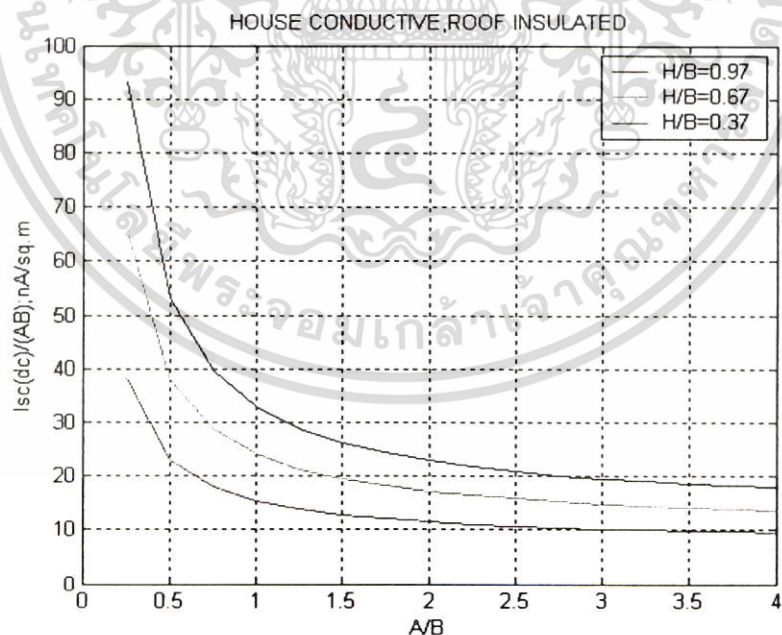
รูปที่ 5.36 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นตัวนำ (ขั้วลบ) ที่ขอบ R.O.W. ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV



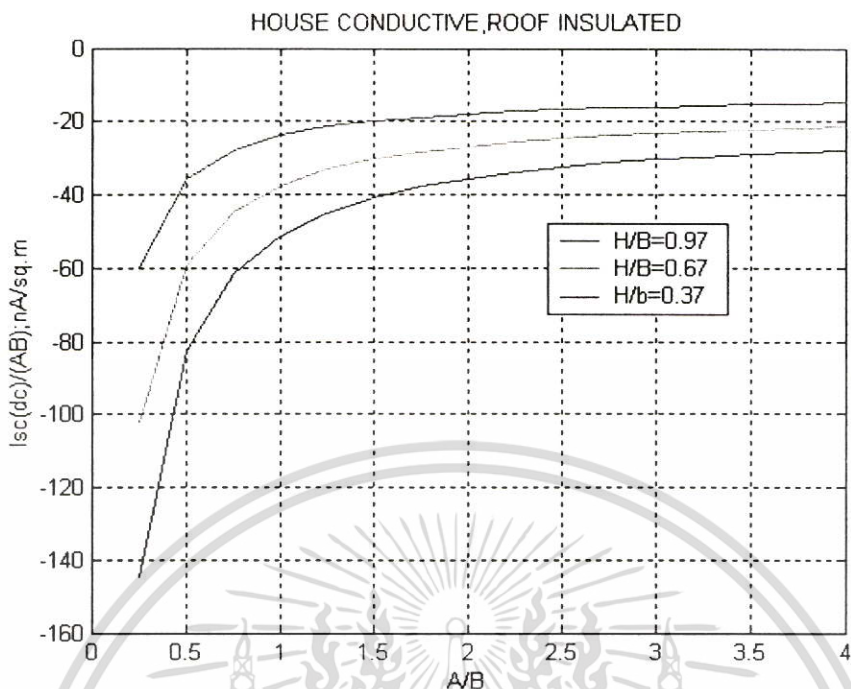
รูปที่ 5.37 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำและตัวบ้านเป็นฉนวน (ขั้วบวก) ที่ขอบ R.O.W. ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV



รูปที่ 5.38 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นดัวนำและดัวบ้านเป็นฉนวน (ขั้วลบ) ที่ขอบ R.O.W. ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV

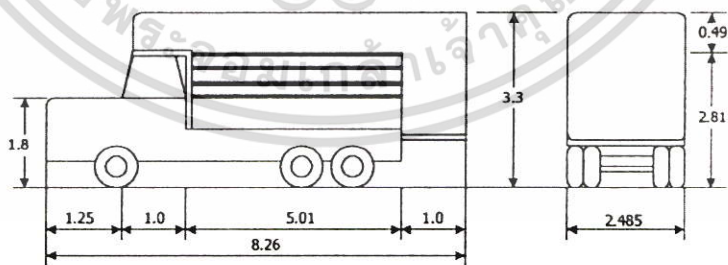


รูปที่ 5.39 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและดัวบ้านเป็นดัวนำ (ขั้วบวก) ที่ขอบ R.O.W. ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV



รูปที่ 5.40 ผลของกระแสเหนี่ยวนำต่อพื้นที่บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำ (ขั้วลบ) ที่ขอบ R.O.W. ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV

ตัวอย่างที่ 3 รถบรรทุกที่จอดอยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ± 300kV และถูกใช้เป็นต้นแบบในการวิเคราะห์ผลกระทบเนื่องมาจากความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าสูงสุด(Maximum Current Density) มีขนาดดังนี้



รูปที่ 5.41 ขนาดของรถบรรทุกภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

ความสูงเฉลี่ย(H)

$$H = [1.25 \times 1.8 + (1.0 + 5.01 + 1.0) \times 3.3] / 8.26$$

$$H = 3.07 \text{ เมตร}$$

จาก Shape Factor

$$A/B = (8.26/2.485) = 3.32$$

$$AB = 8.26 \times 2.485 = 20.52 \text{ m}^2$$

$$H/B = (3.07/2.485) = 1.24$$

พิจารณาจากรูปที่ xx เมื่อ $H/B = 1.24$ และ $A/B = 3.32$ จะได้ $S/(AB) = 6.0$ ดังนั้น

$$S = 6.0 \times (AB)$$

$$S = 6.0 \times 20.52 = 123.12 \text{ m}^2$$

ดังนั้นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดต่อพื้นที่ เมื่อสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมีระยะห่างของสายตัวนำ (Phase Spacing) เท่ากับ 10 เมตร ความสูง (H) เท่ากับ 8.5 เมตร เราสามารถใช้สมการที่ 5.16-5.17 จำนวนได้

$$\text{ขั้วบวก } J_{DC}(+) = 85.63 \text{ nA/m}^2$$

$$\text{ขั้วลบ } J_{DC}(-) = -111.589 \text{ nA/m}^2$$

ดังนั้นกระแสเหนี่ยวนำจากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแบบ BIPOLAR และ MONOPOLAR มีค่าเท่ากับ

รอบรรทุกจุดได้ขั้วบวก

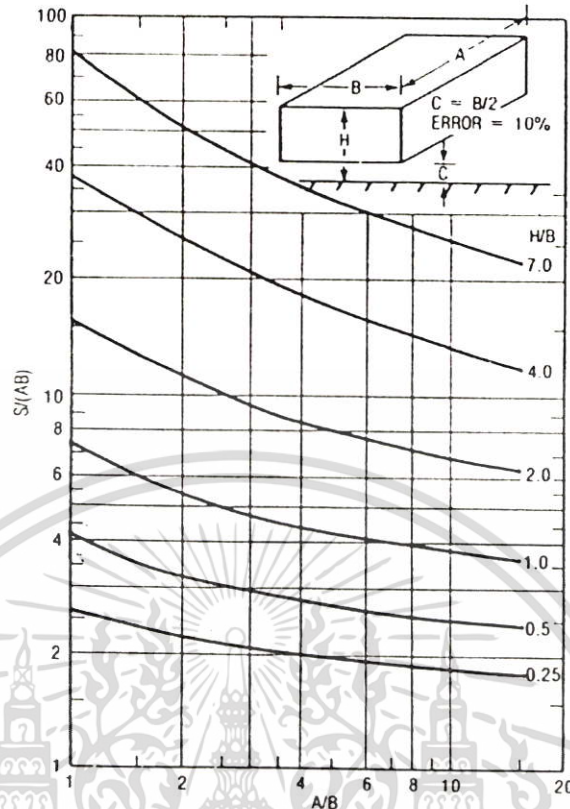
$$I_{sc} = 85.63 \times 123.12 = 10,542 \text{ nA}$$

$$I_{sc} = 10.542 \text{ uA}$$

รอบรรทุกจุดได้ขั้วลบ

$$I_{sc}(DC) = -111.589 \times 123.12 = -13,738 \text{ nA}$$

$$I_{sc}(DC) = -13.738 \text{ uA}$$



รูปที่ 5.42 Shape factor ของวัตถุตัวนำรูปทรงสี่เหลี่ยม

จาก Shape Factor จะเห็นว่าพื้นที่สัมผัสของรถบรรทุก จะถูกกำหนดจากอัตราส่วนระหว่างความสูงเฉลี่ยต่อความกว้างของรถบรรทุก (H/B) และอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างของตัวรถบรรทุก (A/B)

ตารางที่ 5.3 แสดงการคำนวณค่ากระแสชอตเซอร์กิตบนรถบรรทุกภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง
กระแสตรง

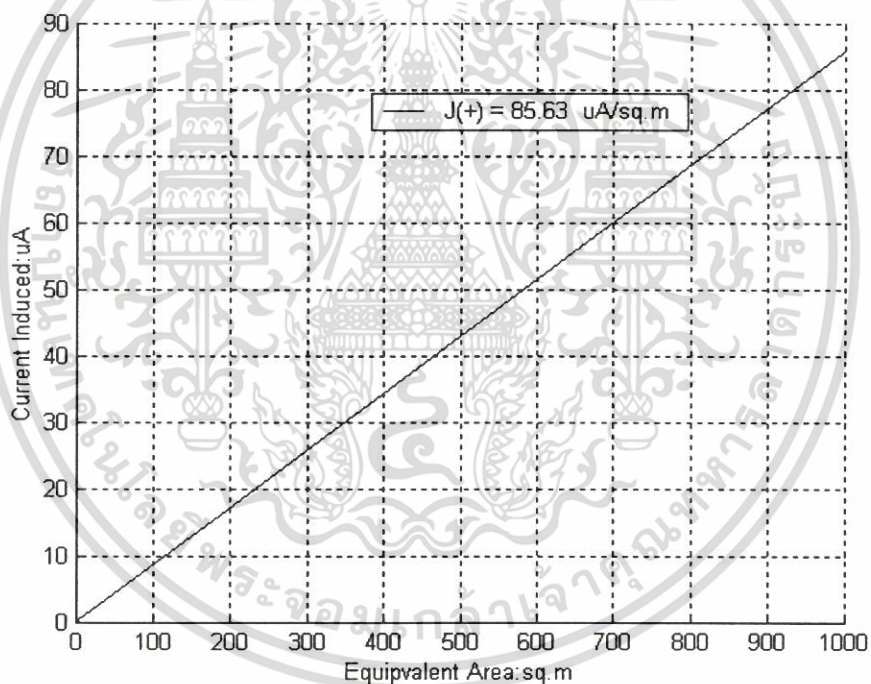
A.B	H/B	S/(AB)	Isc(DC) uA
20.52	0.25	2.1	3.69
20.52	0.5	3.9	6.85
20.52	1.0	4.7	8.26
20.52	2.0	9.05	15.90
20.52	4.0	20	35.14
20.52	7.0	40	70.29

หมายเหตุ $A/B = 3.32$ เมื่อ $J_{DC}(+) = 85.63 \text{ nA/m}^2$

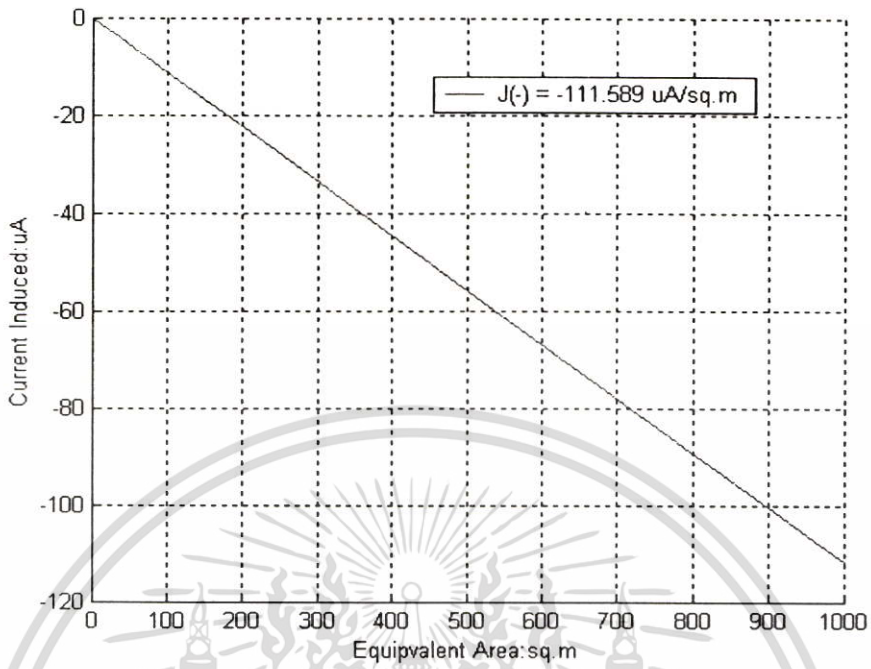
ตารางที่ 5.4 แสดงการคำนวณค่ากระแสชอตเซอร์กิตบนรลบรรทุกภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง
กระแสตรง

A.B	H/B	S/(AB)	Isc(DC) uA
20.52	0.25	2.1	-4.81
20.52	0.5	3.9	-8.93
20.52	1.0	4.7	-10.76
20.52	2.0	9.05	-20.72
20.52	4.0	20	-45.79
20.52	7.0	40	-91.59

หมายเหตุ A/B = 3.32 เมื่อ $J_{DC}(-) = -111.589 \text{ nA/m}^2$

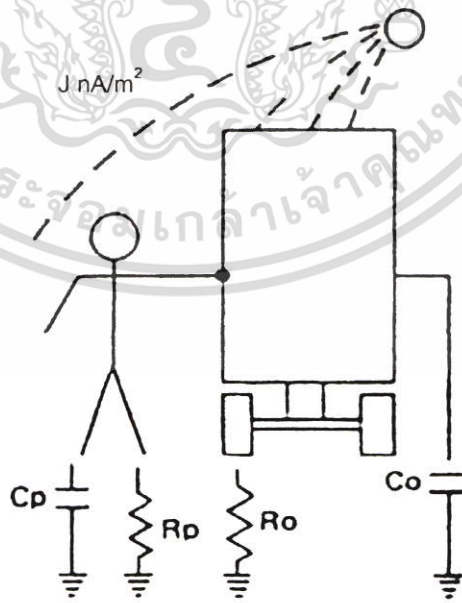


รูปที่ 5.43 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนรลบรรทุกทุกเมื่อมีพื้นที่สมมูลเพิ่มขึ้น (จั่วบวก)



รูปที่ 5.44 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนรถบรรทุกเมื่อมีพื้นที่สมมูลเพิ่มขึ้น (ขั้วลบ)

เราสามารถวิเคราะห์ในรูปแบบของพลังงานสะสมที่เกิดขึ้นบนรถบรรทุกได้



รูปที่ 5.45 วงจรสมมูลระหว่างคนและรถบรรทุกในสภาวะ Steady state อยู่ในภายใต้สายส่งไฟฟ้า
กระแสตรง

$$V_o = I_{sc} \cdot (DC) \cdot R_o \tag{5.21}$$

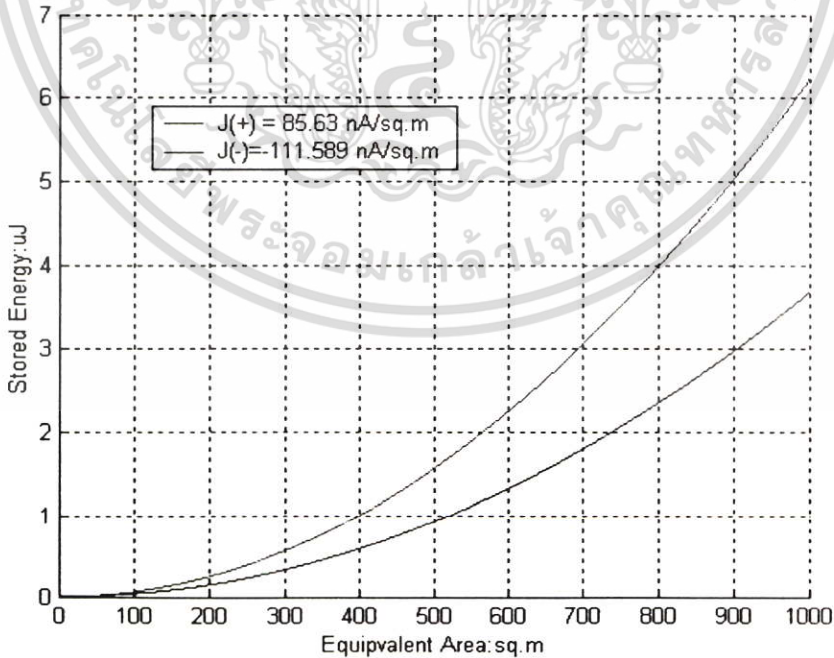
$$\text{พลังงานสะสมสูงสุด} = \frac{1}{2} C_o V_o^2 \tag{5.22}$$

เมื่อ C_o = ค่าคาปาซิแตนซ์ของรบบรรทุกเทียบกับกราวด์ (pF)

R_o = ค่าความต้านทานของขางรถยนต์ ($M\Omega$)

ตารางที่ 5.5 แสดงการคำนวณพารามิเตอร์บนรบบรรทุกภายใต้สายส่งไฟฟ้ากระแสตรง

J_{DC} (nA/m ²)	I_{sc} (uA)	V_{oc} (V)	พลังงานสะสม (nJ)	เมื่อรบบรรทุกมี $R_o = 1 M\Omega$ $C_o = 1000 pF$ [1]
85.63	10.542	10.542	55.56	
-111.589	-13.738	-13.738	94.36	



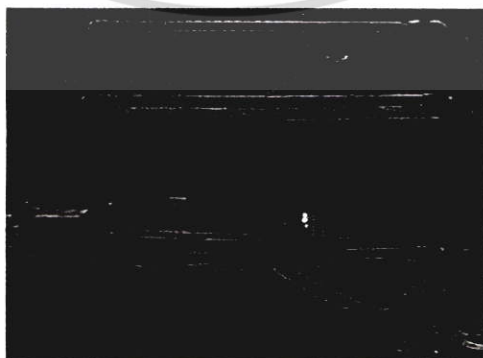
รูปที่ 5.46 ผลของพลังงานสะสมต่อขนาดพื้นที่สมมูลย์ของรบบรรทุกของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง $\pm 300 kV$

5.3 การทดสอบผลกระทบจากการเหนี่ยวนำทางปฏิบัติ

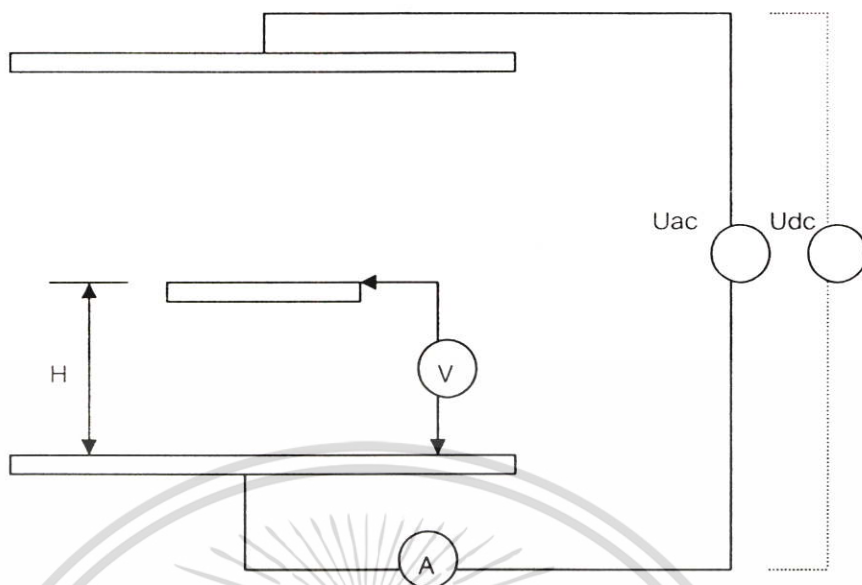
ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้า ซึ่งลักษณะการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นของระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดขึ้นในลักษณะของ Capacitive Charging Effect ในขณะที่ลักษณะการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะเกิดขึ้นในลักษณะที่เรียกว่า Object Charging ที่เกิดจากประจุไฟฟ้ารอบๆบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อวัตถุตัวนำได้รับสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ผลที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำก็คือจะเกิดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุตัวนำ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือค่าคาปาซิแตนซ์และค่าความต้านทานของวัตถุตัวนำเทียบกับพื้นดินที่ได้กล่าวไว้แล้ว ส่วนสนามไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าสถิต (Static Field) แรงดันไฟฟ้าไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ลักษณะของสนามไฟฟ้าแบบนี้จะไม่ทะลุผ่านวัตถุตัวนำ แต่จะทำการเหนี่ยวนำที่พื้นผิวภายนอกของวัตถุตัวนำซึ่งการเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดประจุเชิงผิว (Surface Charge) บนสะสมบนวัตถุตัวนำ

5.3.1 โมเดลที่ใช้ในการทดสอบ

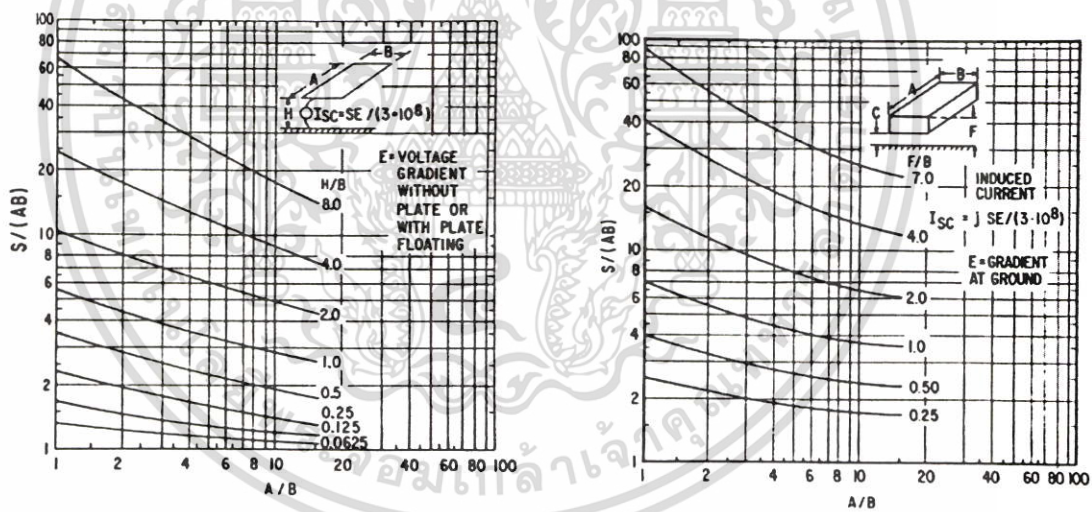
โมเดลที่ใช้ในการทดสอบทำมาจากแผ่นสแตนเลสมีขนาด 1x1 เมตรทำการจ่ายแรงดันสูงกระแสตรง และแรงดันสูงกระแสสลับเพื่อสร้างสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform Field) จากนั้นนำวัตถุตัวนำวางกันระหว่างสนามไฟฟ้าแล้วทำการวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างวัตถุตัวนำกับกราวด์ และกระแสไฟฟ้าระหว่างวัตถุตัวนำไหลลงสู่กราวด์ดังรูป 5.24 การทดลองนี้ จำลองเหตุการณ์โดยมีสมมติฐานคือ เมื่อวัตถุตัวนำอยู่ใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับเป็นผลทำให้เกิดผลกระทบในรูปแบบการเหนี่ยวนำที่แตกต่างกัน จากทฤษฎีที่ได้กล่าวถึง ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ บนวัตถุตัวนำสามารถคำนวณได้ โดยใช้ Model ของเพลท สี่เหลี่ยมขนาด 0.44 x 0.44 เมตร และ กล้องสี่เหลี่ยมแทนวัตถุตัวนำ ซึ่งสามารถหาพื้นที่สมมูลย์ (Equivalent Area) ได้ตามรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.47 ลักษณะโมเดลที่ใช้ในการทดสอบ

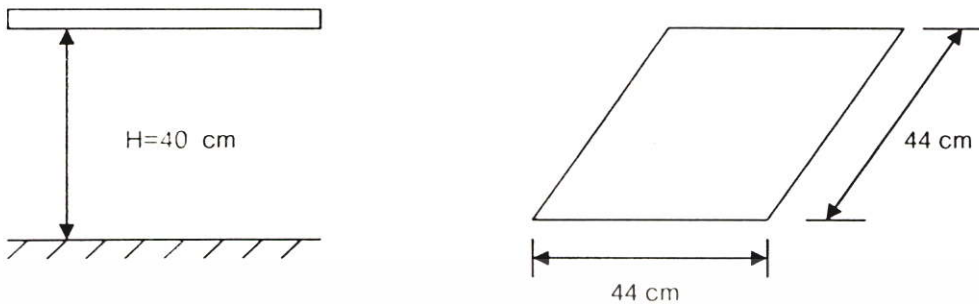


รูปที่ 5.48 โมเดลจำลองผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปแบบการเหนี่ยวนำ



รูปที่ 5.49 Shape factor ของวัสดุตัวนำที่ทำการทดสอบ

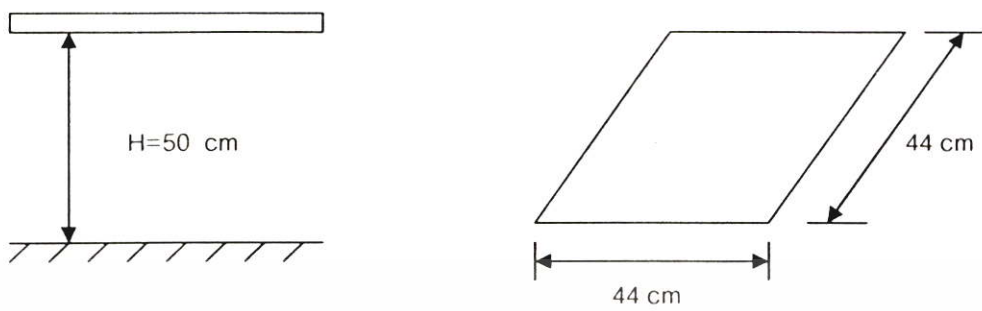
ตารางที่ 5.6 แสดงการทดสอบที่ระยะเพลทที่ระยะ 40 ซม.



สนามไฟฟ้ากระแสสลับ

E(kV/m)	V_{oc} (V)	V_{oc} (V)	I_{sc} (μA)	I (μA)	อิมพีแดนซ์ ($M\Omega$)
	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	
1	64.55	32	2.96	1.5	21.33
2	129.11	69	5.92	3.1	22.25
3	193.67	106	8.88	5	21.2
4	258.23	145	11.84	7	20.71
5	322.78	179	14.8	8	22.37
6	387.34	215	17.76	10	21.50
7	451.9	250	20.72	11.5	21.80
8	516.5	287	23.68	13	22.07
9	581.01	324	26.64	14.5	22.34
10	645.57	361	29.6	16	22.56
พื้นที่สมมูลย์(S) = 1.065 m ²					$\bar{X} = 21.81$

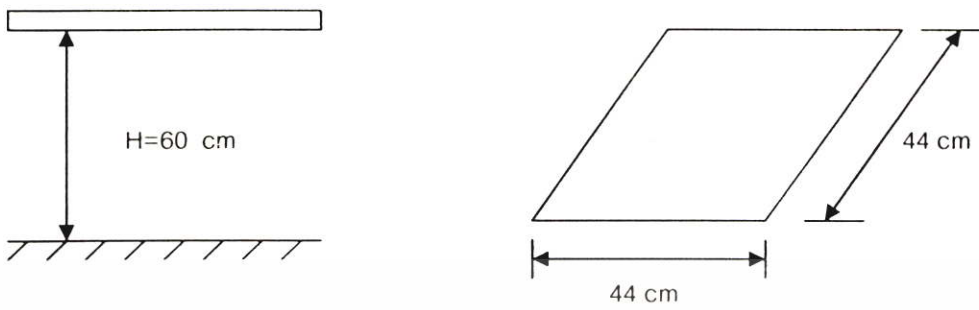
ตารางที่ 5.7 แสดงการทดสอบที่ระยะเพลทที่ระยะ 50 ซม.



สนามไฟฟ้ากระแสสลับ

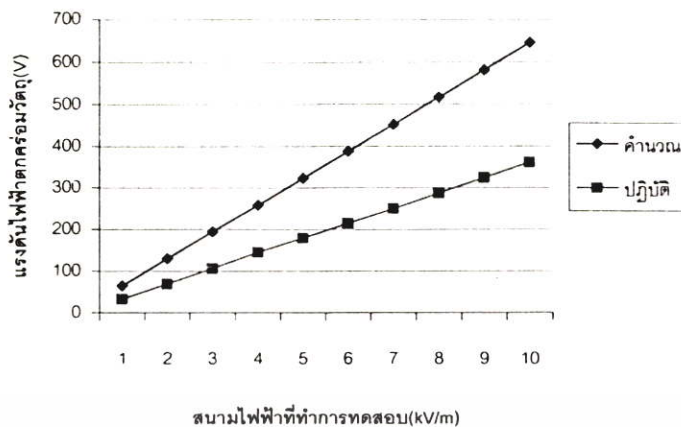
E(kV/m)	V_{oc} (V)	V_{oc} (V)	I_{sc} (μA)	I (μA)	อิมพีแดนซ์ (M Ω)
	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	
1	80.11	38	3.12	1.5	25.33
2	160.21	83	6.24	3.2	25.93
3	240.32	126	9.36	5	25.20
4	320.68	169	12.49	7	24.14
5	400.53	215	15.6	8.5	25.29
6	480.64	251	18.72	9.8	25.61
7	560.74	294	21.84	11	26.72
8	640.85	336	24.96	13	25.84
9	718.90	379	28.08	14.5	26.13
10	801.06	425	31.20	16	26.56
พื้นที่สมมูลย์(S) = 1.123 m ²					$\bar{X} = 25.675$

ตารางที่ 5.8 แสดงการทดสอบที่ระยะเพลทที่ระยะ 60 ซม.

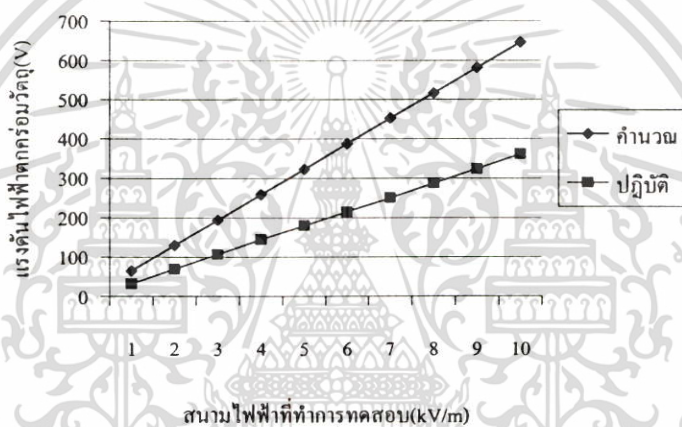


สนามไฟฟ้ากระแสสลับ

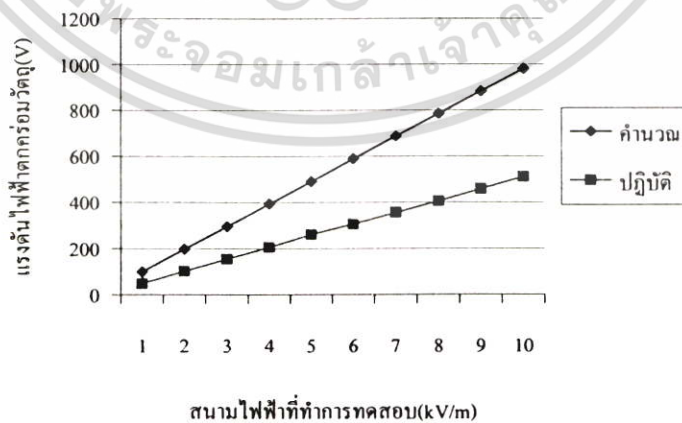
E(kV/m)	V_{oc} (V)	V_{oc} (V)	I_{sc} (μA)	I (μA)	อิมพีแดนซ์ ($M\Omega$)
	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	
1	98.02	49	3.23	1.6	30.62
2	196.04	101	6.46	3.2	21.56
3	294.07	153	9.69	5.2	29.42
4	393.31	205	12.96	7	29.28
5	490.12	260	16.15	8.5	30.58
6	588.14	304	19.38	10	30.40
7	686.17	355	22.61	11.8	30.08
8	784.19	404	25.84	13	31.08
9	882.21	457	29.07	15	30.46
10	980.24	510	32.3	17	30.00
พื้นที่สมมูลย์(S) = 1.162 m ²					$\bar{X} = 30.348$



รูปที่ 5.50 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเพลทที่ระยะ 40 cm

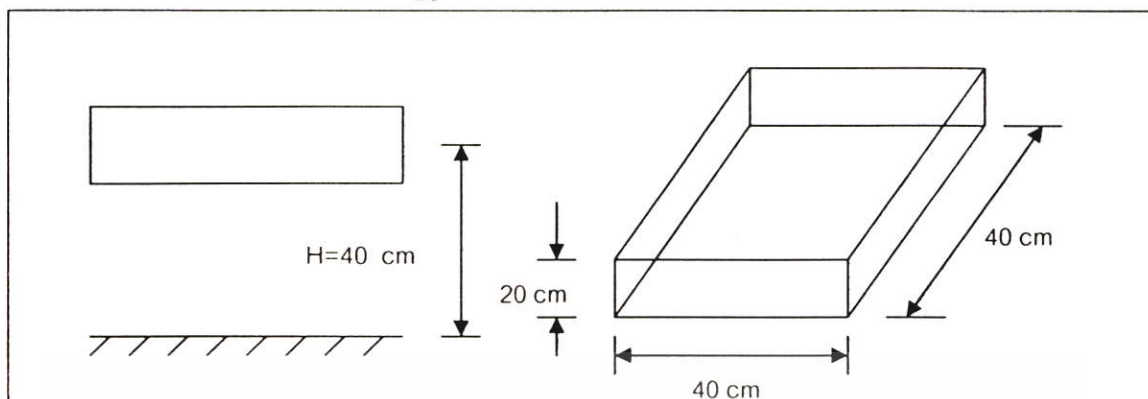


รูปที่ 5.51 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเพลทที่ระยะ 50 cm



รูปที่ 5.52 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมขดลวดเพลทที่ระยะ 60 cm

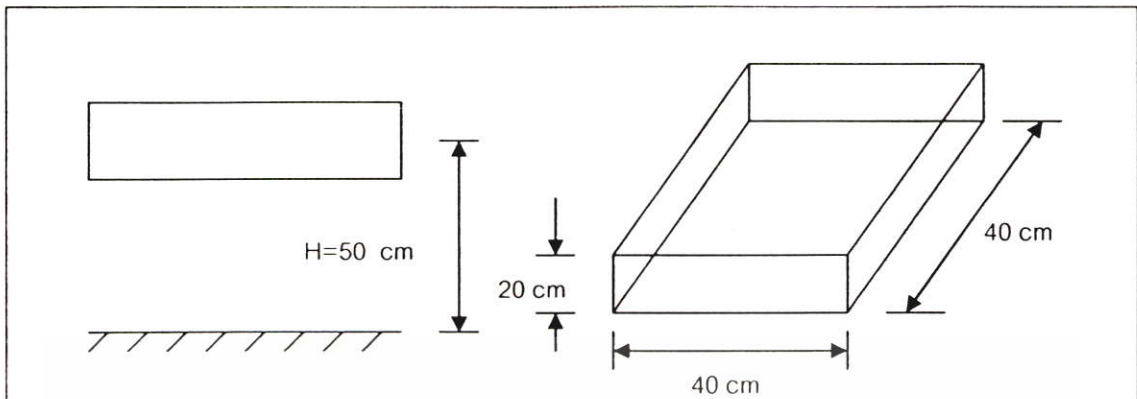
ตารางที่ 5.9 แสดงการทดสอบวัสดุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 40 ซม.



สนามไฟฟ้ากระแสลับ

E(kV/m)	V_{OC} (V)	V_{OC} (V)	I_{SC} (μA)	I (μA)	อิมพีแดนซ์ (M Ω)
	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	
1	143.79	49	4.4	1.3	37.69
2	281.60	97	8.8	2.7	35.92
3	431.37	144	13.2	4	36
4	575.17	191	17.6	5	38.2
5	718.96	238	22	6.5	36.61
6	862.75	285	26.4	8	35.625
7	1006.54	332	30.8	9	36.88
8	1150.34	376	35.2	10.5	35.08
9	1294.13	423	39.6	12	35.25
10	1437.92	470	44	13.5	34.8
พื้นที่สมมูลย์(S) = 1.583 m ²					$\bar{X} = 32.68$

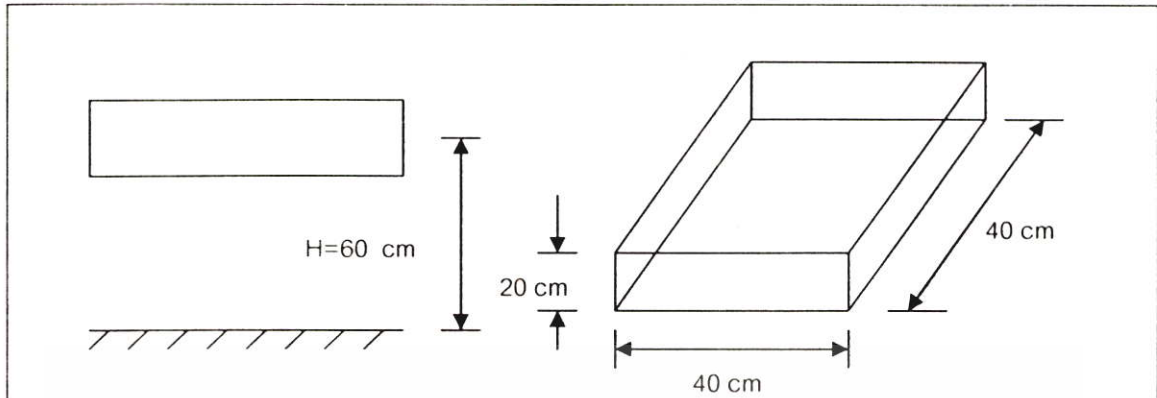
ตารางที่ 5.10 แสดงการทดสอบวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 50 ซม.



สนามไฟฟ้ากระแสสลับ

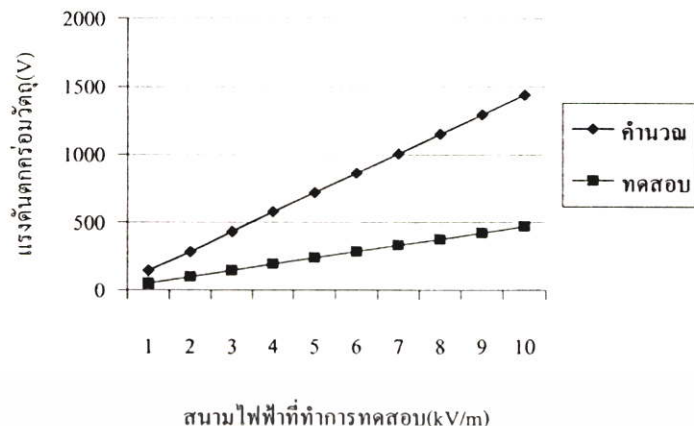
E(kV/m)	V_{oc} (V)	V_{oc} (V)	I_{sc} (μA)	I (μA)	อิมพีแดนซ์ ($M\Omega$)
	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ	ปฏิบัติ	
1	188.60	59	4.9	1.4	42.14
2	401.80	119	9.8	2.8	42.50
3	602.7	161	14.7	4.0	40.25
4	803.6	203	19.6	4.8	42.29
5	1004	274	24.5	7.0	39.14
6	1205	327	29.4	8.0	40.87
7	1406.3	381	34.3	9.0	42.33
8	1607.2	433	39.2	11.0	39.36
9	1808.1	489	44.1	12.0	40.75
10	2009	545	49	13.5	40.37
พื้นที่สมมูลย์(S) = 1.76 m^2					$\bar{X} = 41.00$

ตารางที่ 5.11 แสดงการทดสอบวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 60 ซม

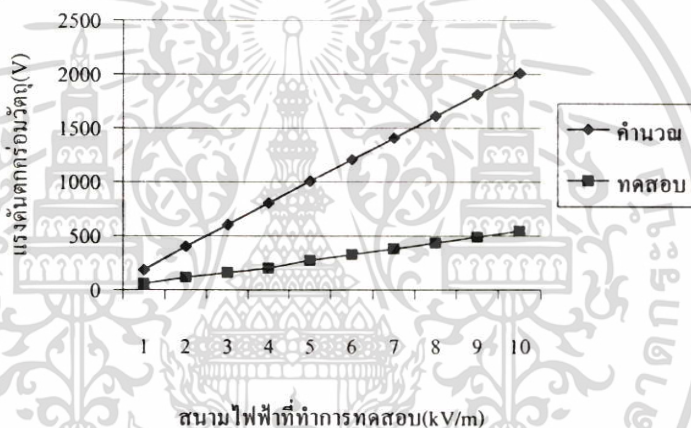


สนามไฟฟ้ากระแสลับ

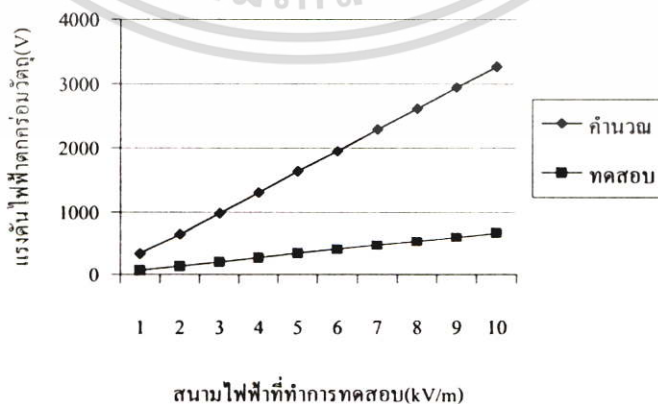
E(kV/m)	V_{oc} (V)	V_{oc} (V)	I_{sc} (μA)	I (μA)	อิมพีแดนซ์ (M Ω)
	คำนวณ	ทดสอบ	คำนวณ	ทดสอบ	
1	326.67	66	6.67	1.4	47.14
2	653.35	129	13.34	2.8	46.07
3	980.03	197	20.01	4.0	49.25
4	1306.70	266	26.68	5.1	53.20
5	1633.40	336	33.35	6.5	51.69
6	1948.00	401	40.02	8.1	50.12
7	2286.73	468	46.69	9.5	49.26
8	2613.41	533	53.36	11.0	48.45
9	2940.09	603	60.03	13.0	46.38
10	3266.70	675	66.70	14.0	48.21
พื้นที่สมมูลย์=2.4 m ²					$\bar{X} = 48.977$



รูปที่ 5.53 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุสี่เหลี่ยมที่ระยะ 40 cm

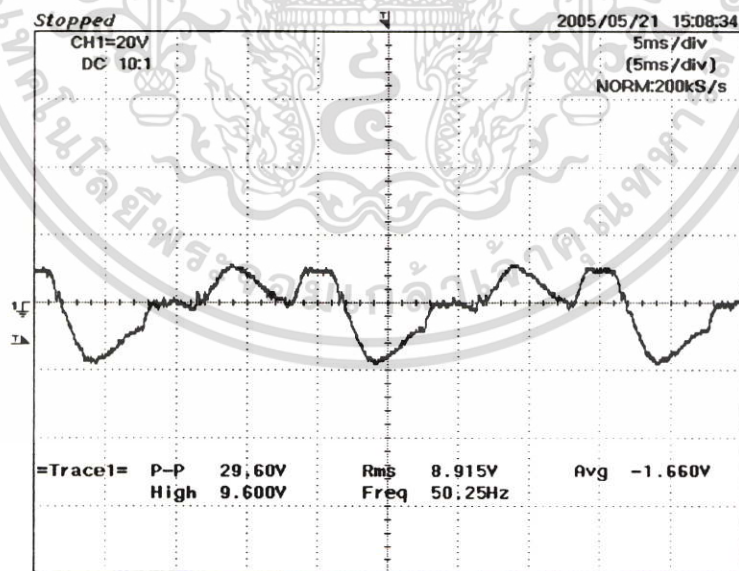
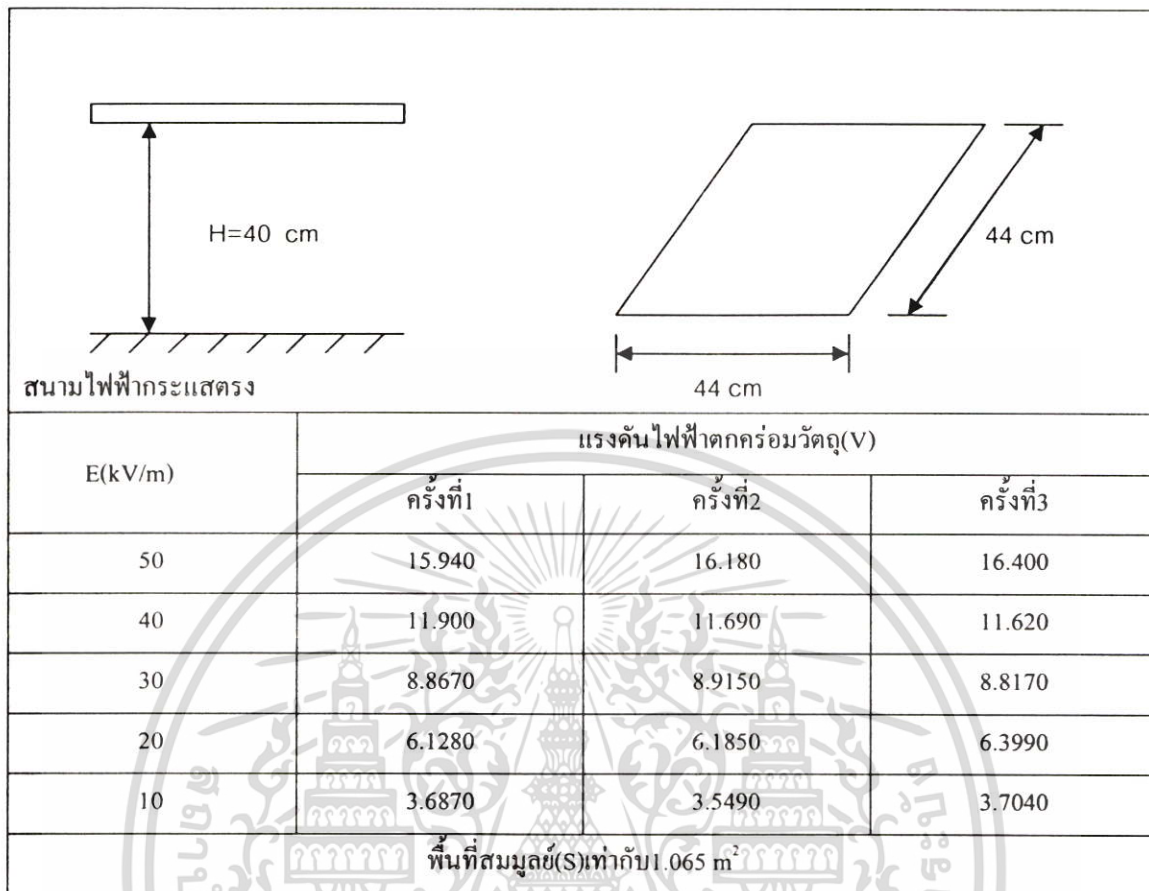


รูปที่ 5.54 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุสี่เหลี่ยมที่ระยะ 50 cm



รูปที่ 5.55 ผลของการวัดและคำนวณศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุสี่เหลี่ยมที่ระยะ 60 cm

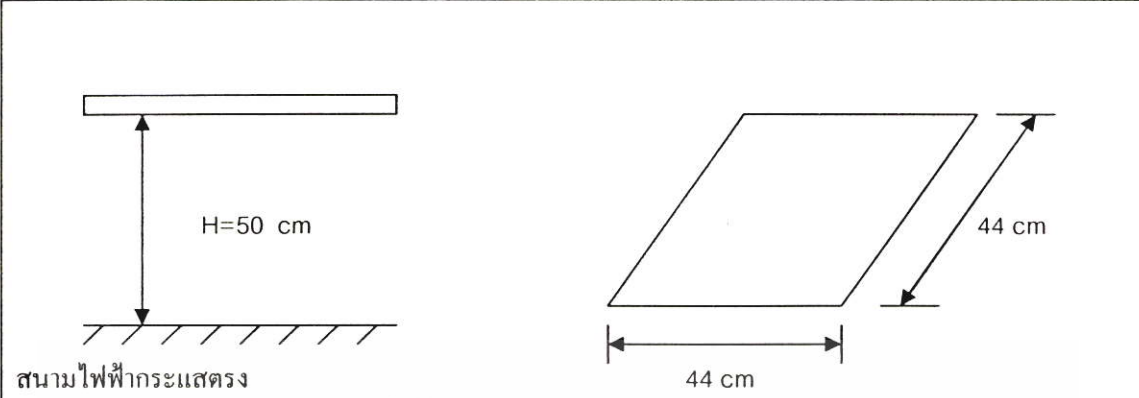
ตารางที่ 5.12 แสดงการทดสอบเพลทที่ระยะ 40 ซม



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
Smoothing : OFF CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : AUTO
BW : FULL CH2 : 0.0V Zoom : 10K Type : EDGE CH1
Delay : 0.0ns
Hold Off : MINIMUM

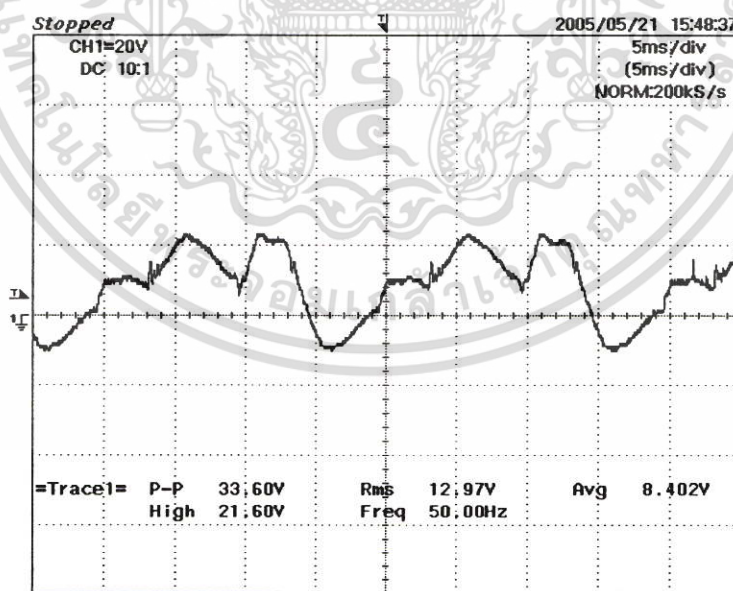
รูปที่ 5.56 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างแผ่นเพลทกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 40 ซม

ตารางที่ 5.13 แสดงการทดสอบเพลทที่ระยะ 50 ซม.



