การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น

THE ELECTROMAGNETIC FIELD EFFECTS ANALYSIS WHICH INTERFERE TO ENVIRONMENT NEAR THE OVERHEAD TRANSMISSION LINES AND CASE STUDY OF EFFECTS REDUCTION

พิทักษ์ ปิ่นอนงค์

PITHAK PIN-ANONG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974-648-628-4

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น

THE ELECTROMAGNETIC FIELD EFFECTS ANALYSIS WHICH INTERFERE TO ENVIRONMENT NEAR THE OVERHEAD TRANSMISSION LINES AND CASE STUDY OF EFFECTS REDUCTION

พิทักษ์ ปิ่นอนงค์

PITHAK PIN-ANONG

เลขหมู่.............................
เลขทะเบียน 43280
วัน, เดือน, ปี 21 ส.ค. 2545

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2545

ISBN 974-648-628-4

THE ELECTROMAGNETIC FIELD EFFECTS ANALYSIS WHICH INTERFERE TO ENVIRONMENT NEAR THE OVERHEAD TRANSMISSION LINES AND CASE STUDY OF EFFECTS REDUCTION

PITHAK PIN-ANONG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2002

ISBN 974-648-628-4

COPYRIGHT 2002

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและกรณีศึกษาการลดผลกระทบที่เกิดขึ้น
ชื่อนักศึกษา	นายพิทักษ์ ปิ่นอนงค์
รหัสประจำตัว	41061159
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2545
อาจารย์ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

บทคัดย่อ

ปัจจุบันผลกระทบที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอันเนื่องมาจากการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้สร้างปัญหาให้กับหน่วยงานที่ออกแบบและก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นอย่างมาก ดังนั้นโครงงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเหนือพื้นดินและผลกระทบที่มีต่อสิ่งแวดล้อมใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยเลือกวิเคราะห์จากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 กิโลโวลต์ซึ่งเป็นสายส่งไฟฟ้าที่มีระดับของแรงดันไฟฟ้าสูงที่สุดในประเทศไทย และเนื่องจากเป็นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงของความถี่ที่ต่ำมากๆ ดังนั้นจึงสามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กรวมทั้งผลกระทบที่เกิดขึ้นแยกออกจากกันได้ สำหรับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้อาศัยโปรแกรมที่สร้างขึ้นจาก MATLAB มาใช้วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงโดยพัฒนาขีดความสามารถของโปรแกรมให้สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในรูปแบบ 3 มิติ และนำเสนอผลจากการวิเคราะห์ทางด้านกราฟิกให้สามารถแสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในรูปของกราฟแบบพื้นผิวและกราฟแบบเส้นโครงร่าง นอกจากนั้นยังได้อาศัยข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากบริเวณที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 กิโลโวลต์พาดผ่านมาประกอบการวิเคราะห์ด้วย หลังจากนั้นค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้จะนำไปสู่การวิเคราะห์หาผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของการเหนี่ยวนำบนวัตถุขนาดใหญ่ที่อยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง สุดท้ายได้นำเสนอการศึกษาการลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กลงเพื่อใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อไป

Thesis Title	The Electromagnetic Field Effects Analysis Which Interfere to Environment Near the Overhead Transmission Lines and Case Study of Effects Reduction
Student	Mr.Pithak Pin-Anong
Student ID.	41061159
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2002
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Siriwat Potivejkul

ABSTRACT

Nowadays, effects of electromagnetic fields generated by the distribution of high voltage electricity via transmission line systems cause substantial problems to designers and constructors of high voltage system authorities. Therefore, this study is initiated to propose an analysis of the effects of such electromagnetic fields and to investigate the effects on environmental systems. The study is focused on a 500 kV system, which is currently the highest voltage level in Thailand. Since the electromagnetic field is in low frequency range, the effects from electric and magnetic fields can be separately analyzed. A program developed using MATLAB is used to analyze the electric and magnetic fields generated from the high voltage transmission lines. The program is able to perform the analysis of electric and magnetic fields in 3-dimensional models, and present the result of their intensity in the form of a surface graphic and a contour graphic. In addition, field measurements of electric and magnetic fields collected from the area around the 500 kV system are taken into account in the analysis. The value of the obtained electric and magnetic fields are used to calculated the induced effect on large objects located adjacent to the transmission line. Finally, the suggestion on the reduction of the electric and magnetic fields are presented.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจาก รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในการอบรมสั่งสอนทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จ

ขอขอบพระคุณ คุณกิตติ เพ็ชรสันทัด ผู้ช่วยผู้จัดการหน่วยวิศวกรรมสายส่ง โครงการวิศวกรรมระบบส่ง 500 เควี ที่ช่วยเหลือทางด้านข้อมูลและคำแนะนำในบางจุดที่ผู้วิจัยติดปัญหาบางอย่าง ซึ่งมีส่วนช่วยทำให้ผู้วิจัยเข้าใจในปัญหาเหล่านั้น

ขอขอบพระคุณหน่วยงานต้นสังกัดของผู้วิจัย กองวิศวกรรมสายส่ง ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ช่วยสนับสนุนทางด้านข้อมูลในการทำวิจัย

สุดท้ายขอขอบพระคุณต่อบุพการีเป็นอย่างสูงที่ได้เลี้ยงดูอบรมสั่งสอนและส่งเสียให้ได้เล่าเรียน ตลอดจนเพื่อน ๆ น้อง ๆ นักศึกษาทุกท่านที่ช่วยเหลือทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

พิทักษ์ ปิ่นอนงค์

สารบัญ

หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II
กิตติกรรมประกาศ.....III
สารบัญ.....IV
สารบัญตาราง.....VIII
สารบัญรูป.....IX
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....3

บทที่ 2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....4
2.1 กล่าวนำ.....4
2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง.....4
2.2.1 สนามไฟฟ้า.....5
2.2.2 สนามแม่เหล็ก.....6
2.3 วิธีคำนวณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง.....6
2.3.1 การคำนวณสนามไฟฟ้า.....6
2.3.2 การคำนวณสนามแม่เหล็ก.....9
2.4 การวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง.....10
2.4.1 ทฤษฎีและหลักการของเครื่องวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้า.....10
2.4.2 ทฤษฎีและหลักการของเครื่องวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก.....11
2.4.3 วิธีวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....13
2.5 บทสรุป.....13

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก......................................15

3.1 กล่าวนำ..15

3.2 หลักการทำงานของโปรแกรม...15

3.2.1 ข้อมูลอินพุท...15

3.2.1.1 ตัวแปรแสดงรายละเอียดของสายตัวนำไฟฟ้า

และตำแหน่งการวาง...15

3.2.1.2 ตัวแปรแสดงข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า..........................16

3.2.1.3 ตัวแปรแสดงข้อมูลตำแหน่งที่ต้องการวิเคราะห์..........................16

3.2.2 โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก....................................17

3.2.3 การแสดงผล...21

3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม..25

3.4 บทสรุป..29

บทที่4 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก...31

4.1 กล่าวนำ..31

4.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV 31

4.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสูงสุด...33

4.4 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า...............................40

4.4.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว...41

4.4.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่...50

4.5 การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณสายส่ง 500 kV 58

4.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด...58

4.5.2 วิธีวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก..59

4.6 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งระยะไกล...62

4.7 บทสรุป..65

บทที่5 ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก...66

5.1 กล่าวนำ..66

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

5.2 ผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของการเหนี่ยวนำ....66

5.2.1 การเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามไฟฟ้า....66

5.2.2 การเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็ก....66

5.3 การวิเคราะห์ผลการเหนี่ยวนำกับวัตถุขนาดใหญ่ใกล้สายส่ง....67

5.4 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนวัตถุในเขตเดินสายไฟฟ้า....82

5.5 บทสรุป....86

บทที่6 การลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก....87

6.1 กล่าวนำ....87

6.2 การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก....87

6.2.1 พิจารณาจากการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง....87

6.2.1.1 ลักษณะของการจัดวางตัวนำ....87

6.2.1.2 ความสูงของสายส่ง....95

6.2.1.3 ระยะห่างระหว่างเฟส....95

6.2.1.4 ขนาดของสายไฟฟ้า....96

6.2.1.5 การจัดเรียงลำดับเฟส....97

6.2.2 วิธีการชิลด์....102

6.2.2.1 การชิลด์โดยใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์
วางในแนวดิ่ง....103

6.2.2.2 การชิลด์โดยธรรมชาติ....110

6.3 บทสรุป....110

บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ....112

7.1 สรุปผลการวิจัย....112

7.1.1 โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก....112

7.1.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก....112

7.1.3 ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก....113

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

7.1.4 การลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก......................113

7.2 ข้อเสนอแนะ.. 113

เอกสารอ้างอิง..115

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การคำนวณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง..117

ภาคผนวก ข โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง..172

ภาคผนวก ค ระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ
ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV..196

ภาคผนวก ง ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเหนือพื้นดิน
เมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงต่าง ๆ..205

ภาคผนวก จ บทความที่ได้รับการตีพิมพ์...208

ประวัติผู้เขียน...214

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
ของสายส่ง 500 kV วงจรคู่..........21

4.1 ข้อมูลทั่วไปของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV..........33