E(kV/m)	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุ(V)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
50	40.450	42.000	42.220
40	21.780	27.330	28.050
30	10.280	12.970	12.840
20	7.0200	7.0880	6.7470
10	4.1440	4.0390	4.1210

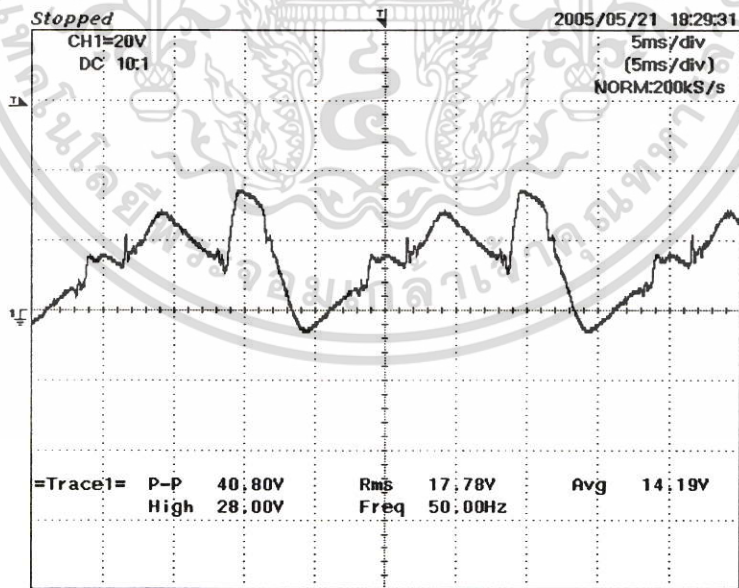
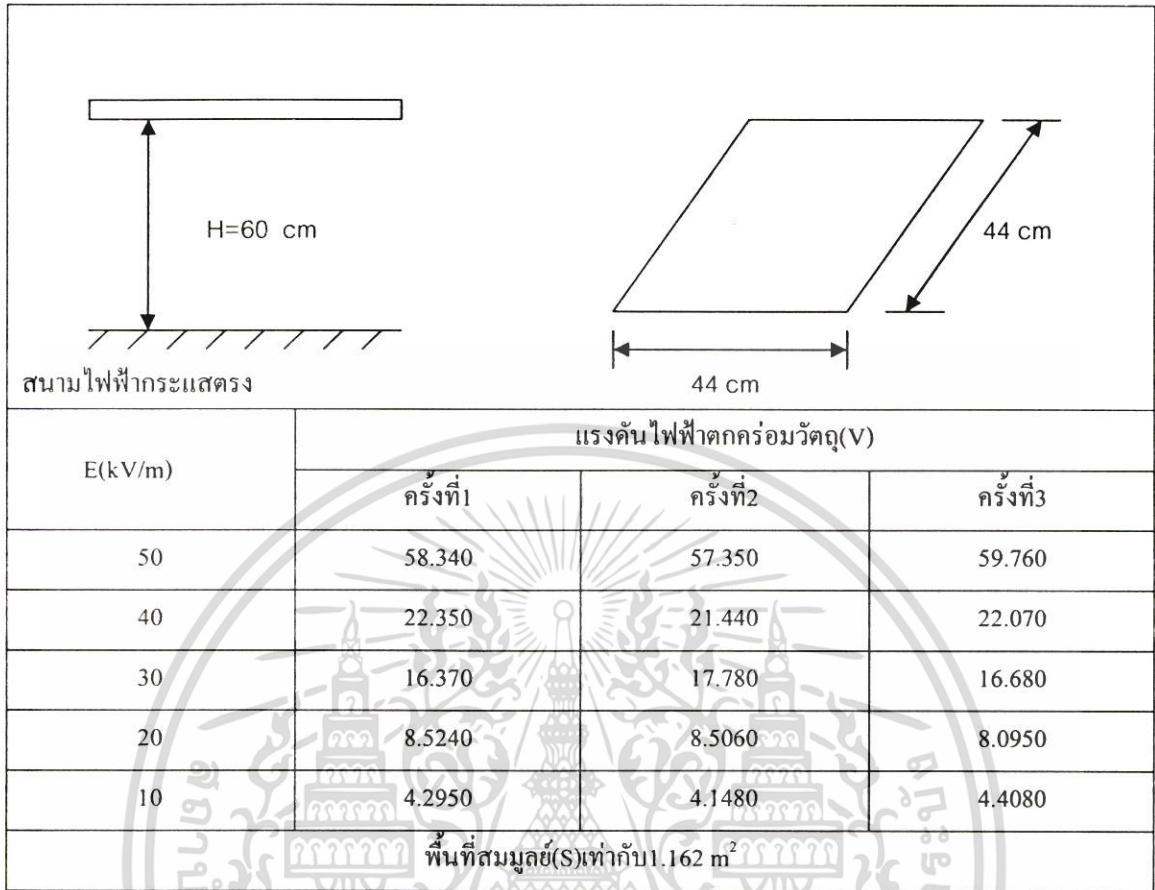
พื้นที่สมมูลย์(S)เท่ากับ 1.123 m^2



=Filter= Smoothing : OFF BW : FULL
=Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0.0V
=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
=Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 5.57 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างแผ่นเพลทกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 50 ซม

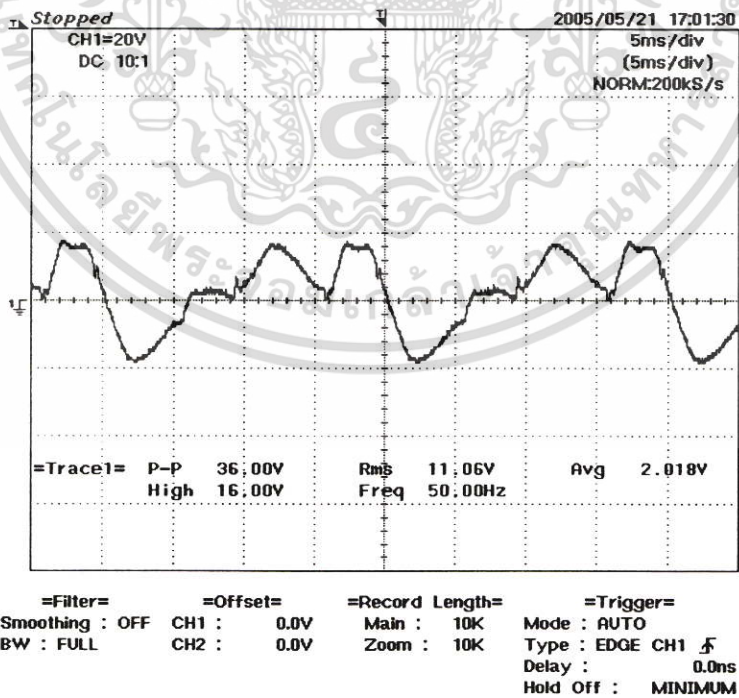
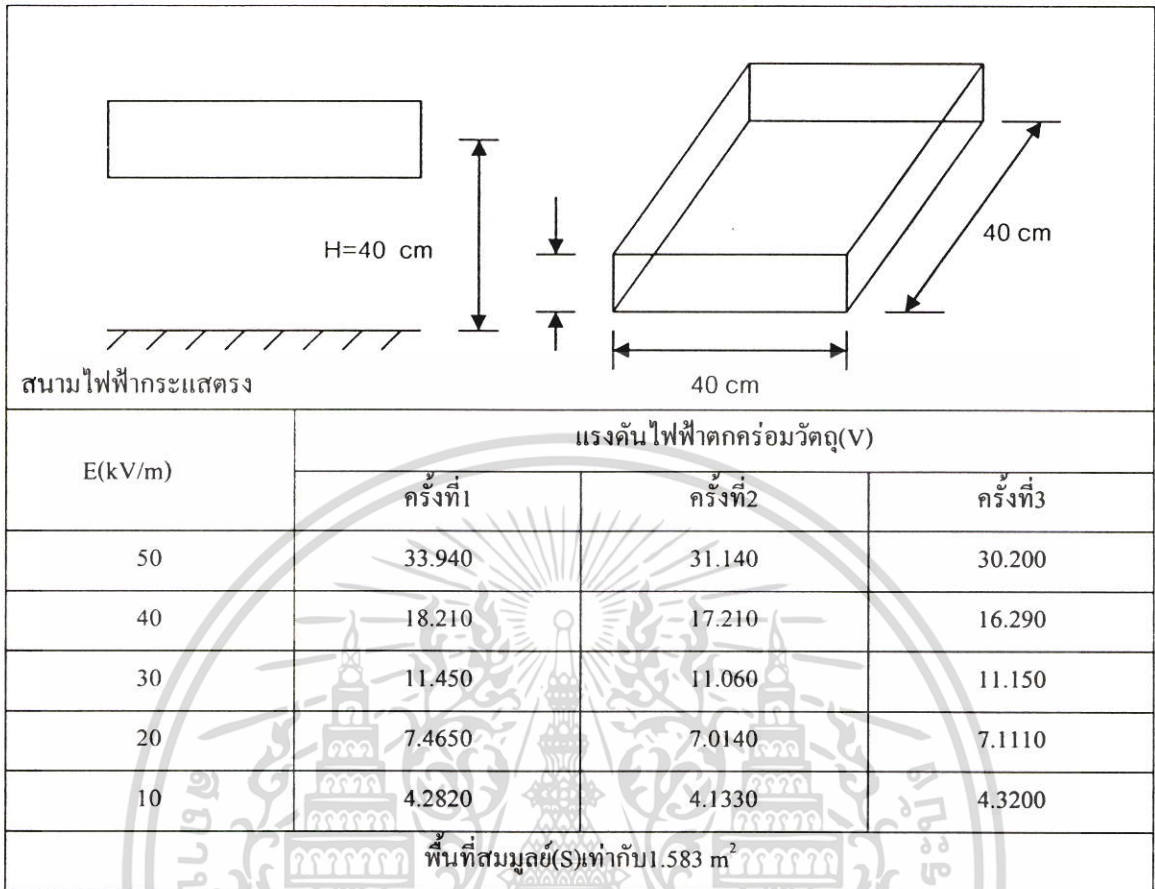
ตารางที่ 5.14 แสดงการทดสอบเพลทที่ระยะ 60 ซม



=Filter= Smoothing : OFF BW : FULL
 =Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0.0V
 =Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
 =Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

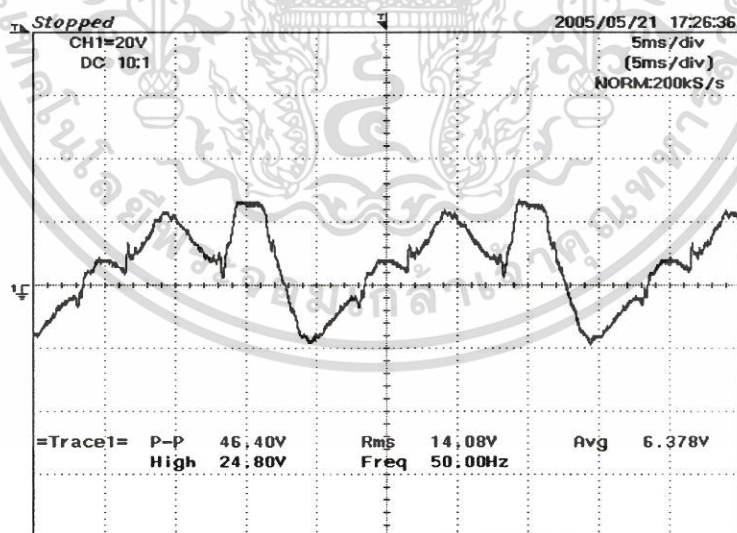
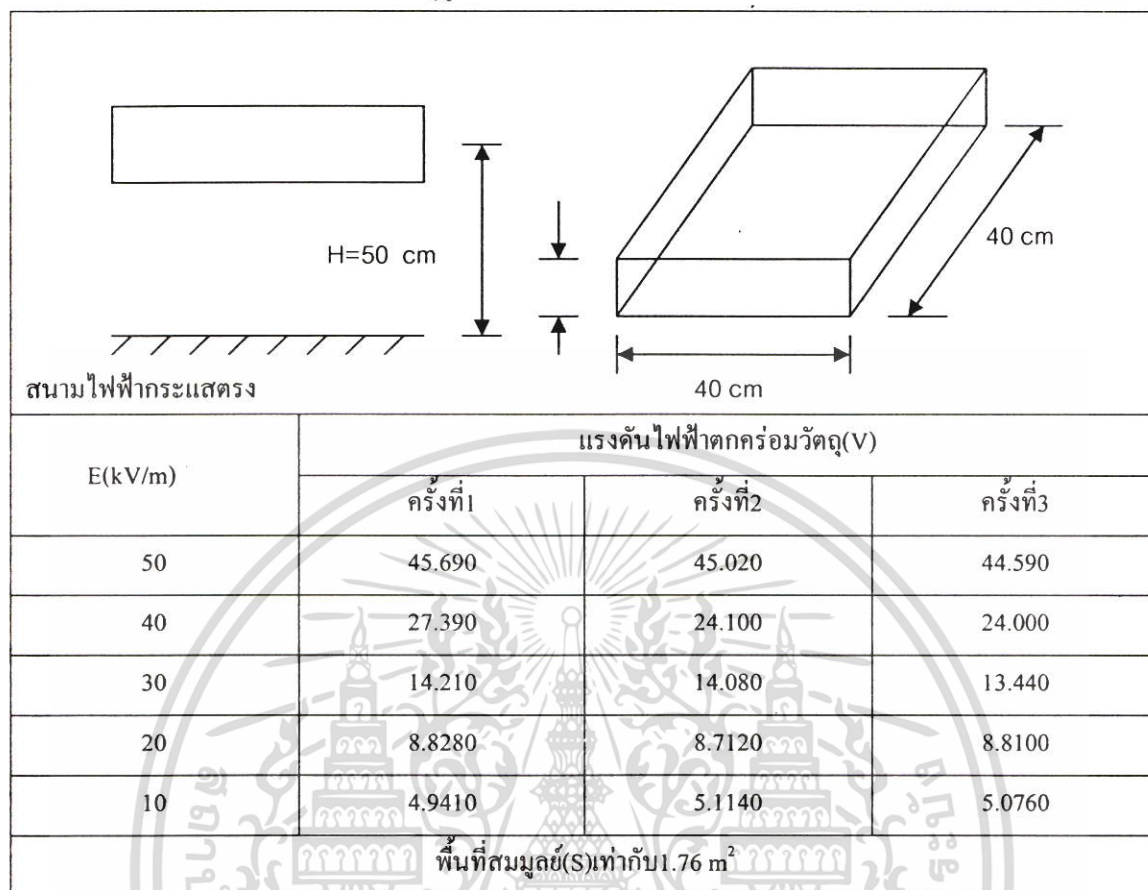
รูปที่ 5.58 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างแผ่นเพลทกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 60 ซม

ตารางที่ 5.15 แสดงการทดสอบวัสดุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 40 ซม.



รูปที่ 5.59 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างวัสดุสี่เหลี่ยมกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 40 ซม

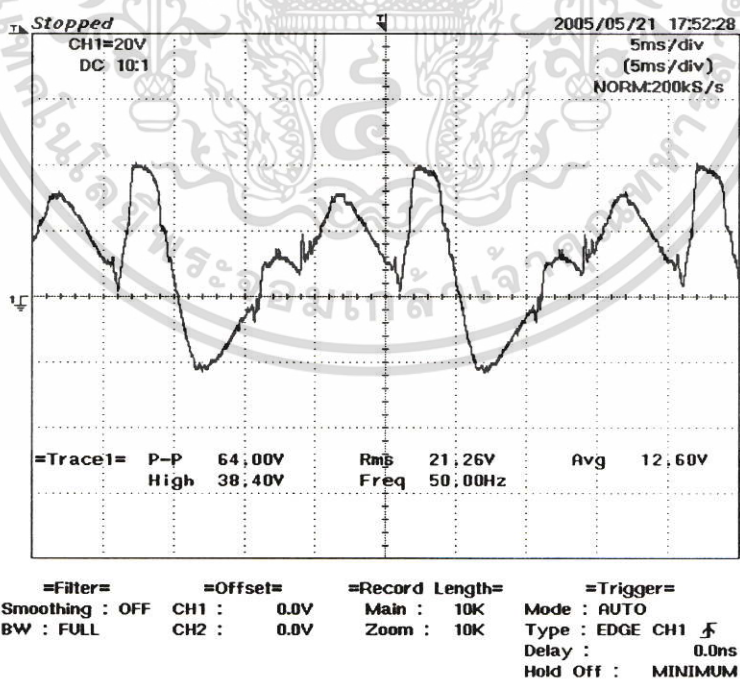
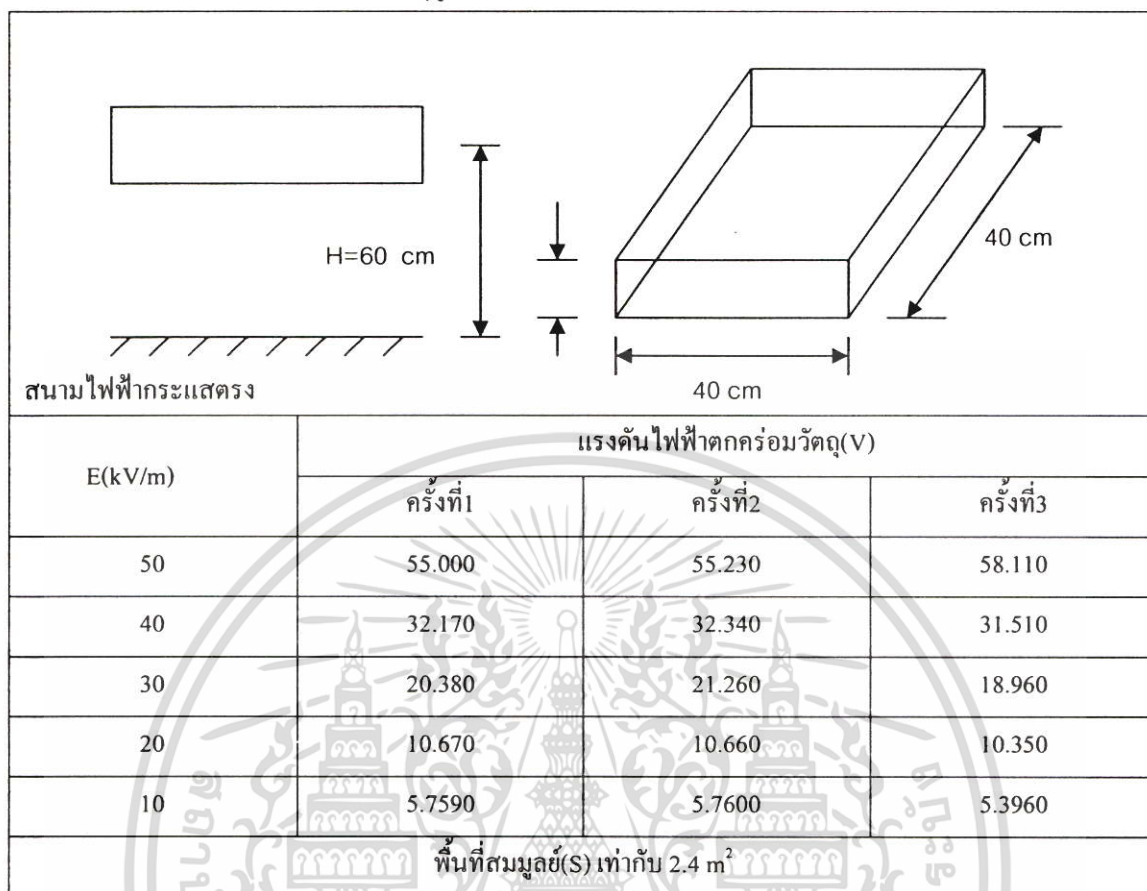
ตารางที่ 5.16 แสดงการทดสอบวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 50 ซม



=Filter= Smoothing : OFF BW : FULL
=Offset= CH1 : 0.0V CH2 : 0.0V
=Record Length= Main : 10K Zoom : 10K
=Trigger= Mode : AUTO Type : EDGE CH1 Delay : 0.0ns Hold Off : MINIMUM

รูปที่ 5.60 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างวัตถุสี่เหลี่ยมกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 50 ซม

ตารางที่ 5.17 แสดงการทดสอบวัตถุทรงสี่เหลี่ยมที่ระยะ 60 ซม



รูปที่ 5.61 ตัวอย่างความต่างศักย์ระหว่างวัตถุสี่เหลี่ยมกับกราวด์ที่สนามไฟฟ้า 30 kV/m ที่ระยะ 60cm

จากผลการทดสอบการหาค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนวัตถุตัวนำภายใต้สนามไฟฟ้ากระแสสลับพบว่าจากสมการที่ 5.4 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนวัตถุแปรผันตรงกับค่าสนามไฟฟ้าและค่าพื้นที่สมมุติของวัตถุตัวนำ ในการทดสอบวัตถุที่เป็นเพลท และรูปทรงสี่เหลี่ยม เมื่อสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ในการทดสอบที่ระยะ 40 ,50,60 ซม.คือการเพิ่มความสูงให้กับวัตถุตัวนำ วัตถุตัวนำได้รับก็จะได้รับศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับวัตถุตัวนำที่อยู่ภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงผลจากการเพิ่มความสูงให้กับวัตถุตัวนำก็คือการเพิ่มพื้นที่สมมุติให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เป็นผลทำให้ค่าคาปาซิแตนซ์ระหว่างวัตถุตัวนำมีค่าน้อยลง (อิมพีแดนซ์มีค่าสูงขึ้น $X_c = 1 / 2\pi fc$) ส่งผลทำให้ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุสูงขึ้น อันตรายที่จะเกิดกับมนุษย์เมื่อสัมผัสกับวัตถุตัวนำอาจได้รับผล Spark discharge เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างมนุษย์กับวัตถุตัวนำ

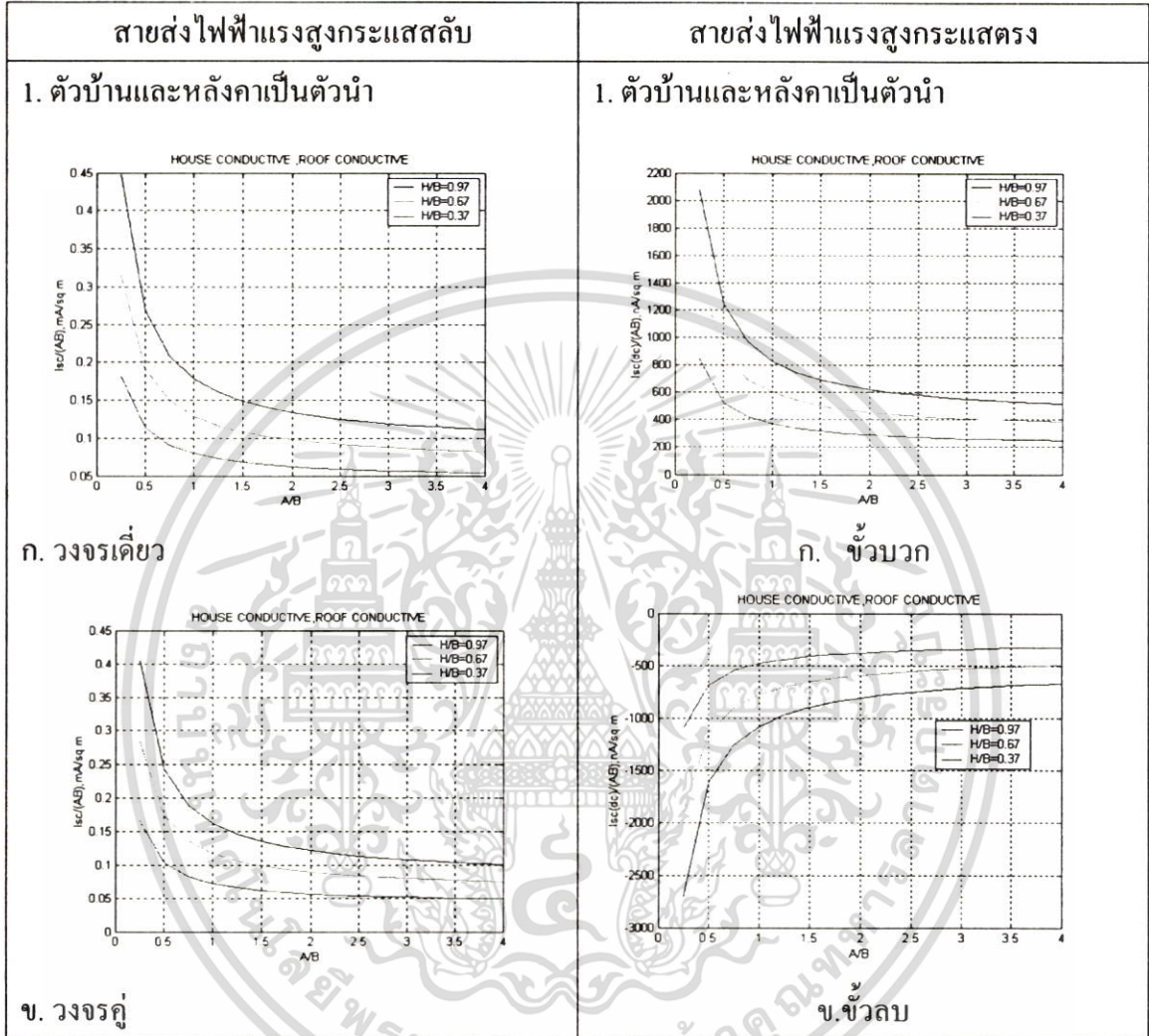
ในส่วนของสนามไฟฟ้ากระแสตรงศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมวัตถุกับกราวด์ที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยมาก ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวัตถุที่เกิดจากสนามไฟฟ้ากระแสตรงแปรผันตาม ความหนาแน่นของกระแส (J) และพื้นที่สมมุติของตัวนำ แม้ว่าการทดสอบนี้ไม่สามารถวัดความหนาแน่นของกระแสที่เกิดขึ้นได้ระหว่างเพลท แต่สามารถที่จะชี้แนะได้ว่า เมื่อพื้นที่สมมุติเพิ่มขึ้น(โดยการเพิ่มความห่างระหว่างวัตถุกับกราวด์เป็น 40, 50 และ 60 cm แสดงในภาคผนวก จ , ฉ) ผลของศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัตถุกับกราวด์มีค่าเพิ่มขึ้นดูผลได้จากการทดสอบ ซึ่งเป็นผลมาจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(มีค่าน้อยมาก) ควบคู่กับความต้านทานระหว่างวัตถุกับกราวด์ ซึ่งในการทดสอบใช้อากาศเป็นฉนวนระหว่างวัตถุตัวนำกับกราวด์ซึ่งมีค่าความต้านทานสูงมาก ความหนาแน่นของกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าสูงขึ้น ($J = \rho\mu E$) ค่าความหนาแน่นของกระแสในสนามไฟฟ้ากระแสตรงขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่น ความชื้น อุณหภูมิ และการเกิดโคโรนาซึ่งทำให้เกิดประจุค้าง(Space charge) อันตรายที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์เมื่อสัมผัสกับวัตถุตัวนำดังกล่าวอาจได้รับผลในรูป Spark discharge เนื่องจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างมนุษย์กับวัตถุตัวนำถ้าศักย์ไฟฟ้าสูงเพียงพอที่จะทำให้เกิดการ discharge ประจุได้ลงกราวด์ได้

5.4 บทสรุป

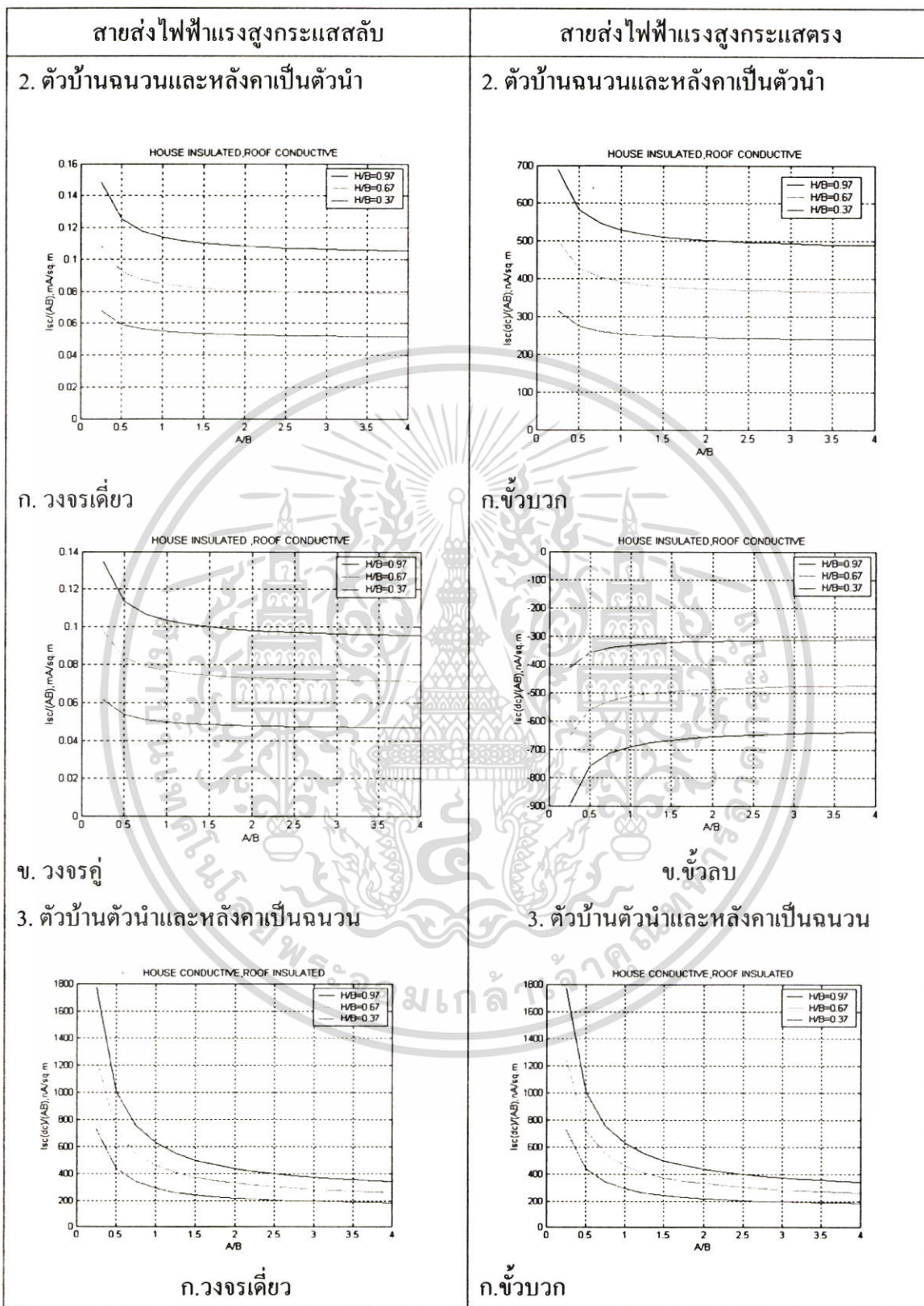
จากตัวอย่างที่ 1-4 แสดงผลการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นสูงสุด (Maximum case study) ที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ซึ่งจากตัวอย่างได้วิเคราะห์บ้านพักอาศัยและรถบรรทุกที่อยู่ภายใต้สายส่งไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

1. บ้านพักอาศัย

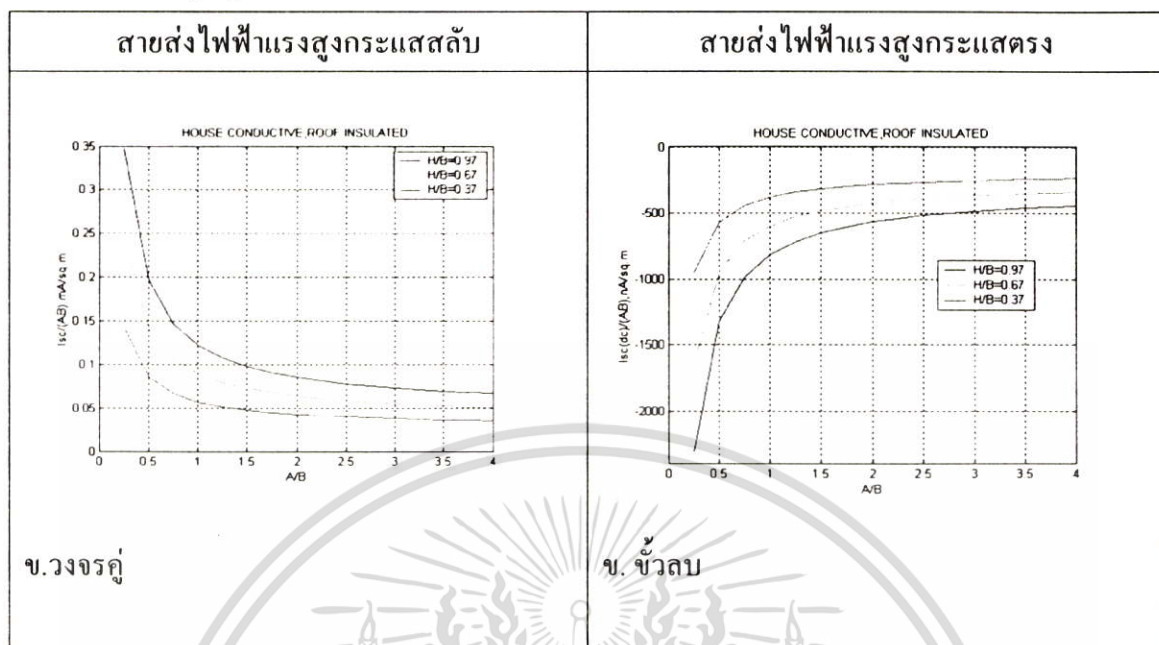
ตารางที่ 5.18 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบเมื่อบ้านพักอาศัยอยู่ภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง



ตารางที่ 5.18 (ต่อ)



ตารางที่ 5.18 (ต่อ)



มีความชัดเจนหลังจากการวิเคราะห์และเปรียบเทียบว่าแนวโน้มค่ากระแสชอตเซอร์กิตที่ไหลผ่านวัตถุลงกราวด์ ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมีค่าต่ำกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

2. รอบรรทุก

ตารางที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบเมื่อรอบรรทุกอยู่ภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (มีพื้นที่สมมูลย์(S)=123.12 m²)

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500kV	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV
<p>1. กระแสชอตเซอร์กิต (I_{sc})</p> <p>2.27 mA (วงจรเดี่ยว)</p> <p>2.06 mA (วงจรคู่)</p>	<p>1. กระแสชอตเซอร์กิต ($I_{sc}(DC)$)</p> <p>10.542 uA (ขั้วบวก)</p> <p>-13.738 uA (ขั้วลบ)</p>
<p>ค่าคาปาซิแตนซ์ เท่ากับ 1000 pF</p>	<p>ค่าคาปาซิแตนซ์ เท่ากับ 1000 pF</p> <p>ค่าความต้านทานของขางเท่ากับ 1 MΩ</p>

ตารางที่ 5.19 (ต่อ)

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500kV	สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV
2. แรงดันไฟฟ้าของรถบรรทุกเทียบกับกราวด์ 7225 V (วงจรเดี่ยว) 6557 V (วงจรคู่)	2. แรงดันไฟฟ้าของรถบรรทุกเทียบกับกราวด์ 10.542 V (ขั้วบวก) -13.738 V (ขั้วลบ)
3. พลังงานสะสมบนรถบรรทุก 52.20 mJ (วงจรเดี่ยว) 42.99 mJ (วงจรคู่)	3. พลังงานสะสมบนรถบรรทุก 55.56 mJ (ขั้วบวก) 94.36 mJ (ขั้วลบ)

สำหรับรถบรรทุก เมื่ออยู่ภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับมีแนวโน้มได้รับผลกระทบเนื่องจาก กระแสชอตเซอร์กิตที่ไหลผ่านวัตถุลงกราวด์ แรงดันไฟฟ้าระหว่างรถบรรทุกเทียบกับกราวด์ และ พลังงานสะสม มากกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

อันตรายเกิดขึ้นกับมนุษย์หากมีส่วนของร่างกายเข้าไปสัมผัสกับวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ ถ้าได้รับแรงดันไฟฟ้าที่เพียงพออาจทำให้เกิดกระแสช็อก (Shock current) ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับความต้านทานที่จุดสัมผัส ถ้าความต้านทานที่จุดสัมผัสต่ำพอจนสามารถทำให้กระแสไหลผ่านร่างกาย[3],[4] โดยในส่วนของกระแสสลับระดับที่ทำให้เกิดความรู้สึกหรือเกิดปฏิกิริยาเบื้องต้น เช่น อาการสะดุ้งตกใจ เกิดปฏิกิริยาในกล้ามเนื้อโดยไม่ตั้งใจ ที่ 50Hz และ 60 Hz สำหรับผู้ชายประมาณ 1.1 mA ผู้หญิงประมาณ 0.7 mA ส่วนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ผู้ชายประมาณ 5.2mA ผู้หญิงประมาณ 3.5 mA

บทที่ 6

การลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

6.1 กล่าวนำ

การลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงวิธีการหนึ่ง ก็คือการลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระจายออกมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงลง ซึ่งความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนี้จะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ลักษณะโครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น จากปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าวจะเห็นว่าค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของสายส่งจะขึ้นอยู่กับภาระทางโหลดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงซึ่งยากต่อการควบคุม ทำให้การลดความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กโดยทั่วไปจะพิจารณาไปที่การออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนั้นสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงก็มีผลทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงด้วย

6.2 การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

6.2.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสลับ

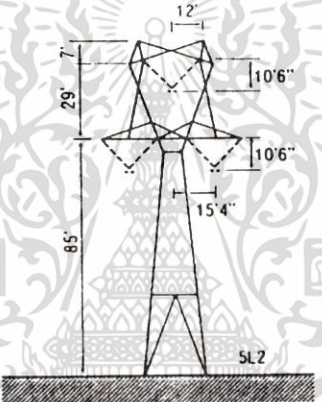
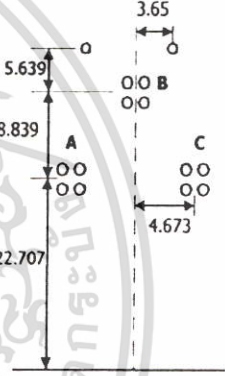
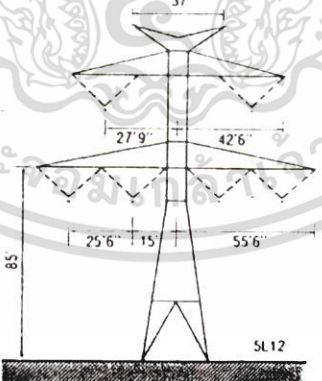
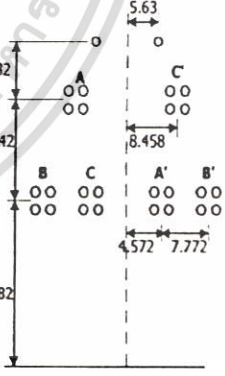
สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระจายออกมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะโครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เช่น ลักษณะของการจัดวางตัวนำ (line configuration) ความสูงของสายส่ง (line height) การจัดเรียงลำดับของเฟส (phase sequences) ขนาดของสายไฟฟ้า (conductor dimension) ระยะห่างระหว่างเฟส (phase spacing) และสายโอเวอร์เฮดกราวด์ (overhead ground wire) เป็นต้น ซึ่งการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อสิ่งต่างๆ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงน้อยที่สุดนั้นจำเป็นต้องพิจารณาเลือกโครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่เหมาะสม ด้วยการพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง[2] ดังนี้

6.2.1.1 ลักษณะของการจัดวางตัวนำ (Line Configuration)

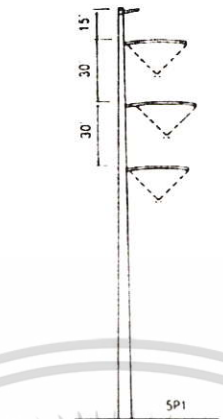
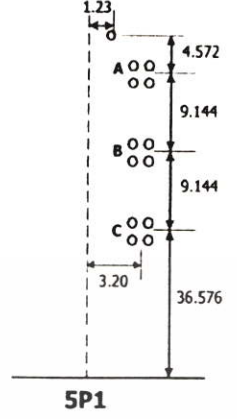
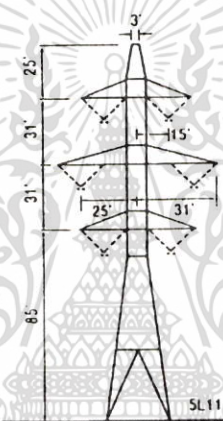
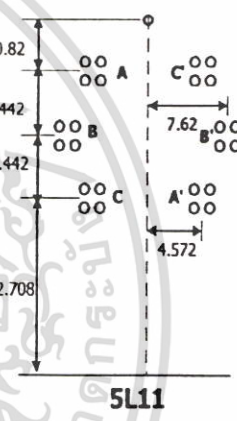
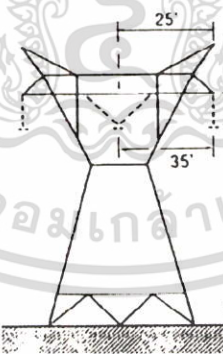
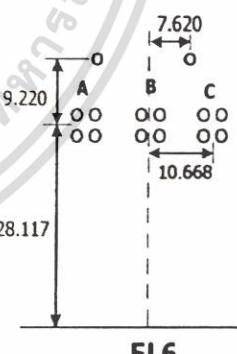
ลักษณะของการจัดวางตัวนำไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ การจัดวางตัวนำแบบสามเหลี่ยม (delta configuration) การจัดวางตัวนำแบบแนวนอน (flat configuration) และการจัดวางตัวนำแบบแนวตั้ง (vertical configuration)

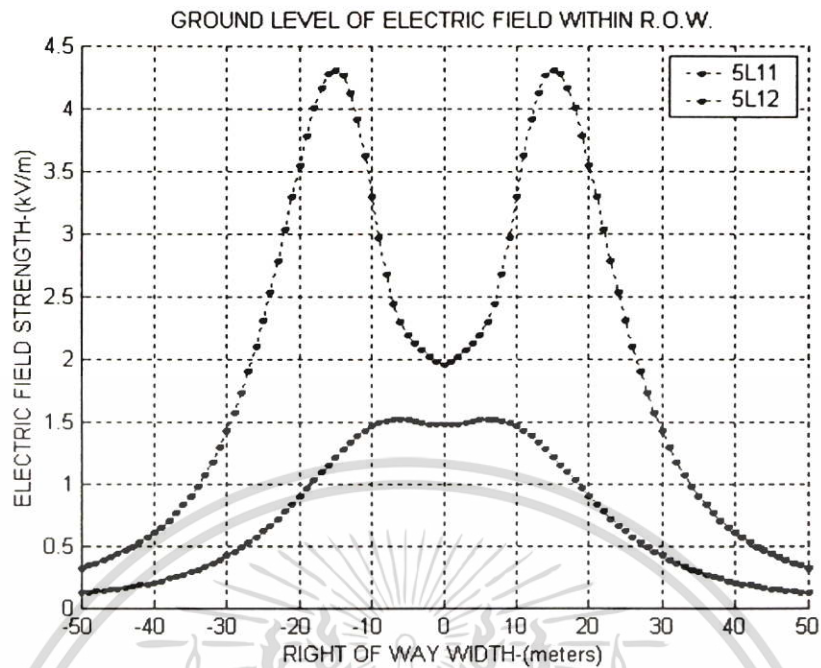
ซึ่งลักษณะการจัดวางตัวนำทั้ง 3 รูปแบบจะส่งผลให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระจายออกมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป เสาไฟฟ้าของสายส่งในระบบแรงดัน 500 KV ที่ใช้งานอยู่ทั่วไปและมีลักษณะของการจัดวางตัวนำในรูปแบบต่าง ๆ การวิเคราะห์ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากเสาไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ จะเป็นข้อมูลอย่างหนึ่งเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบของเสาไฟฟ้าในการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นไปตามความต้องการของผู้ออกแบบ ในตารางที่ 6.1 เป็นตัวอย่างลักษณะการจัดวางตัวนำของเสาไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 6.1 รูปแบบของการจัดวางตัวนำและเฟสของเสาไฟฟ้า[2]

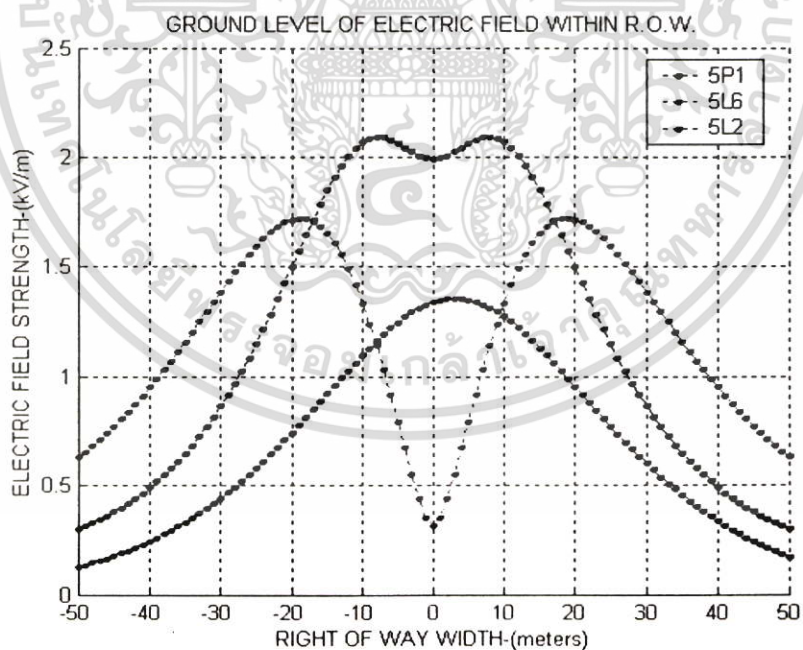
รูปแบบการจัดวางตัวนำ	ลักษณะของเสาไฟฟ้า 500 kV	ตำแหน่งการวางตัวนำ(เมตร)
<p>1. จัดวางตัวนำแบบสามเหลี่ยม (1 วงจร)</p>		
<p>2. จัดวางตัวนำแบบสามเหลี่ยม (2 วงจร)</p> <p>A A'</p> <p>○ ○</p> <p>B B' C C'</p> <p>○ ○ ○ ○</p>		

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

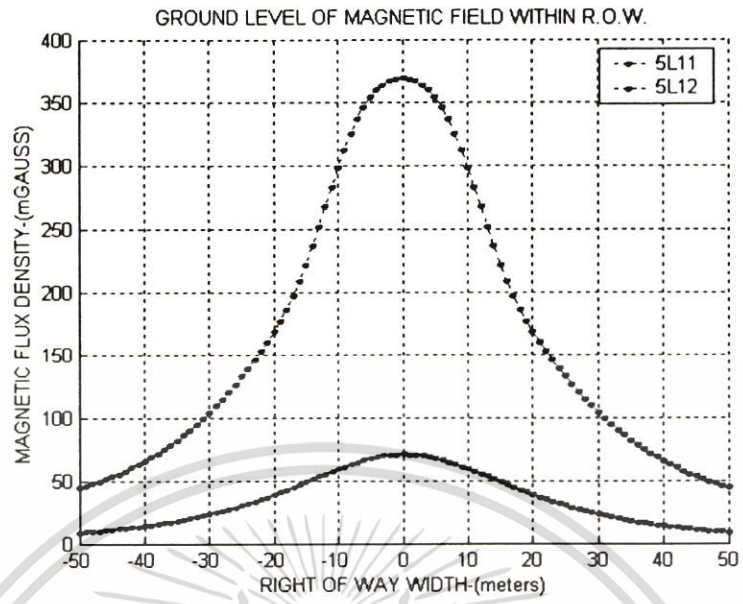
รูปแบบการจัดวางตัวนำ	ลักษณะของเสาไฟฟ้า 500 kV	ตำแหน่งการวางตัวนำ(เมตร)
<p>3. จัดวางตัวนำแบบแนวตั้ง</p> <p>(1 วงจร)</p> <p><input type="radio"/> A</p> <p><input type="radio"/> B</p> <p><input type="radio"/> C</p>		
<p>4. จัดวางตัวนำแบบแนวตั้ง</p> <p>(2 วงจร)</p> <p><input type="radio"/> A <input type="radio"/> C'</p> <p><input type="radio"/> B <input type="radio"/> B'</p> <p><input type="radio"/> C <input type="radio"/> A'</p>		
<p>5. การจัดวางตัวนำแบบแนวนอน</p> <p><input type="radio"/> A <input type="radio"/> B <input type="radio"/> C</p>		



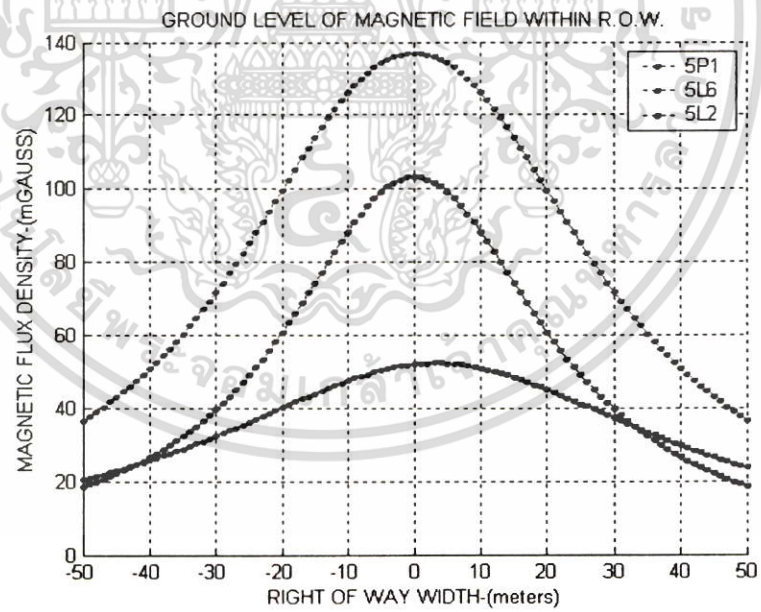
รูปที่ 6.1 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่



รูปที่ 6.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยว



รูปที่ 6.3 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่

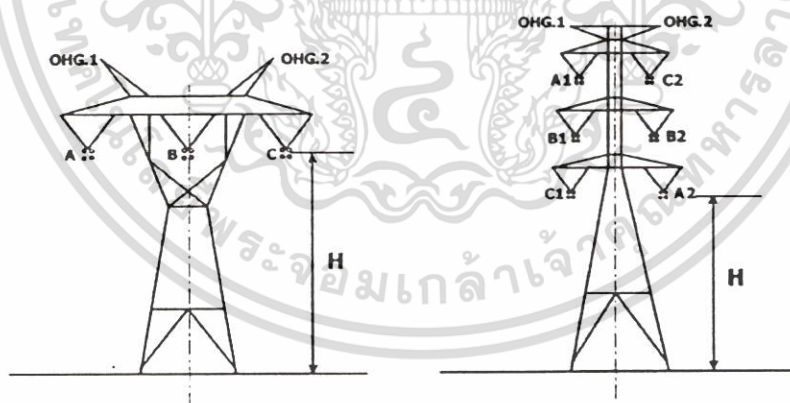


รูปที่ 6.4 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยว

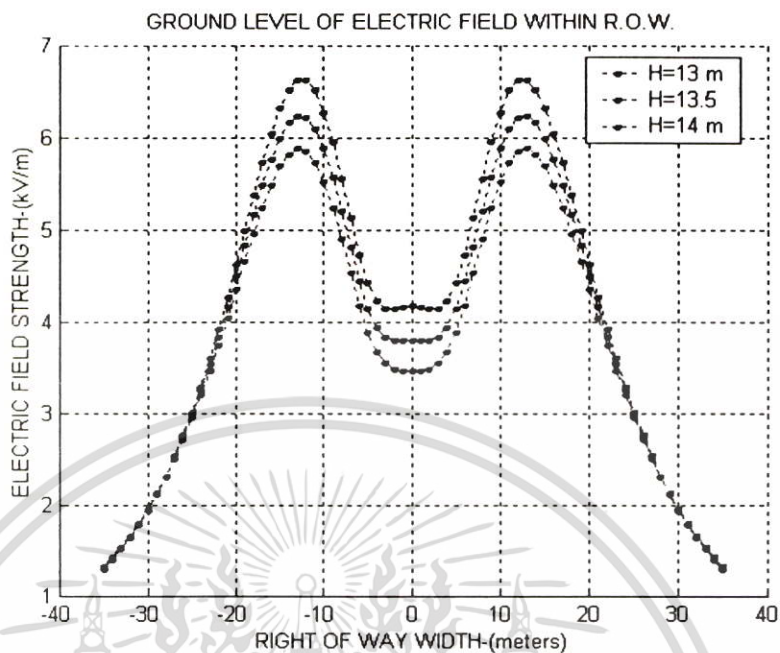
รูปที่ 6.1-6.4 เป็นผลจากการวิเคราะห์ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของการจัดวางตัวนำในรูปแบบต่าง ๆ ของสายส่งระบบแรงดันไฟฟ้า 500 KV ตามตารางที่ 6.1 ในการวิเคราะห์ได้กำหนดให้สายไฟฟ้าเป็นแบบควบจำนวน 4 เส้น ขนาด 795 MCM ACSR/GA(CONDOR) และมีค่าของภาระทางโหลดสูงสุดเท่ากับ 3.15 กิโลแอมป์ ต่อเฟส โดยมีระยะห่างของตัวนำและรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสตามตารางที่ 6.1

6.2.1.2 ความสูงของสายส่ง (Line Height)

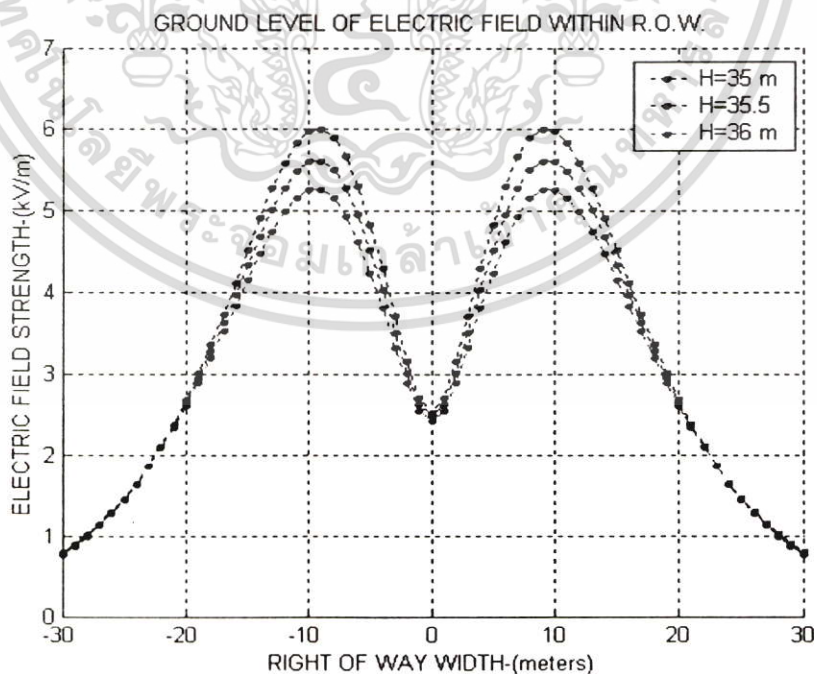
การกำหนดความสูงให้กับสายส่งโดยทั่วไปจะพิจารณาตามลักษณะของพื้นที่ที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดผ่าน ซึ่งในบางครั้งอาจจะมีผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ทำให้จำเป็นต้องเพิ่มความสูงให้กับเสาไฟฟ้าเพื่อให้สายส่งมีความสูงเพิ่มขึ้น การเพิ่มความสูงให้กับสายส่งเปรียบเสมือนกับการเพิ่มระยะห่างระหว่างสิ่งที่ได้รับผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกับแหล่งจ่ายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ในรูปที่ 6.5 เป็นการเพิ่มความสูงให้กับสายส่งโดยการเพิ่มความสูงให้กับเสาไฟฟ้า (H) ซึ่งเป็นเสาไฟฟ้าระดับแรงดัน 500 KV ทั้งแบบวงจรถัดและวงจรถู สำหรับรูปที่ 6.4 และ 6.5 เป็นกราฟความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเพิ่มความสูงให้กับสายส่ง โดยพิจารณาที่สายส่งมีค่าของภาระในการจ่ายโหลดสูงสุด (3.15 กิโลแอมป์ต่อเฟส)



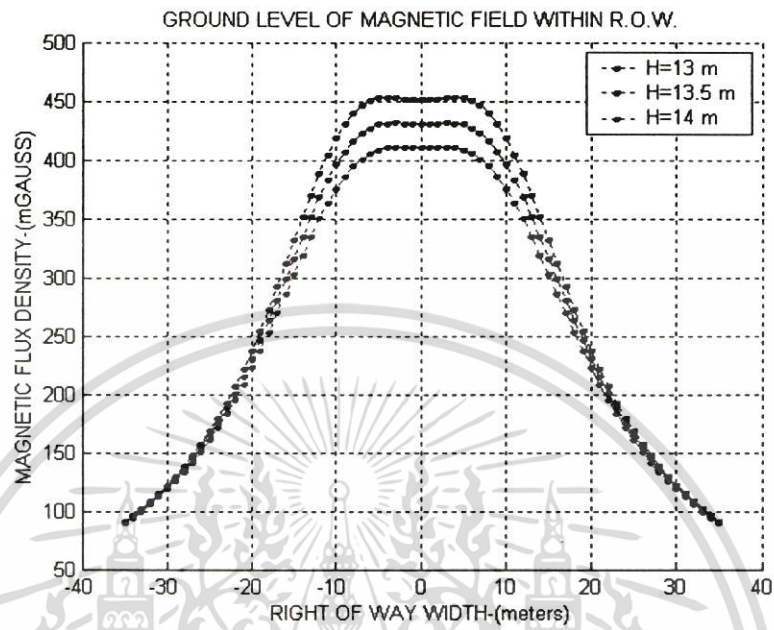
รูปที่ 6.5 การเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ทั้งวงจรถัดและวงจรถู



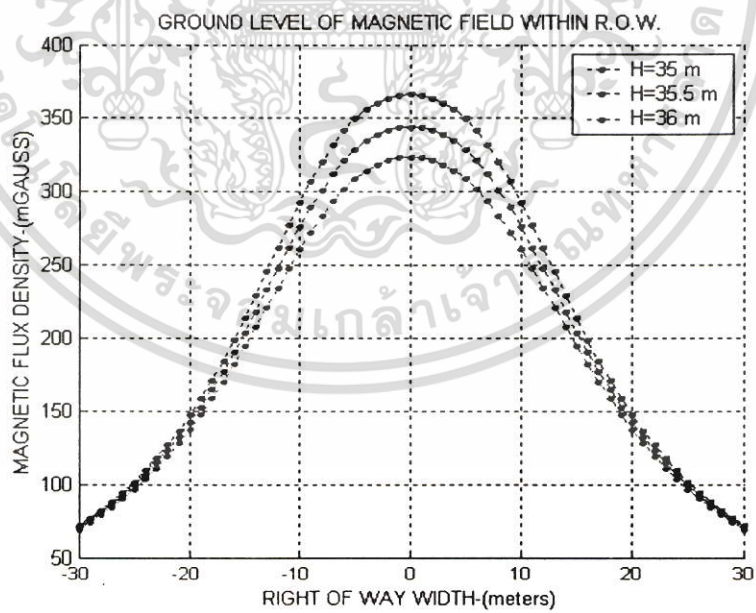
รูปที่ 6.6 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของเสาแรงจรเดี่ยว



รูปที่ 6.7 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของเสาแรงจรคู่



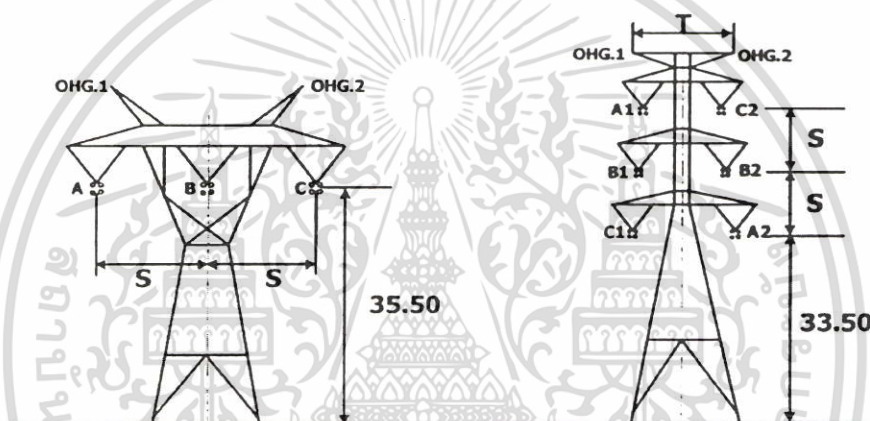
รูปที่ 6.8 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของเสาแรงดึง



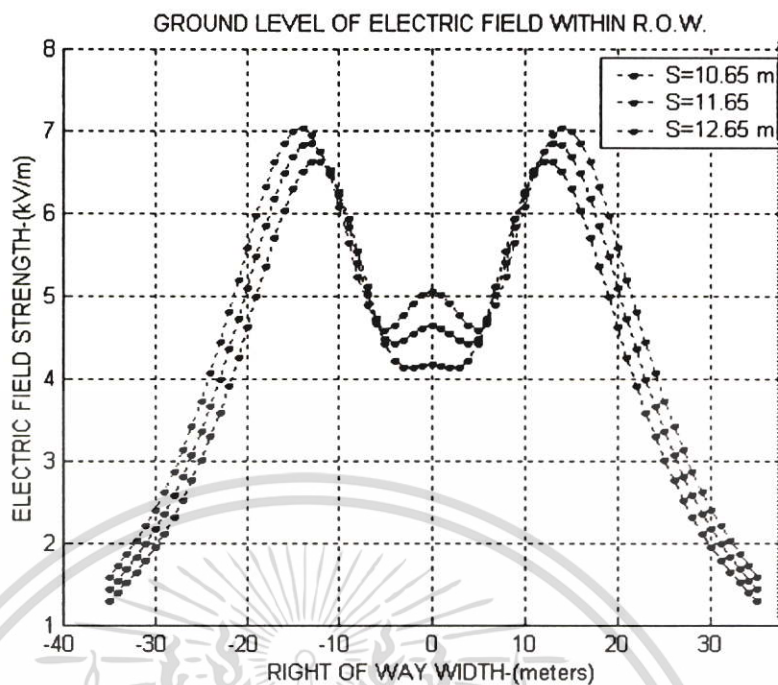
รูปที่ 6.9 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงของเสาแรงดึง

6.2.1.3 ระยะห่างระหว่างเฟส(Phase Spacing)

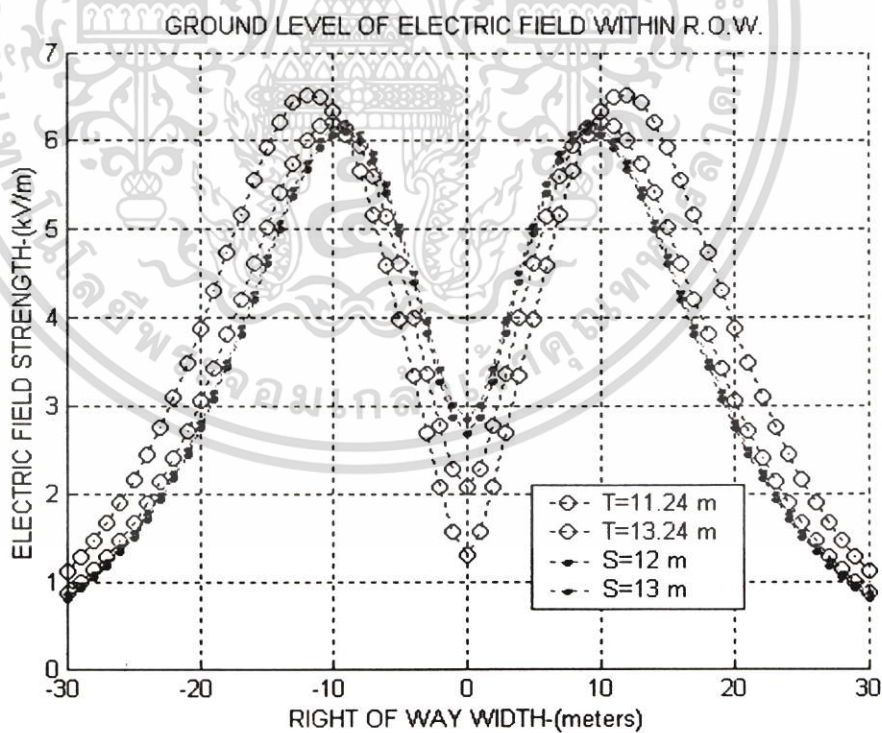
ระยะห่างระหว่างเฟสของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะถูกกำหนดจากระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้าตามระดับแรงดันของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบวงจรเดี่ยวจะมีระยะห่างระหว่างเฟสอยู่ในแนวนอน และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบวงจรถูจะมีระยะห่างระหว่างเฟสทั้งในแนวนอนและในแนวตั้ง (ตามรูปที่ 6.6) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเฟสจะส่งผลทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเปลี่ยนแปลงไป รูปที่ 6.7 - 6.10 เป็นกราฟความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการระยะห่างระหว่างเฟสให้กับสายส่ง โดยพิจารณาที่สายส่งมีค่าของภาระในการจ่ายโหลดสูงสุด (3.15 กิโลแอมป์ต่อเฟส)



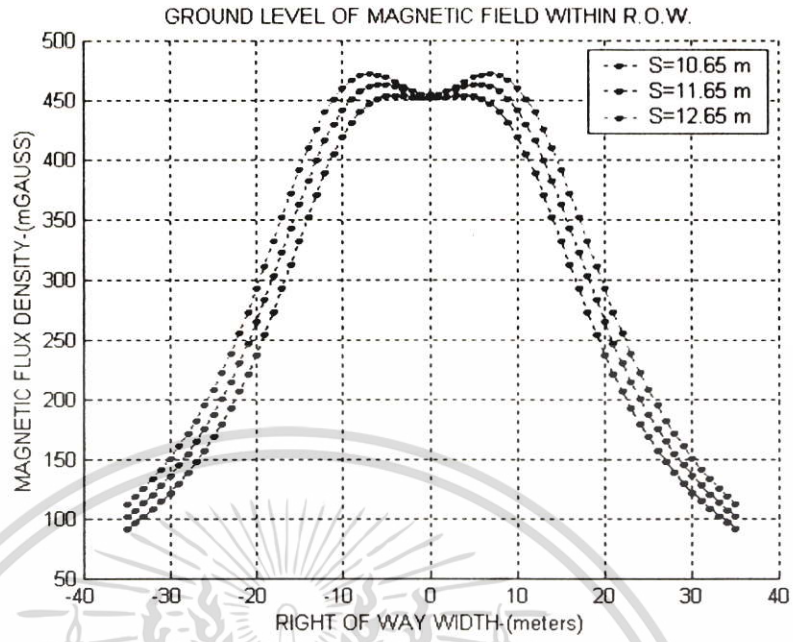
รูปที่ 6.10 การเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเฟสของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรถู



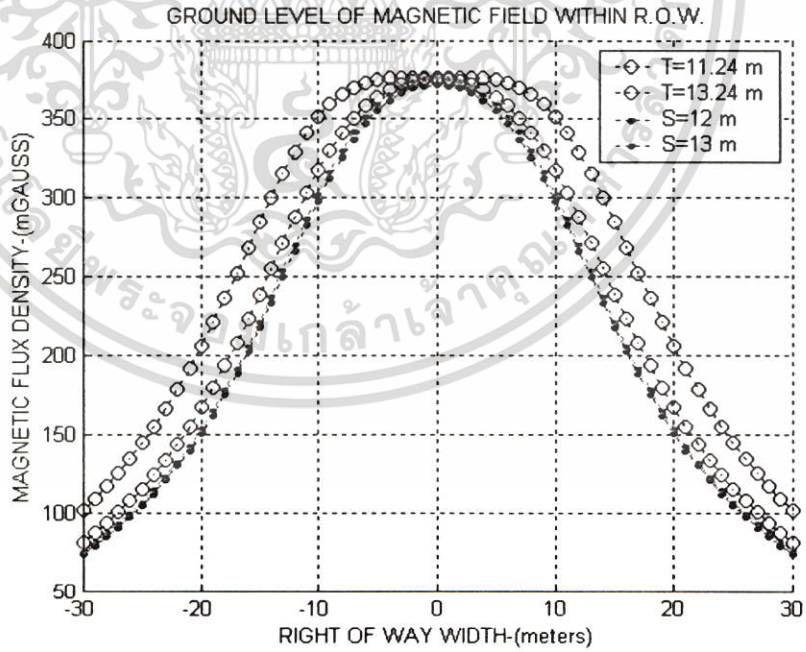
รูปที่ 6.11 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟสวางจรเดี่ยว



รูปที่ 6.12 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟสวางจรคู่



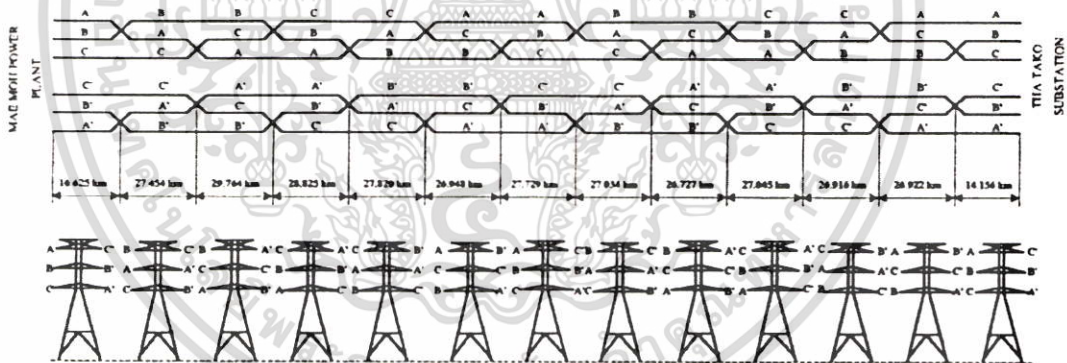
รูปที่ 6.13 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟสวางจรเดี่ยว



รูปที่ 6.14 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟสวางจรคู่

6.2.1.4 การจัดเรียงลำดับเฟส (Phase Sequences)

การจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่งจะทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะกับสายส่งที่เป็นแบบวงจรรู (Double Circuit) เนื่องจากมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของสายส่งเกิดการหักล้างและเสริมซึ่งกันและกัน สำหรับสายส่งที่มีรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสที่มีการหักล้างกันจะทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยเราเรียกรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสแบบนี้ว่า low-reactance(ABC-C'B'A') ส่วนสายส่งที่มีรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสที่เสริมกันจะทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่ามากเราเรียกรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสแบบนี้ว่า superbundle (ABC-A'B'C') สำหรับสายส่ง 500 kV วงจรรูของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้มีการจัดเรียงลำดับเฟส (สำหรับสายส่งที่มีระยะทางไกล ๆ) โดยมีรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสตามรูปที่ 6.11 และในรูปที่ 6.12 และ 6.113 เป็นผลของการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นผลมาจากการจัดเรียงลำดับของเฟส ซึ่งจะเห็นว่าเป็นการจัดเรียงลำดับของเฟสในแบบ low-reactance ทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการเรียงลำดับเฟสในรูปแบบอื่นตลอดความยาวสายส่ง

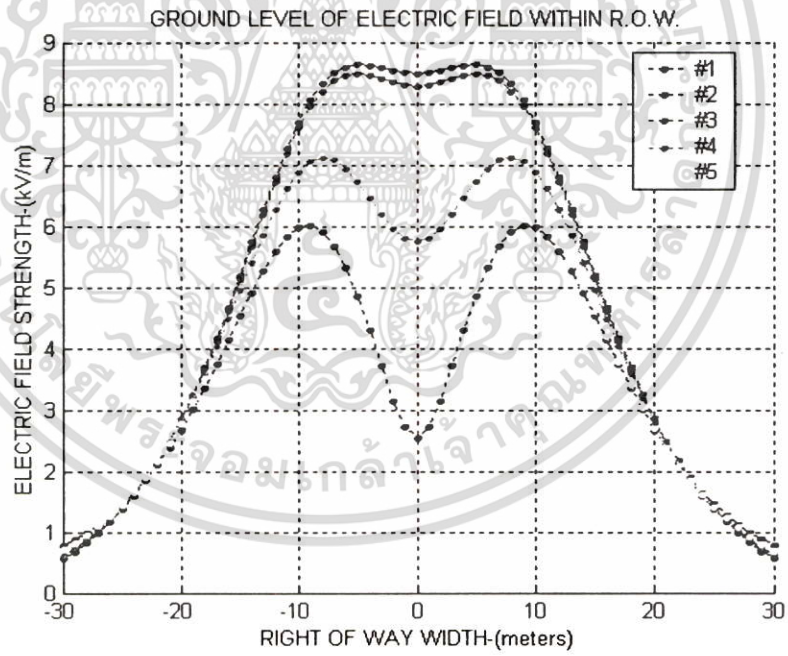


รูปที่ 6.15 การจัดเรียงลำดับของเฟสในแบบ Low-reactance สายส่ง 500 kV วงจรรู

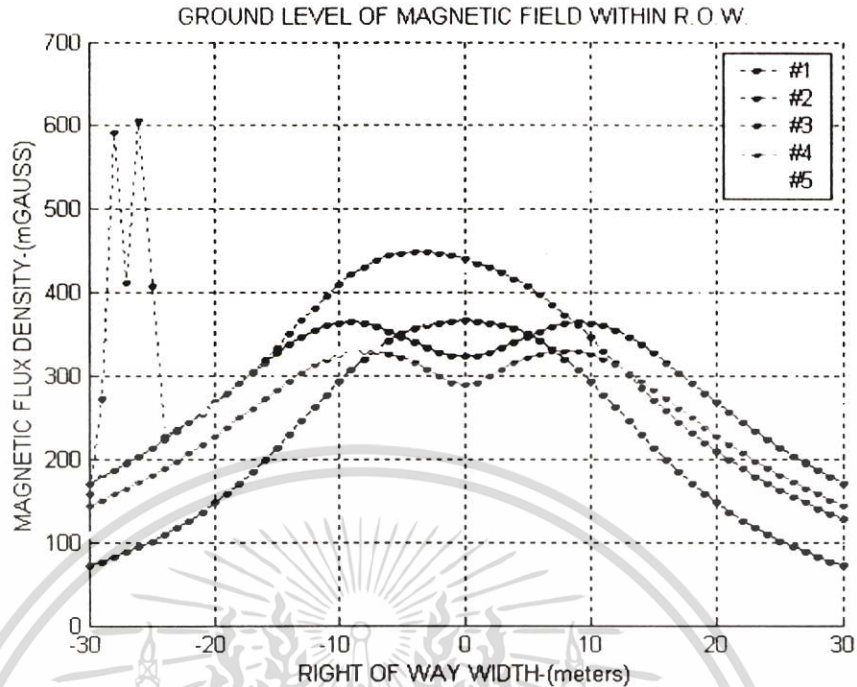
PHASE SEQUENCE

A	C'	A	A'	A	B'
B	B'	B	B'	B	A'
C	A'	C	C'	C	C'
#1		#2		#3	
A	A'	A	B'		
B	C'	B	C'		
C	B'	C	C		
#4		A'	#5		

รูปที่ 6.16 การจัดเรียงลำดับของเฟสในรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 6.17 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามการจัดเรียงเฟส



รูปที่ 6.18 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามการจัดเรียงเฟส

6.2.1.5 ขนาดของสายไฟฟ้า (Conductor Dimension)

สายไฟฟ้าของสายส่งระบบแรงดัน 500 kV จะมีลักษณะเป็นสายควมจำนวน 4 เส้น ดังนั้นขนาดของสายไฟฟ้าต่อเฟสจึงเป็นขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของสายควม การเปลี่ยนแปลงขนาดของสายไฟฟ้าในที่นี้จึงหมายถึงการเปลี่ยนแปลงจำนวนของสายไฟควมต่อเฟสหรือการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของสายไฟควม ซึ่งจะทำให้ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูล ของสายไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดของสายไฟฟ้าเมื่อพิจารณาจากสมการในการคำนวณสนามไฟฟ้าแล้วจะเห็นว่าค่า Maxwell potential coefficient ตามสมการที่ (2.4) จะเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้ แต่สำหรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง (เนื่องจากค่า Maxwell potential coefficient จะมีผลต่อการคำนวณของค่าสนามไฟฟ้าเท่านั้น)

6.2.1.6 การชิลด์ (Shielding methods)

การชิลด์เป็นวิธีการหนึ่งในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เช่น การทำระบบกราวด์ให้กับวัตถุเพื่อลดผลกระทบของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, การใช้โลหะที่มีค่าเปอร์มิบิลิตีสูง (permeability) เพื่อป้องกันการรบกวนจากสนามไฟฟ้า เป็นต้น สำหรับสนามไฟฟ้าการชิลด์จะทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้า ณ บริเวณที่ชิลด์มีค่าลดลง ซึ่งประสิทธิภาพการชิลด์ (shielding efficiency : SE) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 6.1-3.3

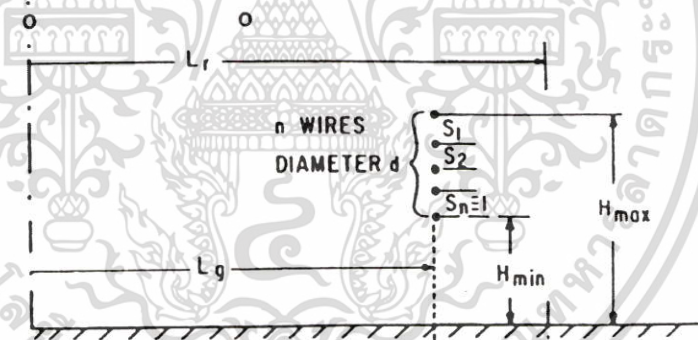
$$E_s = E_U \cdot SF \quad (6.1)$$

$$SE = 1 - SF = \frac{E_U - E_s}{E_U} \quad (6.2)$$

$$E_s = E_U(1 - SE) \quad (6.3)$$

- เมื่อ E_s = ความเข้มสนามไฟฟ้าหลังการชิลด์ (kV/m)
 E_U = ความเข้มสนามไฟฟ้าก่อนการชิลด์ (kV/m)
 SF = ชิลด์ดิ้งแฟคเตอร์
 SE = ประสิทธิภาพของการชิลด์ (Shielding efficiency)

การชิลด์โดยใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์วางในแนวตั้ง (Vertical grid of grounded wire) ในการลดระดับความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของเขตเดินสายไฟฟ้า (edge of right of way) สามารถทำได้ด้วยการใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสมบริเวณเขตเดินสายไฟฟ้า ตามรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 การใช้สายโอเวอร์เฮดกราวด์ลดระดับความเข้มสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.19 ประกอบด้วยตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- L_r = ระยะเขตเดินสายจากแนวสายส่ง
 L_g = ระยะจากแนวสายส่งถึงตำแหน่งติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์
 H_{max} = ความสูงจากพื้นดินถึงสายโอเวอร์เฮดกราวด์เส้นบนสุด
 H_{min} = ความสูงจากพื้นดินถึงสายโอเวอร์เฮดกราวด์เส้นล่างสุด
 n = จำนวนของสายโอเวอร์เฮดกราวด์
 d = เส้นผ่าศูนย์กลางของสายโอเวอร์เฮดกราวด์
 S_i = ระยะห่างระหว่างสายโอเวอร์เฮดกราวด์เส้นที่ i และ $i-1$

สำหรับข้อจำกัดในการติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์จะประกอบไปด้วยระยะห่างระหว่างชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์กับพื้นดิน และระยะระหว่างสายโอเวอร์เฮดกราวด์เส้นบนสุดกับสายไฟฟ้าเมื่อเกิดการแกว่งเนื่องจากลม

การออกแบบชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดระดับความเข้มสนามไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. กำหนดค่าสนามไฟฟ้า ณ ขอบเขตเขตเดินสายไฟฟ้า (L_r)
2. กำหนดตำแหน่งที่ติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ ($L_r - L_g$) โดยที่ตำแหน่งดังกล่าวจะมีค่าเท่ากับหนึ่งในสามของความสูงเฉลี่ยของชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ตามรูปที่ 6.20
3. หาค่าของสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ ($L_r - L_g$) ก่อนการชิลด์ (E_U) จากสมการ

$$E(L) \approx k \cdot \frac{H \cdot L}{(H^2 + L^2)^2}$$

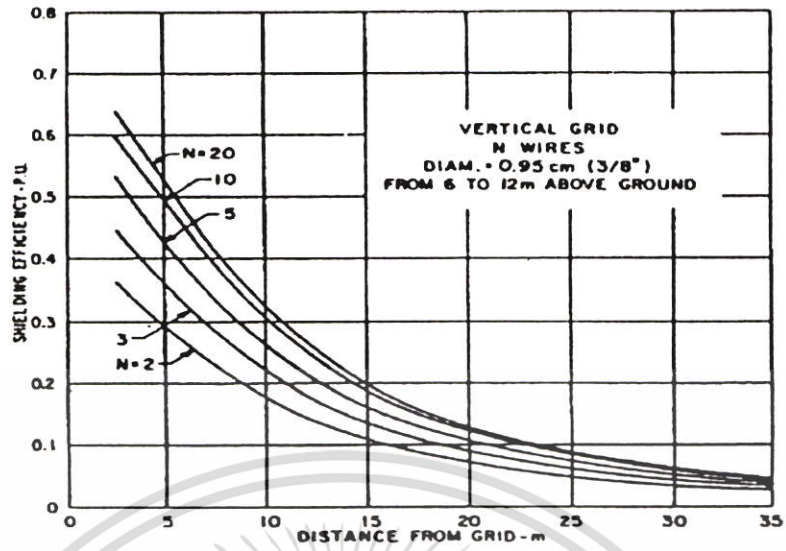
4. หาค่าประสิทธิภาพของการชิลด์จากสมการที่ 6.2
 5. เลือกความสูงของชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์สูงสุด (H_{\max}) ต่ำสุด (H_{\min}) และจำนวนสายโอเวอร์เฮดกราวด์ (n) จากรูปที่ 6.21
 6. หาค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ ($L_r - L_g$) หลังการชิลด์ (E_S) โดยที่ E_G เป็นค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดการเหนี่ยวนำจากชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์
- $$E_S = E_U - E_G$$

ตัวอย่างที่ 6.1 การวิเคราะห์เพื่อลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าด้วยการออกแบบชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ติดตั้งบริเวณที่ขอบเขตเดินสายไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ มีค่าเท่ากับครึ่งเท่าที่ขอบเขตแนวเดินสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้สายโอเวอร์เฮดกราวด์แกนเหล็กดีเกลือว 7 เส้น ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3/8 นิ้ว ซึ่งมีค่า Shielding efficiency of vertical grids of wires for different number of wires ตามรูปที่ 6.20 และ 6.21

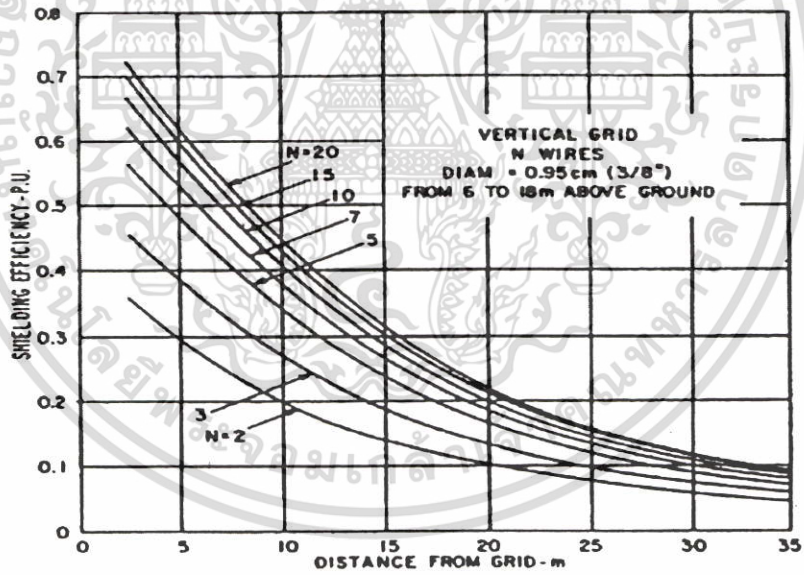
ขั้นตอนการออกแบบและการวิเคราะห์

1. ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ขอบเขตการเดินสายไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV ที่ได้จากการคำนวณ
 - วงจรเดี่ยว มีค่าเท่ากับ 1.235 kV/m
 - วงจรคู่ มีค่าเท่ากับ 0.764 kV/m
2. ตำแหน่งที่ติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ ($L_r - L_g$)

$$(L_r - L_g) = \frac{H_{\max} + H_{\min}}{2} \cdot \frac{1}{3}$$



รูปที่ 6.20 Shielding efficiency of vertical grids of wires for different number of wires



รูปที่ 6.21 Shielding efficiency of vertical grids of wires for different number of wires

จากรูปที่ 6.21 $H_{max} = 18 \text{ m}$ $H_{min} = 6$; $L_r - L_g = 4 \text{ m}$

จากรูปที่ 6.20 $H_{max} = 12 \text{ m}$ $H_{min} = 6$; $L_r - L_g = 3 \text{ m}$

3. หาค่าสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ $L_r - L_g$ ก่อนการชิลด์ (E_U) โดยสมมติให้ความสูงเบื้องต้นของตัวนำ (H) มีค่าเท่ากับ 13 เมตร

3.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรเดี่ยว

$$E(L) = k \frac{(13 \times 35)}{(13^2 + 35^2)^2} ; E(L) = 1.219 \text{ kV/m}$$

$$k = 5206.16$$

$$E(32) = 5206.16 \frac{(13 \times 32)}{(13^2 + 32^2)^2}$$

$$E(32) = 1.54 \text{ kV/m (สำหรับ } H_{\max} = 12 \text{ m)}$$

$$E(31) = 5206.16 \frac{(13 \times 31)}{(13^2 + 31^2)^2}$$

$$E(32) = 1.66 \text{ kV/m (สำหรับ } H_{\max} = 18 \text{ m)}$$

3.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV วงจรคู่

$$E(L) = k \frac{(13 \times 30)}{(13^2 + 30^2)^2} ; E(L) = 0.764 \text{ kV/m}$$

$$k = 2238.64$$

$$E(27) = 2238.64 \frac{(13 \times 27)}{(13^2 + 27^2)^2}$$

$$E(27) = 0.9744 \text{ kV/m (สำหรับ } H_{\max} = 12 \text{ m)}$$

$$E(26) = 2238.64 \frac{(13 \times 26)}{(13^2 + 26^2)^2}$$

$$E(32) = 1.06 \text{ kV/m (สำหรับ } H_{\max} = 18 \text{ m)}$$

4. ต้องการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ขอบเขตเดินสายไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับ ครึ่งเท่าของขอบสนามไฟฟ้าทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่

4.1 ประสิทธิภาพการชิลด์ วงจรเดี่ยว

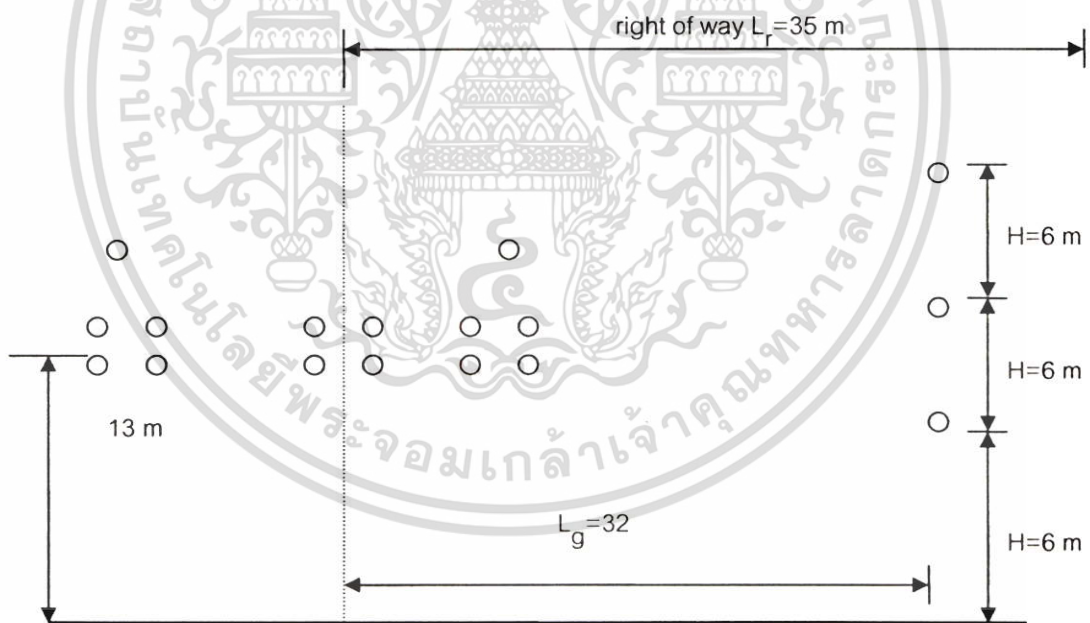
$$SE(32) = \frac{(1.219 - 0.6095)}{1.54} = 0.395$$

$$SE(31) = \frac{(1.219 - 0.6095)}{1.66} = 0.367$$

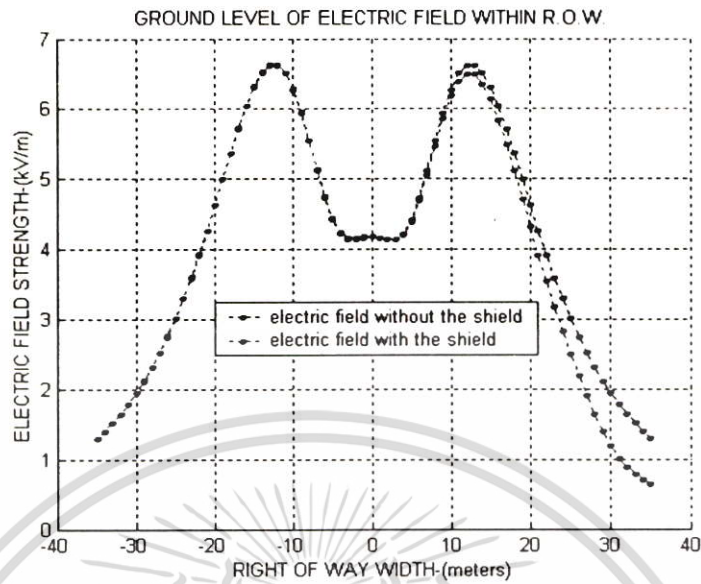
จากรูปที่ 6.21 $H_{\max} = 18m$ $H_{\min} = 6m$; $L_r - L_g = 4m$; $SE = 0.395$; $n = 3$

จากรูปที่ 6.20 $H_{\max} = 12m$ $H_{\min} = 6m$; $L_r - L_g = 3m$ $SE = 0.367$; $n = 2$

เลือกจำนวนสายของชุดโอเวอร์เฮดคราวด์เท่ากับ 3 ($n=3$) โดยมี $H_{\max} = 18m$
 $H_{\min} = 6m$



รูปที่ 6.22 การติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดคราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า 500 kV
 วงจรเดี่ยว



รูปที่ 6.23 ผลการติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรเดียว

4.2 ประสิทธิภาพการชิลด์ วงจรคู่

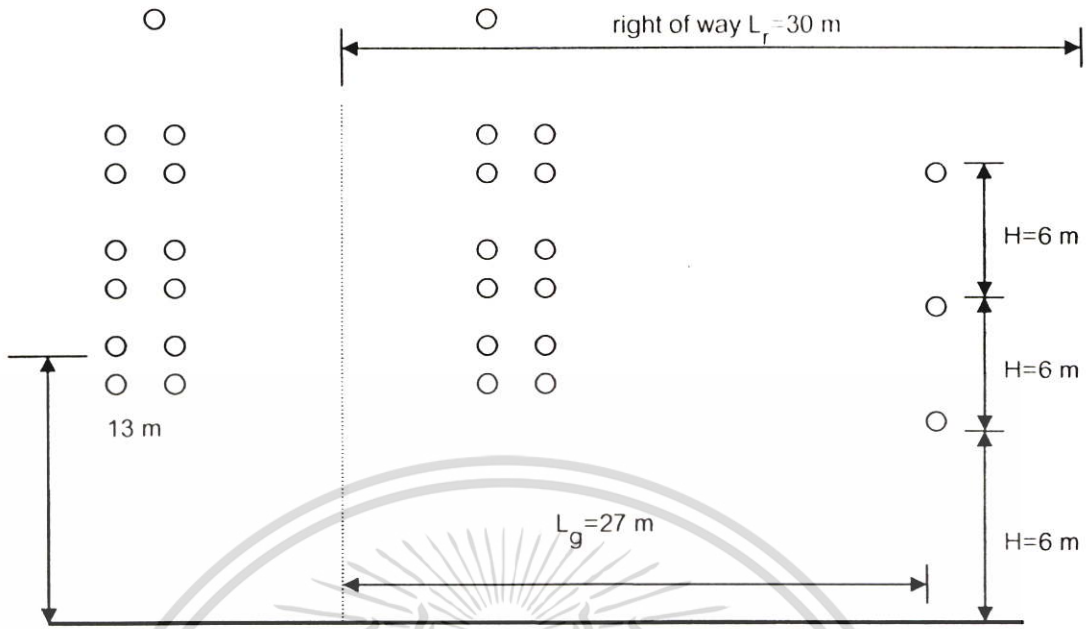
$$SE(27) = \frac{(0.764 - 0.382)}{0.9744} = 0.39$$

$$SE(26) = \frac{(0.764 - 0.382)}{1.06} = 0.36$$

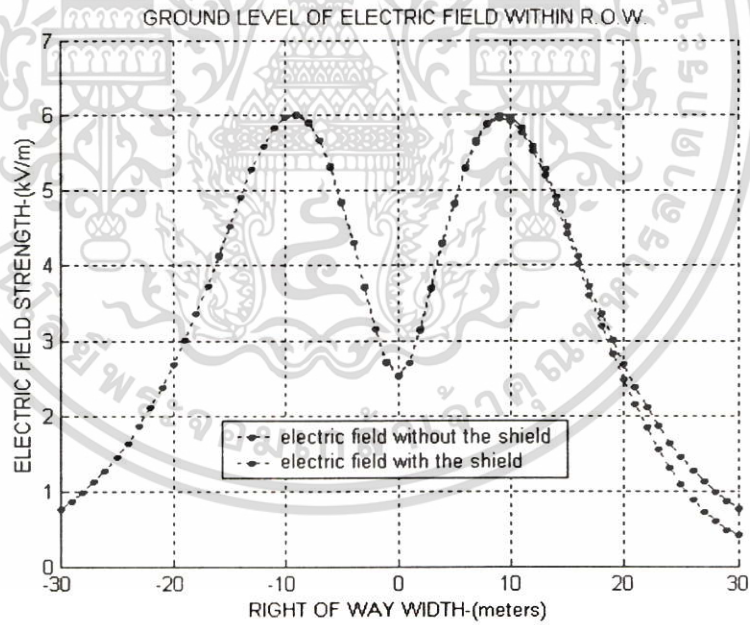
จากรูปที่ 6.21 $H_{max} = 18m$ $H_{min} = 6m$; $L_r - L_g = 4m$; $SE = 0.36$; $n = 2$

จากรูปที่ 6.20 $H_{max} = 12m$ $H_{min} = 6m$; $L_r - L_g = 3m$ $SE = 0.39$; $n = 3$

เลือกจำนวนสายของชุดโอเวอร์เฮดกราวด์เท่ากับ 2 ($n=2$) โดยมี $H_{max} = 12m$ $H_{min} = 6m$