4.2 พารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด..........34

4.3 ความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV..........36

4.4 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด..........39

4.5 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดิน
เมื่อพิจารณาจากกราฟแบบเส้นโครงร่างตามรูปที่ 4.11 และ 4.12..........44

4.6 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดิน
เมื่อพิจารณาจากกราฟแบบเส้นโครงร่างตามรูปที่ 4.16 และ 4.17..........53

4.7 คุณสมบัติของเครื่องมือวัด EMDEX II..........58

4.8 ค่าภาระทางโหลดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500kVวงจรเดี่ยวขณะที่วัด..........61

4.9 ค่าภาระทางโหลดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500kVวงจรคู่ขณะที่วัด..........62

5.1 สมการพื้นที่สมมูลของยุ้งฉาง..........69

5.2 สมการพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัย..........73

5.3 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับรถบรรทุกภายใต้สนามไฟฟ้า 1-6 kV/m..........86

6.1 รูปแบบของการจัดวางตัวนำและเฟสของเสาไฟฟ้าตามรูปที่ 6.1 และ 6.2..........92

6.2 การจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่งวงจรคู่ในแบบต่าง ๆ..........97

7.1 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามข้อกำหนดของ กฟผ.
และการวิเคราะห์..........113

ก-1 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าสนามไฟฟ้า(วงจรเดี่ยว)..........118

ก-2 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าสนามแม่เหล็ก(วงจรเดี่ยว)..........132

ก-3 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าสนามไฟฟ้า(วงจรคู่)..........140

ก-4 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าสนามแม่เหล็ก(วงจรคู่)..........163

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	Frequency spectrum	4
2.2	การเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดในตัวกลางอากาศ	6
2.3	ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์สำหรับวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้า	11
2.4	ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์สำหรับวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก	12
2.5	ตำแหน่งการวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดิน ณ. ตำแหน่งตกท้องช้าง	13
3.1	ตัวอย่างของข้อมูลอินพุทสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก	16
3.2	โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์สนามแม่เหล็กแบบ 2 มิติ	17
3.3	โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์สนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติ	18
3.4	โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบ 2 มิติ	19
3.5	โฟลว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบ 3 มิติ	20
3.6	ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้าต่อระยะทาง	23
3.7	ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็กต่อระยะทาง	24
3.8	ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้า 3 มิติแบบพื้นผิว	24
3.9	ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็ก 3 มิติแบบพื้นผิว	24
3.10	ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้าแบบเส้นโครงร่าง	25
3.11	ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็กแบบเส้นโครงร่าง	25
3.12	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่าง MATLAB กับ Corona and Field Effect program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว	26
3.13	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กระหว่าง MATLAB กับ Corona and Field Effect program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว	27
3.14	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่าง MATLAB กับ Corona and Field Effect program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่	27
3.15	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กระหว่าง MATLAB กับ Corona and Field Effect program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่	28
3.16	ต้นแบบความเข้มสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามการจัดเรียงลำดับเฟส สำหรับใช้ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่สร้างจาก MATLAB	28
3.17	เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างMATLAB กับ Corona and Field	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

Effect program กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีการจัดเรียงลำดับเฟสต่างๆในแบบที่ #1-#6....29

4.1 ลักษณะเสาโครงเหล็กของสายส่ง 500 kV ชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่........................31

4.2 เสาไฟฟ้าและระยะห่างเสาไฟฟ้ามาตรฐานของ
สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว...32

4.3 เสาไฟฟ้าและระยะห่างเสาไฟฟ้ามาตรฐานของ
สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่...32

4.4 ตำแหน่งที่วิเคราะห์หาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด.......................................33

4.5 ตำแหน่งของตัวนำ ณ.ตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่ง 500 kV....................................34

4.6 กราฟความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินสูงสุดของสายส่ง 500 kV
ในเขตเดินสายไฟฟ้า...39

4.7 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินสูงสุดของสายส่ง 500 kV
ในเขตเดินสายไฟฟ้า...40

4.8 ระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ
ของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยว...41

4.9 ความเข้มสนามไฟฟ้า 3 มิติบนพื้นดินแบบพื้นผิว
ตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรเดี่ยว)...42

4.10 ความเข้มสนามแม่เหล็ก 3 มิติบนพื้นดินแบบพื้นผิว
ตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรเดี่ยว)...42

4.11 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินแบบเส้นโครงร่าง
ตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรเดี่ยว)...43

4.12 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินแบบเส้นโครงร่าง
ตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรเดี่ยว)...43

4.13 ระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ
ของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่...50

4.14 ความเข้มสนามไฟฟ้า 3 มิติบนพื้นดินแบบพื้นผิว
ตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรคู่)...51