รูปที่ 6.24 การติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่



รูปที่ 6.25 ผลการติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่

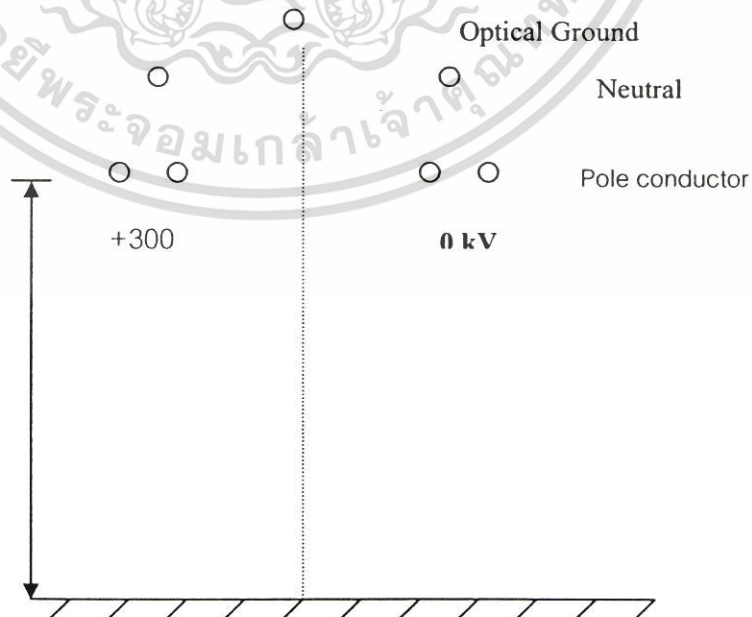
จากตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ติดตั้งในแนวดิ่งเพื่อลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของเขตเดินสายไฟฟ้า โดยใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ที่มีขนาดเส้นละ 3/8 นิ้ว พบว่าในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยวซึ่งมีเขตเดินสายไฟฟ้าข้างละ 35 เมตร เมื่อต้องการลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าให้มีค่าลดลงเท่ากับ 0.61 kV/m จะต้องติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ในแนวดิ่งจำนวน 3 เส้น โดยมีระยะห่างระหว่างเส้นเท่ากับ 6 เมตร วางห่างจากขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าเข้ามา 3 เมตร และชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ มีความสูง 18 เมตร ดังรายละเอียดในรูปที่ 6.22 สำหรับในกรณีของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่ซึ่งมีเขตเดินสายไฟฟ้าข้างละ 30 เมตร เมื่อต้องการลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าให้มีค่าลดลงเหลือ 0.382 kV/m จะต้องติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ ในแนวดิ่งจำนวน 2 เส้น โดยมีระยะห่างระหว่างเส้นเท่ากับ 4 เมตร วางห่างจากขอบเขตเดินสายไฟฟ้าเข้ามา 3 เมตร และชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ มีความสูง 12 เมตร ดังรายละเอียดในรูปที่ 6.24

ในรูปที่ 6.23 และ 6.25 เป็นการวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินเมื่อได้ติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์แล้ว ซึ่งผลจากการวิเคราะห์จะเห็นว่าระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้า จะมีค่าลดลงจากเดิมก่อนการติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์หรือการทำชิลด์ให้กับสายส่ง

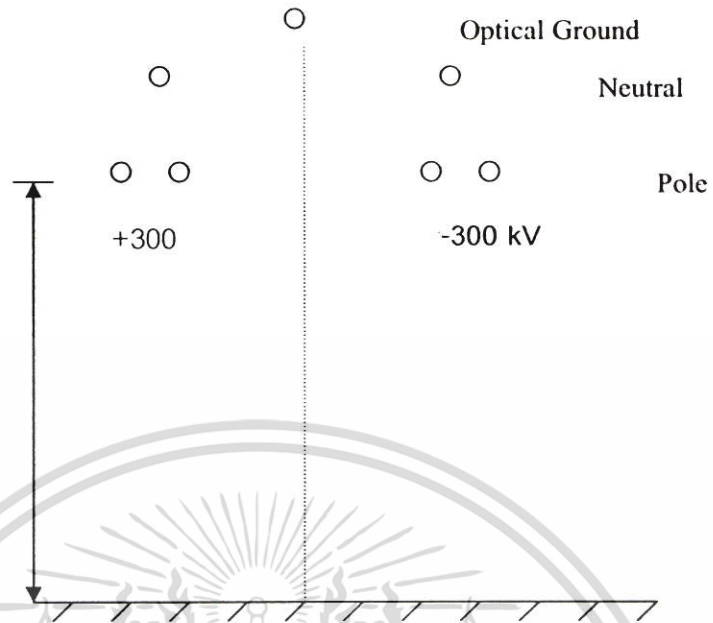
6.2.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

แนวทางในการลดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมีดังนี้

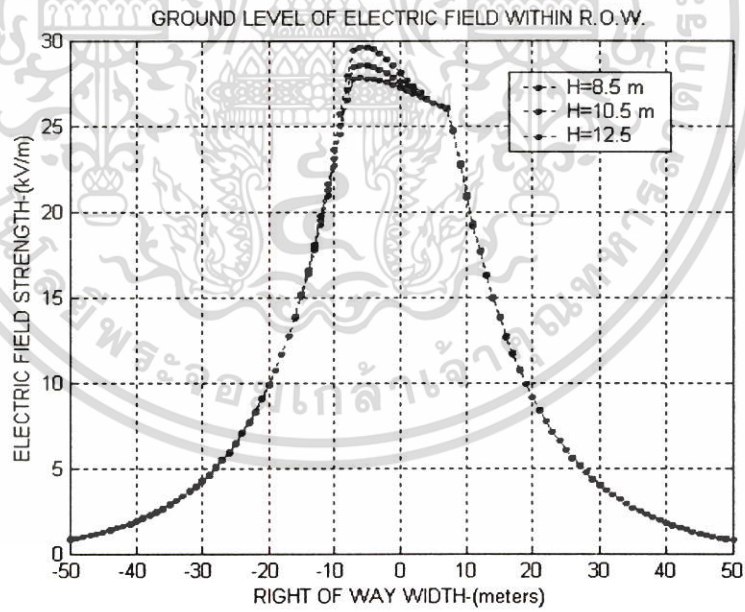
6.2.2.1 ความสูงของเสาส่งไฟฟ้า (Line hight)



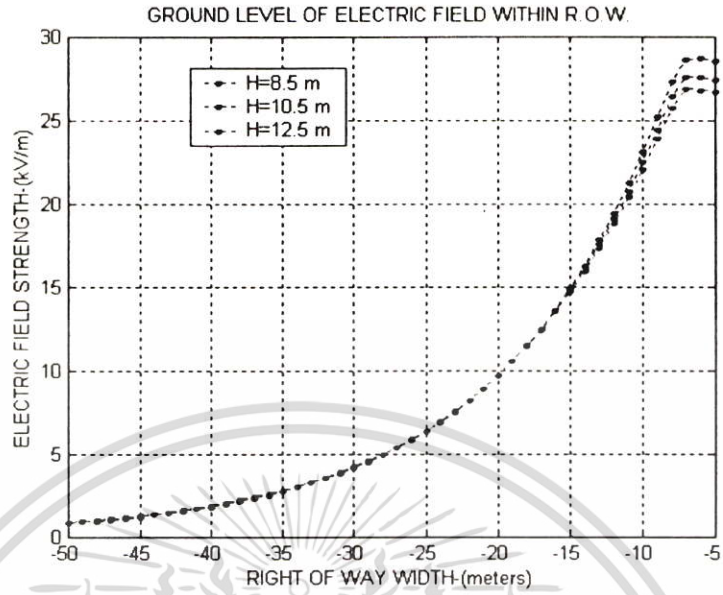
รูปที่ 6.26 การเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน 300 kV แบบไบโพล่า



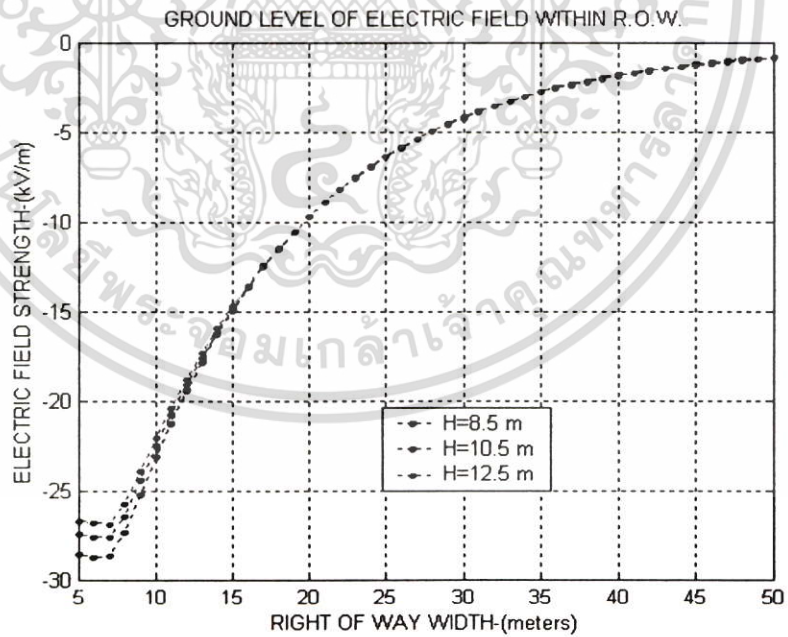
รูปที่ 6.27 การเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน ± 300 kV แบบใบโพล่า



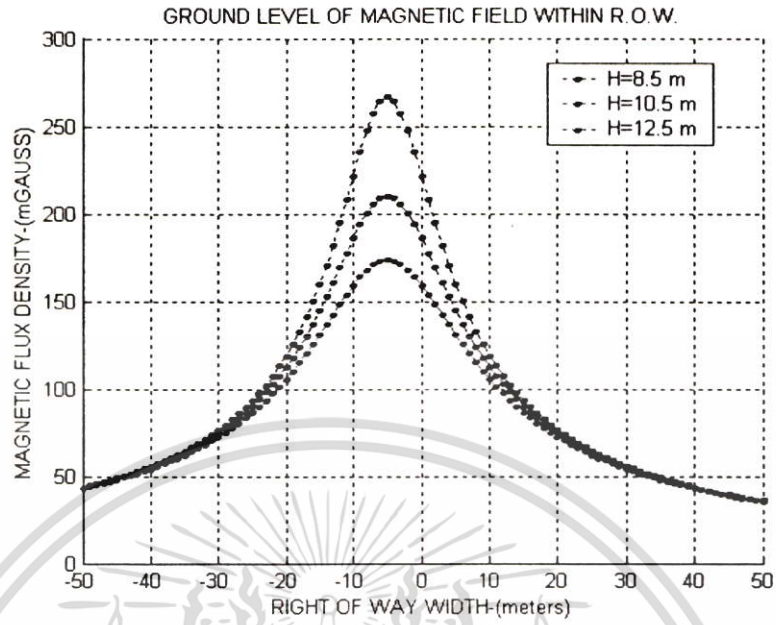
รูปที่ 6.28 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบโมโนโพล่า



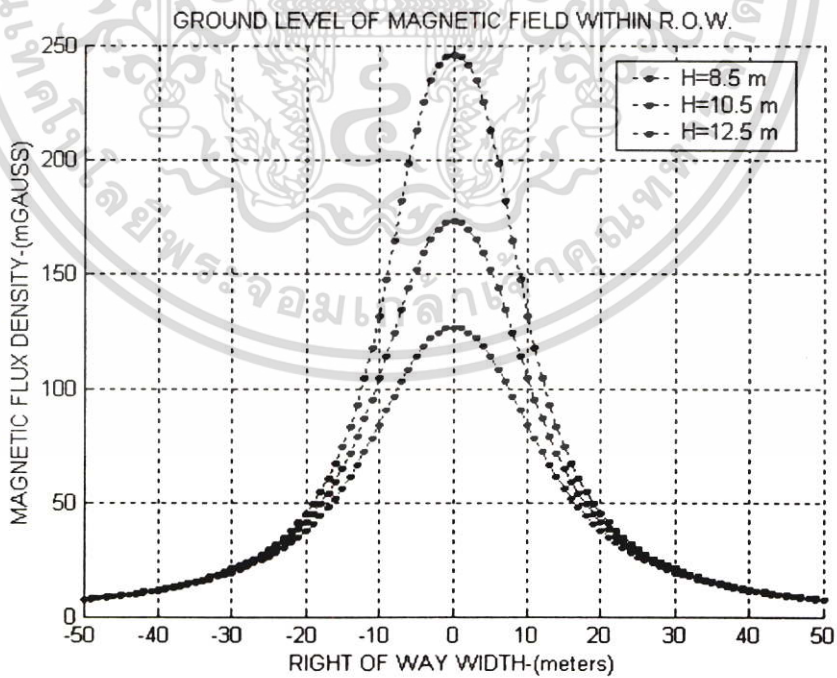
รูปที่ 6.29 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบไบโพลาร์ ขั้วบวก



รูปที่ 6.30 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบไบโพลาร์ ขั้วลบ



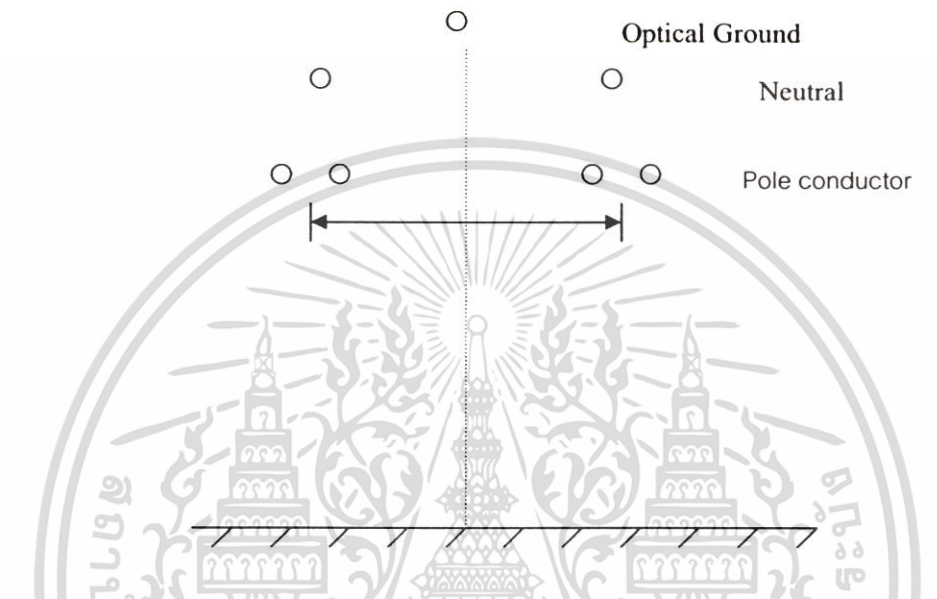
รูปที่ 6.31 ความเข้มแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบโมโนโพล่า



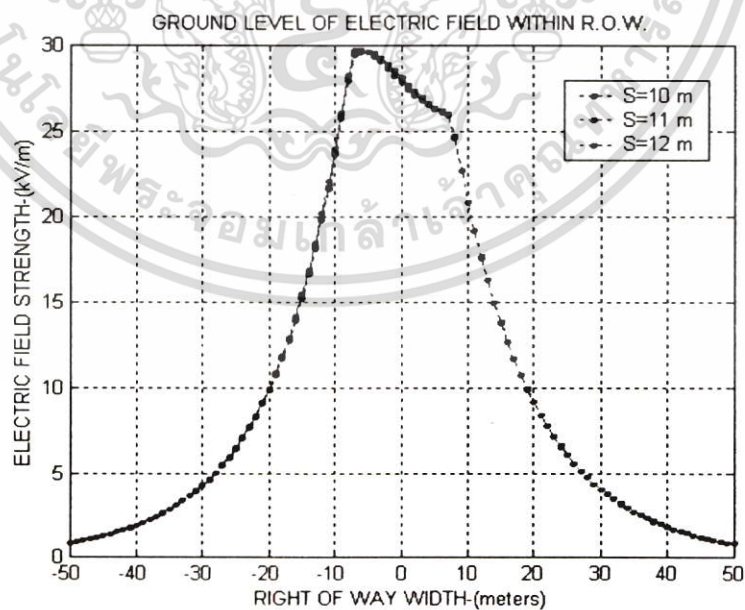
รูปที่ 6.32 ความเข้มแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง 300 kV แบบไบโพล่า

ผลจากการวิเคราะห์ในรูปที่ 6.28-6.30 เป็นการเพิ่มความสูงของเสาส่งไฟฟ้า ± 300 kV ทั้งแบบ โมโนโพล่าและไบโพล่าวิเคราะห์ผลความเข้มสนามไฟฟ้า รูปที่ 6.31-6.32 วิเคราะห์สนามแม่เหล็ก ซึ่งในบางครั้งที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดผ่านบริเวณพื้นที่ที่มีข้อจำกัดในเรื่องสนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็กอาจใช้วิธีนี้ปัญหาผลกระทบที่เกิดขึ้นดังกล่าวได้

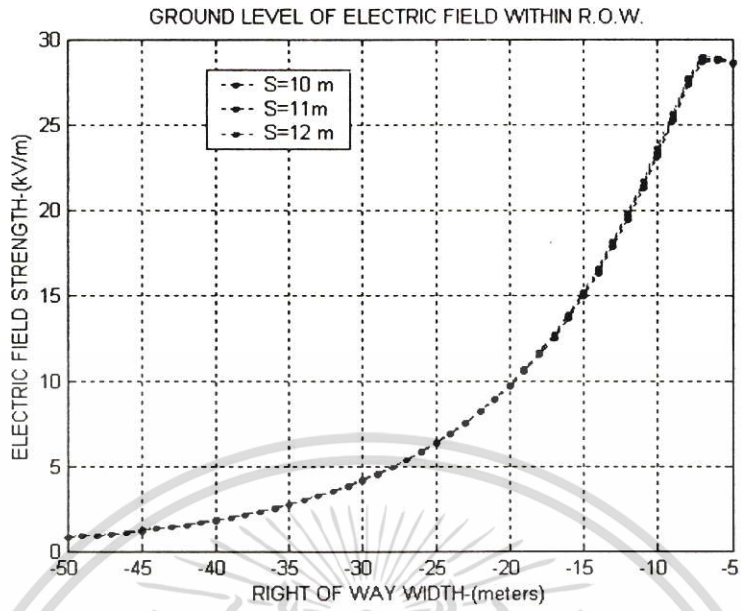
6.2.2.2 ระยะห่างระหว่างตัวนำ (pole spacing)



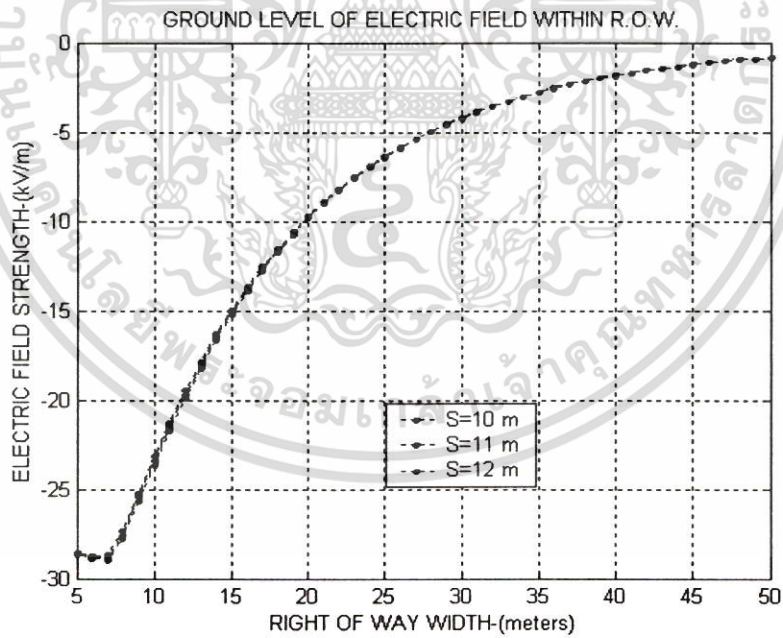
รูปที่ 6.33 การเพิ่มระยะห่างระหว่างตัวนำระบบแรงดันสูงกระแสตรง 300 kV



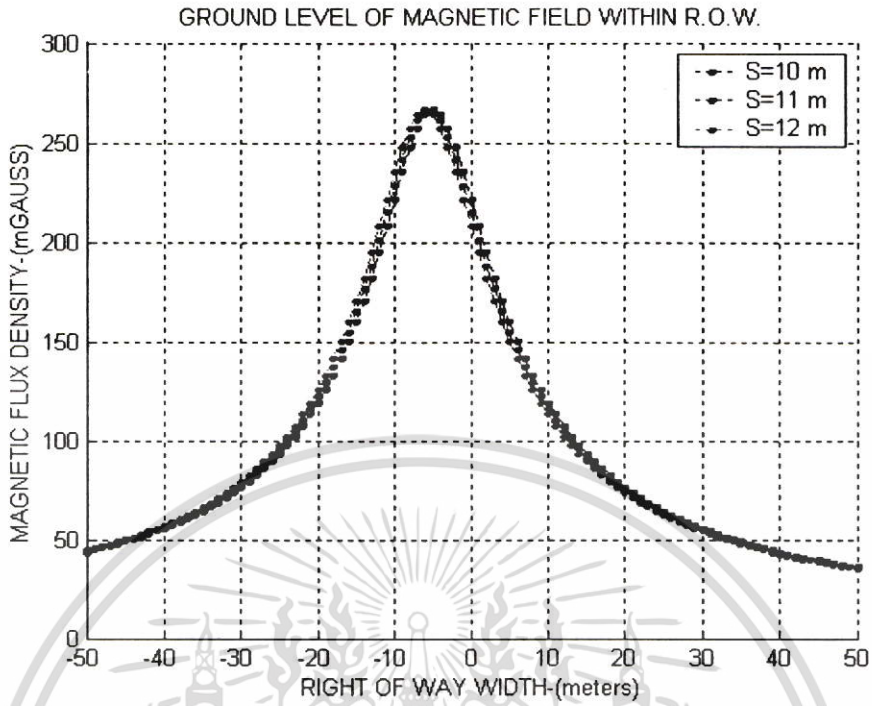
รูปที่ 6.34 ความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV แบบ โมโนโพล่าที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างตัวนำ



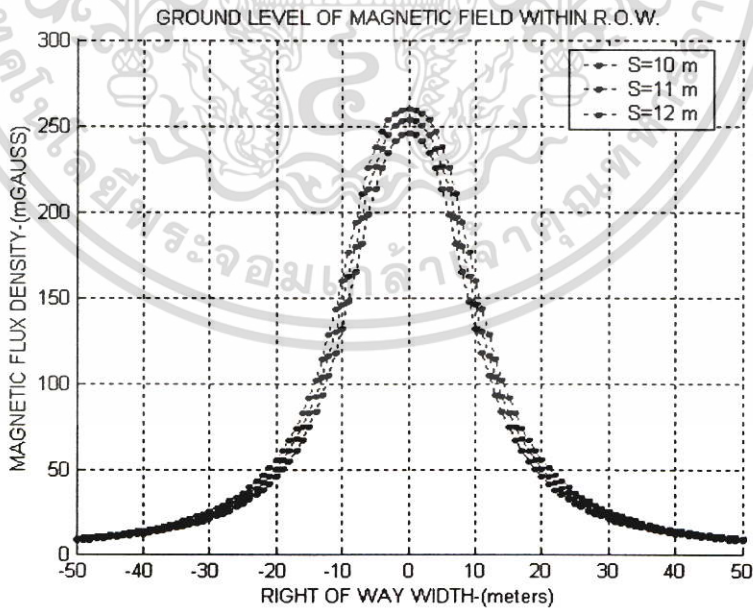
รูปที่ 6.35 ความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV แบบไบโพลาร์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างตัวนำ (ขั้วบวก)



รูปที่ 6.36 ความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV แบบไบโพลาร์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างตัวนำ (ขั้วลบ)



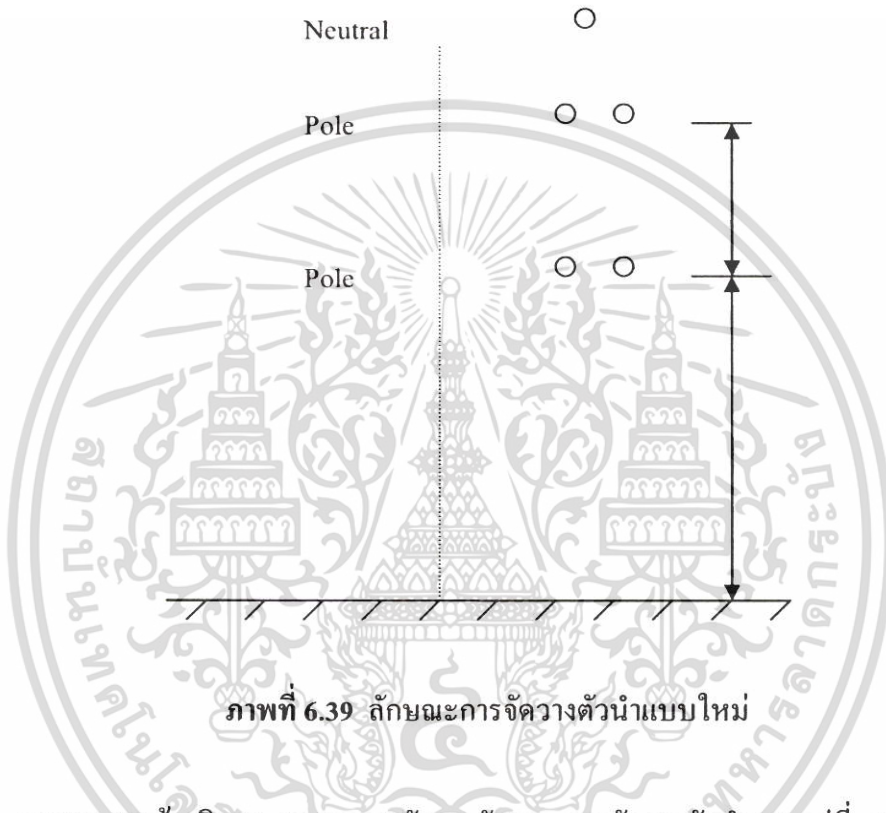
รูปที่ 6.37 ความเข้มสนามแม่เหล็กสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ± 300 kV แบบโมโนโพล่า ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างตัวนำ



รูปที่ 6.38 ความเข้มสนามแม่เหล็กสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ± 300 kV แบบโมโนโพล่า ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างตัวนำ

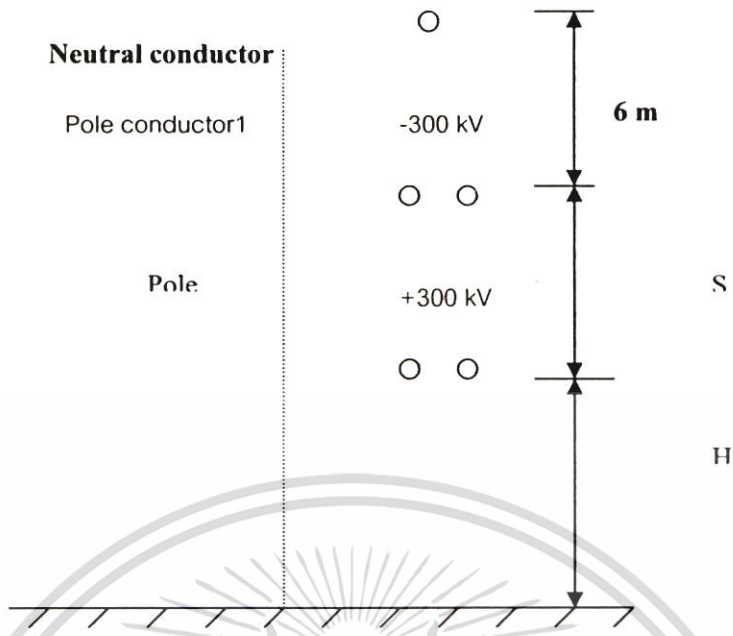
สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมีระยะห่างระหว่างตัวนำเป็นแนวนอน เมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างตัวนำทั้งสองส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จากรูปที่ 6.34-6.36 ผลของสนามไฟฟ้าซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ในระบบแรงดันสูงกระแสตรงแบบไบโพลาร์และโมนโพลาร์ 300 kV รูปที่ 6.37 และ 6.38 ผลของสนามแม่เหล็กเมื่อระยะห่างระหว่างตัวนำเปลี่ยนแปลงไปทั้งแบบไบโพลาร์และโมนโพลาร์

6.2.3 การจัดวางตัวนำ (pole sequence)

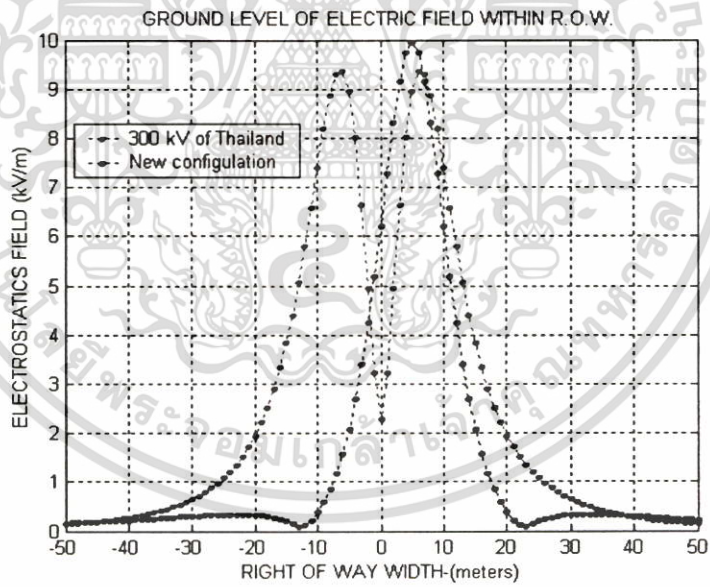


ภาพที่ 6.39 ลักษณะการจัดวางตัวนำแบบใหม่

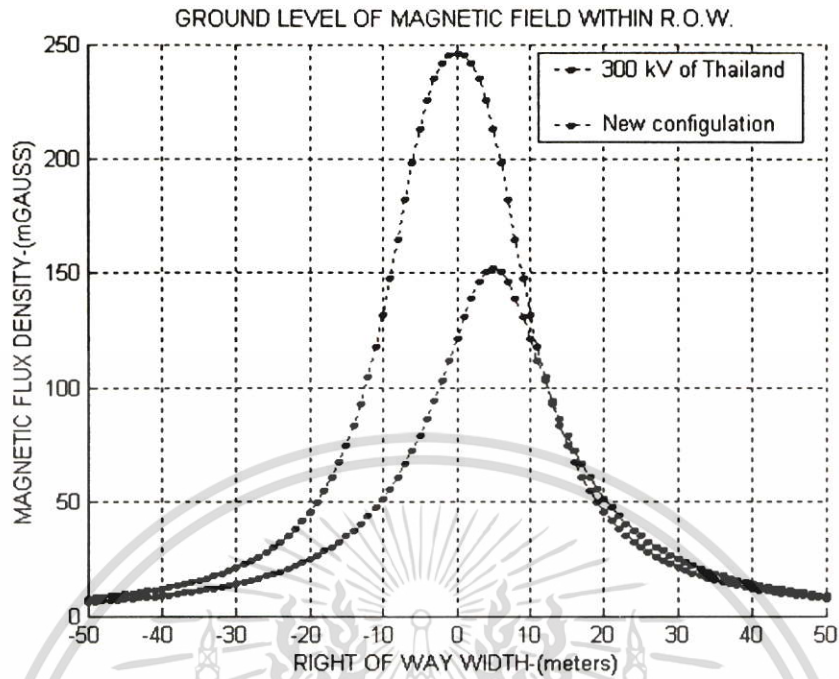
จากเอกสารอ้างอิง[1] ผลจากการจัดวางลักษณะการจัดวางตัวนำตามรูปที่ 6.38 เป็นผลทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไป เราสามารถวิเคราะห์ของสนามไฟฟ้าโดยไม่คิดผลทางโคโรน่า (Corona free condition) ได้ ซึ่งลักษณะเสาส่งไฟฟ้ากระแสตรงแบบนี้ยังไม่มีการใช้งานในประเทศไทย จึงนำเสนอแนวทางการลดสนามไฟฟ้าในแง่ของสนามไฟฟ้าสถิต (electrostatic field) ดังรูป 6.39



รูปที่ 6.40 ตำแหน่งการจัดวางตัวนำแบบใหม่ ± 300 kV แบบไขโพลา



รูปที่ 6.41 ความเข้มสนามไฟฟ้าสถิต(Corona free conditon) ± 300 kV ไขโพลา

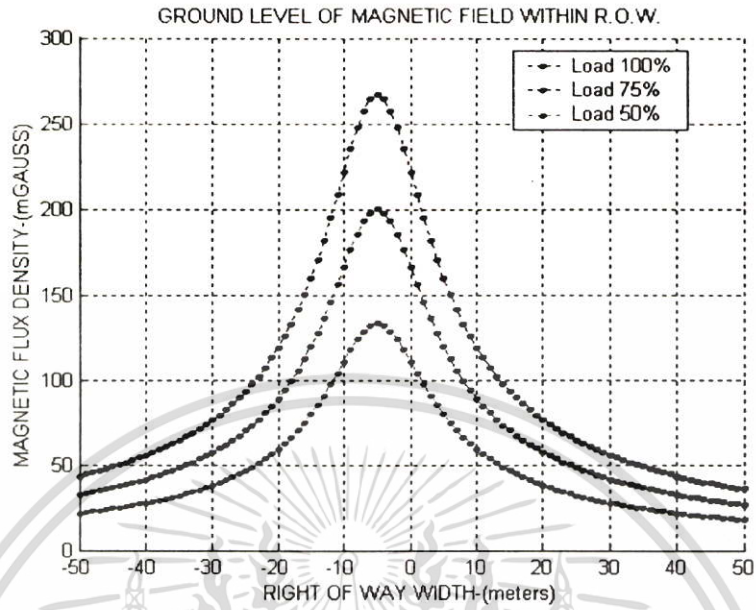


รูปที่ 6.42 ความเข้มสนามแม่เหล็กแรงดันสูงกระแสตรง ± 300 kV ใบบโปลา

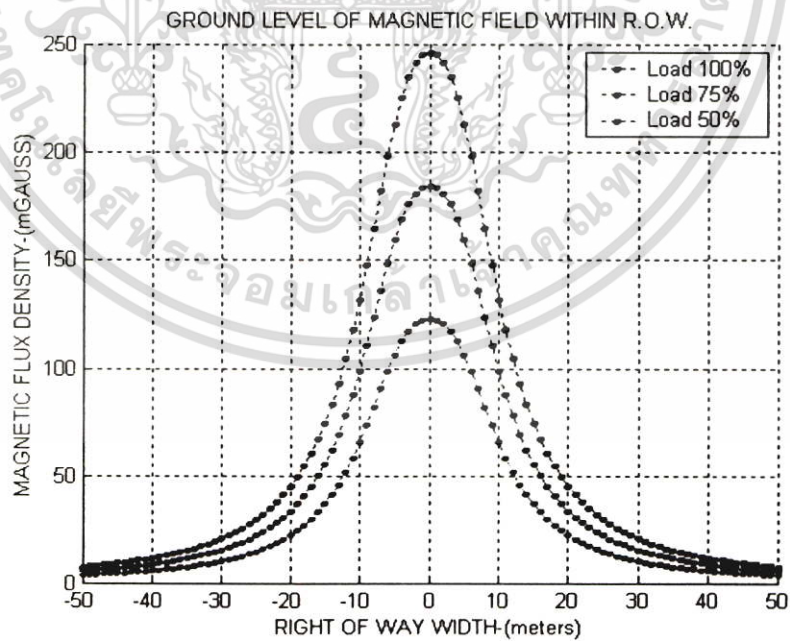
ลักษณะการจัดวางตัวนำแบบใหม่ช่วยลดสนามไฟฟ้าสถิตและสนามแม่เหล็ก (corona free condition) ที่เกิดขึ้น โดยรูปที่ 6.40 ทำการเปรียบเทียบระหว่างการวางตัวนำแบบเดิมเทียบกับการวางตัวนำแบบใหม่

6.2.4 การจัดการโหลด (Load management)

สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขึ้นอยู่กับค่ากระแสไฟฟ้า ดังนั้นหากมีการจัดโหลดให้เหมาะสมเมื่อสายส่งพาดผ่านพื้นที่ที่คำนึงถึงผลกระทบเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก เราสามารถนำแนวทางดังกล่าวแก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดขึ้นได้



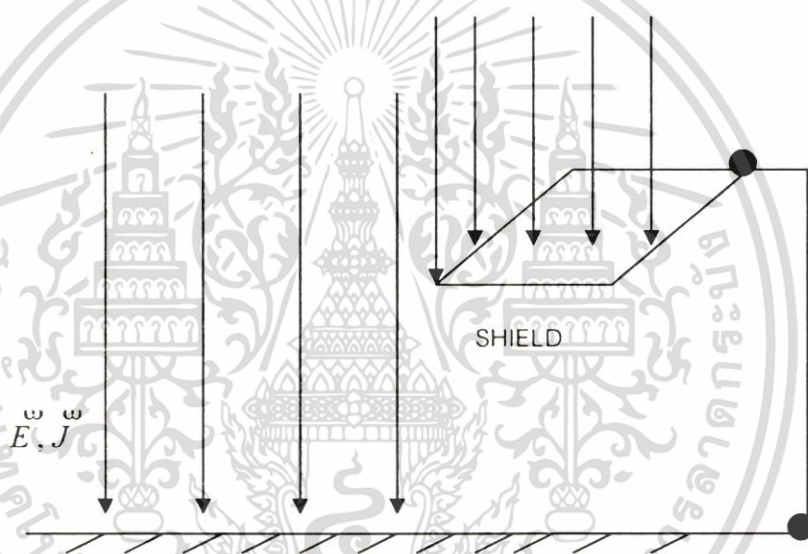
รูปที่ 6.43 ความเข้มสนามแม่เหล็กแรงดันสูงกระแสตรง ± 300 kV โมโนโพล่าตามลักษณะของการจัดโหลด



รูปที่ 6.44 ความเข้มสนามแม่เหล็กแรงดันสูงกระแสตรง ± 300 kV ไบโพล่าตามลักษณะของการจัดโหลด

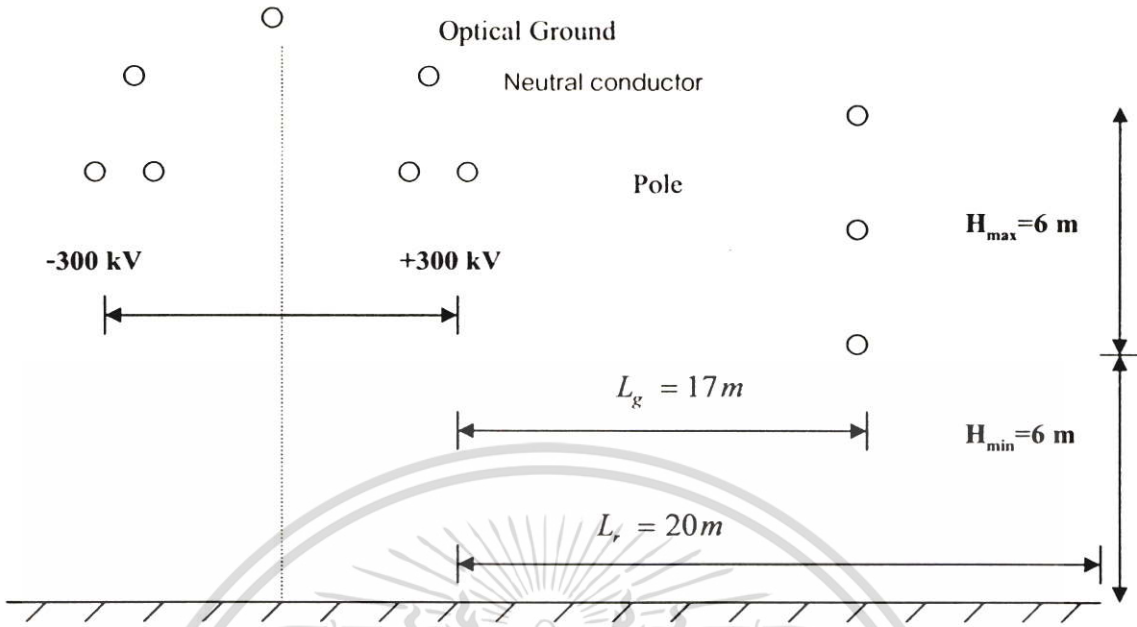
6.2.5 การชิลด์(Shield method)

ความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับสามารถใช้วิธีการชิลด์โดยใช้โอเวอร์เฮดกราวด์แนวตั้งหรือแนวนอนขนานกับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับบริเวณที่สายส่งพาดผ่านหรืออาจจะใช้วิธีชิลด์ธรรมชาติ[2] เช่นต้นไม้ปลูกบริเวณขอบแนวการเดินสายส่งไฟฟ้า ในการลดระดับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงสามารถนำบางวิธีของสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับมาใช้ได้ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมทางด้านวิศวกรรมและความคุ้มค่าการลงทุน และเนื่องจากแรงดันสูงไฟฟ้ากระแสตรงไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นผลทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแตกต่างจากสนามไฟฟ้ากระแสสลับ การที่แรงดันไม่แปรเปลี่ยนตามเวลานี้ส่งผลทำให้เกิดประจุค้าง (Space Charge) รอบแนวสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง แนวทางที่จะสามารถช่วยลดผลที่เกิดเนื่องมาจากประจุค้างที่เกิดขึ้นสามารถประยุกต์การชิลด์ได้ตามลักษณะดังรูปที่

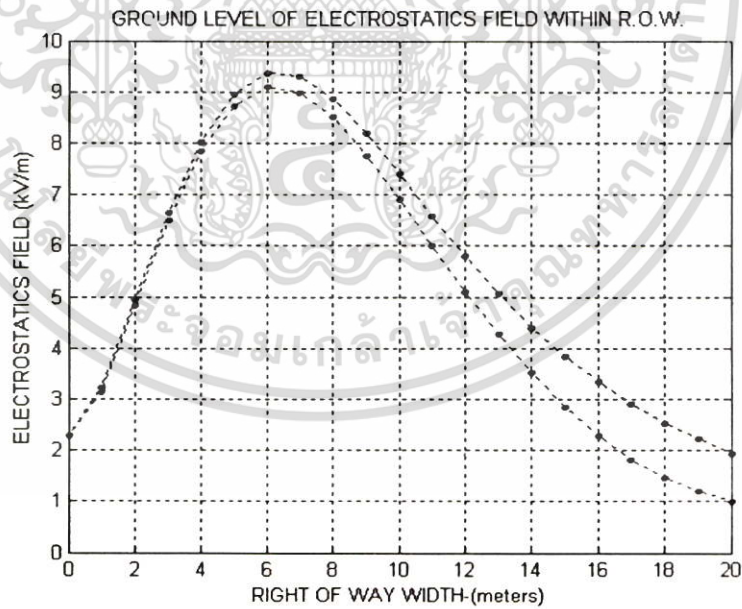


รูปที่ 6.45 การชิลด์สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของประจุ

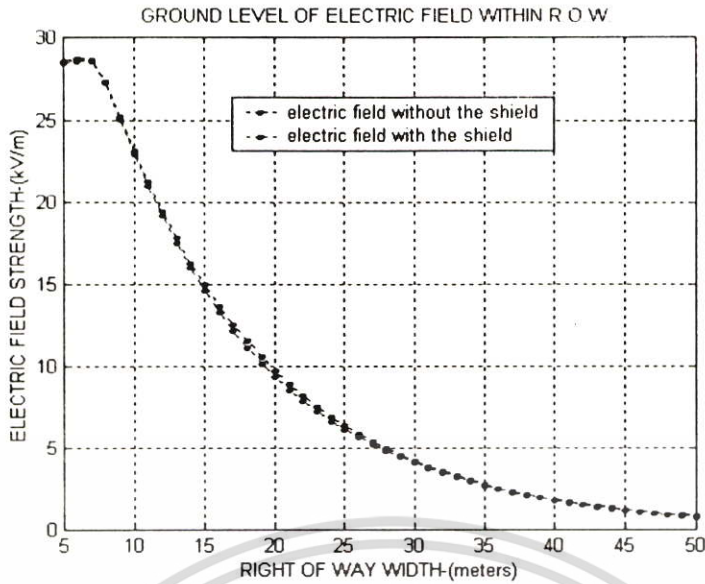
การชิลด์โดยใช้สายโอเวอร์เฮดกราวด์แนวตั้งดังได้กล่าวไปแล้วในเรื่องการชิลด์สนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ลดสนามไฟฟ้าเมื่อไม่คิดผลของโคโรน่า (Corona free condition) หรือเรียกอีกอย่างว่าสนามไฟฟ้าสถิต(Electrostatic field)ได้ แต่จากทฤษฎีสถานะไฟฟ้ากระแสตรงเป็นผลมาจากสนามไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งคือสนามไฟฟ้าในสถานะโคโรน่า เมื่อดูผลจากการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสถิตที่ขอบระยะแนวทางเดินสายส่งไฟฟ้า (Edge of right of way) มีค่าประมาณเท่ากับ 2 kV/m แต่ความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรงที่ขอบแนวทางเดินสายส่งไฟฟ้าที่ประมาณเท่ากับ 10 kV/m แสดงว่าสนามไฟฟ้าในสถานะโคโรน่ามีผลสูงกว่าสนามไฟฟ้าสถิต จึงต้องมีการศึกษาการลดผลกระทบกันต่อไป และจากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้นสามารถทำการศึกษาโดยนำวิธีของสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับมาประยุกต์การลดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงได้



รูปที่ 6.46 ตำแหน่งการติดตั้งชุด โอเวอร์โฮลคราวด์เมื่อต้องการลดผลของสนามไฟฟ้าสถิตลดลง
เท่ากับครึ่งเท่าที่ระยะขอบแนวเดินสายส่งไฟฟ้า



รูปที่ 6.47 ผลการวิเคราะห์หาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสถิตลดลงเท่ากับครึ่งเท่าที่ระยะขอบแนวเดิน
ของสายส่งไฟฟ้า



รูปที่ 6.48 ผลการวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้ากระแสตรงตามวิธีของ EPRI เมื่อติดตั้งชุดโอเวอร์เฮดกราวด์ที่ระยะ 17 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลางของสายโอเวอร์เฮด 0.0095 เมตร จำนวน 3 เส้น บนสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง ± 300 kV แบบไบโพล่า

6.3 บทสรุป

จากการเสนอแนวทางการศึกษาเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในลักษณะต่าง ๆ เป็นการเสนอแนวทางเพื่อลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ซึ่งก็จะทำให้ระดับความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงด้วย วิธีการดังกล่าวจะประกอบด้วย 2 วิธีการ คือ การออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเพื่อให้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีการก้าเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กออกมาน้อย และการทำชิลด์เพื่อป้องกันพร้อมทั้งลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งวิธีการต่าง ๆ ที่นำเสนอมาเป็นกรณีศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการใช้แก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดมาสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงได้

บทที่ 7

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยในวิทยานิพนธ์สามารถสรุปผลการวิจัยออกเป็น 4 ส่วน ได้ดังนี้

7.1.1 โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก

โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ที่สร้างจาก MATLAB นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง อีกทั้งพัฒนาโปรแกรมให้สามารถแสดงผลในรูปแบบ 3 มิติ เพื่อช่วยในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ได้ชัดเจนมากขึ้น ตลอดช่วงความยาวของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง จากการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม MATLAB วิเคราะห์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับ เปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม Corona and field effect ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง เปรียบเทียบกับโปรแกรม Field and Corona effect (FACE) ซึ่งวิเคราะห์โดย บริษัท TESHMONT ที่ทำการศึกษาให้กับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งผลจากการวิเคราะห์โปรแกรมสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้น พบว่ามีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์สายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองได้

7.1.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยว วงจรคู่ และสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง 300 kV ทั้งชนิดโมโนโพล่า และไบโพล่า สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ ได้ดังนี้

1. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก บนพื้นดินที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสสลับ 500 kV เมื่อสายส่งมีภาระในการจ่ายโหลดสูงสุด จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทย
2. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง เมื่อสายส่งไฟฟ้ามีค่าภาระในการจ่ายโหลดสูงสุดทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ไม่ได้กำหนดไว้เนื่องจากเป็นสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงเส้นแรกของประเทศไทย ซึ่งผลจากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม MATLAB และบริษัท TESHMONT

ตารางที่ 7.1 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามข้อกำหนดของ กฟผ. และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB

ตำแหน่งที่พิจารณา	สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV							
	วงจรเดียว				วงจรคู่			
	สนามไฟฟ้า		สนามแม่เหล็ก		สนามไฟฟ้า		สนามแม่เหล็ก	
	กฟผ.	สรุป	กฟผ.	สรุป	กฟผ.	สรุป	กฟผ.	สรุป
ภายในเขตเดินสายไฟฟ้า	15 kV/m	6.630 kV/m	-	366.4 mG	15 kV/m	6.012 kV/m	-	451.4 mG
ที่ขอบเขตของเขตเดินสายไฟฟ้า	2 kV/m	1.219 kV/m	200 mG	91.81 mG	2 kV/m	0.764 kV/m	200 mG	52.56 mG

ตารางที่ 7.2 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงสูงสุด และการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง	สนามไฟฟ้า(kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mG)
1. 300 kV โมโนโพล่า (อากาศปกติ)	23.406	266.670
2. 300 kV โมโนโพล่า (ฝนตก)	29.643	266.670
3. \pm 300 kV ไบโพล่า(อากาศปกติ)	21.875(ขั้วบวก) -14.904(ขั้วลบ)	246.154
4. \pm 300 kV ไบโพล่า(ฝนตก)	28.688(ขั้วบวก) -28.688(ขั้วลบ)	246.154
<p>จากมาตรฐาน IEEE PC95.6-2002 standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic field,0 to 3kHz กำหนดค่าสนามไฟฟ้าภายในเขตเดินสายไฟฟ้า(R.O.W) จากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าเท่ากับ 20 kV/m และ สนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมีค่าเท่ากับ 353 mT หรือ เท่ากับ 3530 Gauss สามารถดูได้ดังภาคผนวก ง</p>		

3. ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกระแสตรง ลักษณะไม่เหมือนกับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กกระแสลับ เพราะสนามแม่เหล็กกระแสตรง ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา เหมือนกระแสลับ ดังนั้นจึงไม่เกิดการเหนี่ยวนำบนวัตถุตัวนำ ค่าสนามแม่เหล็กที่คำนวณจากโปรแกรม MATLAB จึงถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นค่าที่เกิดจากทิศทางของกระแสในภาวะโหลดสูงสุดซึ่งไม่คำนึงถึงผลกระทบจากสนามแม่เหล็กโลก

7.1.3 ผลกระทบจากสนามไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ ที่เกิดขึ้นในรูปการเหนี่ยวนำ สามารถบอกได้ว่า ผลกระทบที่มีต่อวัตถุตัวนำขนาดใหญ่บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ จะเกิดจากสนามไฟฟ้าเป็นหลัก ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุเทียบกับกราวด์ พลังงานสะสมบนวัตถุตัวนำขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุ

ซึ่งก็จะเห็นได้จากการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง มีค่ามากกว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ($E_{HVDC} > E_{HVAC}$) แม้ในการวิเคราะห์ระดับแรงดันต่างกัน แต่ในการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ปรากฏว่าผลกระทบเมื่อพิจารณาในรูปของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมวัตถุกับกราวด์, พลังงานสะสมบนวัตถุตัวนำที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับมีความรุนแรงมากกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ซึ่งจากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้ากระแสตรง ผลที่เกิดขึ้นคือแตกต่างจากสนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับ ก็จะอยู่ในลักษณะที่ประจุสะสมบนวัตถุตัวนำ (Object Charging) โดยพิจารณาจากค่าความหนาแน่นของกระแส เมื่อดูผลของกระแสเหนี่ยวนำหรือกระแสชอตเซอร์กิตเมื่อไหลผ่านวัตถุลงกราวด์ พบว่าค่ากระแสเหนี่ยวนำซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันสูงกระแสสลับมีค่าอยู่ในระดับ มิลลิแอมป์ (mA) ส่วนกระแสเหนี่ยวนำซึ่งมาจากแรงดันสูงกระแสตรง มีค่าอยู่ในระดับ ไมโครแอมป์แอมป์ (uA) เมื่อพิจารณากับมนุษย์[3] เมื่ออยู่ในสนามไฟฟ้าทั้งสองพบว่า ค่ากระแสเหนี่ยวนำเริ่มต้นที่คนสามารถรู้สึกในส่วนกระแสสลับมีค่ามากกว่า 1 mA ในส่วนกระแสตรงต้องมีค่ามากกว่า 5 mA เมื่อพิจารณาศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัตถุกับกราวด์ ในส่วนของสนามไฟฟ้ากระแสสลับ เป็นฟังก์ชันของ อิมพีแดนซ์ (คาปาซิแตนซ์, ความต้านทาน) ระหว่างวัตถุกับกราวด์ ซึ่งในสนามไฟฟ้ากระแสตรง ศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัตถุกับกราวด์ เป็นฟังก์ชันของค่าความต้านทานเพียงอย่างเดียวซึ่งผลที่วิเคราะห์จากตัวอย่างที่แสดงในบทที่ 5 และผลจากการทดสอบพบว่า ศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัตถุกับกราวด์ ในสนามไฟฟ้ากระแสตรงมีค่าน้อยกว่าในสนามไฟฟ้ากระแสสลับ เมื่อพิจารณากับคน เมื่อไปสัมผัสกับวัตถุตัวนำ อาจจะได้รับอันตรายถ้า ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเป็นร้อยโวลท์ขึ้นไป [3]

7.1.4 สนามแม่เหล็ก

ไม่ได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากสนามแม่เหล็กในวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งผลจากสนามแม่เหล็กกระแสสลับจะทำให้เกิดกับแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับวัตถุตัวนำซึ่งแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันกับวัตถุรูปทรงยาวๆ เช่น ท่อแก๊ส ร้วเหล็ก และเมื่อพิจารณาผลกระทบทางด้านชีววิทยา เช่น คน สัตว์ พืช มีความเชื่อว่าความเข้มในระดับสูงที่เกิดจากสนามแม่เหล็กกระแสสลับมีผลต่อคน สัตว์ พืช ในส่วนสนามแม่เหล็กกระแสตรง [2] มีลักษณะคล้ายกับสนามแม่เหล็กโลก คือ มีทิศทางที่เกิดขึ้นเพียงทิศทางเดียว เมื่อนำเข็มทิศไปวางใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง มีผลต่อ

การอ่านเข็มทิศ ซึ่งสนามแม่เหล็กโลกอาจจะช่วยเสริมหรือช่วยลดสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงนั้นขึ้นอยู่กับทิศทางของการไหลกำลังไฟฟ้า (Power flow)

7.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง กระแสตรง และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ และวิเคราะห์ผลกระทบในรูปของสนามไฟฟ้าที่มีผลต่อวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสอง จึงขอเสนอแนวทางในพัฒนาและวิจัยเป็นหัวข้อดังนี้

1. วิเคราะห์ผลกระทบเปรียบเทียบผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีการส่งแบบไฮบริด ซึ่งการสร้างเส้นทางเดินสายส่งใหม่นั้น เป็นไปได้ยาก ทางเลือกหนึ่ง คือ นำระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ วางอยู่บนเสาสูงชุดเดียวกัน (Hybrid Tower) ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของความแรงสนามไฟฟ้าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ระดับพื้นดิน กระแสโคโรน่า การเปลี่ยนแปลงสิ่งต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นนี้อาจจะส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและการสูญเสียกำลังทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นเรื่องสำคัญที่ต้องทำการศึกษาและวิเคราะห์กันต่อไป
2. วิเคราะห์ผลของการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้ากระแสสลับกระทำต่อวัตถุตัวนำในรูปแบบต่าง ๆ
3. วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้า และ สนามแม่เหล็กในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงใต้ดิน (Underground Cable System)
4. วิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบส่งจำหน่ายไฟฟ้ากระแสตรง ในระบบขนส่งมวลชนซึ่งจะมีใช้งานในเมืองหลวงต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] Electric Power Research Institute. Transmission Line Reference Book 345 kV and Above. 2 nd Ed. California 1982.
- [2] Electric Power Research Institute. Transmission Line Reference Book HVDC To +-600 kV , Palo Alto, California.
- [3] Electric Power Research Institute. HVDC Transmission Line Reference Book. EPRI TR-102764 Project 2472-03 Final Report, Palo Alto, California, 1993.
- [4] พัทธ์ชัย ปิ่นอนงค์ . 2544 “การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดิน และกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] นุชิต ทิพย์เจริญ , พัทธ์ชัย ปิ่นอนงค์ , ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล “การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าระหว่างสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับบริเวณใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 26 , 2546.
- [6] พัทธ์ชัย ปิ่นอนงค์ , ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล “การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 กิโลโวลต์” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23 , 2543.
- [7] Eva A. Sebo, Stephen A. Sebo , Fellow , ”Public Reaction to Power Frequency Electric and Magnetic Field (EMF) Effects” IEEE Spectrum , April 1996, pp103-109.
- [9] IEEE Guide for the Measurement of DC Electric Field Strength and Ion Related Quantities, IEEE Std 1227-1990.
- [10] Gary B. Johnson “ Degree of Corona Saturation For HVDC Transmission Lines” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol5, No.2, April 1990.
- [12] P. J. Carter, G.B. Johnson “Space Charge Measurement Downwind From A Monopolar 500 kV HVDC Test Lines” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol3, No.4, October 1988.
- [13] Yuji Amano , Yoshitaka Sunaga “Study on Reduction in Electric Field , Charge Voltage Ion Current and Ion Density Under HVDC Transmission Lines By Parallel Shield Wires” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol4, No.2, April 1989.