4.15 ความเข้มสนามแม่เหล็ก 3 มิติบนพื้นดินแบบพื้นผิว
ตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรคู่)...51

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.16 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินแบบเส้นโครงร่าง
ตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรคู่)..52

4.17 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินแบบเส้นโครงร่าง
ตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรคู่)..52

4.18 เครื่องมือวัด EMDEX II..58

4.19 ตำแหน่งและทิศทางการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้า
และสนามแม่เหล็กใต้สายส่งไฟฟ้า 500 kV..59

4.20 การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
ใต้แนวสายส่งด้วยเครื่องมือวัด EMDEX II...59

4.21 ผลการวัดและการคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้า
ของสายส่ง 500 kV(วงจรเดี่ยว)..60

4.22 ผลการวัดและการคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้า
ของสายส่ง 500 kV(วงจรคู่)..60

4.23 ผลการวัดและการคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็ก
ของสายส่ง 500 kV(วงจรเดี่ยว)..60

4.24 ผลการวัดและการคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็ก
ของสายส่ง 500 kV(วงจรคู่)..61

4.25 ลักษณะของการจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว..............................62

4.26 ลักษณะของการจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่ง 500 kV วงจรคู่...................................62

4.27 ความเข้มสนามไฟฟ้าตามรูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 3 รูปแบบ
ของสายส่ง 500 kV : ท่าตะโก – หนองจอก...63

4.28 ความเข้มสนามแม่เหล็กตามรูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 3 รูปแบบ
ของสายส่ง 500 kV : ท่าตะโก – หนองจอก...64

4.29 ความเข้มสนามไฟฟ้าตามรูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 6 รูปแบบ
ของสายส่ง 500 kV : แม่เมาะ – ท่าตะโก...64

4.30 ความเข้มสนามแม่เหล็กตามรูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 6 รูปแบบ
ของสายส่ง 500 kV : แม่เมาะ – ท่าตะโก...65

5.1 ตำแหน่งที่วิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าบริเวณสายส่ง

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
	ไฟฟ้าแรงสูง 500 kV	67
5.2	ความเข้มสนามไฟฟ้า ณ.ตำแหน่งที่วิเคราะห์ผลกระทบจากการเหนี่ยวนำ	68
5.3	ลักษณะของยุ้งฉางสำหรับใช้วิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	69
5.4	Shape factor ของยุ้งฉาง	70
5.5	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางภายใต้สนามไฟฟ้า 6.630 kV/m	71
5.6	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางภายใต้สนามไฟฟ้า 1.219 kV/m	71
5.7	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางภายใต้สนามไฟฟ้า 6.012 kV/m	72
5.8	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางภายใต้สนามไฟฟ้า 0.764 kV/m	72
5.9	ลักษณะของบ้านพักอาศัยสำหรับใช้วิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	73
5.10	Shape factor ของบ้านพักอาศัย (H/B=0.67)	74
5.11	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 6.630 kV/m(H/B=0.67)	75
5.12	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 1.219 kV/m(H/B=0.67)	75
5.13	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 6.012 kV/m(H/B=0.67)	76
5.14	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 0.764 kV/m(H/B=0.67)	76
5.15	Shape factor ของบ้านพักอาศัย (H/B=1.25)	77
5.16	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 6.630 kV/m(H/B=1.25)	78
5.17	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 1.219 kV/m(H/B=1.25)	78
5.18	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 6.012 kV/m(H/B=1.25)	79
5.19	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 0.764 kV/m(H/B=1.25)	79
5.20	ลักษณะของรถบรรทุกที่วิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้า	80
5.21	Shape factor for rectangular solids	81
5.22	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางภายใต้สนามไฟฟ้า 1-6 kV/m	83
5.23	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 1-6 kV/m (H/B=0.67)	84
5.24	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 1-6 kV/m (H/B=1.25)	85
6.1	ลักษณะของเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500kV	88
6.2	ลักษณะของเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500kV(ต่อ)	89
6.3	ตำแหน่งตัวนำของเสาไฟฟ้าในระบบ 500 kV ตามรูปที่ 6.1	90
6.4	ตำแหน่งตัวนำของเสาไฟฟ้าในระบบ 500 kV ตามรูปที่ 6.2	91

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
6.5	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยวตามรูปที่ 6.1 และ 6.2	93
6.6	ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยวตามรูปที่ 6.1 และ 6.2	93
6.7	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่ตามรูปที่ 6.1 และ 6.2	94
6.8	ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่ตามรูปที่ 6.1 และ 6.2	94
6.9	การเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่	95
6.10	ระยะห่างระหว่างเฟสของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่	96
6.11	รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่ง 500 kV วงจรคู่ของ กฟผ	98
6.12	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงเสา	98
6.13	ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงเสา	99
6.14	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส(วงจรเดี่ยว)	99
6.15	ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส(วงจรเดี่ยว)	100
6.16	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส(วงจรคู่)	100
6.17	ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส(วงจรคู่)	101
6.18	ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามการจัดเรียงของเฟส	101
6.19	ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV	

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

ที่เปลี่ยนแปลงตามการจัดเรียงของเฟส..102

6.20 การใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า........................103

6.21 ประสิทธิภาพการชิลด์ของการใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ในแนวดิ่ง..........................104

6.22 การติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้า

ของสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว...107

6.23 การติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้า

ของสายส่ง 500 kV วงจรคู่..108

6.24 การลดลงของสนามไฟฟ้าเมื่อติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์

สำหรับสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยว..109

6.25 การลดลงของสนามไฟฟ้าเมื่อติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์

สำหรับสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่...109

6.26 การลดลงของสนามไฟฟ้าเมื่อมีต้นไม้...110

ก-1 ภาพแนวขวางของตัวนำที่ตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว............118

ก-2 ภาพแนวขวางของตัวนำที่ตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่ง 500 kV วงจรคู่................139

ง-1 การกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าเหนือพื้นดินเมื่อพิจารณาที่

ความสูงระดับต่าง ๆ ของสายส่ง 500kV วงจรเดี่ยว...206

ง-2 การกระจายของความเข้มสนามแม่เหล็กเหนือพื้นดินเมื่อพิจารณาที่

ความสูงระดับต่าง ๆ ของสายส่ง 500kV วงจรเดี่ยว...206

ง-3 การกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าเหนือพื้นดินเมื่อพิจารณาที่

ความสูงระดับต่าง ๆ ของสายส่ง 500kV วงจรคู่...207

ง-4 การกระจายของความเข้มสนามแม่เหล็กเหนือพื้นดินเมื่อพิจารณาที่

ความสูงระดับต่าง ๆ ของสายส่ง 500kV วงจรคู่...207

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หลายพื้นที่ที่มีสายส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดผ่านจะได้รับผลกระทบจากการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือ ผลกระทบที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายอยู่โดยรอบบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นนับวันจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณความต้องการการใช้ไฟฟ้าภายในประเทศทำให้จำเป็นต้องมีการก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มขึ้น และพัฒนาให้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีระดับของแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นตามไปด้วย จากสาเหตุดังกล่าวได้สร้างปัญหาให้กับหน่วยงานและวิศวกรที่รับผิดชอบต่อการออกแบบและการก่อสร้างสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ทำให้ต้องมีการศึกษาวิจัยและทำความเข้าใจเกี่ยวกับปัญหาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง การศึกษาลักษณะของผลกระทบที่เป็นสาเหตุมาจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รวมทั้งการศึกษาแนวทางแก้ปัญหาเพื่อลดทอนผลกระทบดังกล่าวลง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้เพื่อต้องการให้เข้าใจวิธีการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งปัญหาผลกระทบที่เกิดขึ้นเพื่อเป็นแนวทางแก้ปัญหาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษา ดังนี้

1) สามารถอธิบายลักษณะของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

2) สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยอาศัยโปรแกรมที่สร้างขึ้นจาก MATLAB

3) สามารถรู้และเข้าใจถึงปัญหาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของการเหนี่ยวนำที่มีต่อสิ่งต่างๆ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง

4) สามารถนำผลจากงานวิจัยไปใช้เป็นข้อมูลในการแก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

5) เพื่อเป็นการพัฒนาขีดความสามารถของโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในรูปแบบ 3 มิติได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ในการแก้ปัญหาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเข้าใจในพฤติกรรมของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ทั้งนี้เนื่องมาจากระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีผลโดยตรงกับผลกระทบที่เกิดขึ้น ซึ่งการพัฒนาโปรแกรมเพื่อเพิ่มขีดความสามารถให้กับโปรแกรมจะช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์ รวมทั้งการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในรูปแบบ 3 มิติจะช่วยทำให้สามารถมองเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยอาศัยหลักการที่ว่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ณ.จุดใด ๆ ในอากาศจะมีค่าคงที่ตลอดเวลา(quasi-static fields)ในขณะที่พิจารณา และจากหลักการนี้เองจึงสามารถคำนวณและสร้างเป็นโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้โดยอาศัยการสร้างโปรแกรมจาก MATLAB และพัฒนาให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในรูปแบบ 3 มิติได้ นั่นคือสามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า สำหรับการตรวจความถูกต้องของโปรแกรมได้เปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกับโปรแกรมที่ชื่อว่า “Corona and Field Effect : CFE” ซึ่งเป็นโปรแกรมที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

สำหรับขอบเขตของการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้สามารถแบ่งออกได้ 3 ส่วน ดังนี้

1) การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้เลือกสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV มาเป็นต้นแบบในการวิเคราะห์ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นสายส่งไฟฟ้าที่มีระดับของแรงดันสูงสุดในประเทศไทยทำให้ผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีสูงกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดันอื่น ๆ

2) สร้างโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วยโปรแกรม MATLAB โดยพัฒนาให้โปรแกรมให้สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในรูปแบบ 3 มิติได้ ซึ่งในโปรแกรม MATLAB จะมีความสามารถในการนำเสนอผลการวิเคราะห์ในแบบกราฟิกมากมาย ทั้งนี้เพื่อชดเชยจุดด้อยของโปรแกรมเดิมที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้งานอยู่

3) การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้พิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของการเหนี่ยวนำ(induction effects) ซึ่งเป็นปัญหาผลกระทบที่มักจะพบเจอได้ในบริเวณแหล่งชุมชนที่มีสายส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดผ่าน

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ส่วนหนึ่งจะเป็นการพัฒนาโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กให้มีขีดความสามารถมากขึ้น ซึ่งการใช้ประโยชน์จากโปรแกรมสามารถนำไปวิเคราะห์หาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง รวมทั้งการนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไปหาผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในรูปของการเหนี่ยวนำบนวัตถุตัวนำใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ตลอดจนศึกษาแนวทางลดผลกระทบที่เกิดขึ้นลงโดยมีขั้นตอนของการศึกษา ดังนี้

1) จัดสร้างโปรแกรมสำหรับคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจาก MATLAB โดยตรวจสอบค่าความถูกต้องกับโปรแกรมที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตใช้งานอยู่

2) พัฒนาขีดความสามารถของโปรแกรมให้สามารถวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในรูปแบบ 3 มิติ

3) เลือกวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV และพิจารณาผลการวิเคราะห์ร่วมกับการวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กโดยวัดตามข้อกำหนดของมาตรฐาน IEEE 644-1994 [14]

4) วิเคราะห์ลักษณะของผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในรูปของการเหนี่ยวนำ (induction effects) ที่เกิดกับวัตถุตัวนำลักษณะต่าง ๆ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง

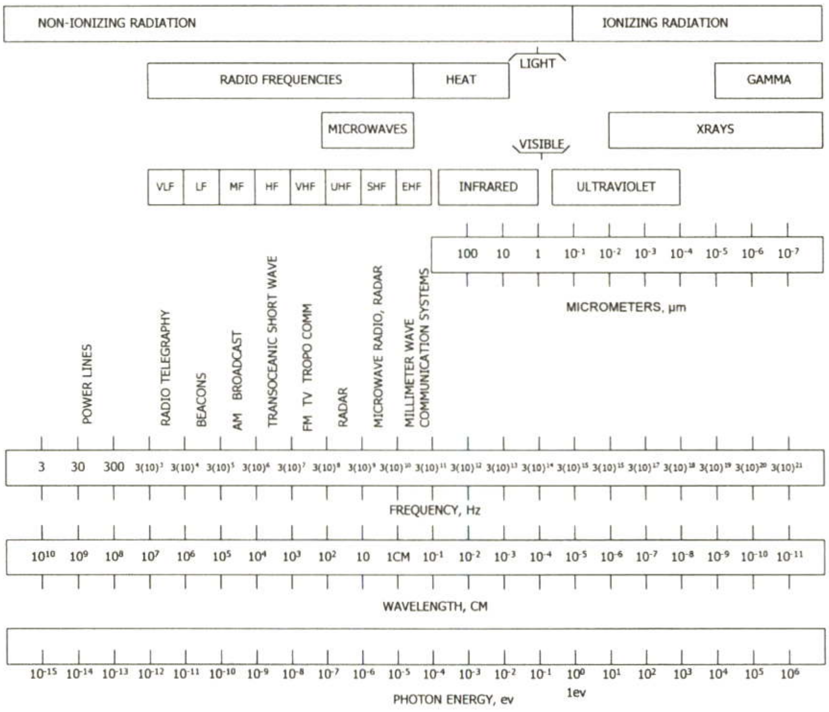
5) ศึกษาแนวทางการแก้ปัญหาและลดทอนผลกระทบที่เกิดขึ้นลงโดยพิจารณาไปที่การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

บทที่ 2

สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

2.1 กล่าวนำ

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพลังงานไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งและเมื่อมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกระจายอยู่โดยรอบในอากาศส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมานั้นจะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สำหรับปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกมานั้นเราสามารถหาได้จากการคำนวณและการวัด