ภาคผนวก ก
ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Corona and Field Effect
230 kV



|| CORONA AND FIELD ||
|| EFFECTS PROGRAM ||
|| Source: Bonneville Power Administration ||

+++++

+ INPUT DATA LIST +

+++++

+500 kV TRANSMISSION LINE

+PREDICTION OF 500 kV DL-TOWER

+ 0 0 6 8 525.0 1.00 1.00 .00

(METRIC UNITS OPTION)

LINE GRADIENTS COMPUTED BY PROGRAM

PHYSICAL SYSTEM CONSISTS OF 8 CONDUCTORS, OF WHICH 6 ARE ENERGIZED PHASES

+COMB XX XX XX XX XX XX XX

+ 1.500 2.000 3.000 .000 1.000 75.000 1.000 10.000 1.000

+ PH-A1 A -5.62 35.00 4 33.910 45.70 303.10 .0 4.50 .00

+ PH-B1 A -6.82 24.00 4 33.910 45.70 303.10 120.0 4.50 .00

+PH-C1 A -7.92 13.00 4 33.910 45.70 303.10 -120.0 4.50 .00

+PH-C2 A 5.62 35.00 4 33.910 45.70 303.10 -120.0 4.50 .00

+PH-B2 A 6.82 24.00 4 33.910 45.70 303.10 120.0 4.50 .00

+PH-A2 A 7.92 13.00 4 33.910 45.70 303.10 .0 4.50 .00

+OHG-1 A -4.70 49.76 1 9.144 .00 .00 .0 .00 .00

+OGH-2 A 4.70 49.79 1 9.144 .00 .00 .0 .00 .00

+ 41 -40.0 1.0

+ 40 1.0 1.0

+ 0 .0 .0

COMBINED OUTPUT OF AUDIBLE NOISE, RADIO NOISE, TVI, OZONE CONCENTRATION,
GROUND GRADIENT AND MAGNETIC FIELD

500 kV TRANSMISSION LINE

PREDICTION OF 500 kV DL-TOWER

525.0 KV

DIST. FROM CENTER OF TOWER (METERS)	MAXIMUM (METERS)	SUBCON (KV/CM)	NO. OF (MM)	SUBCON (CM)	VOLTAGE (KV)	PHASE (DEGREES)	CURRENT (KAMPS)	CORONA LOSSES (KW/KM)
---	---------------------	-------------------	----------------	----------------	-----------------	--------------------	--------------------	-----------------------------

PH-A1	-5.62	35.00	13.80	33.91	4.00	45.70	303.10	.00	4.500	1.828
PH-B1	-6.82	24.00	13.09	33.91	4.00	45.70	303.10	120.00	4.500	1.301
PH-C1	-7.92	13.00	13.60	33.91	4.00	45.70	303.10	-120.00	4.500	1.667
PH-C2	5.62	35.00	13.79	33.91	4.00	45.70	303.10	-120.00	4.500	1.828
PH-B2	6.82	24.00	13.09	33.91	4.00	45.70	303.10	120.00	4.500	1.301
PH-A2	7.92	13.00	13.60	33.91	4.00	45.70	303.10	.00	4.500	1.667
OHG-1	-4.70	49.76	6.39	9.14	1.00	.00	.00	.00	.000	.000
OGH-2	4.70	49.79	6.37	9.14	1.00	.00	.00	.00	.000	.000

AN MICROPHONE HT.= 1.5 M, RI ANT. HT.= 2.0 M, TV ANT. HT.= 3.0 M, ALTITUDE= .0 M
RI FREQ= 1.000 MHZ, TV FREQ= 75.000 MHZ, WIND VEL.(OZ)=1.000 M/SEC, GROUND
CONDUCTIVITY = 10.0 MMHOS /M
E-FIELD TRANSDUCER HT.= 1.0M, B-FIELD TRANSDUCER HT. = 1.0M

LATERAL DIST FROM	AUDIBLE NOISE (RAIN)	AUDIBLE NOISE (FAIR)	RADIO INTERFERENCE (RAIN)	RADIO INTERFERENCE (FAIR)	TOTAL	TVI FOR RAIN RATE OF	OZONE ELECTRIC GRADIENT	MAGNETIC FIELD
REFERENCE (METERS)	L50 DBA	L50 DBA	L50 DBUV/M	L50 DBUV/M	RAIN DBUV/M	1.00 MM/HR AT 0. M LEVEL PPB	KV/M	GAUSS
-40.0	41.3	16.3	47.4	30.4	7.6	.000000	.199	.05620
-39.0	41.4	16.4	47.6	30.6	7.9	.000000	.233	.05944
-38.0	41.5	16.5	47.7	30.7	8.2	.000000	.271	.06292
-37.0	41.6	16.6	47.9	30.9	8.4	.000000	.314	.06667
-36.0	41.7	16.7	48.2	31.2	8.7	.000000	.362	.07072
-35.0	41.8	16.8	48.4	31.4	9.0	.000000	.417	.07509
-34.0	41.9	16.9	48.6	31.6	9.2	.000000	.479	.07982

-33.0	42.0	17.0	48.8	31.8	9.5	.000000	.549	.08494
-32.0	42.1	17.1	49.0	32.0	9.8	.000000	.628	.09048
-31.0	42.2	17.2	49.2	32.2	10.2	.000000	.718	.09650
-30.0	42.3	17.3	49.4	32.4	10.5	.000000	.820	.10303
-29.0	42.5	17.5	49.6	32.6	10.8	.000000	.935	.11013
-28.0	42.6	17.6	49.7	32.7	11.2	.000000	1.065	.11786
-27.0	42.7	17.7	49.9	32.9	11.5	.000000	1.212	.12628
-26.0	42.8	17.8	50.1	33.1	11.9	.000000	1.378	.13545
-25.0	42.9	17.9	50.5	33.5	12.2	.000000	1.565	.14546
-24.0	43.1	18.1	51.2	34.2	12.6	.000000	1.776	.15637
-23.0	43.2	18.2	51.9	34.9	13.0	.000000	2.013	.16826
-22.0	43.3	18.3	52.6	35.6	13.4	.000000	2.278	.18121
-21.0	43.5	18.5	53.3	36.3	13.8	.000000	2.572	.19531
-20.0	43.6	18.6	54.1	37.1	14.3	.000000	2.897	.21061
-19.0	43.7	18.7	54.8	37.8	14.7	.000000	3.252	.22718
-18.0	43.9	18.9	55.6	38.6	15.1	.000000	3.636	.24503
-17.0	44.0	19.0	56.3	39.3	15.6	.000000	4.044	.26417
-16.0	44.1	19.1	57.1	40.1	16.0	.000000	4.469	.28454
-15.0	44.3	19.3	57.8	40.8	16.4	.000000	4.900	.30599
-14.0	44.4	19.4	58.5	41.5	16.8	.000000	5.322	.32833
-13.0	44.5	19.5	59.1	42.1	17.2	.000000	5.715	.35126
-12.0	44.6	19.6	59.6	42.6	17.5	.000000	6.056	.37436
-11.0	44.7	19.7	60.1	43.1	17.8	.000000	6.318	.39715
-10.0	44.8	19.8	60.4	43.4	18.0	.000000	6.477	.41911
-9.0	44.9	19.9	60.6	43.6	18.1	.000000	6.512	.43967
-8.0	45.0	20.0	60.7	43.7	18.2	.000000	6.407	.45835
-7.0	45.0	20.0	60.6	43.6	18.1	.000000	6.158	.47477
-6.0	45.1	20.1	60.4	43.4	18.0	.000000	5.773	.48869
-5.0	45.1	20.1	60.1	43.1	17.8	.000000	5.271	.50006
-4.0	45.1	20.1	59.7	42.7	17.6	.000010	4.685	.50894
-3.0	45.1	20.1	59.2	42.2	17.2	.000131	4.061	.51552
-2.0	45.1	20.1	58.6	41.6	16.9	.000534	3.466	.52000
-1.0	45.1	20.1	57.9	40.9	16.5	.001251	3.001	.52260
.0	45.1	20.1	57.2	40.2	16.1	.002162	2.814	.52345
1.0	45.1	20.1	57.9	40.9	16.5	.003121	3.001	.52260
2.0	45.1	20.1	58.6	41.6	16.9	.004029	3.466	.52000
3.0	45.1	20.1	59.2	42.2	17.2	.004840	4.061	.51552

4.0	45.1	20.1	59.7	42.7	17.6	.005542	4.685	.50894
5.0	45.1	20.1	60.1	43.1	17.8	.006144	5.271	.50006
6.0	45.1	20.1	60.4	43.4	18.0	.006661	5.773	.48869
7.0	45.0	20.0	60.6	43.6	18.1	.007105	6.158	.47477
8.0	45.0	20.0	60.7	43.7	18.2	.007491	6.407	.45835
9.0	44.9	19.9	60.6	43.6	18.1	.007829	6.512	.43967
10.0	44.8	19.8	60.4	43.4	18.0	.008127	6.477	.41911
11.0	44.7	19.7	60.1	43.1	17.8	.008392	6.318	.39715
12.0	44.6	19.6	59.6	42.6	17.5	.008648	6.055	.37436
13.0	44.5	19.5	59.1	42.1	17.2	.009021	5.715	.35126
14.0	44.4	19.4	58.5	41.5	16.8	.009677	5.322	.32833
15.0	44.3	19.3	57.8	40.8	16.4	.010622	4.900	.30599
16.0	44.1	19.1	57.1	40.1	16.0	.011729	4.469	.28454
17.0	44.0	19.0	56.3	39.3	15.6	.012869	4.044	.26417
18.0	43.9	18.9	55.6	38.6	15.1	.013953	3.636	.24504
19.0	43.7	18.7	54.8	37.8	14.7	.014942	3.252	.22718
20.0	43.6	18.6	54.1	37.1	14.3	.015822	2.897	.21061
21.0	43.5	18.5	53.3	36.3	13.8	.016599	2.572	.19531
22.0	43.3	18.3	52.6	35.6	13.4	.017282	2.278	.18121
23.0	43.2	18.2	51.9	34.9	13.0	.017881	2.013	.16826
24.0	43.1	18.1	51.2	34.2	12.6	.018409	1.776	.15637
25.0	42.9	17.9	50.5	33.5	12.2	.018875	1.565	.14546
26.0	42.8	17.8	50.1	33.1	11.9	.019287	1.378	.13545
27.0	42.7	17.7	49.9	32.9	11.5	.019652	1.212	.12628
28.0	42.6	17.6	49.7	32.7	11.2	.019975	1.064	.11786
29.0	42.5	17.5	49.6	32.6	10.8	.020261	.934	.11013
30.0	42.3	17.3	49.4	32.4	10.5	.020513	.820	.10303
31.0	42.2	17.2	49.2	32.2	10.2	.020734	.718	.09650
32.0	42.1	17.1	49.0	32.0	9.8	.020927	.628	.09048
33.0	42.0	17.0	48.8	31.8	9.5	.021093	.549	.08494
34.0	41.9	16.9	48.6	31.6	9.3	.021235	.479	.07982
35.0	41.8	16.8	48.4	31.4	9.0	.021355	.417	.07509
36.0	41.7	16.7	48.1	31.1	8.7	.021453	.362	.07072
37.0	41.6	16.6	47.9	30.9	8.4	.021532	.314	.06667
38.0	41.5	16.5	47.7	30.7	8.2	.021593	.271	.06292
39.0	41.4	16.4	47.5	30.5	7.9	.021637	.233	.05944
40.0	41.3	16.3	47.4	30.4	7.6	.021665	.199	.05620



	CORONA AND FIELD	
	EFFECTS PROGRAM	
	Source: Bonneville Power Administration	

+++++

+ INPUT DATA LIST +

+++++

+230 kV TRANSMISSION LINE

+PREDICTION OF 230 kV WA1-TOWER

+ 0 0 6 8 241.5 1.00 1.00 .00

(METRIC UNITS OPTION)

LINE GRADIENTS COMPUTED BY PROGRAM

PHYSICAL SYSTEM CONSISTS OF 8 CONDUCTORS, OF WHICH 6 ARE ENERGIZED PHASES

+COMB XX XX XX XX XX XX XX

+ 1.500 2.000 3.000 .000 1.000 75.000 1.000 10.000 1.000

+ PH-A1 A -4.67 20.80 2 33.910 40.00 139.43 .0 2.25 .00

+ PH-B1 A -4.78 14.60 2 33.910 40.00 139.43 120.0 2.25 .00

+PH-C1 A -5.10 8.40 2 33.910 40.00 139.43 -120.0 2.25 .00

+PH-C2 A 4.67 20.80 2 33.910 40.00 139.43 -120.0 2.25 .00

+PH-B2 A 4.78 14.60 2 33.910 40.00 139.43 120.0 2.25 .00

+PH-A2 A 5.10 8.40 2 33.910 40.00 139.43 .0 2.25 .00

+OHG-1 A -4.30 33.37 1 9.144 .00 .00 .0 .00 .00

+OHG-2 A 4.30 33.37 1 9.144 .00 .00 .0 .00 .00

+ 41 -40.0 1.0

+ 40 1.0 1.0

+ 0 .0 .0

COMBINED OUTPUT OF AUDIBLE NOISE, RADIO NOISE, TVI, OZONE CONCENTRATION,
 GROUND GRADIENT AND MAGNETIC FIELD

230 kV TRANSMISSION LINE
 PREDICTION OF 230 kV WAI-TOWER

241.5 KV

DIST. FROM CENTER OF TOWER (METERS)	MAXIMUM HEIGHT (METERS)	SUBCON GRADIENT (KV/CM)	NO. OF SUBCON DIAM. (MM)	NO. OF SUBCON (CM)	SUBCON VOLTAGE (KV)	PHASE SPACING (DEGREES)	CURRENT L-N ANGLE (KAMPS)	CORONA LOSSES (KW/KM)
-------------------------------------	-------------------------	-------------------------	--------------------------	--------------------	---------------------	-------------------------	---------------------------	-----------------------

PH-A1	-4.67	20.80	10.29	33.91	2.00	40.00	139.43	.00	2.250	.111
PH-B1	-4.78	14.60	10.39	33.91	2.00	40.00	139.43	120.00	2.250	.118
PH-C1	-5.10	8.40	10.46	33.91	2.00	40.00	139.43	-120.00	2.250	.123
PH-C2	4.67	20.80	10.29	33.91	2.00	40.00	139.43	-120.00	2.250	.111
PH-B2	4.78	14.60	10.39	33.91	2.00	40.00	139.43	120.00	2.250	.118
PH-A2	5.10	8.40	10.46	33.91	2.00	40.00	139.43	.00	2.250	.123
OHG-1	-4.30	33.37	2.04	9.14	1.00	.00	.00	.00	.000	.000
OGH-2	4.30	33.37	2.04	9.14	1.00	.00	.00	.00	.000	.000

AN MICROPHONE HT.= 1.5 M, RI ANT. HT.= 2.0 M, TV ANT. HT.= 3.0 M, ALTITUDE= .0 M
 RI FREQ= 1.000 MHZ, TV FREQ= 75.000 MHZ, WIND VEL.(OZ)= 1.000 M/SEC, GROUND CONDUCTIVITY = 10.0 MMHOS /M
 E-FIELD TRANSDUCER HT.= 1.0M, B-FIELD TRANSDUCER HT. = 1.0M

LATERAL DIST FROM REFERENCE (METERS)	AUDIBLE NOISE		RADIO INTERFERENCE			TVI	OZONE	ELECTRIC GRADIENT (KV/M)	MAGNETIC FIELD (GAUSS)
	(RAIN)	(FAIR)	(RAIN)	(FAIR)	TOTAL	FOR RAIN RATE OF 1.00 MM/HR AT 0. M LEVEL	PPB		
-40.0	25.1	.1	29.9	12.9	-6.5	.000000	.067	.01309	
-39.0	25.2	.2	30.2	13.2	-6.2	.000000	.067	.01399	
-38.0	25.3	.3	30.5	13.5	-6.0	.000000	.068	.01498	
-37.0	25.4	.4	30.9	13.9	-5.7	.000000	.068	.01607	
-36.0	25.5	.5	31.2	14.2	-5.4	.000000	.067	.01726	
-35.0	25.7	.7	31.5	14.5	-5.2	.000000	.066	.01856	
-34.0	25.8	.8	31.9	14.9	-4.9	.000000	.064	.02000	
-33.0	25.9	.9	32.2	15.2	-4.6	.000000	.061	.02158	
-32.0	26.1	1.1	32.6	15.6	-4.3	.000000	.056	.02333	
-31.0	26.2	1.2	32.9	15.9	-4.0	.000000	.051	.02527	

-30.0	26.3	1.3	33.3	16.3	-3.6	.000000	.044	.02741
-29.0	26.5	1.5	33.7	16.7	-3.3	.000000	.035	.02980
-28.0	26.6	1.6	34.1	17.1	-2.9	.000000	.025	.03246
-27.0	26.8	1.8	34.5	17.5	-2.6	.000000	.019	.03543
-26.0	26.9	1.9	34.9	17.9	-2.2	.000000	.031	.03876
-25.0	27.1	2.1	35.3	18.3	-1.8	.000000	.054	.04249
-24.0	27.3	2.3	35.7	18.7	-1.4	.000000	.085	.04669
-23.0	27.4	2.4	36.1	19.1	-.9	.000000	.125	.05143
-22.0	27.6	2.6	36.7	19.7	-.5	.000000	.175	.05680
-21.0	27.8	2.8	37.3	20.3	.0	.000000	.237	.06289
-20.0	28.0	3.0	38.0	21.0	.5	.000000	.314	.06981
-19.0	28.2	3.2	38.6	21.6	1.0	.000000	.409	.07771
-18.0	28.4	3.4	39.2	22.2	1.6	.000000	.525	.08675
-17.0	28.6	3.6	39.9	22.9	2.2	.000000	.668	.09709
-16.0	28.8	3.8	40.9	23.9	2.8	.000000	.842	.10897
-15.0	29.0	4.0	42.1	25.1	3.5	.000000	1.052	.12260
-14.0	29.2	4.2	43.3	26.3	4.1	.000000	1.304	.13825
-13.0	29.5	4.5	44.6	27.6	4.9	.000000	1.603	.15614
-12.0	29.7	4.7	45.9	28.9	5.6	.000000	1.950	.17650
-11.0	29.9	4.9	47.2	30.2	6.4	.000000	2.339	.19942
-10.0	30.2	5.2	48.5	31.5	7.2	.000000	2.759	.22481
-9.0	30.4	5.4	49.8	32.8	8.0	.000000	3.180	.25223
-8.0	30.6	5.6	50.9	33.9	8.7	.000000	3.560	.28083
-7.0	30.8	5.8	51.8	34.8	9.3	.000000	3.842	.30924
-6.0	30.9	5.9	52.3	35.3	9.7	.000000	3.964	.33575
-5.0	31.0	6.0	52.5	35.5	9.8	.000000	3.883	.35868
-4.0	31.1	6.1	52.2	35.2	9.7	.000000	3.584	.37683
-3.0	31.1	6.1	51.6	34.6	9.2	.000001	3.098	.38988
-2.0	31.1	6.1	50.7	33.7	8.6	.000081	2.498	.39825
-1.0	31.2	6.2	49.5	32.5	7.9	.000434	1.899	.40278
.0	31.2	6.2	48.3	31.3	7.1	.000953	1.564	.40419
1.0	31.2	6.2	49.5	32.5	7.9	.001458	1.899	.40278
2.0	31.1	6.1	50.7	33.7	8.6	.001889	2.498	.39825
3.0	31.1	6.1	51.6	34.6	9.2	.002247	3.098	.38988
4.0	31.1	6.1	52.2	35.2	9.7	.002547	3.584	.37683
5.0	31.0	6.0	52.5	35.5	9.8	.002799	3.883	.35868
6.0	30.9	5.9	52.3	35.3	9.7	.003011	3.964	.33575

7.0	30.8	5.8	51.8	34.8	9.3	.003191	3.842	.30924
8.0	30.6	5.6	50.9	33.9	8.7	.003387	3.560	.28083
9.0	30.4	5.4	49.8	32.8	8.0	.003808	3.180	.25223
10.0	30.2	5.2	48.5	31.5	7.2	.004420	2.759	.22481
11.0	29.9	4.9	47.2	30.2	6.4	.005037	2.339	.19942
12.0	29.7	4.7	45.9	28.9	5.6	.005574	1.950	.17650
13.0	29.5	4.5	44.6	27.6	4.9	.006017	1.603	.15614
14.0	29.2	4.2	43.3	26.3	4.1	.006377	1.304	.13825
15.0	29.0	4.0	42.1	25.1	3.5	.006667	1.052	.12260
16.0	28.8	3.8	40.9	23.9	2.8	.006899	.842	.10897
17.0	28.6	3.6	39.9	22.9	2.2	.007082	.668	.09709
18.0	28.4	3.4	39.2	22.2	1.6	.007223	.525	.08675
19.0	28.2	3.2	38.6	21.6	1.0	.007328	.409	.07771
20.0	28.0	3.0	38.0	21.0	.5	.007402	.314	.06981
21.0	27.8	2.8	37.3	20.3	.0	.007449	.237	.06289
22.0	27.6	2.6	36.7	19.7	-.5	.007474	.175	.05680
23.0	27.4	2.4	36.1	19.1	-.9	.007479	.125	.05143
24.0	27.3	2.3	35.7	18.7	-1.4	.007467	.085	.04669
25.0	27.1	2.1	35.3	18.3	-1.8	.007442	.054	.04249
26.0	26.9	1.9	34.9	17.9	-2.2	.007404	.031	.03876
27.0	26.8	1.8	34.5	17.5	-2.6	.007357	.019	.03543
28.0	26.6	1.6	34.1	17.1	-2.9	.007302	.025	.03246
29.0	26.5	1.5	33.7	16.7	-3.3	.007240	.035	.02980
30.0	26.3	1.3	33.3	16.3	-3.6	.007173	.044	.02741
31.0	26.2	1.2	32.9	15.9	-4.0	.007102	.051	.02527
32.0	26.1	1.1	32.6	15.6	-4.3	.007027	.056	.02333
33.0	25.9	.9	32.2	15.2	-4.6	.006950	.061	.02158
34.0	25.8	.8	31.9	14.9	-4.9	.006872	.064	.02000
35.0	25.7	.7	31.5	14.5	-5.2	.006792	.066	.01856
36.0	25.5	.5	31.2	14.2	-5.4	.006711	.067	.01726
37.0	25.4	.4	30.9	13.9	-5.7	.006630	.068	.01607
38.0	25.3	.3	30.5	13.5	-6.0	.006548	.068	.01498
39.0	25.2	.2	30.2	13.2	-6.2	.006467	.067	.01399
40.0	25.1	.1	29.9	12.9	-6.5	.006387	.067	.01309

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรม Corona and Field Effect

230 kV



R.O.W.	MAGNETIC FIELD			
	SINGLE CIRCUIT		DOUBLE CIRCUIT	
	คำนวณ	การวัด	คำนวณ	การวัด
-35	17.19678	7.16	9.8456	
-34	18.16388	7.05	10.46527	
-33	19.21002	7.26	11.13605	
-32	20.34315	7.34	11.86297	
-31	21.57201	7.43	12.65164	
-30	22.90623	9.1	13.50821	11.84
-29	24.35627	9.82	14.43949	12.26
-28	25.93346	11.04	15.45294	13.66
-27	27.64991	12.04	16.5567	14.09
-26	29.51831	12.6	17.75962	14.6
-25	31.55167	13.1	19.07115	14.8
-24	33.76283	13.6	20.5013	15.4
-23	36.16372	14.4	22.06046	16.2
-22	38.76436	15.1	23.75904	16.4
-21	41.5714	15.6	25.60711	17.6
-20	44.58624	16.2	27.61363	19.2
-19	47.80267	17	29.78561	19
-18	51.20416	18.6	32.1268	20.2
-17	54.76102	19.3	34.63612	20.2
-16	58.42802	20.4	37.30573	21.4
-15	62.14304	21.8	40.11894	22.2
-14	65.82789	22	43.0482	23
-13	69.39196	23.5	46.05356	23.6
-12	72.73897	24	49.08247	25.2
-11	75.77627	25.1	52.07129	26.2
-10	78.42508	25.6	54.94936	28.2
-9	80.62932	26.4	57.64526	29.4
-8	82.36119	27.2	60.09453	29.6

R.O.W.	MAGNETIC FIELD			
	SINGLE CIRCUIT		DOUBLE CIRCUIT	
	คำนวณ	การวัด	คำนวณ	การวัด
-7	83.62287	28.2	62.24722	31
-6	84.44499	29.1	64.07314	31.4
-5	84.88372	29.8	65.56347	32.6
-4	85.0178	30.8	66.7282	33.2
-3	84.94514	31	67.5903	34.2
-2	84.77611	31	68.17827	34.8
-1	84.61902	31.2	68.51862	34.6
0	84.55625	31.2	68.62986	35.6
1	84.61902	31.2	68.51862	35.2
2	84.77611	30.8	68.17827	35
3	84.94514	30.2	67.5903	34.8
4	85.0178	29.6	66.7282	34
5	84.88372	28.6	65.56347	34.4
6	84.44499	28.1	64.07314	32.6
7	83.62287	27.6	62.24722	30.8
8	82.36119	27	60.09453	31.6
9	80.62932	26.5	57.64526	30.4
10	78.42508	25.8	54.94936	30.6
11	75.77627	24.2	52.07129	29.2
12	72.73897	23.4	49.08247	28
13	69.39196	21.4	46.05356	27.8
14	65.82789	20.9	43.0482	26
15	62.14304	20.1	40.11894	26.4
16	58.42802	19.8	37.30573	26.2
17	54.76102	18.2	34.63612	24.6
18	51.20416	17	32.1268	25.2
19	47.80267	16.5	29.78561	24.6
20	44.58624	15.4	27.61363	23.6

R.O.W	MAGNETIC FIELD			
	SINGLE CIRCUIT		DOUBLE CIRCUIT	
	คำนวณ	การวัด	คำนวณ	การวัด
21	41.5714	14.4	25.60711	22.8
22	38.76436	13.2	23.75904	21.8
23	36.16372	12	22.06046	20.8
24	33.76283	12.2	20.5013	18.6
25	31.55167	11.2	19.07115	17.4
26	29.51831	10.2	17.75962	16
27	27.64991	9.6	16.5567	15.4
28	25.93346	9.2	15.45294	14.2
29	24.35627	8.76	14.43949	12.4
30	22.90623	8.18	13.50821	12.2
31	21.57201	7.81	12.65164	
32	20.34315	7.36	11.86297	
33	19.21002	7.23	11.13605	
34	18.16388	7.19	10.46527	
35	17.19678	7.03	9.8456	

R.O.W.	ELECTRIC FIELD			
	SINGLE CIRCUIT		DOUBLE CIRCUIT	
	คำนวณ	การวัด	คำนวณ	การวัด
-35	1.33551	0.78		
-34	1.44571	0.8		
-33	1.56728	0.82		
-32	1.70148	0.85		
-31	1.8497	1.1		
-30	2.01341	1.3	0.79118	1.83
-29	2.19421	1.4	0.90096	1.89
-28	2.39371	1.7	1.02516	2.09
-27	2.61353	1.9	1.1656	2.32
-26	2.85519	2.15	1.32425	2.49
-25	3.11999	2.45	1.50323	2.51
-24	3.40878	2.57	1.70471	2.77
-23	3.72172	2.89	1.93084	3.11
-22	4.05792	2.96	2.18362	3.13
-21	4.41501	3.15	2.46463	3.43
-20	4.78855	3.26	2.77482	3.45
-19	5.17148	3.45	3.11401	3.79
-18	5.55353	3.57	3.48041	4.15
-17	5.92084	3.79	3.86998	4.17
-16	6.25593	3.98	4.27577	4.51
-15	6.53829	4.15	4.68719	4.81
-14	6.74589	4.28	5.08956	4.85
-13	6.85765	4.74	5.46405	5.03
-12	6.85678	4.98	5.78822	5.06
-11	6.73455	5.13	6.03755	5.32
-10	6.49385	5.26	6.18781	5.23
-9	6.15163	5.19	6.21826	5.3
-8	5.7398	4.85	6.11489	5.09

R.O.W.	ELECTRIC FIELD			
	SINGLE CIRCUIT		DOUBLE CIRCUIT	
	คำนวณ	การวัด	คำนวณ	การวัด
-7	5.30388	4.34	5.87332	4.83
-6	4.89855	3.74	5.50044	4.81
-5	4.57746	3.56	5.015	4.45
-4	4.3756	3.48	4.4478	4.43
-3	4.29149	3.68	3.84297	4.04
-2	4.28744	3.72	3.2637	3.6
-1	4.31202	3.72	2.80748	3.32
0	4.32511	3.82	2.62231	3.23
1	4.31202	3.69	2.80748	3.26
2	4.28744	3.71	3.2637	3.32
3	4.29149	3.68	3.84297	3.45
4	4.3756	3.48	4.4478	3.72
5	4.57746	3.56	5.015	4.13
6	4.89855	3.89	5.50044	4.17
7	5.30388	4.23	5.87332	4.53
8	5.7398	4.85	6.11489	4.55
9	6.15163	5.19	6.21826	4.91
10	6.49385	5.3	6.18781	5.21
11	6.73455	5.24	6.03755	5.36
12	6.85678	5.12	5.78822	5.36
13	6.85765	5.06	5.46405	5.28
14	6.74589	4.98	5.08956	5.3
15	6.53829	4.85	4.68719	5.06
16	6.25593	4.83	4.27577	5.11
17	5.92084	4.76	3.86998	4.79
18	5.55353	4.27	3.48041	4.81
19	5.17148	4.15	3.11401	4.49
20	4.78855	3.89	2.77482	4.45

R.O.W	ELECTRIC FIELD			
	SINGLE CIRCUIT		DOUBLE CIRCUIT	
	คำนวณ	การวัด	คำนวณ	การวัด
21	4.41501	3.69	2.46463	4.17
22	4.05792	3.59	2.18362	4.11
23	3.72172	3.46	1.93084	3.77
24	3.40878	3.36	1.70471	3.59
25	3.11999	3.23	1.50323	3.43
26	2.85519	2.95	1.32425	3.04
27	2.61353	2.56	1.1656	2.72
28	2.39371	2.35	1.02516	2.45
29	2.19421	2.1	0.90096	2.13
30	2.01341	1.96	0.79118	1.98
31	1.8497	1.7		
32	1.70148	1.45		
33	1.56728	1.12		
34	1.44571	0.83		
35	1.33551	0.81		

ภาคผนวก ง

**EPRI COMMENTS ON THE IEEE STANDARD FOR SAFETY LEVELS
WITH RESPECT TO ELECTROMAGNETIC FIELDS, 0 TO 3 kHz (2002)**



EPRI Comments on the IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 to 3 kHz (2002)

The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) recently published a standard for human exposure to electric and magnetic fields in the frequency range of 0 to 3 kilohertz (kHz).¹ This standard was developed over several years by Subcommittee III of the IEEE Standards Coordinating Committee 28 (SCC-28), now known as the IEEE International Committee on Electromagnetic Safety (ICES).

The IEEE Standard is founded upon a careful examination of the current understanding of biological effects of electrostimulation. The Standard explains the extrapolation from internal dose to external exposure and characterizes the uncertainties associated with this process in detail. The resulting standard is a detailed and complex document with discussions of neurophysiological processes.

Other organizations that have developed guidelines for electric and magnetic exposures in this frequency range are the American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), through its Threshold Limit Values (TLVs[®]); the National Radiological Protection Board (NRPB) in the United Kingdom;³ and the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) and affiliate of the World Health Organization (WHO).

Description of the Standard

GENERAL Approach

Scope

The IEEE Standard recommends limits on exposures to magnetic fields, electric fields, contact currents in the frequency range of 0 to 3000 hertz (Hz). Exposure limits are derived for both controlled (occupational) and uncontrolled (publicly accessible) environments, for uniform and nonuniform fields, whole and extremity exposures; and for pulsed fields and multiple-frequency exposures. This commentary does not cover the last two factors.

The ICES states that the limits are intended to protect against the following adverse short-term effects:

- Aversive or painful stimulation of sensory or motor neurons
- Muscle excitation that may lead to injury while performing hazardous activities
- Excitation of neurons or direct alteration of synaptic activity within the brain
- Cardiac excitation
- adverse effects associated with induced potentials or forces rapidly moving ions with the body, such as blood flow

Potential chronic effects associated with long-term exposure are not considered, the ICES states, for two reasons: (1) there is not sufficient reliable evidence that community or occupational exposures cause adverse chronic effects, such as cancer, and (2) there is no confirmed mechanism that would provide a basis for predicting long-term effects.

Basic Restrictions and Maximum Permissible Exposures

For effects involving a known internal mechanism of field interaction, limits for acceptable exposures are derived from a *basic restriction* for an internal body dose below which no adverse effects occur in humans. Given the basic restriction, physical and biological models are used to estimate exposure limits for external fields. Exposure limits, referred to in this standard as *maximum permissible exposures* (MPE) and in other guidelines as *reference levels*, represents the fields level below which the basic restriction will not be exceeded.

IEEE Standard for Exposure to Electromagnetic Fields

However, exposures above the MPE may or may not cause the basic restriction to be exceeded. Thus, the basic restriction is the ultimate determinant as to whether the standard is exceeded.

When an internal mechanism is not known or quantified for an effect, exposure limits are derived from external field and current levels known to cause adverse reactions, as in the case of aversive spark discharges during electric field exposure. In such cases, the MPE level is derived directly from data on empirical effects and no basic restriction applies.

Adverse Effects and Mechanisms

In establishing basic restrictions for electric and magnetic field exposures, the IEEE Standard assumes that the *in situ* electric field is the fundamental electric parameter responsible for electrostimulation effects. This assumption is based on a contemporary understanding of neurophysiological effects. It allows for a more accurate derivation of MPE levels than does the previously relied-upon assumption that internal current density is the relevant parameter.⁴

Magnetic field exposure limits are extrapolated from permissible *in situ* electric field doses using simple elliptical induction models. Electric field and contact current limits are derived directly from data on sensory responses to external fields and currents.

Threshold Multipliers

For both occupational and general-public exposures, conservative assumptions are employed to ensure that limits are based on excitation thresholds below those of the vast majority (> 99 percent) of healthy adults. To derive limits, threshold multipliers (*safety factors*) are applied to empirical data. These multipliers account for overly sensitive individuals, including children, and for uncertainties in both the determination of adverse-effect thresholds and the extrapolation from internal dose quantities to external exposure levels. The response thresholds used in deriving limits for the general public are generally lower than those for controlled environments.

Magnetic Fields

Basic Restrictions

The IEEE Standard links the *in situ* electric field to effects in specific excitable tissues in the brain, heart, and peripheral nerves. The basic restriction on the electric field in the body varies by anatomical location and frequency, and is different for individuals in controlled environments than for the general public. The effect with the lowest exposure threshold for a given location in the body and a given frequency determines the MPE level for that exposure.

For example, 60-Hz head and torso MPE levels are determined by the basic restriction derived from the threshold for synaptic excitation in the brain; 60-Hz MPE levels for limbs are determined by the basic restriction for peripheral nerve (20-micrometer neuron) pain. Above 759 Hz, the MPE levels for the head and torso are determined by the basic restriction for peripheral nerve stimulation in the torso. At very low frequencies (< 0.153 Hz for head and torso; < 10.7 Hz for extremities), adverse effects associated with induced potentials and forces on rapidly moving charges in the body determine MPE levels.

Maximum Permissible Exposures

MPE levels for magnetic field exposures are given in Table 1 as a function of frequency. The whole-body (head and torso) MPE level for uniform 60-Hz magnetic fields in a controlled environment is 2.71 millitesla (mT) or 27.1 gauss (G). For arms and legs, the occupational MPE level at 60 Hz increases to 63.2 mT (632 G). Whole-body MPE levels for the general public are lower by a factor of three than those for controlled environments. Exposures above these levels require evaluation to determine compliance with the basic restriction.

Table 1. IEEE uniform magnetic field maximum permissible exposure levels ¹

Frequency, Hz	Exposure Limit, mT			
	Controlled Environment ^a		General Public ^a	
	Head and torso	Limbs	Head and torso	Limbs
< 0.153	353		118	
0.153–20	54.3/f			
20–759	2.71		0.904	
759–3350	2061/f		687/f	
< 10.7	353		353	
10.7–3350	3790/f		3790/f	

^a For nonuniform fields, limits apply to the maximum field on the body

IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers; Hz, hertz; mT, millitesla; f, frequency in hertz

Nonuniform Fields

The IEEE Standard MPE levels are given in terms of uniform, single-phase fields over the body or a portion of the body. For nonuniform fields, the standard specifies that the maximum field on the body is to be compared with the MPE level. Most realistic magnetic field exposures at fields near guideline levels are not uniform. Comparing the highest measured field over the body with the MPE levels for uniform fields may be overly conservative; that is, exposure in measured fields that exceed MPE limits may not exceed the basic restriction. Evaluation of nonuniform magnetic field exposures can determine whether the basic restriction on the *in situ* electric field is in fact exceeded for such exposures. ⁵

Electric Fields

Basic Restrictions

For electric field exposure, the thresholds for sensing contact currents and spark discharges and perceiving the field occur at much lower electric field levels than do the thresholds for direct electrostimulation. Thus, the MPE levels for electric field exposures are determined by sensory responses to external conditions rather than by an internal response to induced electric fields.

The short-term effects that electric field limits seek to avoid are annoying field perception, painful spark discharges, and aversive or painful contact currents. The currents and spark discharges can occur when an ungrounded person standing in an electric field touches a conductive path to ground. Field perception is enhanced when a person situated in an electric field is also well grounded.

Empirical data are available for the external conditions under which aversive shocks from spark discharges and contact currents and annoying field perception take place. ^{6, 7, 8} The MPE levels for electric field exposure at 60 Hz are derived directly from the external field levels below which spark discharges are not aversive. These conditions apply to a person standing upright in a uniform, vertical field. Above 282 Hz for controlled environments, and above 368 Hz for general-public environments, the contact current MPE levels are the basis for setting MPE levels for electric fields.

In controlled environments, spark discharges can be mitigated through the use of appropriate work clothing, grounding measures, and other work practices, allowing the MPE level to be increased to 20 kilovolts per meter (kV/m). At this level, however, field perception is also a consideration: 50 percent of standing adults perceive the field, and about 5 percent experience annoying sensations on the body caused by hair vibration. The 20-kV/m limit can be exceeded in controlled environments if no ground is within reach.

Maximum Permissible Exposures

MPE levels for whole-body electric field exposure are given in Table 2 as a function of frequency. The MPE level for 60-Hz uniform electric field exposure in a controlled environment is 20 kV/m. The MPE level for the general public is 5 kV/m, except on transmission line rights-of-way, where the limit is 10 kV/m.

Table 2. IEEE uniform electric field maximum permissible exposure levels ¹

Frequency, Hz	Exposure Limit, kV/m	
	Controlled Environment ^a	General Public ^a
< 1	≥ 20 ^c	≥ 5 ^c
1–272 [368] ^d	20	5 ^b
272 [368] ^d –3000	5440/f	1840/f
> 3000	1.813	0.614

^a For nonuniform fields, limits apply to the average field over the body

^b On power line rights-of-way, the recommended limit is 10 kV/m

^c Limits below 1 Hz are not less than those at 1 Hz

^d 272 Hz for controlled environment; 368 Hz for general public

IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers; Hz, hertz; kV/m, kilovolts per meter; f, frequency in hertz

Nonuniform Fields

The IEEE Standard MPE levels would apply directly to electric field exposures under transmission lines, where the fields are uniform. However, in nonuniform fields on or near grounded structures, spatial averaging over the body is used to determine whether the MPE level is exceeded.

Contact Currents

The IEEE Standard also establishes MPE levels for contact currents that occur when an individual touches a grounded object when standing in an electric field. These limits are independent of frequency between 0 and 3000 Hz. The MPE levels for contact currents in controlled environments are 3 milliamperes (mA) and 1.5 mA for grasp and touch contacts, respectively. The MPE level for the general public is 0.5 mA for a touch contact. (Grasp contacts do not apply to the general public.)

The contact current limits, and hence the electric field MPE levels, apply only to an ungrounded person touching a grounded conductor, and may not protect a grounded person touching large conductive objects that are insulated from ground. Limits on 60-Hz contact currents due to electric field induction on large objects located under transmission lines are established in the National Electrical Safety Code (NESC). ⁹

EPRI Comments

Occupational Exposure

The 60-Hz magnetic fields in certain power company work environments can on rare occasions exceed the MPE levels and TLVs[®] cited in the IEEE, ACGIH, and ICNIRP guidelines. ^{10, 11, 12} However, the generally nonuniform nature of these magnetic fields makes the likelihood of noncompliance much less probable. ⁵ In a nonuniform field, the *in situ* electric field may fall below the basic restriction after accounting for spatial variation of the field over the entire body. The nonuniform fields associated with realistic exposures in power company environments also make the exceedance of the more stringent basic restriction of 10 milliamperes per square meter (mA/m²) found in the ICNIRP guidelines unlikely.

IEEE Standard for Exposure to Electromagnetic Fields

Exposures to electric fields in the electricity industry will generally be below the IEEE Standard MPE level of 20 kV/m. However, exposures for workers climbing towers near conductors at 500 kV or higher can result in whole-body average fields above this level. In these cases, body orientation with respect to the field may mitigate field perception and spark discharges relative to those experienced when standing in a vertical field. For performing bare-hand maintenance on high-voltage transmission lines, work practices generally require the wearing of hooded conducting suits and gloves as shielding.

Fields enhanced by corona-generated ions near high-voltage direct-current (HVDC) lines can sporadically exceed 20 kV/m.^{13,14} The IEEE Standard specifies a minimum MPE level (based on the occurrence of spark discharges) of 20 kV/m for electric fields below 1 Hz. Below 1 Hz the MPE level can be increased if the leakage resistance to ground of an individual standing in the field mitigates spark discharges. This provision would generally allow the high static electric fields found under HVDC transmission lines to comply with the IEEE Standard.

General-Public Exposure

The magnetic fields in spaces accessible to the general public are very unlikely to exceed the 60-Hz MPE level of 0.9 mT (9 G) cited in the IEEE Standard. Similarly, static magnetic fields near power facilities are very unlikely to exceed the static field limits established for the general public under this guideline.

The IEEE Standard explicitly increases the general-public MPE level for 60-Hz electric fields from 5 kV/m to 10 kV/m on transmission line rights-of-way. Exposure of the general public would not exceed the MPE of 10 kV/m, except in limited areas under some 765-kV lines.

Public use of HVDC transmission line rights-of-way could result in exposures to static electric fields above 20 kV/m. However, realistic leakage resistances make it unlikely that such exposures would exceed an MPE level based on potential spark discharges.