รูปที่ 2.1 Frequency spectrum [1]

2.2 สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

ในชีวิตประจำวันเราได้พบเจอกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในรูปแบบต่าง ๆ ทั้งที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น รังสีแกรมมา รังสีจากแสงอาทิตย์ และที่เกิดจากการสร้างขึ้นของมนุษย์ เช่น เรดาร์ ไมโครเวฟ โทรทัศน์ วิทยุ และสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถ

แบ่งแยกออกได้ตามช่วงความถี่(frequency spectrum)ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.1 สำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจัดเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำเนิดขึ้นจากการส่งจ่ายย่านความถี่ที่ต่ำมาก ๆ (Extreme Low Frequency : ELF) มีความถี่ในการส่งจ่าย 50-60 เฮิรตซ์ และมีช่วงความยาวคลื่นที่ยาวมาก ๆ ในอากาศโดยรอบดังนั้นคลื่นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจึงไม่เกี่ยวเนื่องกัน ทำให้สามารถพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแยกออกจากกันได้

2.2.1 สนามไฟฟ้า (Electric field)

สนามไฟฟ้าเป็นแรงในการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่มีทั้งขนาดและทิศทางเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\vec{E}$ และถูกวัดออกมาในหน่วยของแรงดันต่อระยะทาง (kV/m) โดยที่ขนาดของสนามไฟฟ้าเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดใด ๆ ในสนามไฟฟ้า ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและจะแปรผกผันกับระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สนามไฟฟ้า ณ.จุดใด ๆ ในอากาศจะประกอบด้วยองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x,y และ z ตามลำดับ สำหรับค่าของสนามไฟฟ้าในสภาวะคงที่ (steady-state) เราสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าที่มีองค์ประกอบตามแนวแกน x,y และ z ได้ ดังนี้

$$\vec{E} = e_X(t).\vec{u}_X + e_Y(t).\vec{u}_Y + e_Z(t).\vec{u}_Z \tag{2.1}$$

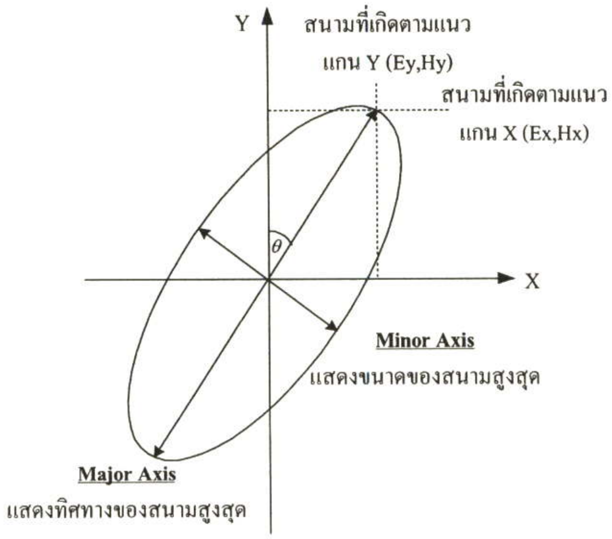
เมื่อ $\vec{u}_X, \vec{u}_Y, \vec{u}_Z$ คือ ยูนิตเวตเตอร์ตามแนวแกน x,y และ z ตามลำดับ และ $e_X(t), e_Y(t), e_Z(t)$ คือ ขนาดของสนามไฟฟ้าในทิศทางตามแนวแกน x,y และ z ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x แล้วเราสามารถเขียนสมการของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลาได้ ดังนี้

$$e_X(t) = E_X \cos(\omega t + \phi_X) \tag{2.2}$$

$$e_X(t) = E_{X,real} \cos\omega t + E_{X,imag} \sin\omega t \tag{2.3}$$

เมื่อ E_X เป็นขนาดของสนามไฟฟ้าตามแนวแกน x และ ϕ_X เป็นทิศทางของสนามไฟฟ้าที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของเวลา $e_X(t)$ สำหรับค่าของ $E_{X,real}$ และ $E_{X,imag}$ เป็นค่าของสนามไฟฟ้าในส่วนที่เป็นจำนวนจริงและในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพตามลำดับ สนามไฟฟ้าในระบบสามเฟสการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าทั้งขนาดและมุมจะมีผลทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ณ.จุดใด ๆ ในตัวกลางอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เราสามารถอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงนี้ได้จากลักษณะของวงรีตามรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์สนามไฟฟ้าโดยที่ค่าความเข้มสนามไฟ