Summary

The IEEE Standard represents a clear advancement in the development and documentation of exposure guidelines in the designated frequency range. This advancement is accomplished by (1) assuming that the *in situ* electric field is the principal physical parameter defining the interaction of fields with the human body; (2) accounting for different interaction thresholds at specific locations in the body; (3) using the lowest demonstrated internal or external field threshold for interaction as the determinant of MPEs; (4) explicitly documenting the extrapolation from sensory responses such as field perception associated with external electric field and current exposures to the electric field MPE levels; and (5) introducing empirically based adjustments to thresholds to account for uncertainties.

Implementation of the IEEE Standard is expected to have minimal impact on current electric power company practices. One possible exception is that the design of 765-kV lines might need to be changed to meet the 10-kV/m limit for general-public exposure on rights-of-way. On the other hand, implementation of the ICNIRP guidelines, which specify lower MPE levels for both occupational and general-public exposure, could have an impact on transmission line design, work practices, and right-of-way management.¹⁵

For a comparison of IEEE guideline limits with those set by ICNIRP,⁴ ACGIH,² the NRPB,³ and the European Union,¹⁶ which recently adopted ICNIRP limits for public exposure, see Table 3, below.

Table 3. Comparison of exposure guideline limits for 60-Hz fields and contact currents

	IEEE 2002	ICNIRP 1998	ACGIH 2000	NRPB 1993	EU 1999
Occupational					
Electric Field, kV/m	20	8.3	25	12	NA
Magnetic Field, mT	2.71	0.42	1.0 ^a	1.3	NA
Contact Current, mA	1.5	1.0	NA	1.0	NA
General Public					
Electric Field, kV/m	5	4.2	NA	12	4.2
Magnetic Field, mT	0.904	0.083	NA	1.3	0.083
Contact Current, mA	0.5	0.5	NA	0.5 ^b	0.5

^aFor persons with cardiac pacemakers or other medical electronic devices, the limit is 0.1mT.

^bFor children. The limit for adults is 1.0 mA.

IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers; ¹ ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; ⁴ ACGIH, American Conference of Governmental Industrial Hygienists ²; NRPB, National Radiological Protection Board; ³ EU, European Union; ¹⁰ kV/m, kilovolts per meter; mT, millitesla; mA, milliamperes

For further technical information, please contact

- Rob Kavet at 650-855-1061 (rkavet@epri.com)

Press contact:

- Jackie Turner at 650-855-2272 (jturner@epri.com)

References

1. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). IEEE PC95.6-2002 standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0 to 3 kHz. Prepared by Subcommittee III of Standards Coordinating Committee 28, IEEE Standards Department. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 2002.
2. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH): 2002 TLVs® and BEIs®: threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 2002.
3. National Radiological Protection Board (NRPB). Restrictions on human exposure to static and time-varying electromagnetic fields and radiation: scientific basis and recommendation for implementation of the Board's statement. Documents of the NRPB 1993;4:8–69.
4. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys 1988;74:494–522.
5. Bracken TD, Dawson TW. Evaluation of non-uniform 60-Hz magnetic field exposures for compliance with guidelines. Submitted for publication, 2002.

IEEE Standard for Exposure to Electromagnetic Fields

6. Deno DW, Zaffanella LW. Field effects of overhead transmission lines and stations. In: LaForest JJ, editor. *Transmission line reference book*, 2nd ed. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute; 1982, p. 329–419.
7. Reilly JP, Larkin WD. Human sensitivity to electric shock induced by power frequency electric fields. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility EMC-29* 1987;3:221–32.
8. Reilly JP. *Applied bioelectricity: from electrical stimulation to electropathology*. New York: Springer; 1998.
9. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). *National electrical safety code*, 1997 ed. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.; 1997.
10. Bracken TD, Senior RS, Rankin RF, Bailey WH, Kavet R. Magnetic field exposures in the electric utility industry relevant to occupational guideline levels. *Appl Occup Environ Hyg* 1997;12:756–68.
11. Bracken TD, Rankin RF, Senior RS, Kavet R, Geissinger LG. Magnetic-field exposures of cable splicers in electrical network distribution vaults. *Appl Occup Environ Hyg* 2001;16:369–79.
12. Bracken TD. Assessing compliance with power-frequency magnetic-field guidelines. *Health Phys* 2002; 83: 409–16.
13. Bracken TD, Capon AS, Montgomery DV. Ground level electric fields and ion currents on the Celilo-Sylmar \pm 400 kV DC Intertie during fair weather. *IEEE Trans Power App Sys* 1978; PAS 97: 370–8.
14. Johnson GB. Electric fields and ion currents of a \pm 400 kV HVDC test line. *IEEE Trans Power App Sys* 1983; PAS-102:2559–68.
15. Swanson J A transmission utilities experience of applying EMF exposure standards. *Health Phys* 2002;83:417–25.
16. European Union (EU). Council recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) (199/519/EC). *Official J Eur Comm*. L199.

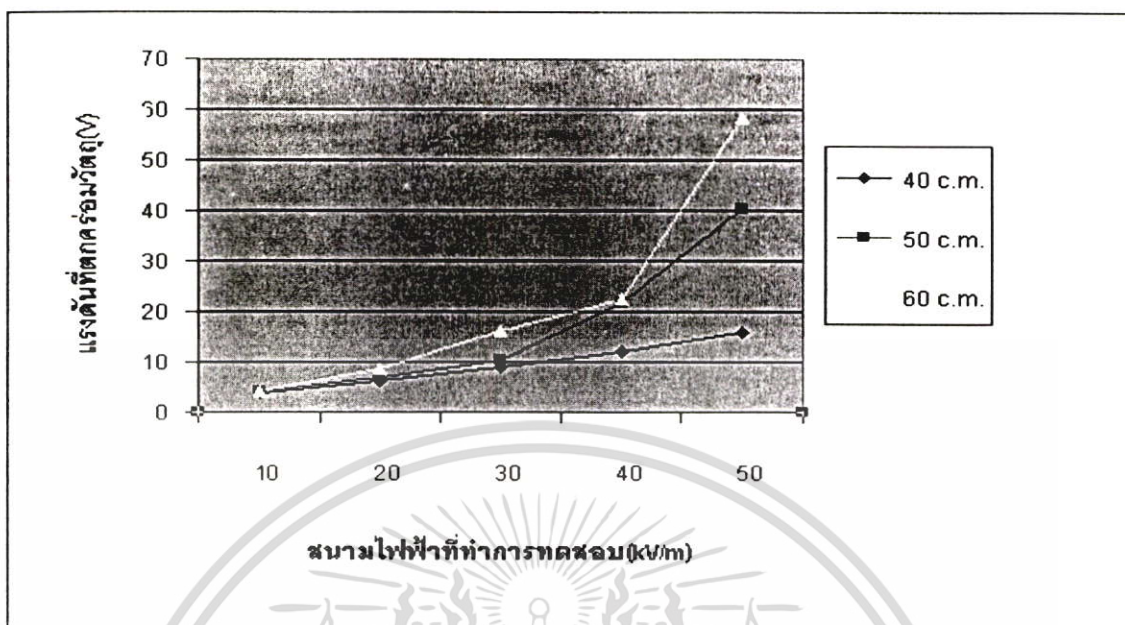
© 2003 Electric Power Research Institute (EPRI), Inc. All rights reserved. Electric Power Research Institute and EPRI are registered service marks of the Electric Power Research Institute, Inc. EPRI, ELECTRIFY THE WORLD is a service mark of the Electric Power Research Institute, Inc.

♻️ Printed on recycled paper in the United States of America

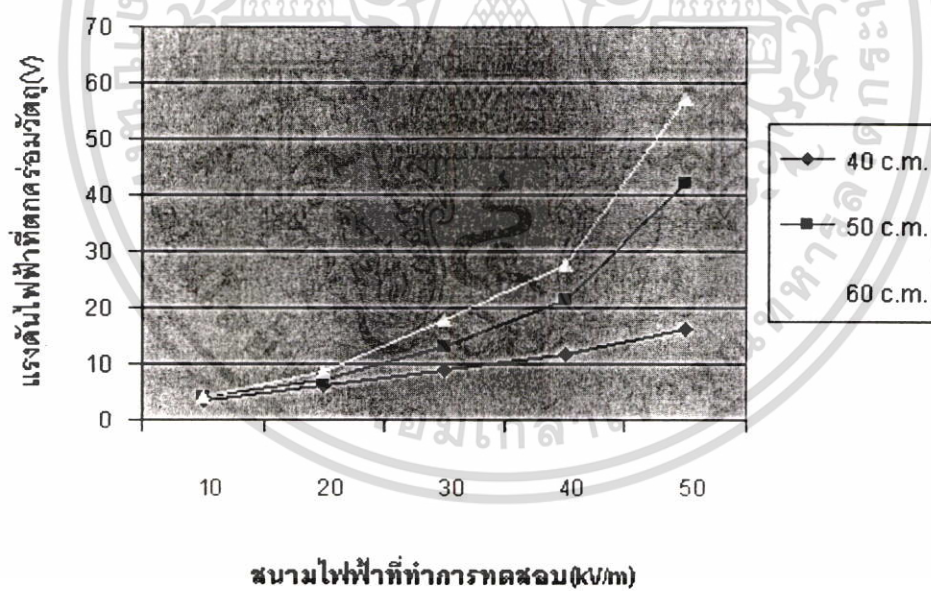


ภาคผนวก จ
การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ระบบต่างๆ ของ
สถานีไฟฟ้ากระแสตรง

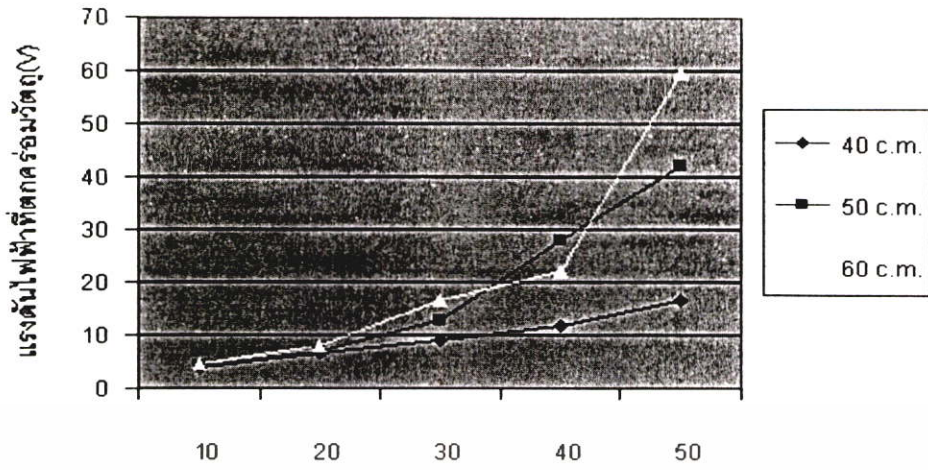
ผลการทดสอบแบบ Plate



การทดสอบ ครั้งที่ 1



การทดสอบ ครั้งที่ 2

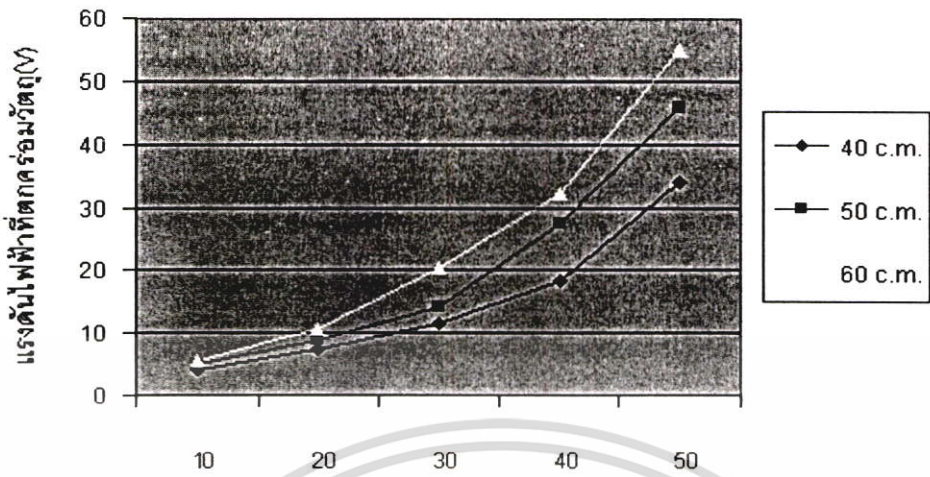


สนามไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ(kV/m)

การทดสอบ ครั้งที่ 3

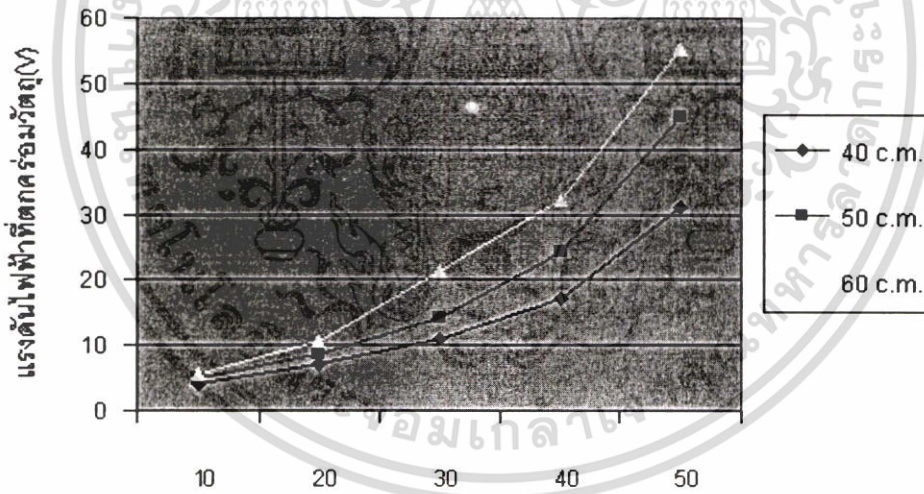


ผลการทดสอบแบบ Box



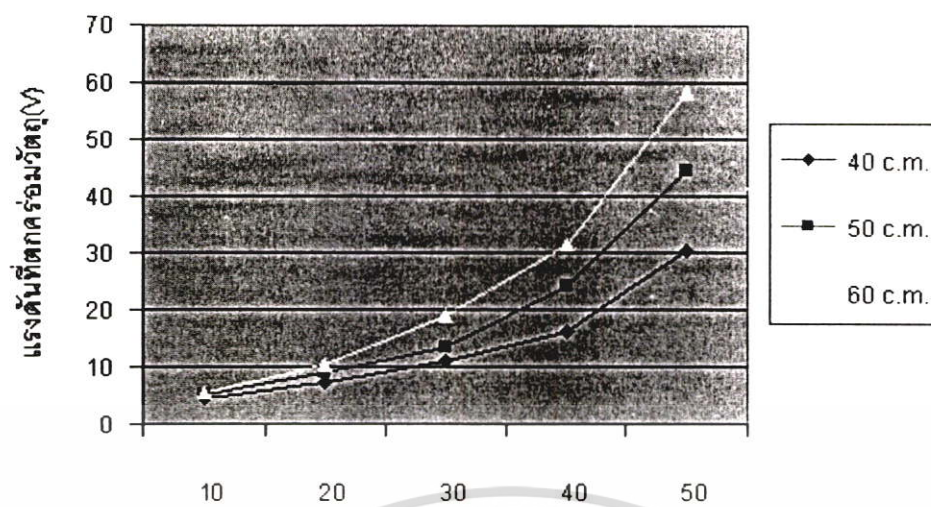
สนามไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ (kV/m)

การทดสอบ ครั้งที่ 1



สนามไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ (kV/m)

การทดสอบ ครั้งที่ 2



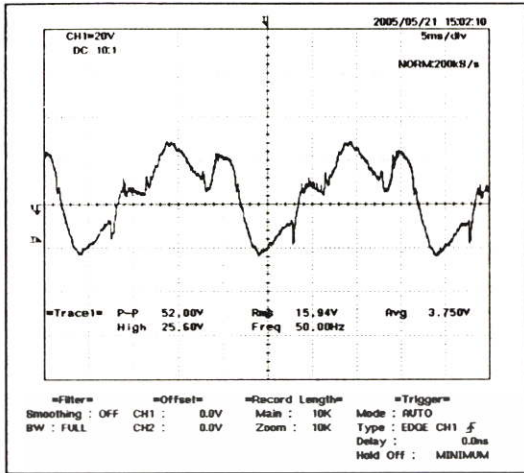
สนามไฟฟ้าที่ทำการทดสอบ (kV/m)

การทดสอบ ครั้งที่ 3

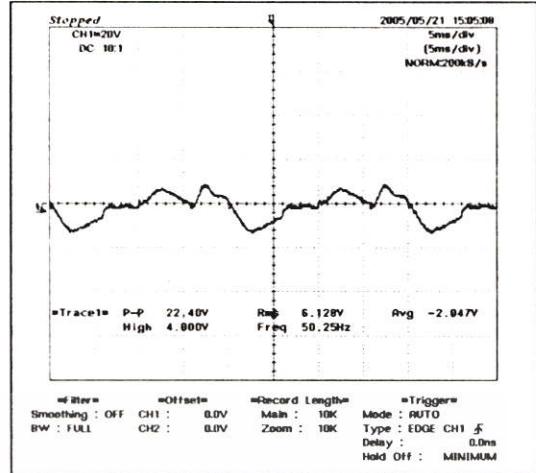




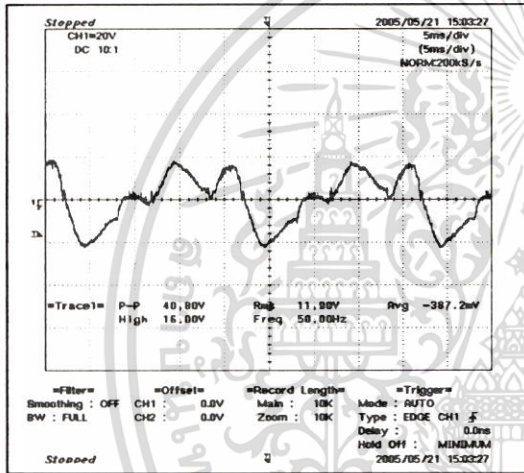
ภาคผนวก ฉ
การเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ระบบต่างๆ ของ
สนามไฟฟ้ากระแสตรง



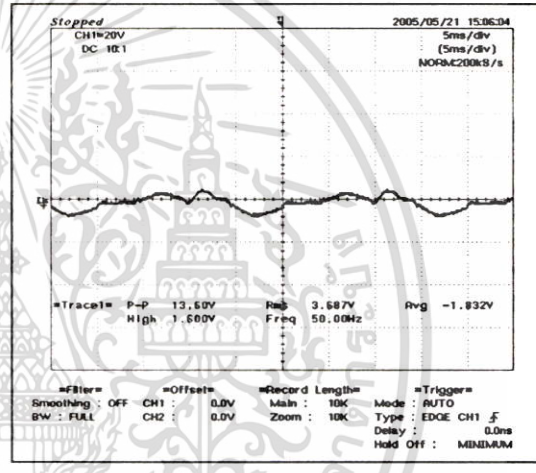
50 kV/m



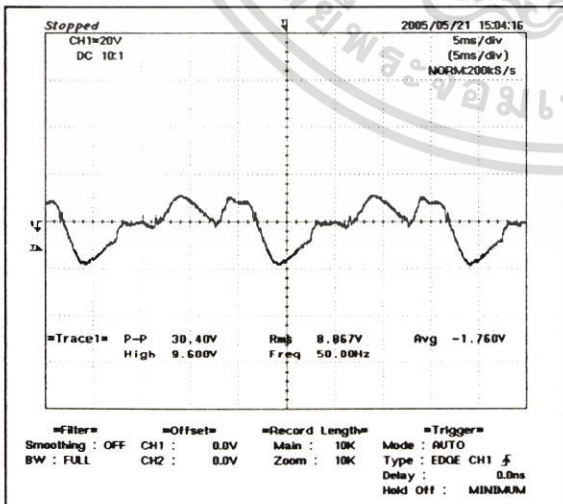
20 kV/m



40 kV/m

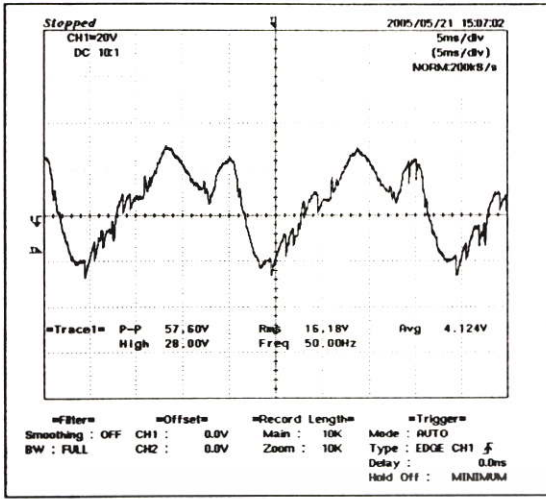


10 kV/m

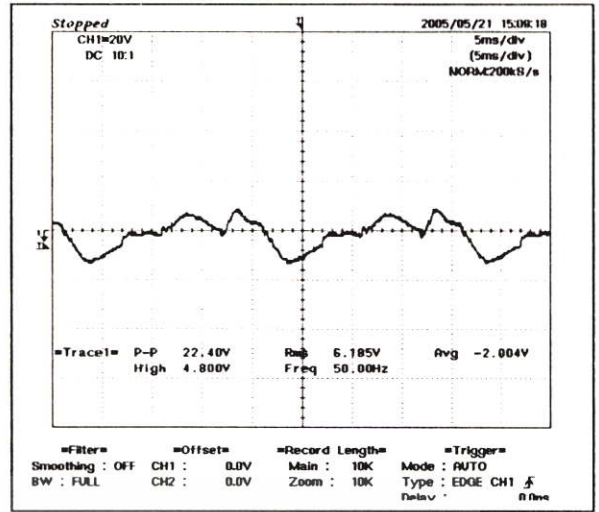


30 kV/m

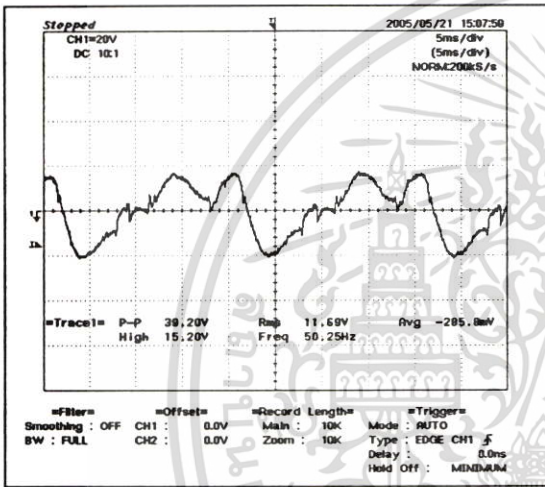
ระยะห่างระหว่างเพลตกับกราวด์ 40 ซม. ทดสอบครั้งที่ 1



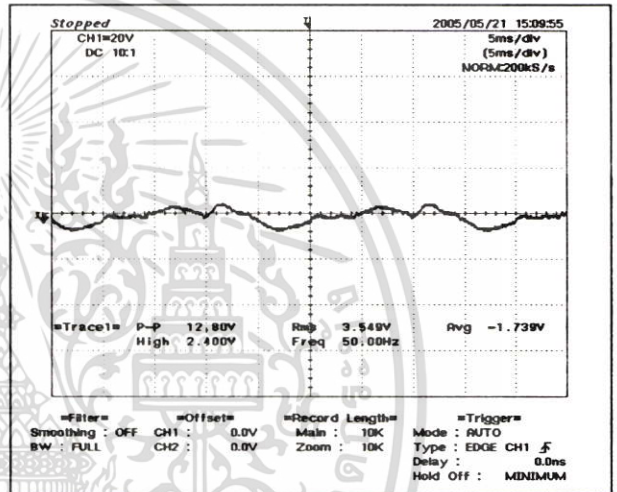
50 kV/m



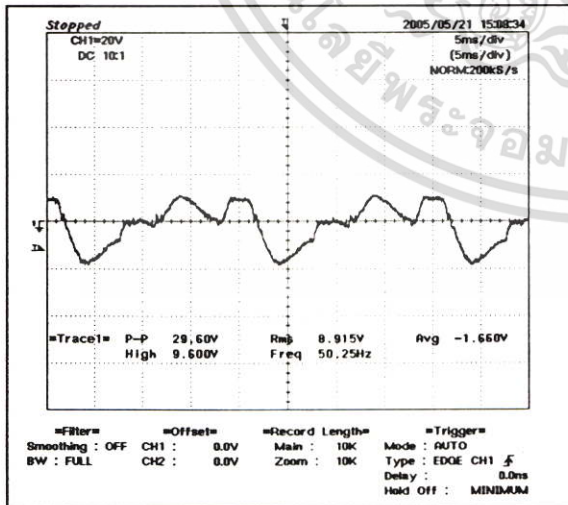
20 kV/m



40 kV/m

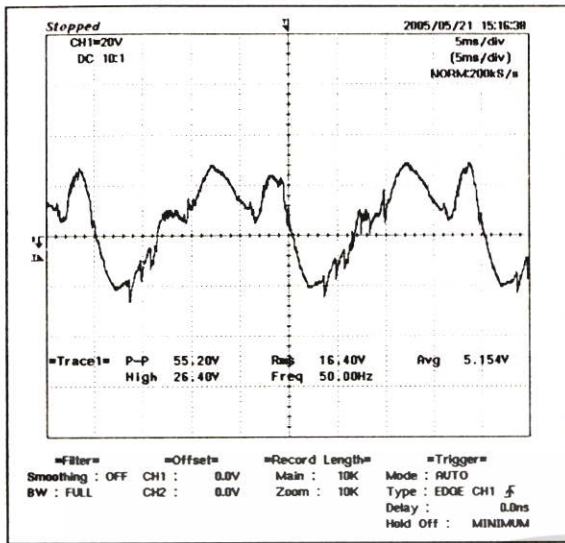


10 kV/m

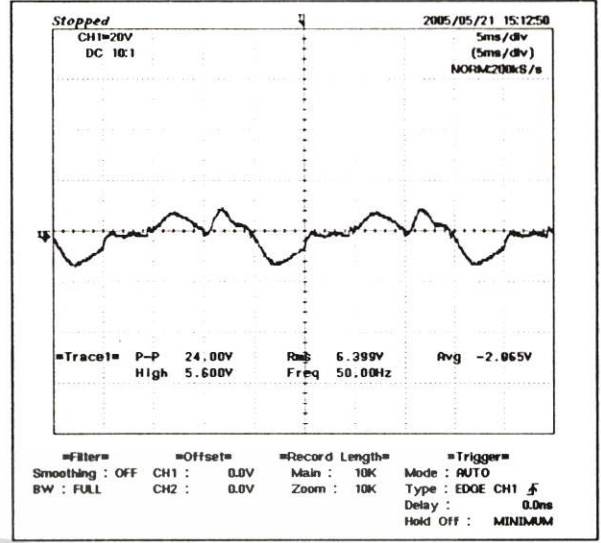


30 kV/m

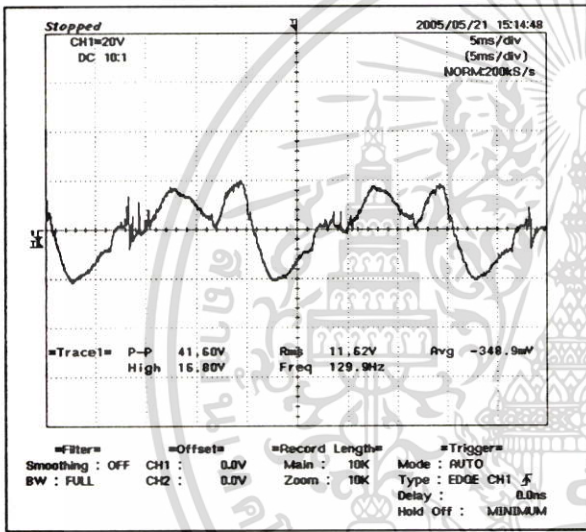
ระยะห่างระหว่างเฟลท กับกราวด์ 40 ซม. ทดสอบ ครั้งที่ 2



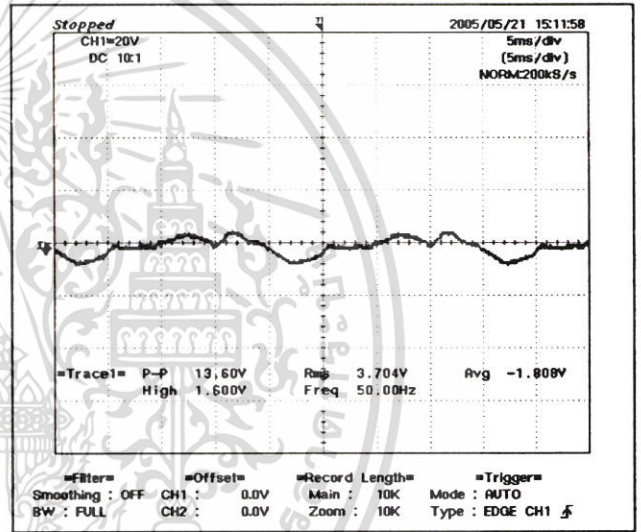
50 kV/m



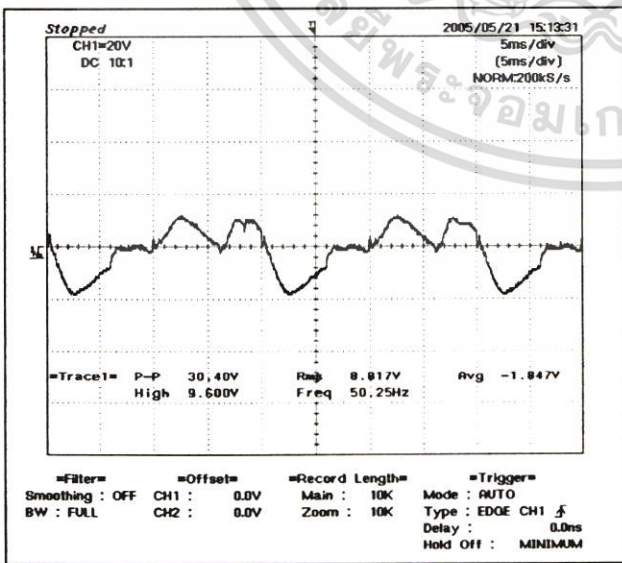
20 kV/m



40 kV/m

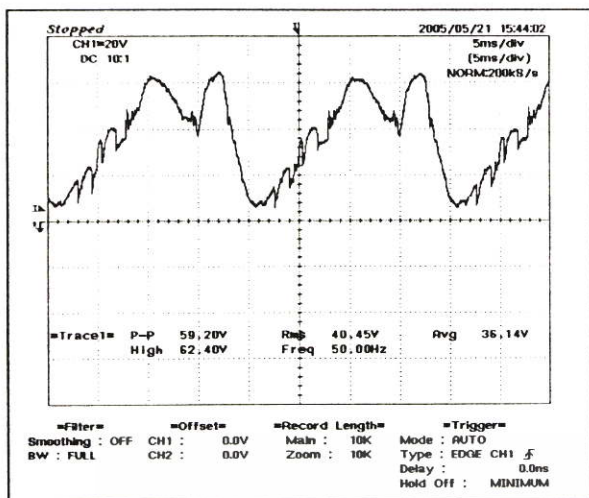


10 kV/m

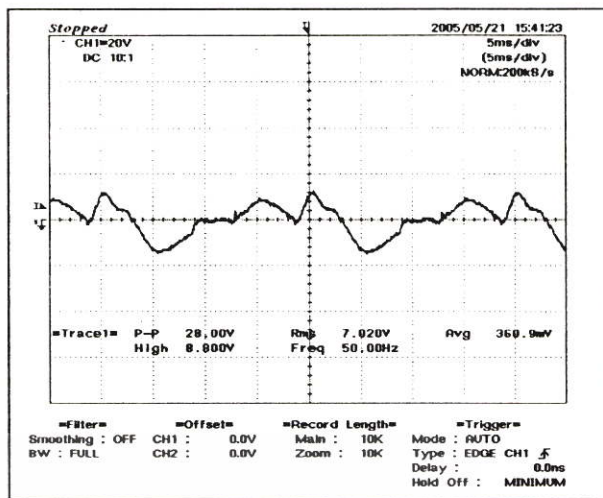


30 kV/m

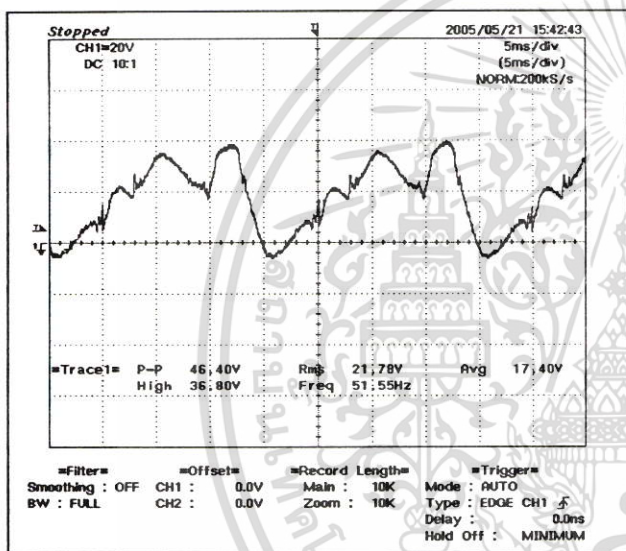
ระยะห่างระหว่างเพลท กับกราวด์ 40 ซม. ทดสอบครั้งที่ 3



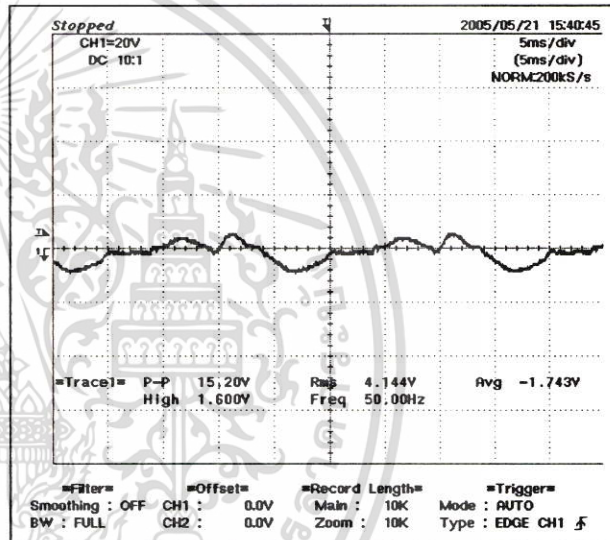
50 kV/m



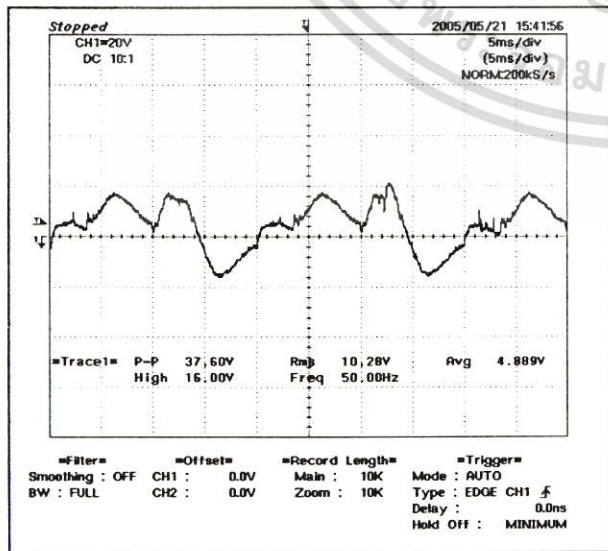
20 kV/m



40 kV/m

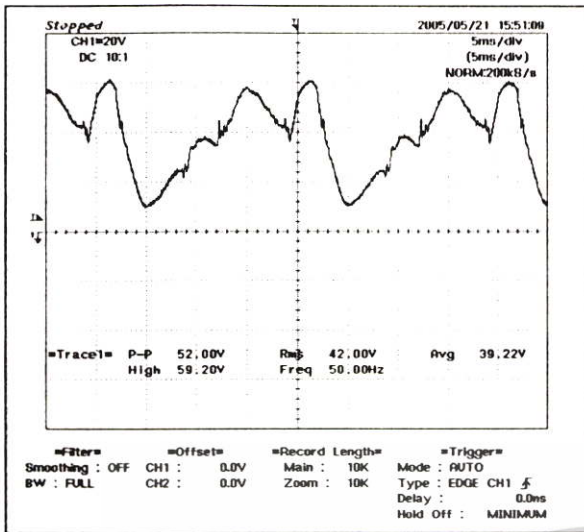


10 kV/m

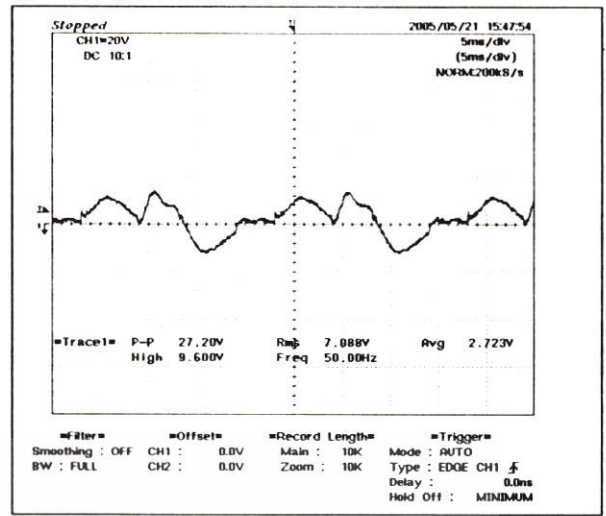


30 kV/m

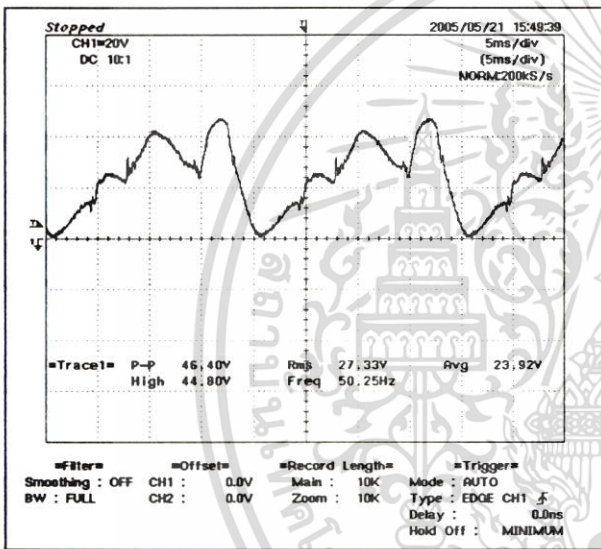
ระยะห่างระหว่างเพลท กับกราวด์ 50 ซม. ทดสอบครั้งที่ 1



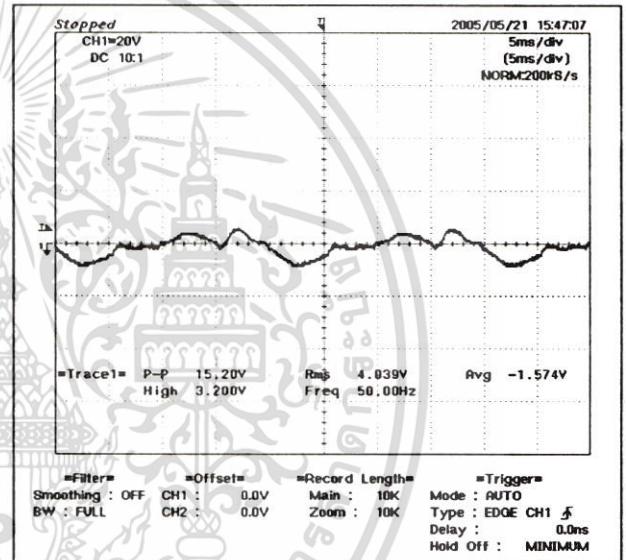
50 kV/m



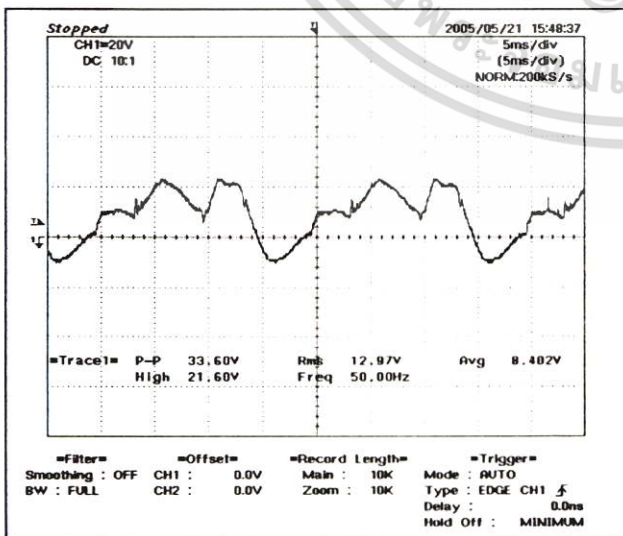
20 kV/m



40 kV/m

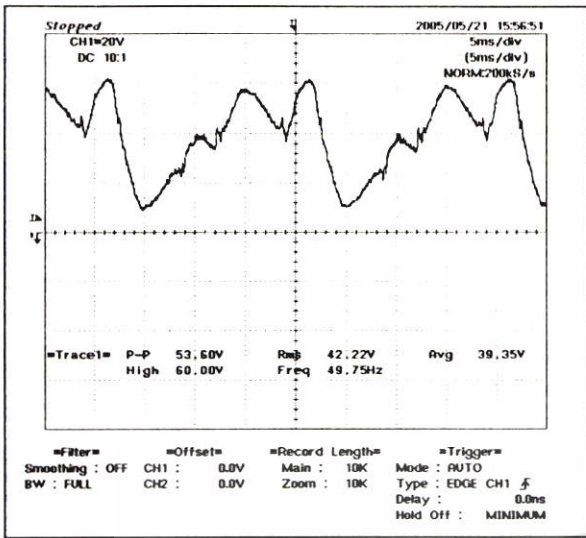


10 kV/m

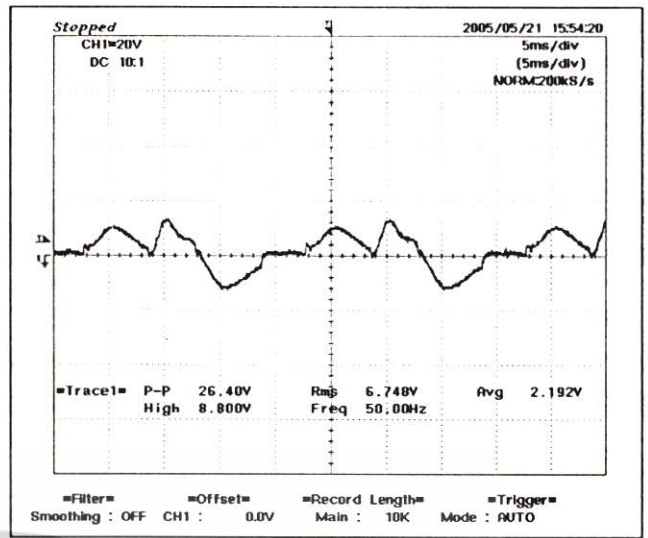


30 kV/m

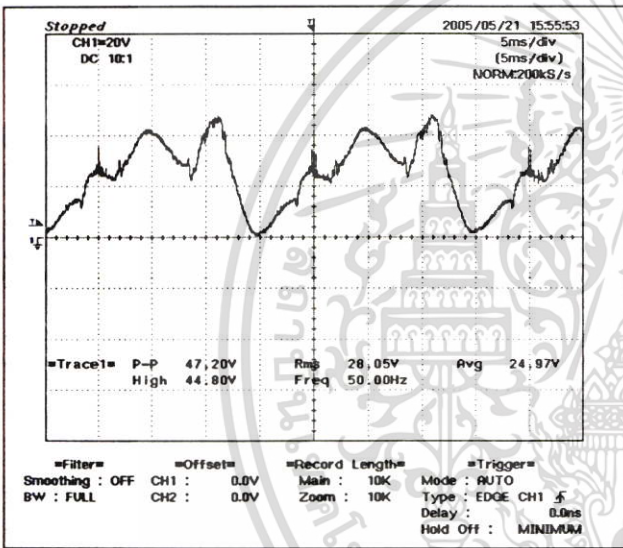
ระยะห่างระหว่างเพลท กับกราวด์ 50 ซม. ทดสอบครั้งที่ 2



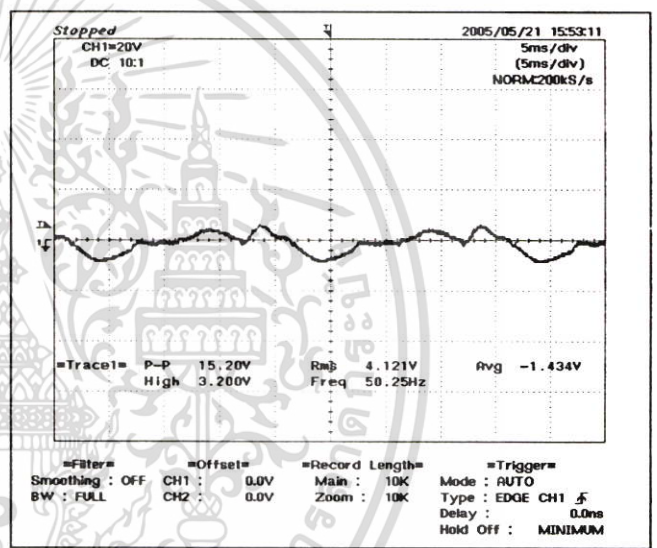
50 kV/m



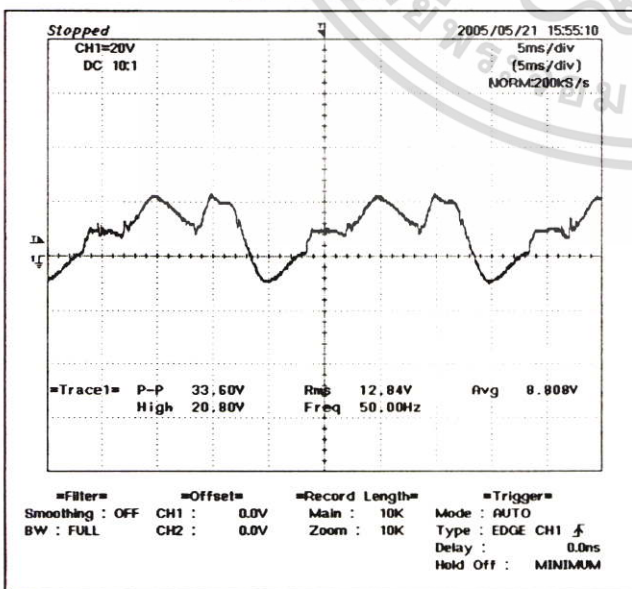
20 kV/m



40 kV/m

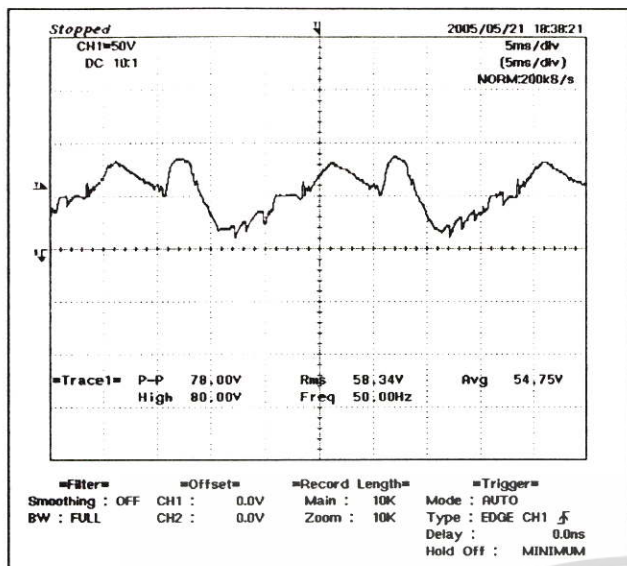


10 kV/m

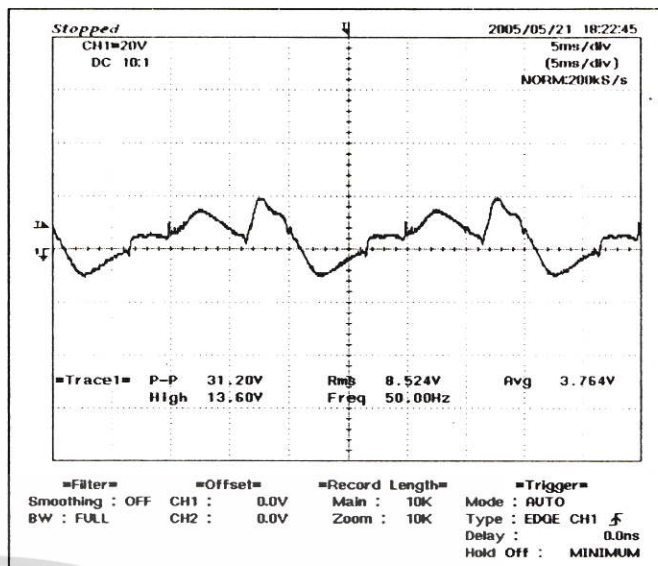


30 kV/m

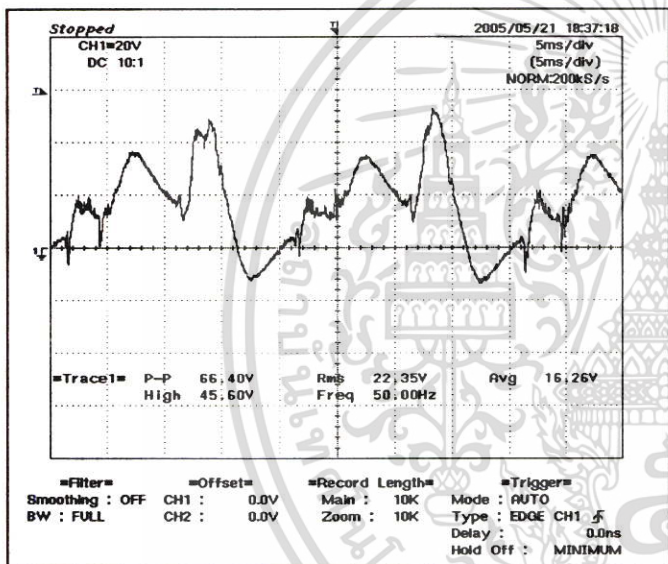
ระยะห่างระหว่างเพลต กับริวด์ 50 ซม. ทดสอบครั้งที่ 3



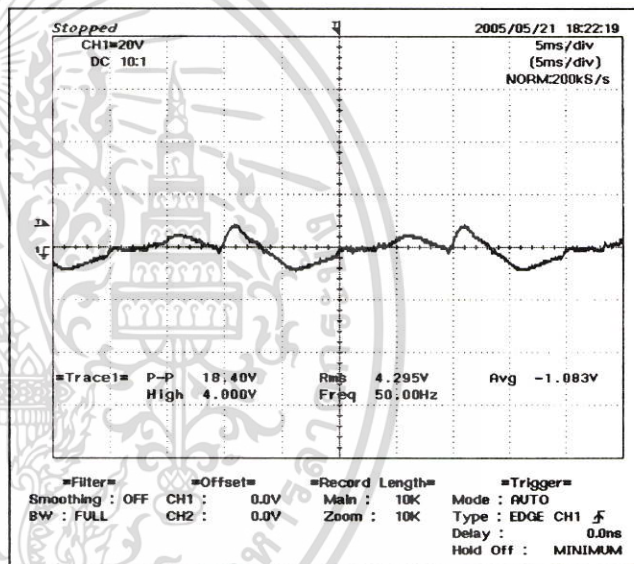
50 kV/m



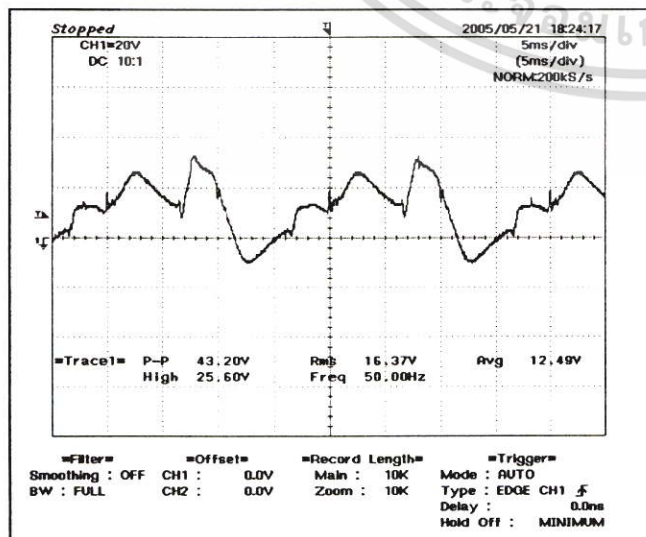
20 kV/m



40 kV/m

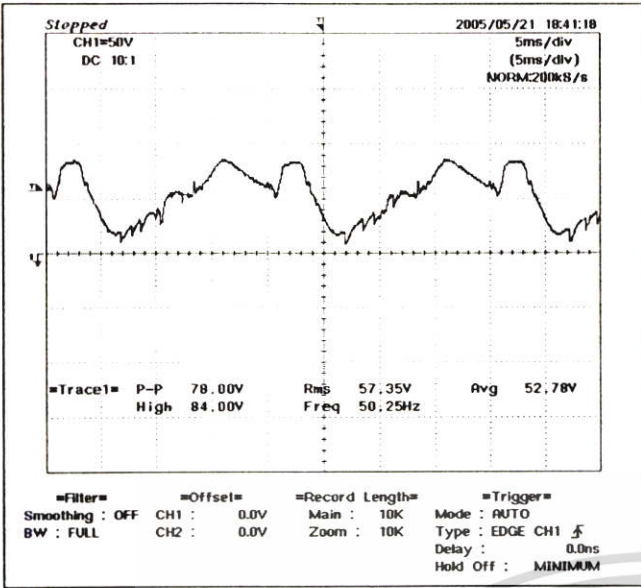


10 kV/m

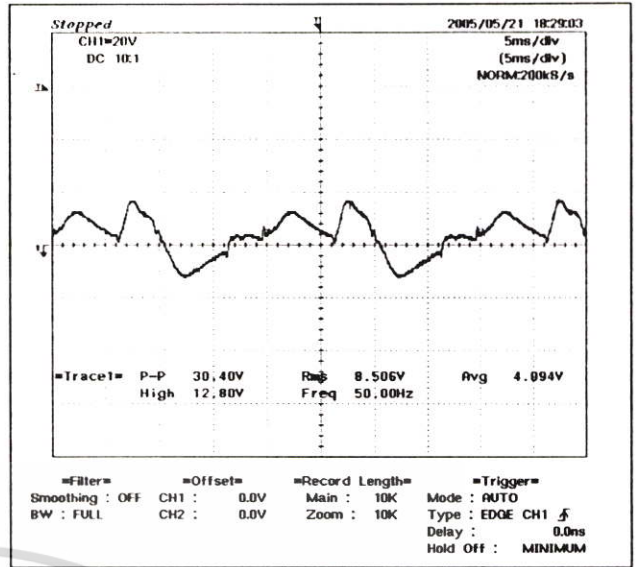


30 kV/m

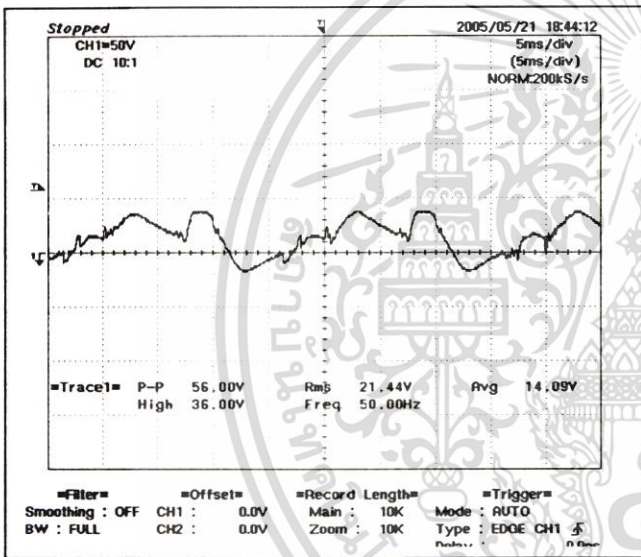
ระยะห่างระหว่างเพลท กับกราวด์ 60 ซม. ทดสอบครั้งที่ 1



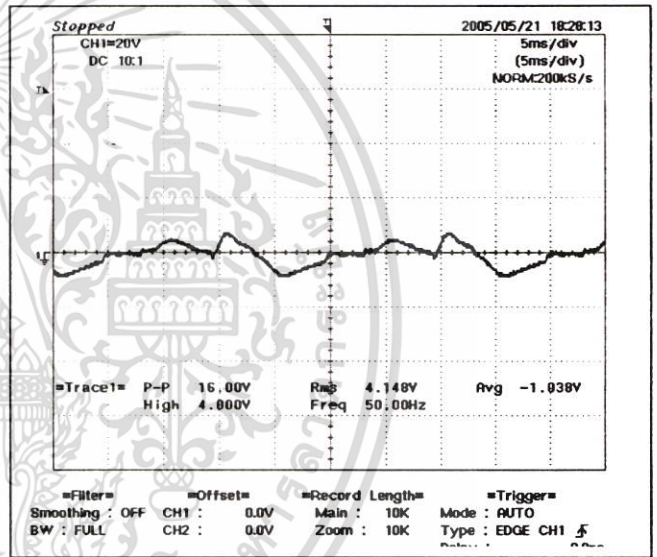
50 kV/m



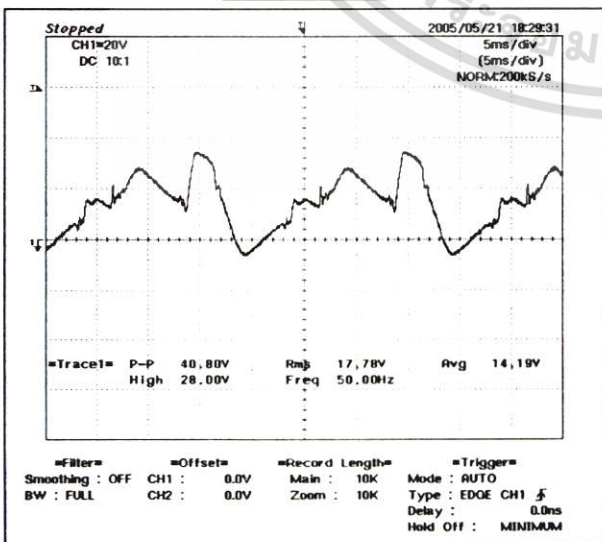
20 kV/m



40 kV/m

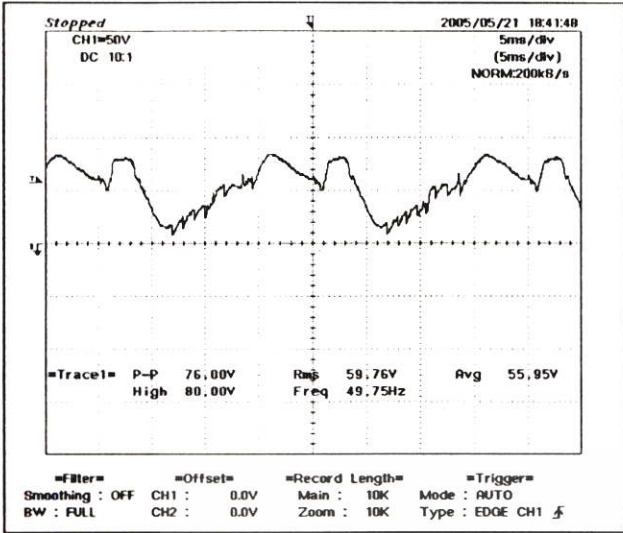


10 kV/m

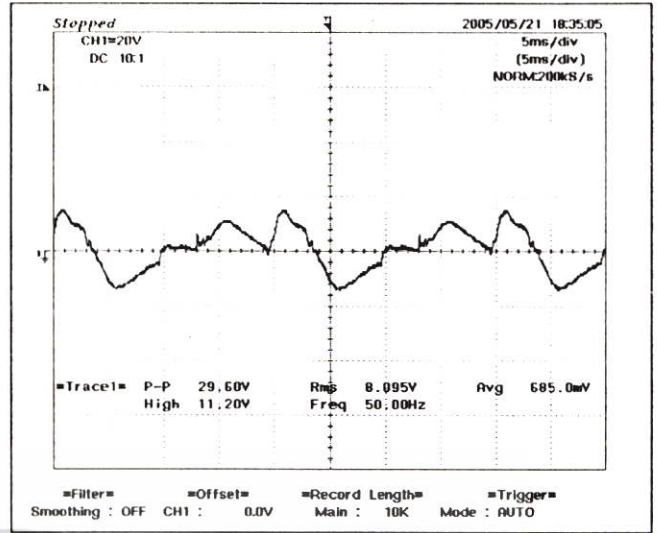


30 kV/m

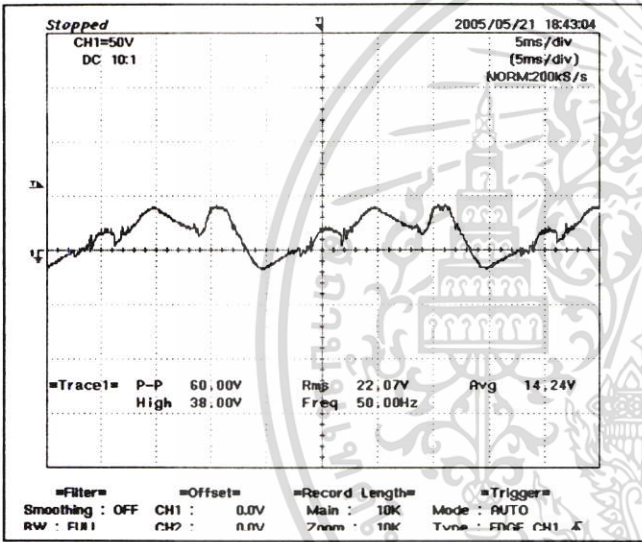
ระยะห่างระหว่างเพลท กับกราวด์ 60 ซม. ทดสอบครั้งที่ 2



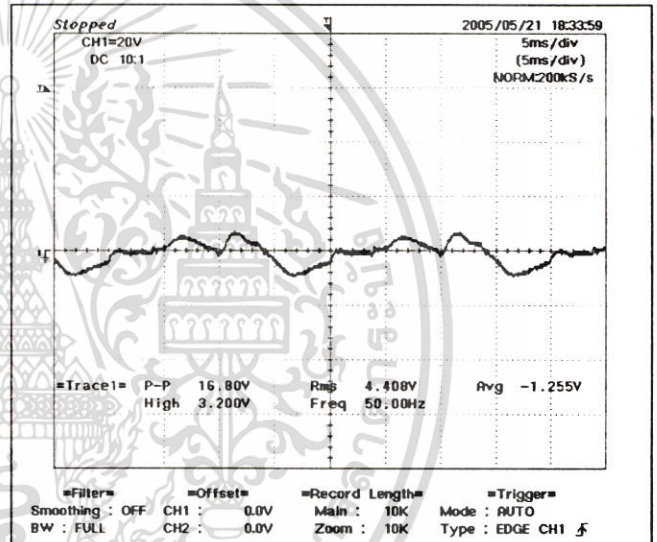
50 kV/m



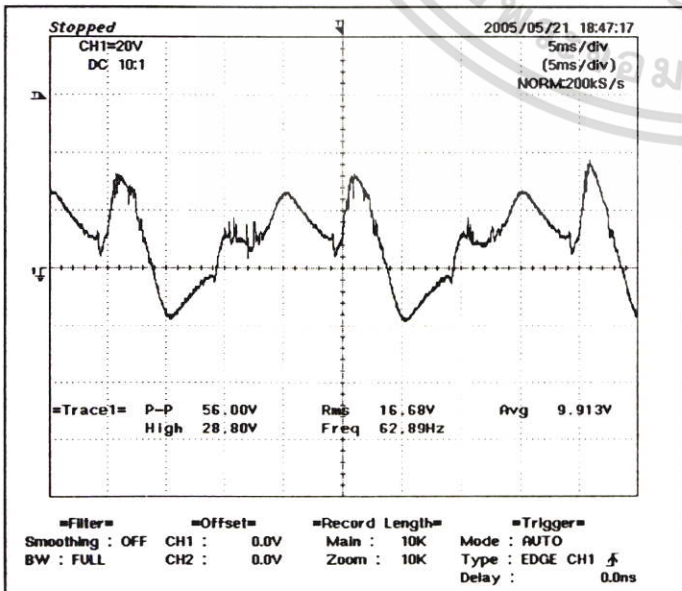
20 kV/m



40 kV/m

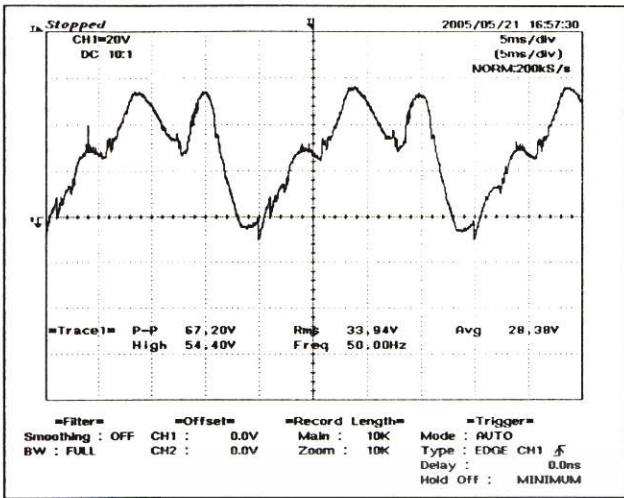


10 kV/m

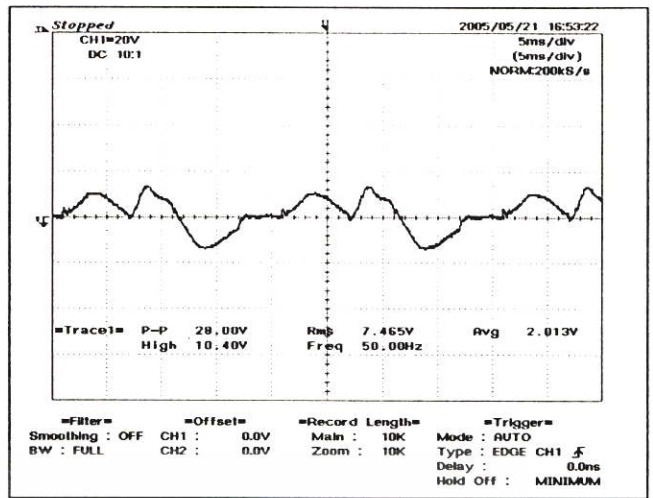


30 kV/m

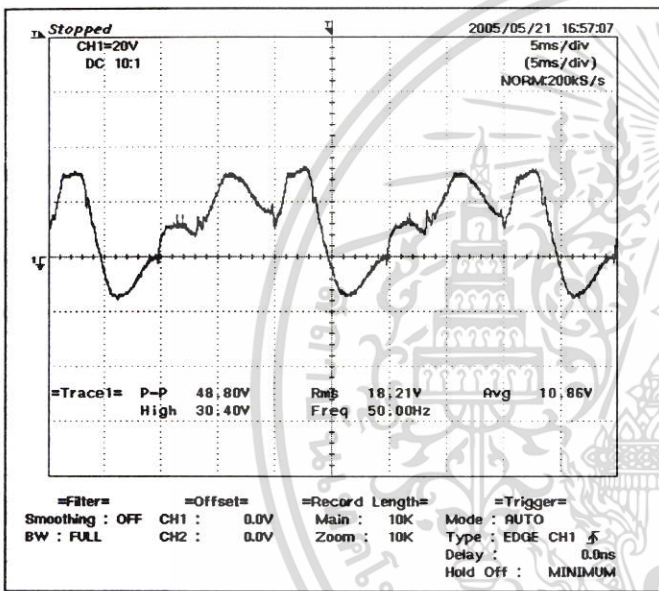
ระยะห่างระหว่างเพลท กับกราวด์ 60 ซม. ทดสอบครั้งที่ 3



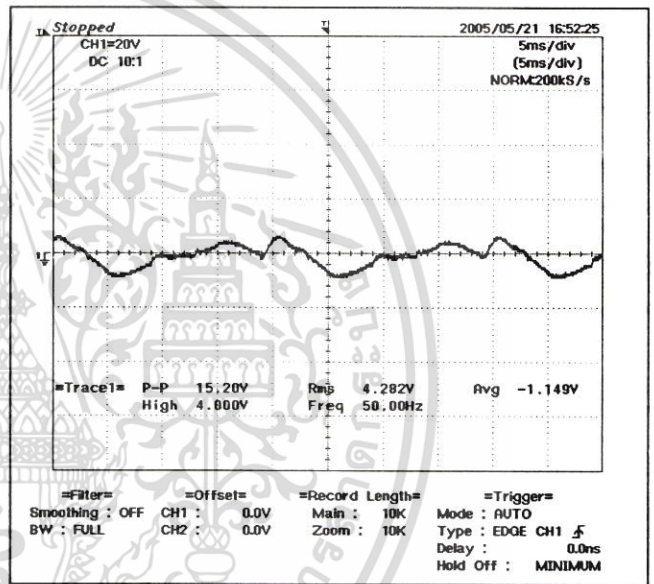
50 kV/m



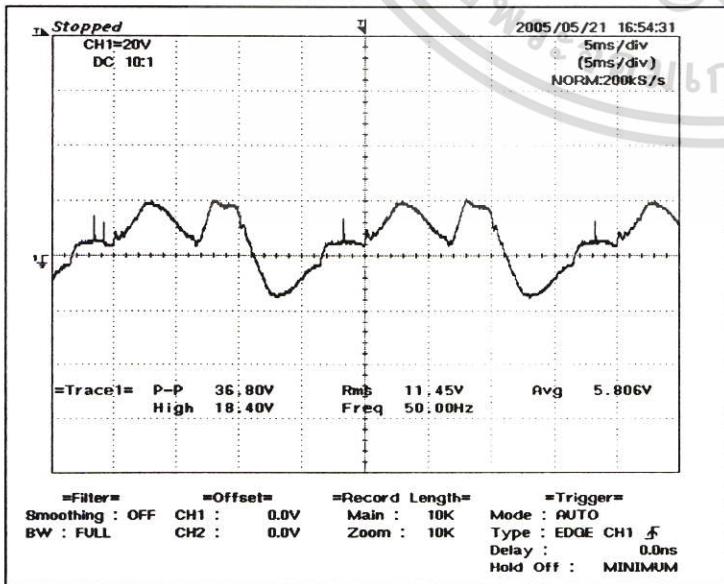
20 kV/m



40 kV/m

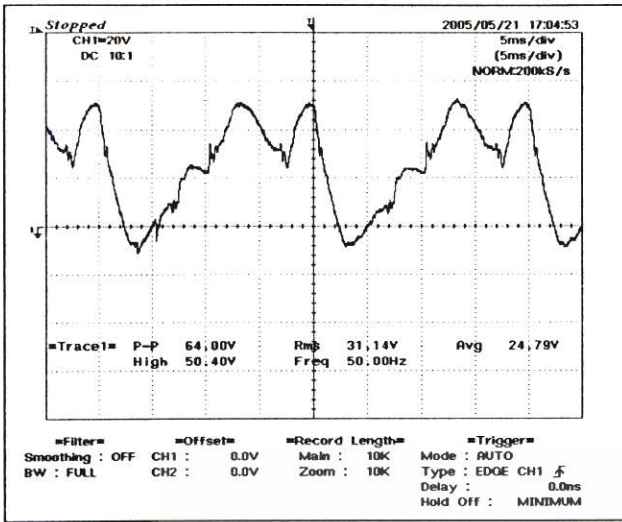


10 kV/m

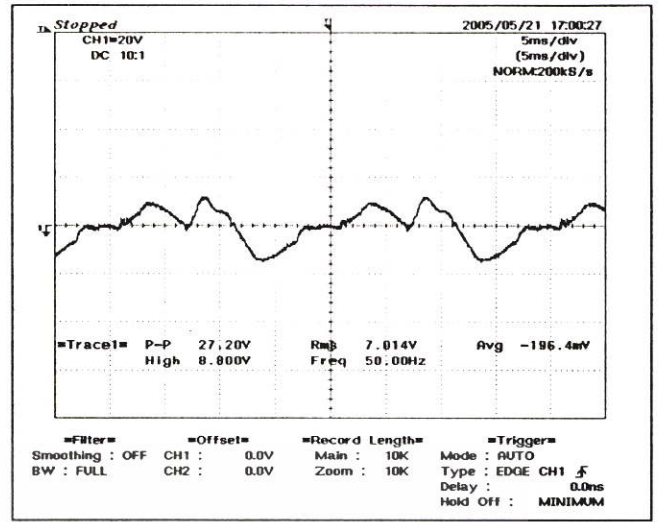


30 kV/m

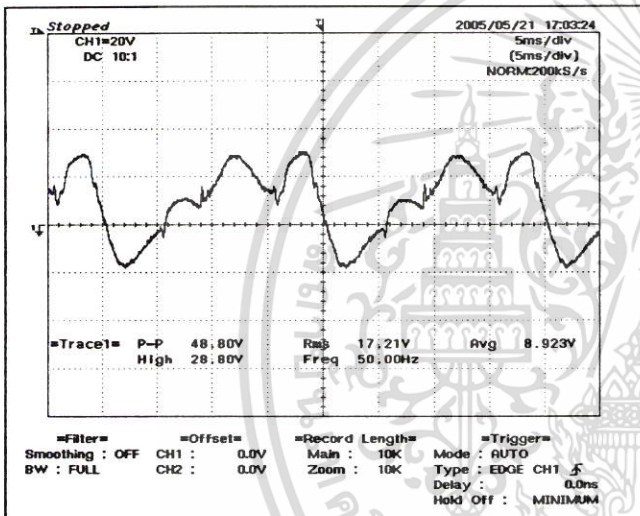
ระยะห่างระหว่าง Box 40 ซม. ทดสอบครั้งที่ 1



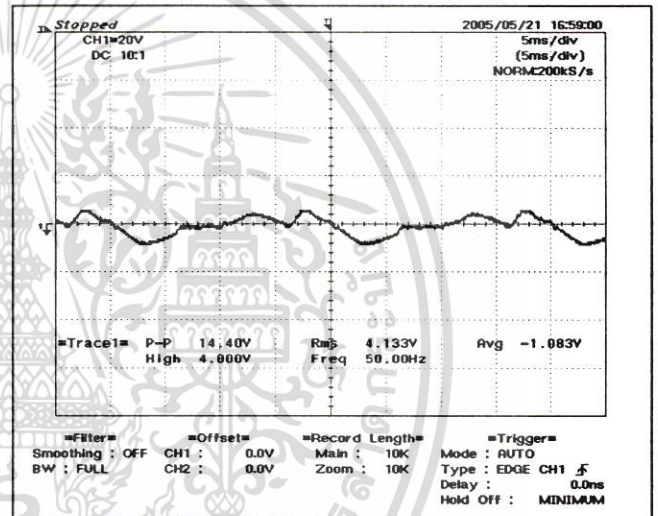
50 kV/m



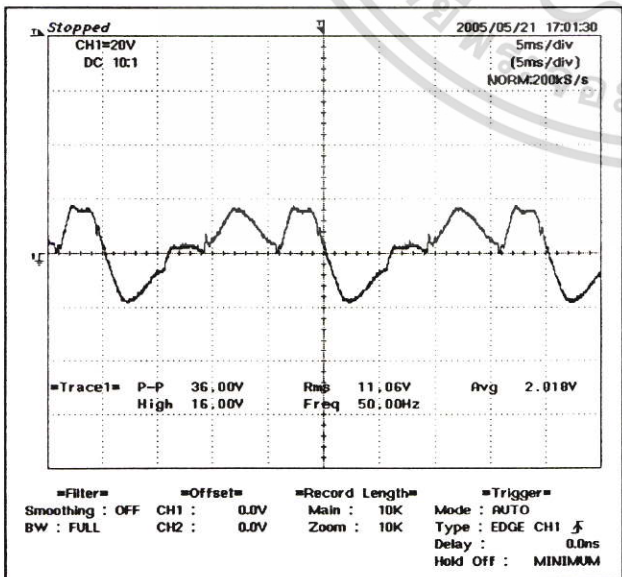
20 kV/m



40 kV/m

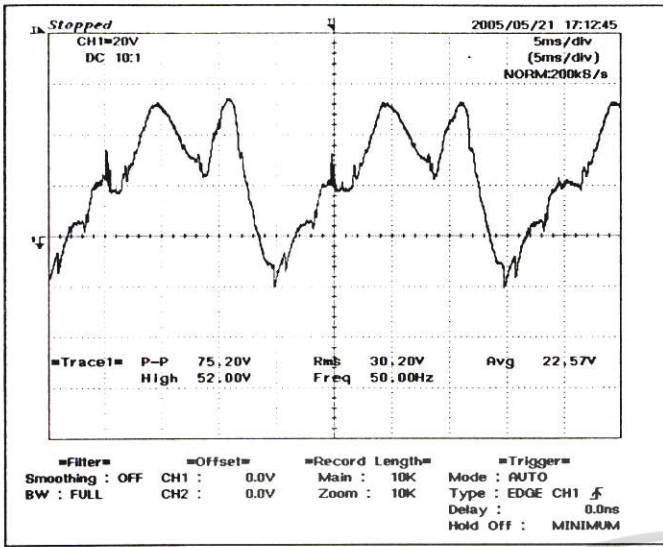


10 kV/m

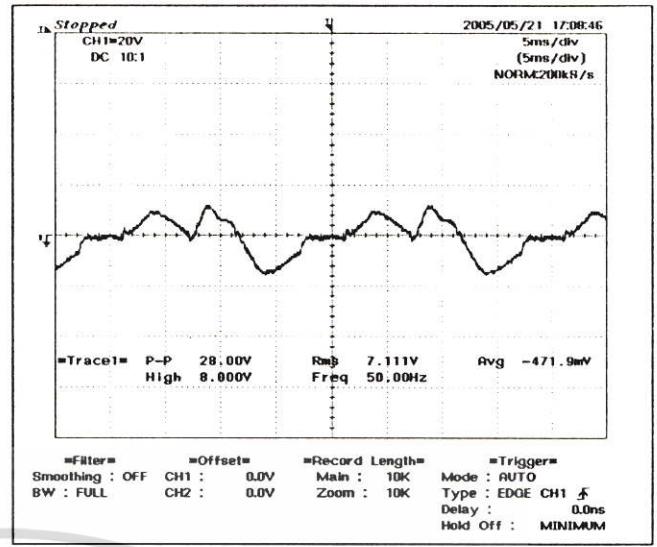


30 kV/m

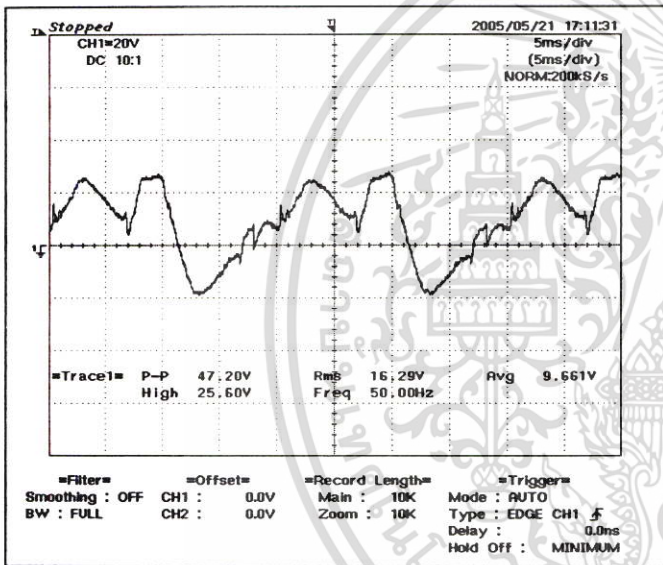
ระยะห่างระหว่าง Box 40 ซ.ม. ทดสอบครั้งที่ 2



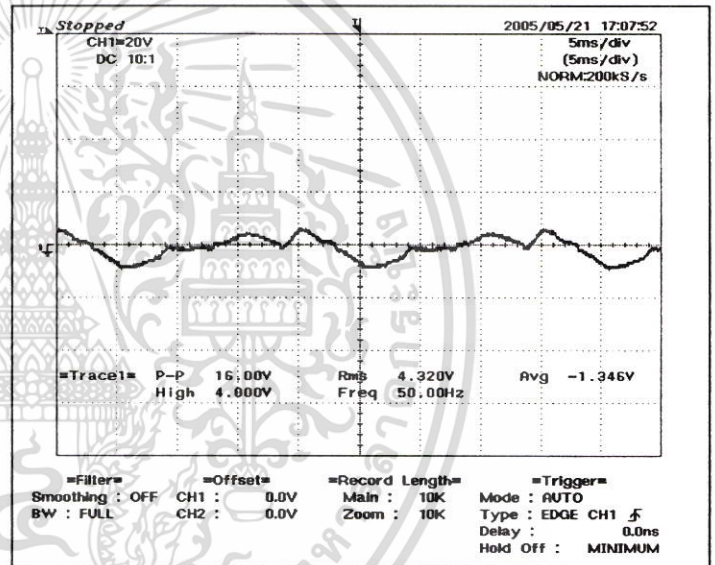
50 kV/m



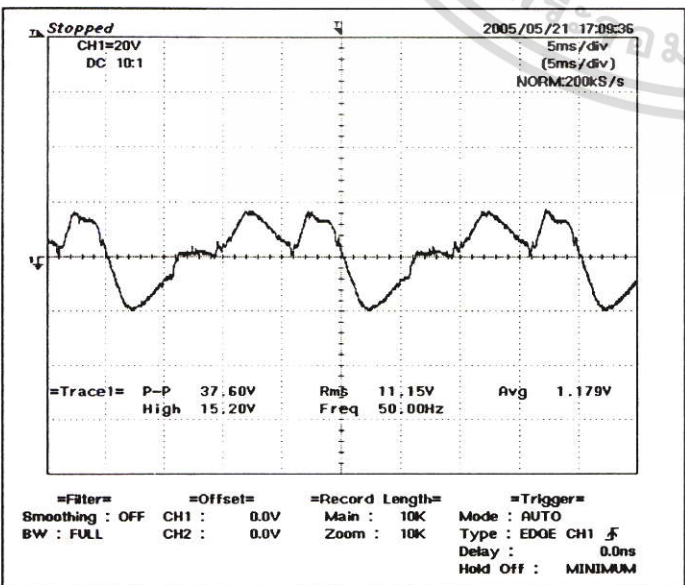
20 kV/m



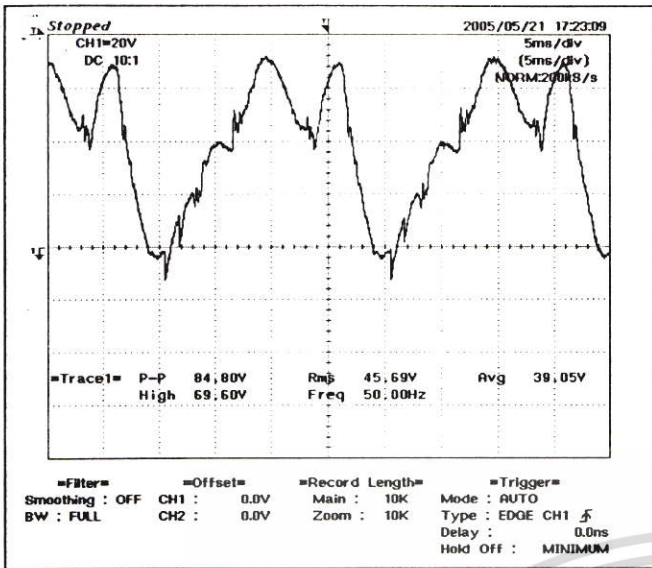
40 kV/m



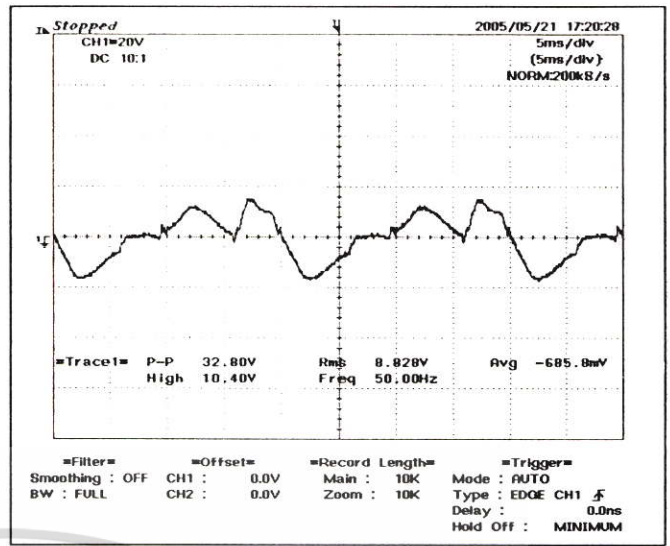
10 kV/m



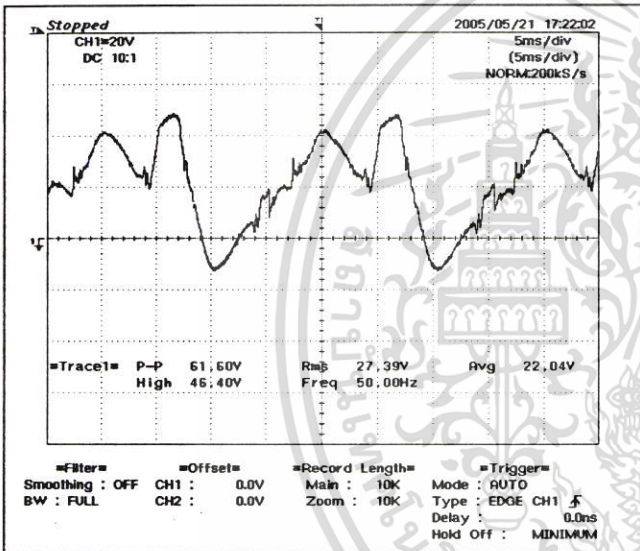
30 kV/m



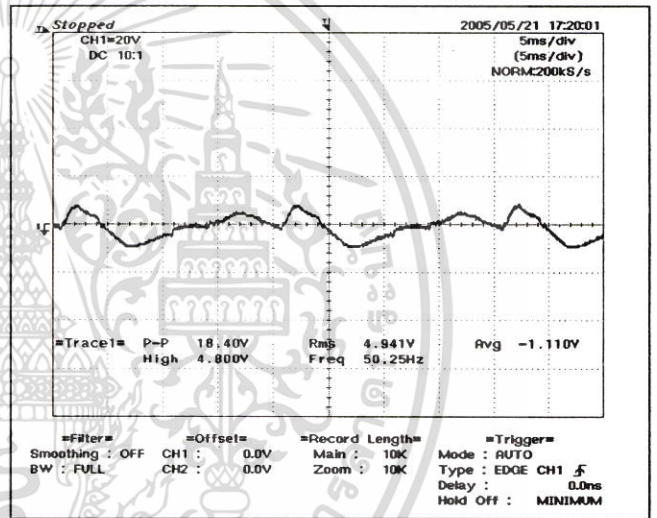
50 kV/m



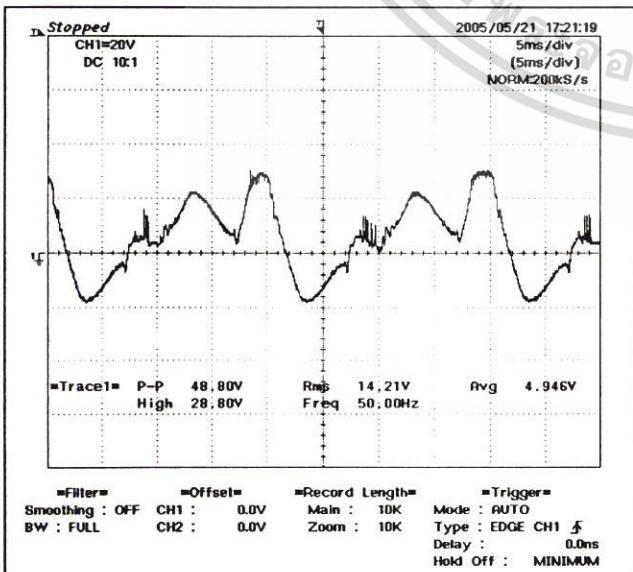
20 kV/m



40 kV/m

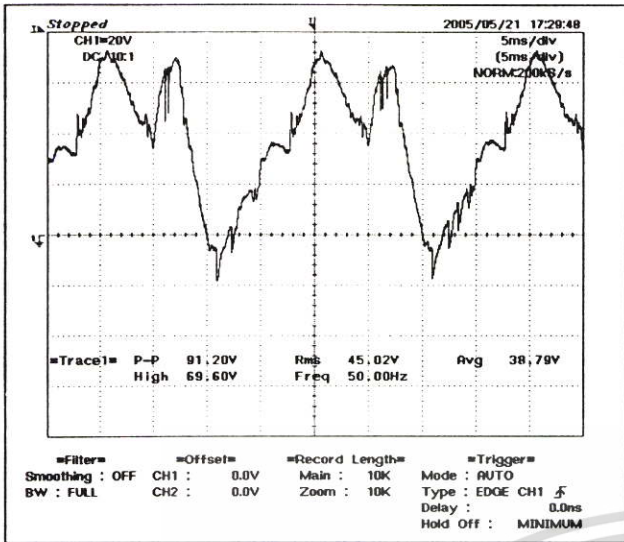


10 kV/m

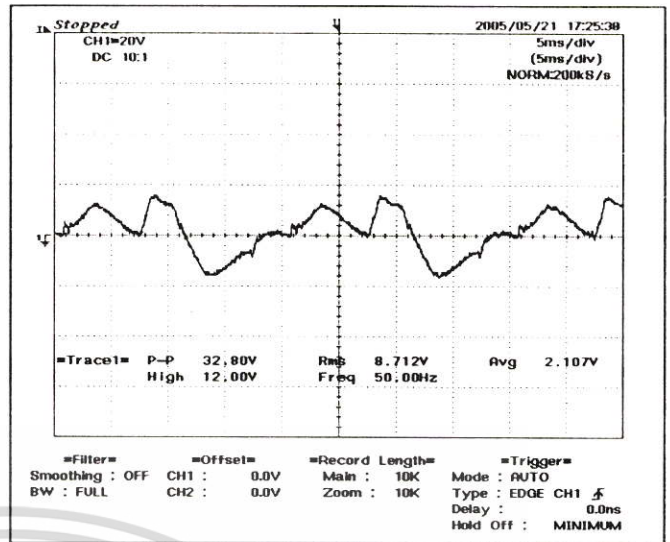


30 kV/m

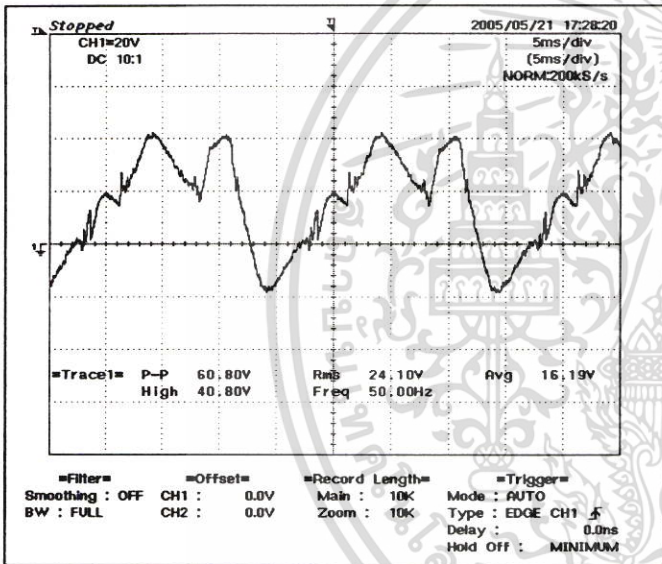
ระยะห่างระหว่าง Box 50 ซม. ทดสอบครั้งที่ 1



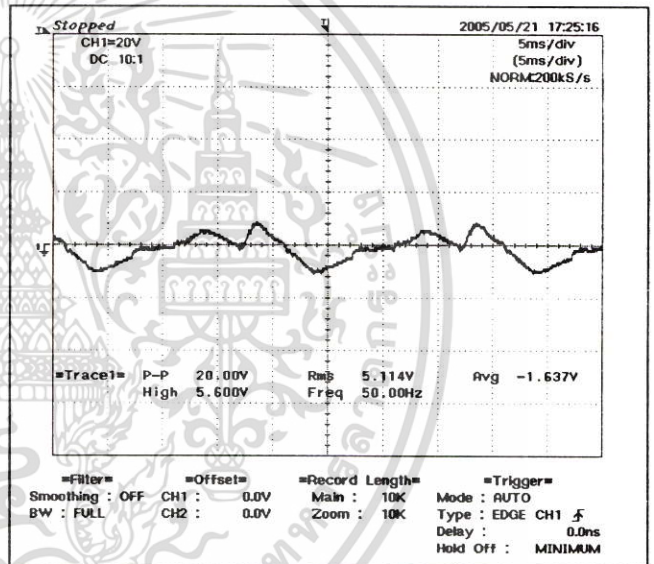
50 kV/m



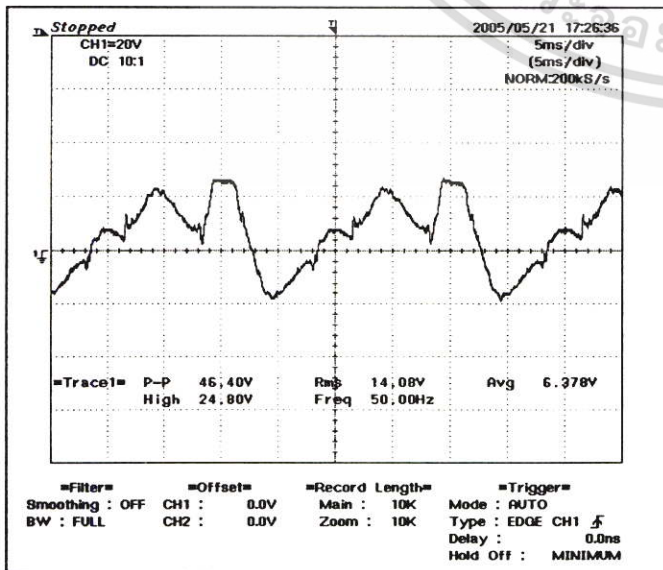
20 kV/m



40 kV/m

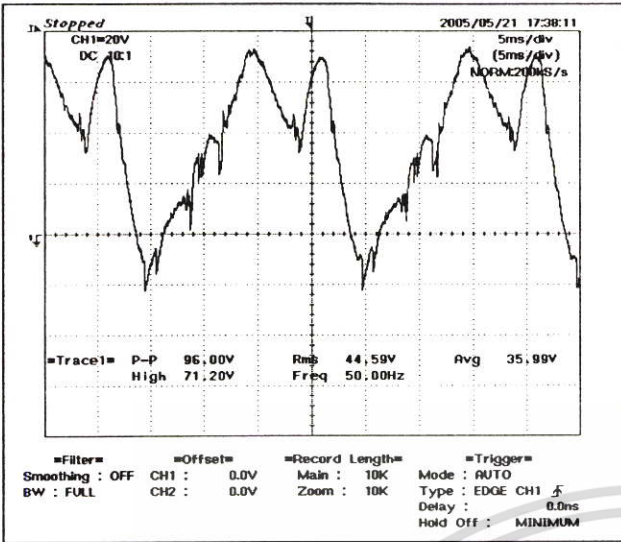


10 kV/m

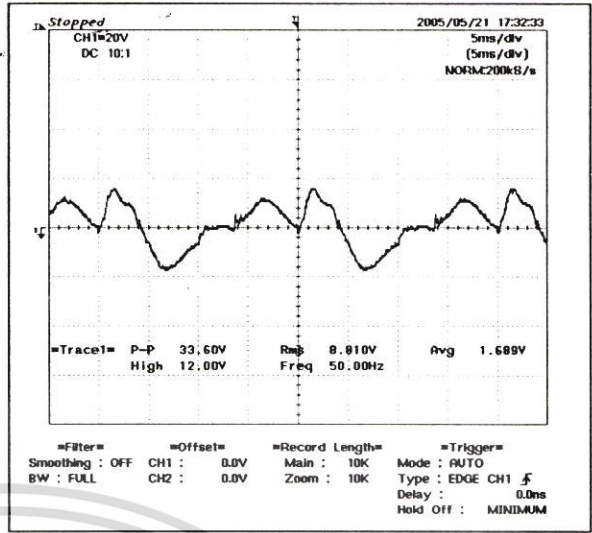


30 kV/m

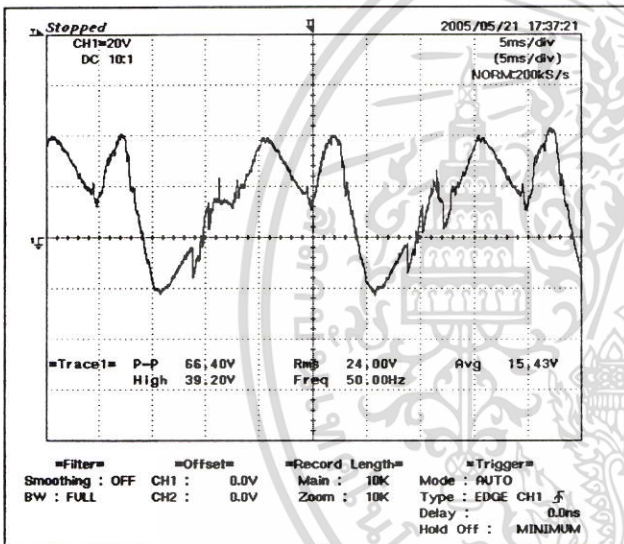
ระยะห่างระหว่าง Box 50 ซม. ทดสอบครั้งที่ 2



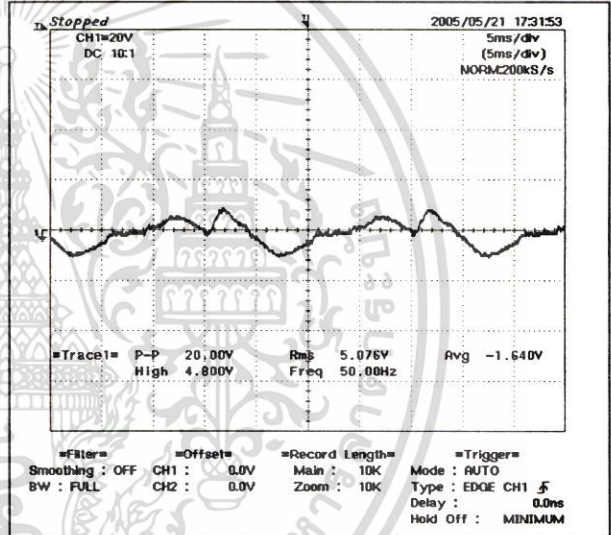
50 kV/m



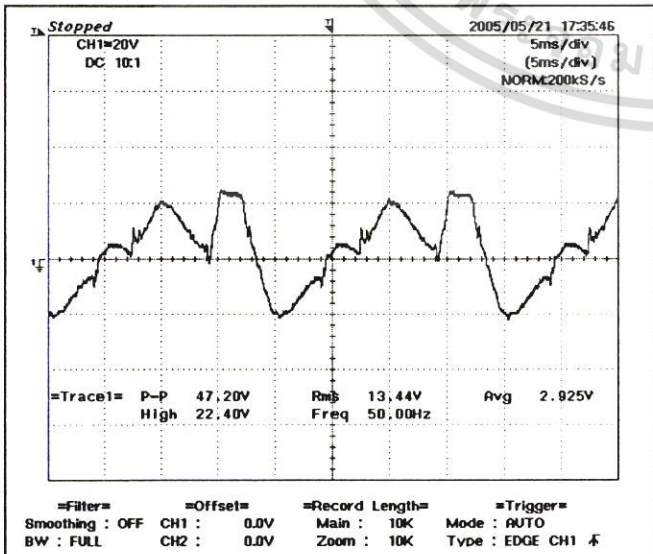
20 kV/m



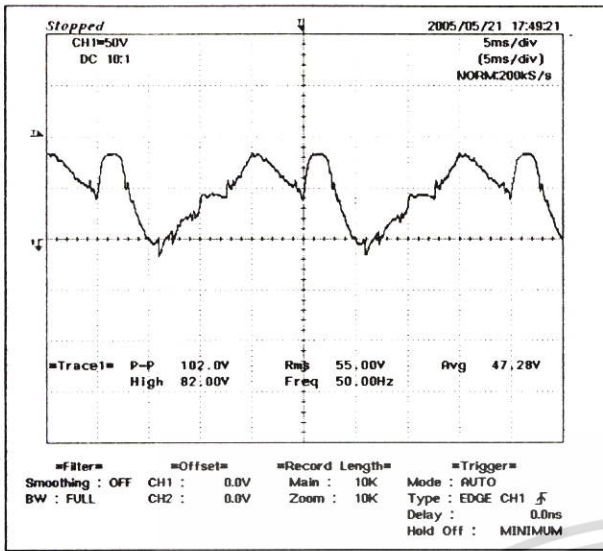
40 kV/m



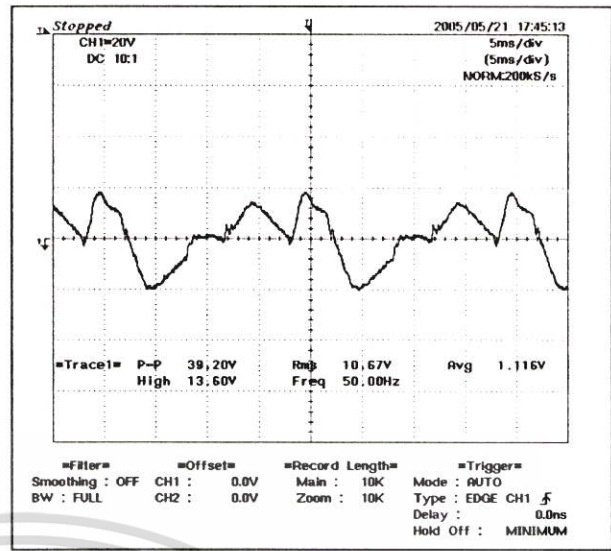
10 kV/m



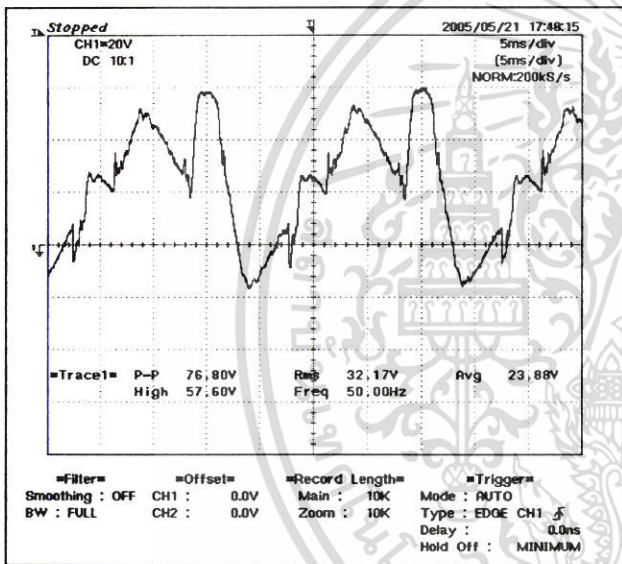
30 kV/m



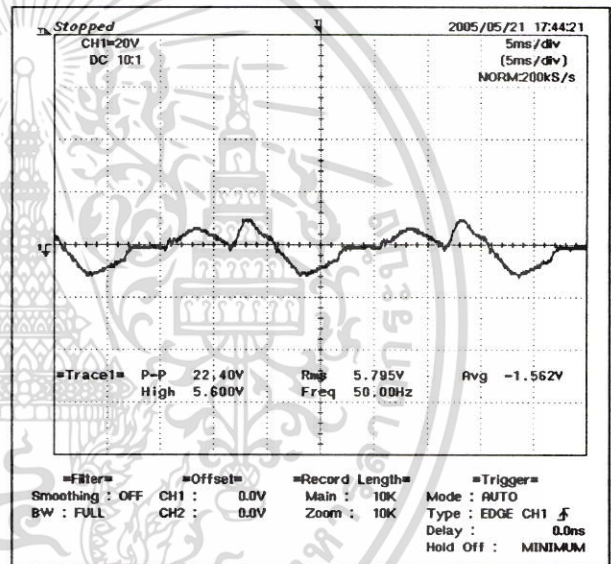
50 kV/m



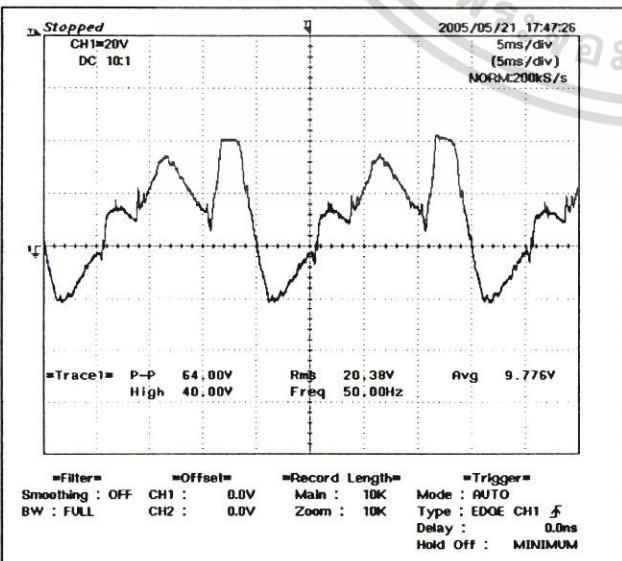
20 kV/m



40 kV/m

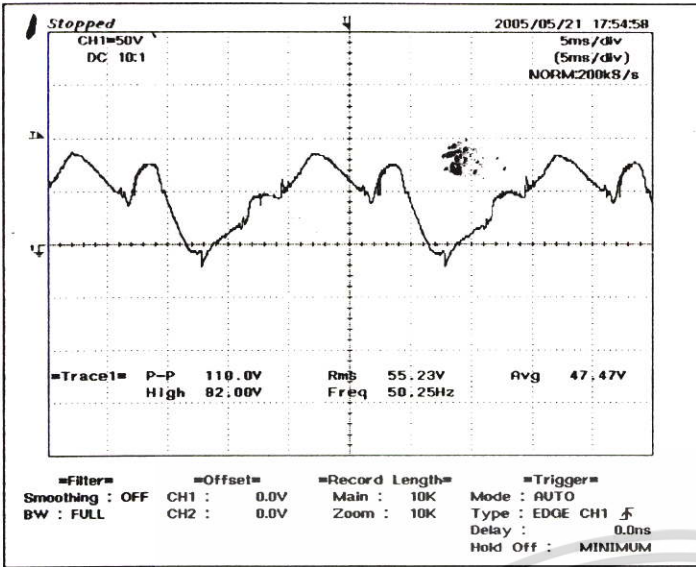


10 kV/m

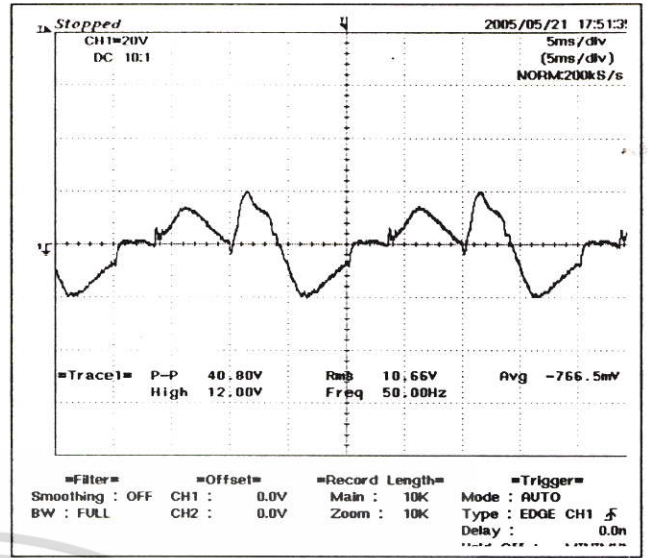


30 kV/m

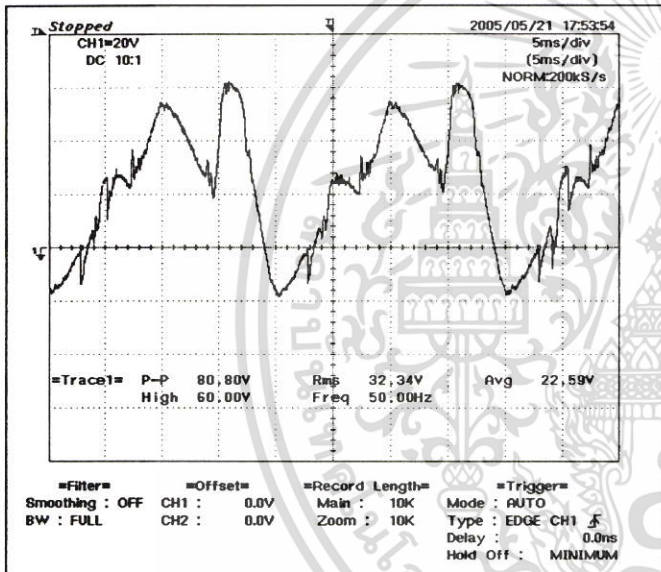
ระยะห่างระหว่าง Box 60 ซม. ทดสอบครั้งที่ 1



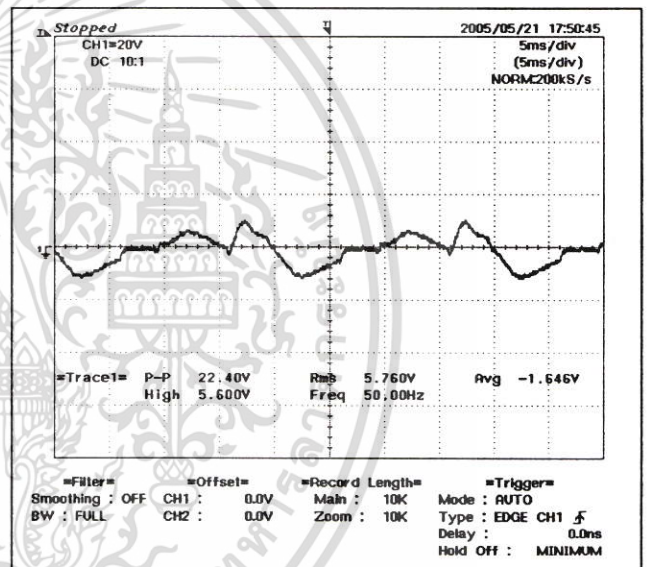
50 kV/m



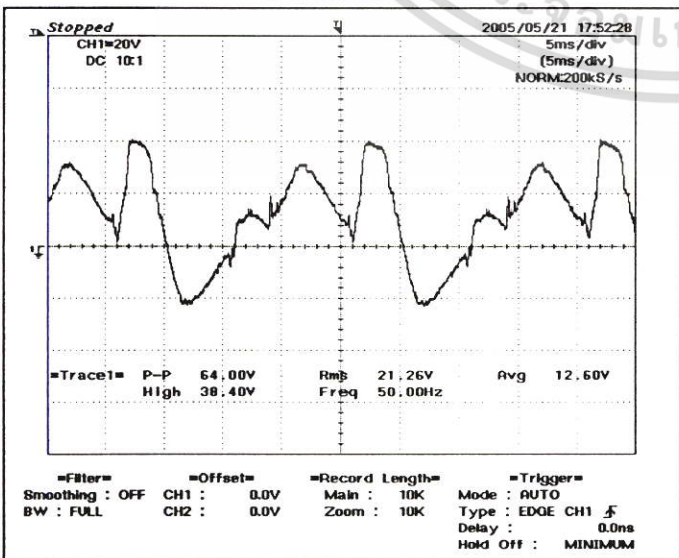
20 kV/m



40 kV/m

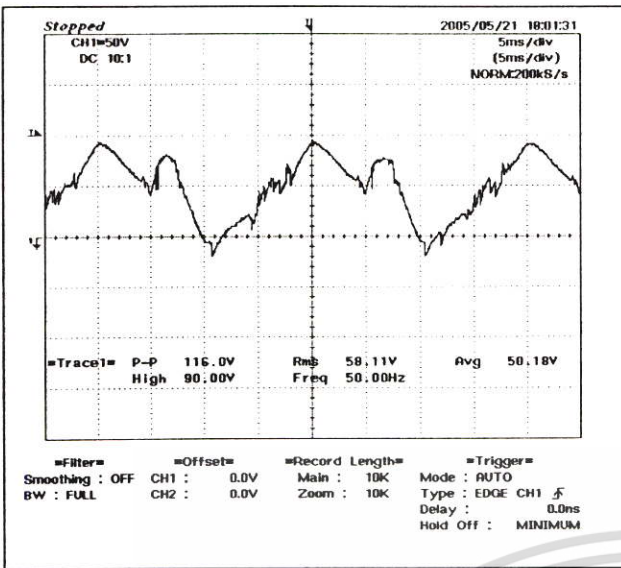


10 kV/m

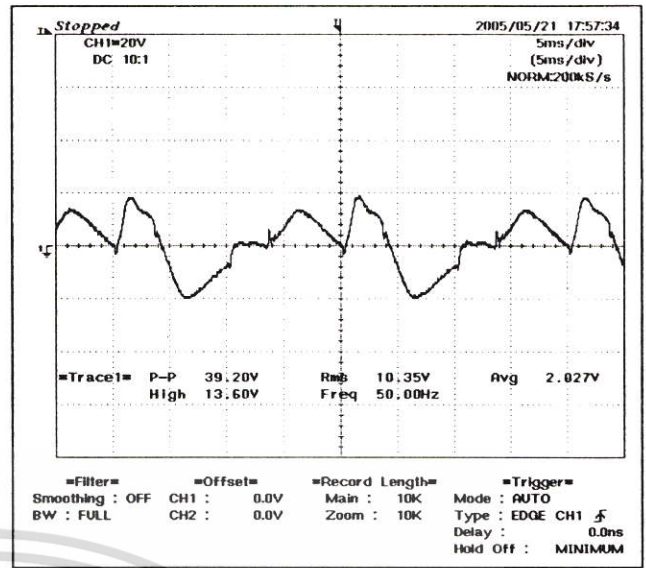


30 kV/m

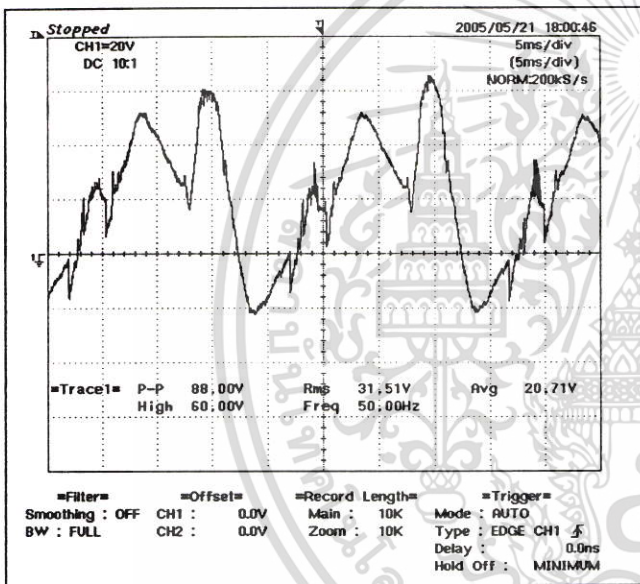
ระยะห่างระหว่าง Box 60 ซม. ทดสอบครั้งที่ 2



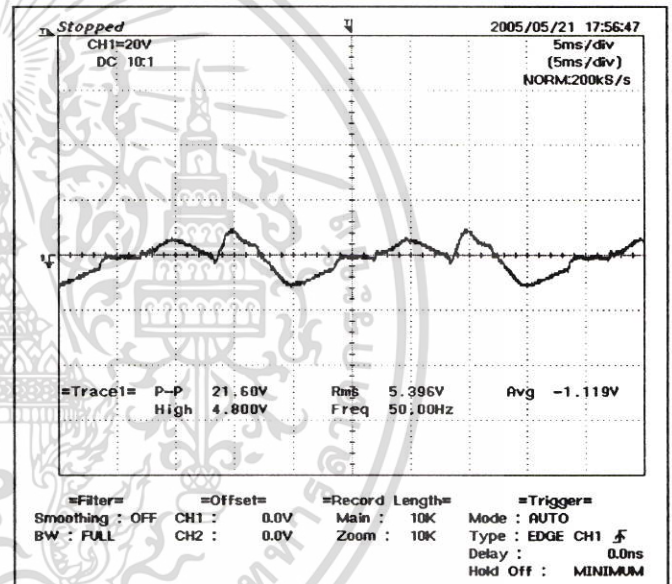
50 kV/m



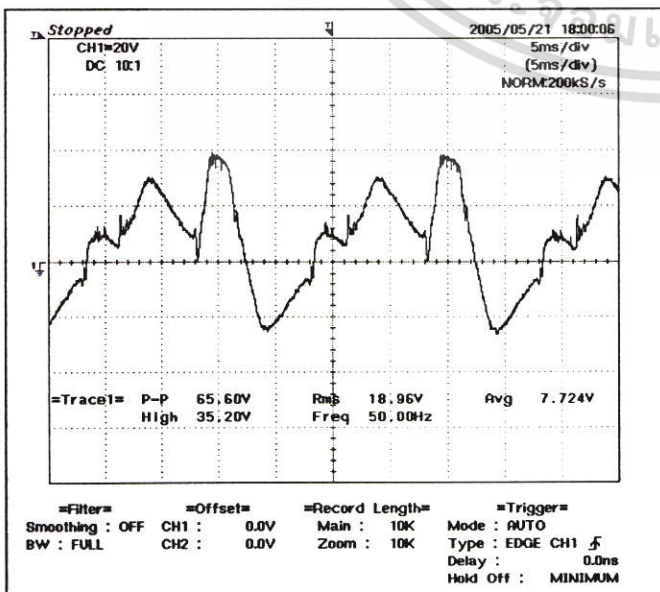
20 kV/m



40 kV/m



10 kV/m



30 kV/m

ระยะห่างระหว่าง Box 60 ซ.ม. ทดสอบครั้งที่ 3



ภาคผนวก ข
บทความที่ได้รับตีพิมพ์

การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าระหว่างสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง
และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับบริเวณใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง

The Analysis of Electric Field Effects between HVDC and HVAC Near Overhead Lines

บุษิต ทิพย์เจริญ* พัทธ์ชัย ปิ่นอนงค์** และศิริวัฒน์ โทษิเวชกุล*

*ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 0-2326-9902

**กองวิศวกรรมสายส่ง ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

53 ถนนจรัญสนิทวงศ์ อ.บางกรวย จ.นนทบุรี 11130 โทร 0-2436-3332 E-mail: tsept@egat.or.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ± 300 kV และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับแรงดัน 500 kV บริเวณใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยศึกษาถึงความแตกต่างระหว่างผลกระทบจากการเหนี่ยวนำที่เกิดจากคนสัมผัสกับวัตถุขนาดใหญ่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองชนิด เพื่อเปรียบเทียบความรุนแรงที่เกิดขึ้นระหว่างสนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองชนิด สำหรับการวัดความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นจะพิจารณาจากพลังงานสะสมที่เกิดขึ้นจากการเข้าไปสัมผัสกับวัตถุขนาดใหญ่ภายใต้การวิเคราะห์ในเงื่อนไขต่าง ๆ

จากการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในกรณีของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับได้มีการศึกษาถึงผลกระทบของการเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามไฟฟ้ามาแล้วตามเอกสารอ้างอิงที่ [1] แต่ในกรณีของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงลักษณะของสนามไฟฟ้าจะมีความแตกต่างกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ส่งผลทำให้ความรุนแรงของผลกระทบจากการเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองชนิดมีระดับของความรุนแรงที่แตกต่างกันออกไป และโดยส่วนมากแล้วผลกระทบส่วนใหญ่่มักจะเกิดบริเวณแหล่งชุมชนที่อาศัยอยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

คำสำคัญ: ผลกระทบของสนามไฟฟ้า, การเหนี่ยวนำ, พลังงานสะสม

2. ลักษณะของสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเกิดจากแรงดันไฟฟ้าทำให้เกิดประจุไฟฟ้ากระจายอยู่ทั่วบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับประจุที่กระจายอยู่รอบบริเวณสายส่งจะประกอบด้วยประจุบวกและประจุลบตามลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 50 Hz สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงประจุที่กระจายอยู่รอบบริเวณสายส่งจะมีเพียงประจุบวก หรือประจุลบหรือทั้งประจุบวกและประจุลบในเวลาเดียวกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของการส่งจ่ายว่าเป็นแบบโมโนโพลาร์ (monopolar) หรือเป็นแบบไบโพลาร์ (bipolar) นอกจากนั้นแล้วจากการที่ระบบไฟฟ้ากระแสตรงไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงดันไฟฟ้าตามเวลาทำให้บริเวณที่ผิวตัวนำของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงสะสมความเครียดสนามไฟฟ้าได้เร็วและเกิดการแตกตัวเป็นไอออนของอากาศรอบสายตัวนำได้ง่ายกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ ดังนั้นค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงนอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าประจุไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าประจุแล้วยังขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการเบรคคาร์บอนบางส่วนของอากาศรอบสายตัวนำที่เรียกว่าปรากฏการณ์โคโรน่าอีกด้วย ซึ่งระดับของการเกิดโคโรน่าจะแปรเปลี่ยนไปตามฤดูกาล

Abstract

This papers analyzed electric field effects , which generated from ± 300 kV HVDC and 500 kV HVAC lines near overhead line area. The induction effect were studied comparatively between HVDC and HVAC lines when some part of human body touched the large object under HV lines. The degree of effect were considered by stored energy for varios conditions.

Keywords: electric field effects, induction, stored energy

1. บทนำ

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมักถูกใช้ในกรณีที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับมีข้อจำกัดในการใช้งาน เช่น เมื่อสายส่งมีระยะทางไกลมาก ๆ หรือถูกใช้เป็นสายส่งเชื่อมโยงเมื่อระบบการส่งจ่ายทั้งสองมีความถี่ที่แตกต่างกัน สำหรับประเทศไทยเมื่อมีการนำสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงเข้ามาใช้งานแล้วสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ ผลกระทบที่เกิดขึ้น

3. การคำนวณสนามไฟฟ้า

3.1 สนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับจะพิจารณาประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใต้แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของระบบ ดังนี้

ประจุไฟฟ้า(Q)

จำนวนประจุไฟฟ้า, Q บนสายตัวนำที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า, V และสัมประสิทธิ์ของ Maxwell potential coefficient, P จะหาได้จาก[2]

$$[Q]=[P]^{-1}[V] \tag{1}$$

พิจารณาในส่วนของ real และ imaginary part จะได้

$$[Q_r]=[P]^{-1}[V_r] \quad , \quad [Q_i]=[P]^{-1}[V_i] \tag{2}$$

สนามไฟฟ้า (\vec{E})

ค่าของสนามไฟฟ้า, \vec{E} ของสายตัวนำไฟฟ้าใด ๆ ที่เกิดจากประจุไฟฟ้า, Q ณ จุดใด ๆ (x_n, y_n) บนพื้นดินภายใต้ตัวกลางอากาศที่มีค่า Dielectric constant, ϵ เท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m คือ [2]

$$\vec{E}_{x,n} = \frac{(q_m + jq_m)(x_n - x_n)}{2\pi\epsilon((x_n - x_n)^2 + (y_n - y_n)^2)} \tag{3}$$

$$\vec{E}_{y,n} = \frac{(q_m + jq_m)(y_n - y_n)}{2\pi\epsilon((x_n - x_n)^2 + (y_n - y_n)^2)} \tag{4}$$

เมื่อ n= จำนวนสายตัวนำไฟฟ้า

และผลรวมของสนามไฟฟ้า, \vec{E} ตามแนวแกน x และ y คือ

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{x,1} + \vec{E}_{x,2} + \vec{E}_{x,3} + \dots + \vec{E}_{x,n} \tag{5}$$

$$\vec{E}_y = \vec{E}_{y,1} + \vec{E}_{y,2} + \vec{E}_{y,3} + \dots + \vec{E}_{y,n} \tag{6}$$

$$E_T = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \tag{7}$$

3.2 สนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

สนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะพิจารณาประจุไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้าของระบบ และประจุไฟฟ้าเมื่อสายส่งอยู่ภายใต้สภาวะการเกิดโคโรน่าซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นได้ง่ายสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง สำหรับในบทความนี้ได้ใช้วิธีการ

คำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตามวิธีของHVTRC[3] ซึ่งเป็นวิธีที่ได้จากการทดลองที่เรียกว่า Reduced Scale

การคำนวณสนามไฟฟ้าตามวิธีของHVTRC

- ค่าสนามสนามไฟฟ้าในกรณีที่มีสายส่งไม่อยู่ในสภาวะของการเกิดโคโรน่า
- ประมาณค่าสนามไฟฟ้าเมื่อสายส่งเกิดอยู่ในสภาวะของการเกิดโคโรน่า(พิจารณาจากค่าสถิติของการเกิดความถี่) (การเกิดโคโรน่าพิจารณาจากค่าสถิติของการเกิดความถี่)
- หากค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงซึ่งเป็นสนามไฟฟ้าที่มีค่าอยู่ระหว่างการเกิดโคโรน่าและไม่เกิดโคโรน่า

สมการสนามไฟฟ้าสูงสุดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในสภาวะของการเกิดโคโรน่าเปอร์เซ็นต์ คือ

$$E_s = 1.31[1 - e^{-1.7P/H}] \cdot V/H \tag{8}$$

เมื่อ
 P = ระยะห่างของสายตัวนำในแนวระนาบ
 H = ความสูงของสายตัวนำเหนือพื้นดิน
 V = แรงดันไฟฟ้าของระบบ

ระดับของการเกิดโคโรน่าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะขึ้นอยู่กับค่าเกรเดียนท์โวลท์เดบรีเวนท์ที่ผิวของสายตัวนำและจากฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงส่งผลให้อากาศรอบสายตัวนำมีสภาพการเป็นฉนวนแตกต่างกันออกไป สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ± 300 kV ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้กำหนดค่าเกรเดียนท์โวลท์เดบรีเวนท์ที่สายตัวนำไว้เท่ากับ 23.2 kV/cm ซึ่งจากการทดลองที่สหรัฐอเมริกาด้วยวิธี Reduced Scale ตามเอกสารอ้างอิงที่ [3] จะได้ค่าของตัวแปรที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าเมื่อเกิดโคโรน่าขึ้นอยู่กับสภาพอากาศซึ่งในบทความนี้ การวิเคราะห์เลือกใช้ค่าจากเอกสารอ้างอิงที่[3]ตามลักษณะสภาพอากาศเกิดขึ้นในฤดูฝนลักษณะคล้ายอากาศทางภาคใต้ของประเทศไทยแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเกิดเกรเดียนท์โวลท์เดบรีเวนท์ในฤดูฝน

	Positive (field and current) peak		Negative (field and current) peak		
	G_c	K	G_c	K	
50% value	6k V/cm	0.058	50% value	6k V/cm	0.058
95% value	6k V/cm	0.058	95% value	6k V/cm	0.058

ระดับของการเกิดโคโรน่าเมื่อพิจารณาจากค่าทางสถิติของการเกิดเกรเดียนท์โวลท์เดบรีเวนท์ คือ

$$S = 1 - e^{-K(G - G_0)} \tag{9}$$

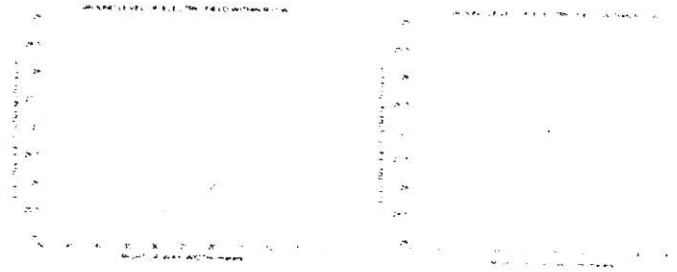
และค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่มีการส่งจ่ายในแบบไบโพลาร์ คือ

ด้านซ้าย $E(+) = E_c + S_{50}(+) |E_s - E_c|$ (10)

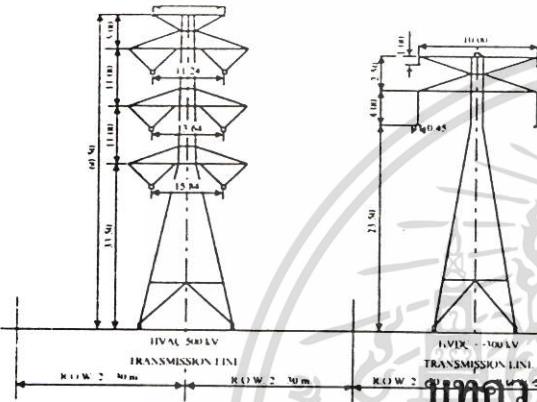
ด้านขวา $E(-) = E_c + S_{50}(-) |E_s - E_c|$ (11)

- เมื่อ E_c = สนามไฟฟ้าในกรณีสายส่งไม่เกิดโคโรน่า
- E_s = สนามไฟฟ้าเมื่อสายส่งเกิดโคโรน่า
- S_{50} = สถิติ 50% ของค่าของการเกิดโคโรน่า
- G_c = ค่าการเคียนท์โวลท์เดจเมื่อเริ่มเกิดแรงดันโคโรน่า
- G = ค่าการเคียนท์โวลท์เดจสูงสุด
- K = coefficient

DC ELECTRIC FIELD OF BIPOLAR ±300 kV LINE



AC ELECTRIC FIELD OF DOUBLE CIRCUIT 500 kV LINE



ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

รูปที่ 2 สนามไฟฟ้าภายใน R.O.W. ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองชนิด

รูปที่ 1 ลักษณะเสาส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองชนิด

ตารางที่ 2 ข้อมูลสำหรับการคำนวณสนามไฟฟ้า

ลักษณะข้อมูล	HVAC 500 kV	HVDC ± 300 kV
Conductor type	4x1272 kcmil (0.457 m. spacing)	2x954 kcmil (0.45 m. spacing)
OHG. wire	1x3/8 "(EHS)	2x477 kcmil (0.25 m. spacing)
Span length	390 m.	450 m.
Ground clearance	13.0 m.	8.50 m.
Sag of conductor	15.67 m. at 75 °C	15.00 m. at 75 °C
Right-of-way	60 m.	40 m.
Max. system voltage	525 kV	± 300 kV
Phase sequence	A-B-C and C-B-A	-

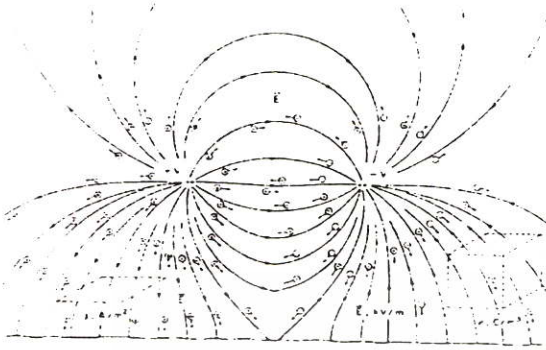
จากรูปแสดงรายละเอียดของเสาไฟฟ้าแรงสูงในรูปที่ 1 และข้อมูลทั่วไปของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทั้งสองชนิดในตารางที่ 2 เราสามารถคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับวงจรคู่ และสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่มีการส่งถ่ายแบบไบโพลาร์ โดยใช้โปรแกรมที่สร้างจาก MATLAB มาคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเขตเดินสายไฟฟ้าได้ ดังนี้

ในรูปที่ 2 เป็นกราฟของสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้จากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงและสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับบนพื้นดิน (พิจารณาที่ความสูง 1 เมตรเหนือพื้นดิน) ที่ตำแหน่งดกร่องข้างของสายส่ง ซึ่งจากการคำนวณด้วยโปรแกรมที่สร้างจาก MATLAB พบว่าค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงขนาดแรงดัน ±300 kV ระหว่างด้านที่เป็นซ้ายและด้านที่เป็นขวาลบจะมีค่าเท่ากับ โดยที่ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดสำหรับด้านที่เป็นซ้ายลบจะมีค่าเท่ากับ 28.648 kV/m และค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดสำหรับด้านที่เป็นขวาลบจะมีค่าเท่ากับ 28.648 kV/m ส่วนค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับวงจรคู่แรงดัน 500kV จะมีค่าเท่ากับ 5.798 kV/m

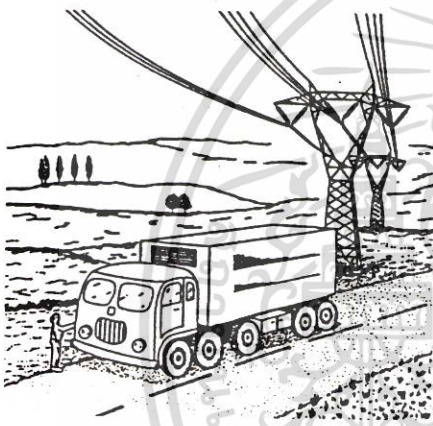
4. การเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้า

สนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะเหนี่ยวนำกับวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งลักษณะของการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในระบบของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับจะเกิดขึ้นในลักษณะที่เรียกว่า Capacitive Charging Effect ในขณะที่ลักษณะของการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในระบบแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะเกิดขึ้นในลักษณะที่เรียกว่า object charging ที่เกิดจากประจุไฟฟ้าบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมวัตถุตัวนำที่อยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับจะพิจารณาในรูปฟังก์ชันของคาปาซิแตนซ์กับค่าความต้านทาน สำหรับสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงแล้วค่าของแรงดันตก

พร้อมวัดความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่ความดันเท่ากัน ซึ่งสามารถพิจารณารายละเอียดได้ในรูปที่ 5



รูปที่ 3 การกระจายประจุไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง



รูปที่ 4 การเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าเมื่อคนสัมผัสรถบรรทุก ในรูปที่ 4 เป็นรูปรถบรรทุกที่จอดอยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งในส่วนของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับจะเกิดการเหนี่ยวนำกับโครงสร้างที่เป็นโลหะของรถบรรทุก โดยพิจารณาผลกระทบที่มีต่อคนที่เข้าไปสัมผัสในรูปของค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ไหลผ่านร่างกายลงสู่ดิน หรือที่เราเรียกว่ากระแสลัดวงจร (short-circuit current: I_{SC}) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$I_{SC} = j\omega E_{AC} \cdot S \tag{12}$$

เมื่อ I_{SC} เป็นกระแสลัดวงจรที่พิจารณาภายใต้สนามไฟฟ้า, E_{AC} และพื้นที่สัมผัสของรถบรรทุก, S และ $\omega = 2\pi f$

และเมื่อรถบรรทุกจอดอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 5.798 kV/m (ค่าจากกราฟสนามไฟฟ้าในรูปที่ 2) ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับวงจร 500kV ค่ากระแสลัดวงจรต่อพื้นที่รถบรรทุกจะมีค่าเป็นตามสมการ ดังนี้

$$I_{SC} = E_{AC} \cdot S / (3 \times 10^8) \tag{13}$$

$$I_{SC} = 193.875 \text{ mA} \cdot \text{m}^2$$

ในส่วนของกรณีเหนี่ยวนำจากสนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะพิจารณากระแสไฟฟ้าจากความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้า (ion current density, J) มีหน่วยเป็น A/m^2 ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการ ดังนี้

$$\vec{E}_{DC} = -\nabla V \tag{14}$$

$$\epsilon \cdot \nabla V = \rho \tag{15}$$

$$\rho = \frac{J}{\mu \cdot E_{DC}}; J = \rho \mu \cdot E_{DC} \tag{16}$$

เมื่อ E_{DC} เป็นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง, V เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า, ρ เป็นความหนาแน่นประจุไฟฟ้า และ μ เป็นอัตราการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า (ion mobility)

สำหรับในบทความนี้ได้พิจารณาหาค่าความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าโดยใช้วิธี HVTRC (3) เช่นเดียวกับกับการหาค่าสนามไฟฟ้า นั่นคือพิจารณาจากสภาวะการเกิดโคโรนาของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ดังนั้นค่าความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าสูงสุดเมื่อสายส่งอยู่ในสภาวะที่เกิดโคโรนามากที่สุด (17), (18) (ion mobility: $\mu (+) = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{v.s}$, $\mu (-) = 1.15 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{v.s}$)

ด้านขั้วบวก $J_s(+)= 1.65 \times 10^{-15} [1 - e^{-0.7P/H}] \cdot \frac{V^2}{H^3} \tag{17}$

ด้านขั้วลบ $J_s(-)= -2.15 \times 10^{-15} [1 - e^{-0.7P/H}] \cdot \frac{V^2}{H^3} \tag{18}$

และค่าของความหนาแน่นประจุกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงที่มีการส่งจ่ายในแบบไบโพลาร์คือ

ด้านขั้วบวก $J(+)= J_e + S_{50}(+) [J_s - J_e] \tag{19}$

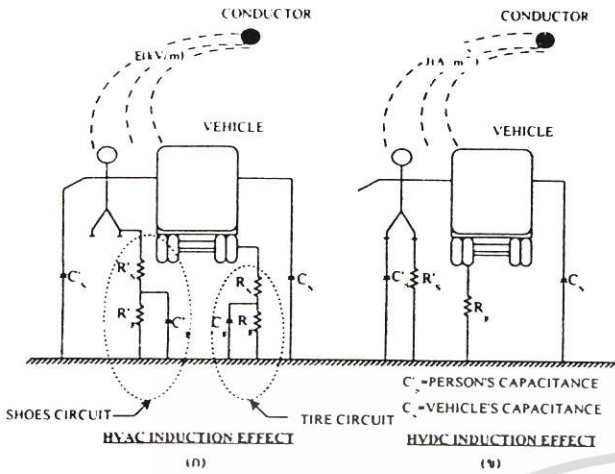
ด้านขั้วลบ $J(-)= J_e + S_{50}(-) [J_s - J_e] \tag{20}$

เมื่อ $J_e = 0$ (สำหรับกรณีที่สายส่งเกิดโคโรนา)

และค่าของกระแสไฟฟ้าสูงสุดต่อพื้นที่รถบรรทุกเมื่อสายส่งมีระยะห่างของสายตัวนำ (P) เท่ากับ 10 เมตร, ความสูง (H) เท่ากับ 8.5 เมตร เราสามารถใช้สมการที่ (17) - (20) หาค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ ดังนี้

ด้านขั้วบวก $J(+) = 0.554 \text{ nA/m}^2$

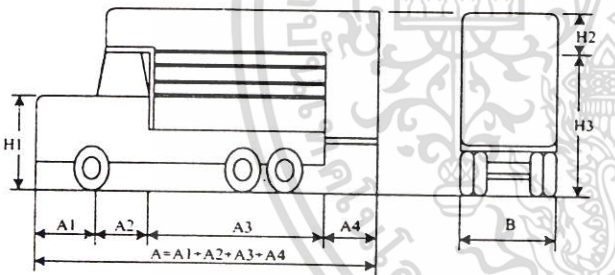
ด้านขั้วลบ $J(-) = 0.339 \text{ nA/m}^2$



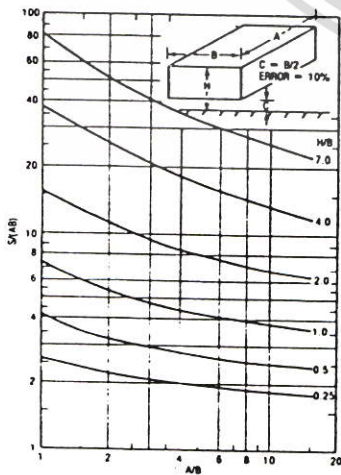
รูปที่ 5 วงจรสมมูลของการเหนี่ยวนำระหว่างคนกับรถบรรทุก

5. การวิเคราะห์ผลกระทบจากการเหนี่ยวนำ

ในรูปที่ 6 แสดงขนาดของรถบรรทุกที่จอดอยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงและถูกใช้เป็นตัวแบบในการวิเคราะห์ผลกระทบจากการเหนี่ยวนำ โดยที่พื้นที่ของรถบรรทุกจะเป็นพื้นที่ที่สมมูลที่พิจารณาในรูป shape factor ทรงสี่เหลี่ยมเหนือพื้นดิน(ตามรูปที่ 7) สำหรับค่าความสูงของรถบรรทุกที่พิจารณาจะเป็นความสูงเฉลี่ย(H)

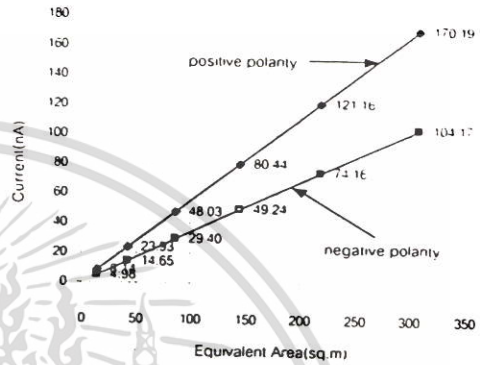


รูปที่ 6 ขนาดรถบรรทุกสำหรับวิเคราะห์ผลกระทบจากการเหนี่ยวนำ

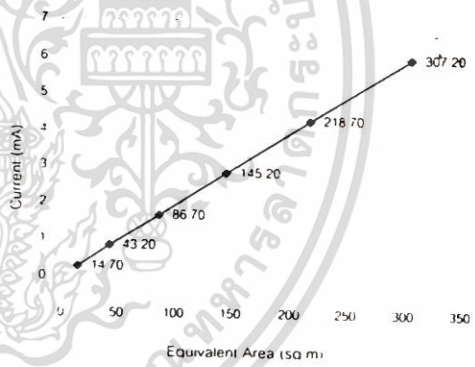


รูปที่ 7 Shape factor for rectangular solids [2]

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าพื้นที่ที่สมมูลของรถบรรทุกจะถูกกำหนดจากอัตราส่วนระหว่างความสูงเฉลี่ยคือความกว้างของรถบรรทุก (H/B) และอัตราส่วนระหว่างความยาวคือความกว้างของรถบรรทุก (A/B) ซึ่งจากการกำหนดอัตราส่วนดังกล่าวทำให้เราสามารถหาพื้นที่ที่สมมูลของรถบรรทุกได้เมื่อพิจารณาจาก shape factor ในรูปที่ 7 และเมื่อพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือพื้นที่ที่คำนวณได้จากหัวข้อที่แล้วจะทำให้เราทราบถึงปริมาณของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจริงตามพื้นที่ของรถบรรทุก



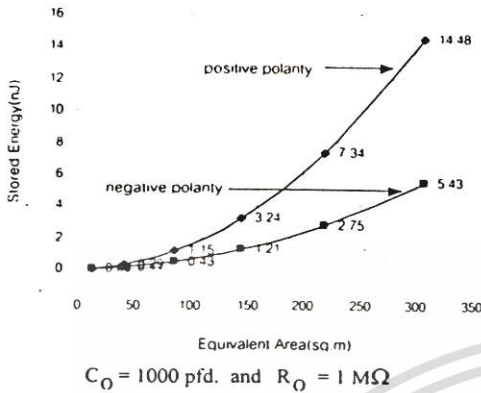
รูปที่ 8 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง



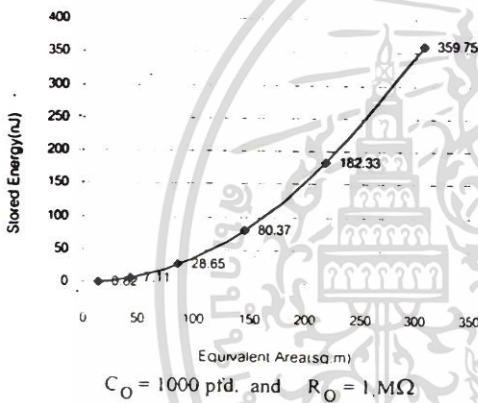
รูปที่ 9 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

ในรูปที่ 8 และ 9 เป็นกราฟแสดงค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วน ความสูงต่อความกว้างของตัวรถ(H/B) เท่ากับ 0.5 โดยเป็นค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกที่จอดอยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายใต้สนามไฟฟ้าสูงสุด และเมื่อพิจารณาให้พื้นที่ที่สมมูล(S) ของรถบรรทุกมีค่ามากขึ้นค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ของรถบรรทุกที่เพิ่มมากขึ้นด้วย โดยที่ในรูปที่ 8 เป็นค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของรถบรรทุกที่เกิดจากสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง โดยที่ปริมาณของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ด้านข้างรถและที่ด้านขั้วรถจะมีค่าไม่เท่ากัน และปริมาณของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะมีหน่วยเป็นนาโนแอมป์ (nanoampere : nA) ในรูปที่ 9 เป็นค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของรถ

บรรทุกจากสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับซึ่งปริมาณของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีหน่วยเป็นมิลลิแอมป์ (milliampere : mA)



รูปที่ 10 พลังงานสะสมที่บรรทุกจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง



รูปที่ 11 พลังงานสะสมที่บรรทุกจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

ในรูปที่ 10 และ 11 เป็นกราฟแสดงการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าในรูปของพลังงานสะสมที่เกิดขึ้นจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและค่าคาปาซิแตนซ์ของบรรทุก ซึ่งสามารถพิจารณาได้ ดังนี้

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ

$$V_{OC} = I_{SC} / (j\omega C_0) \tag{21}$$

$$J_{max} = C_0 \cdot V_0^2 \tag{22}$$

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง

$$V_0 = I \cdot R_0 \tag{23}$$

$$J_{max} = \frac{1}{2} C_0 \cdot V_0^2 \tag{24}$$

เมื่อ J_{max} เป็นค่าพลังงานสะสมสูงสุดที่เกิดขึ้นบนบรรทุก, C_0 เป็นค่าคาปาซิแตนซ์ของบรรทุกเทียบกับกราวด์ และ V_{og}, V_0 เป็นค่าของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำระหว่างบรรทุกเทียบกับกราวด์

6. สรุป

ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับจะมีระดับของความรุนแรงมากกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง ซึ่งค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบรรทุกที่คำนวณได้พบว่าในส่วนของสายส่งไฟฟ้ากระแสตรงจะมีค่าน้อยกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ และจากการพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของพลังงานสะสมยิ่งเห็นได้ชัดเจนว่าพลังงานสะสมที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงจะมีค่าน้อยกว่ามาก ซึ่งข้อมูลในส่วนนี้สามารถบอกได้ว่าผลกระทบจากการเหนี่ยวนำที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรงมีค่าน้อยกว่า

เอกสารอ้างอิง

- [1] พัทธกษ ปิ่นอนงค์, ศิริวิวัฒน์ โพธิเวชกุล "การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 กิโลโวลท์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23, 23-24 พฤศจิกายน 2543, หน้า 53-56.
- [2] Transmission Line Reference Book 345 and Above /Second Edition, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1982.
- [3] HVDC Transmission Line Reference Book, EPRI TR-102764 Project 2472-03 Final Report, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1993.
- [4] Transmission Line Reference Book HVDC ±600 kV, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, pp.73-100.

ประวัติผู้เขียนบทความ



นาย นุชิต ทิพย์เจริญ จบการศึกษา ว.บ. ไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล ปัจจุบันกำลังศึกษาปริญญาโท ที่ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง



นาย พัทธกษ ปิ่นอนงค์ จบการศึกษา ว.ม. ไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกร ระดับ 7 กองวิศวกรรมสายส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ทำงานวิจัยด้านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง



นาย ศิริวิวัฒน์ โพธิเวชกุล จบการศึกษา ว.บ. ไฟฟ้า และ ว.ม. ไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำงานวิจัยในด้าน วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง, วัสดุวิศวกรรมไฟฟ้า, การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังและการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย นุชิต ทิพย์เจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	14 มิถุนายน 2521
ที่อยู่	3/13 หมู่บ้านเขาวพรรณ ต.บางกร่าง อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000
ประวัติการศึกษา	2538 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ โรงเรียนกองทัพบกอุปถัมภ์ช่างกล ขส.ทบ 2543 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ศูนย์กลางสถาบันเทคโนโลยีราชมงคล คลอง 6 จ. ปทุมธานี
ประสบการณ์ทำงาน	พ.ศ.2543-2544 อาจารย์ประจำ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันราชภัฏราชนครินทร์ พ.ศ. 2544-ปัจจุบัน วิศวกรระบบอัตโนมัติ ฝ่าย AUTOMATION สถาบันไทย เยอรมัน