ฟ้าสูงสุดจะเกิดตามแนวแกนหลักของวงรี (major axis of ellipse) และขนาดความเข้มสนามไฟฟ้าจะถูกแทนด้วยความยาวของเส้นแกนรองของวงรี (minor axis of ellipse) สำหรับขนาดของสนามไฟฟ้าในทิศตั้งฉากกับวงรีจะมีค่าเท่ากับศูนย์



รูปที่ 2.2 การเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดในตัวกลางอากาศ

2.2.2 สนามแม่เหล็ก (Magnetic field)

สนามแม่เหล็กเกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทำให้เกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density) ขึ้นเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\vec{B}$ และถูกวัดออกมาในหน่วยของเวเบอร์ต่อตารางเมตร(wb/m²) หรือเทสลา(Tesla) สนามแม่เหล็กเป็นเวกเตอร์ของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่มีทั้งขนาดและทิศทางเหมือนสนามไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วสนามแม่เหล็กจะถูกพิจารณาในหน่วยของเกาส์(Gauss) สำหรับขนาดของสนามแม่เหล็กเกิดจากแรงในการเคลื่อนตัวของประจุหรือเกิดจากค่าของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา ซึ่งจะมีค่าแปรผันกับกระแสไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและแปรผกผันกับระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในการหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดจะมีหลักการพิจารณาเหมือนกับสนามไฟฟ้า (ตามรูปที่ 2.2)

2.3 วิธีคำนวณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

2.3.1 การคำนวณสนามไฟฟ้า (Electric field calculation)

การคำนวณหาสนามไฟฟ้าที่กระจายอยู่บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้ตั้งสมมุติฐานในการคำนวณ [2] ไว้ ดังนี้ ไม่มีประจุไฟฟ้าใด ๆ นอกจากประจุไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง, พื้นดินบริเวณที่พิจารณามีค่าความต้านทานน้อยมาก ๆ และมีค่าเพอร์มิทติวิตี (permittivity) ของตัว

กลางอากาศคงที่ (ε =8.854x10^{-12} F/m) ค่าประจุไฟฟ้า (Q) ที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากค่าของแรงดันไฟฟ้า (V) และค่าสัมประสิทธิ์ของ Maxwell potential coefficient(P) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$[Q]=[P]^{-1}.[V] \tag{2.4}$$

ในการคำนวณได้พิจารณาผลของประจุเงา(image charge) ด้วยดังนั้นค่าของประจุไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริงและส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ ดังนี้

$$[Q]=[Q_{real}]+[Q_{imag}] \tag{2.5}$$

ค่าประจุที่เกิดจากสายไฟฟ้าเฟส a,b,c,…,m สามารถหาได้จากสมการ

$$\begin{bmatrix} Q_{ra} \\ Q_{rb} \\ . \\ . \\ . \\ Q_{rm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & . & . & . & P_{am} \\ P_{ba} & P_{bb} & . & . & . & P_{bm} \\ . & . & & & & . \\ . & . & & & & . \\ . & . & & & & . \\ P_{ma} & P_{mb} & . & . & . & P_{mm} \end{bmatrix}^{-1} . \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ . \\ . \\ . \\ V_{rm} \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{ia} \\ Q_{ib} \\ . \\ . \\ . \\ Q_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & . & . & . & P_{am} \\ P_{ba} & P_{bb} & . & . & . & P_{bm} \\ . & . & & & & . \\ . & . & & & & . \\ . & . & & & & . \\ P_{ma} & P_{mb} & . & . & . & P_{mm} \end{bmatrix}^{-1} . \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ . \\ . \\ . \\ V_{im} \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

และค่าเอลิเมนต์ภายในเมตริกซ์ P สามารถหาได้จาก

$$P_{aa}=\frac{1}{2\pi\varepsilon}.\ln\left[\frac{4y_a}{D_{eq}(a)}\right] \tag{2.8}$$

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

เมื่อ $D_{eq}(a)$ = เส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของสายควบเฟส a (m)

$= D.\sqrt[n]{\frac{nd}{D}}$

D = ระยะห่างของสายควบ (m)

n = จำนวนของสายควบ

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของสายย่อย (m)

y_a, y_b = ความสูงจากพื้นดินของสายไฟฟ้าเฟส a , b (m)

x_a, x_b = ระยะห่างจากแนวสายส่งของสายไฟฟ้าเฟส a , b (m)

ค่าสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$) ที่เกิดจากสายไฟฟ้าเฟส a ณ.จุด x,y ใด ๆ (x_N , y_N) ในแนวแกน x และ y จะหาได้จากสมการ

$$\vec{E}_{x,a} = \frac{(Q_{ra} + jQ_{ia}).(x_N - x_a)}{2\pi\varepsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(Q_{ra} + jQ_{ia}).(x_N - x_a)}{2\pi\varepsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a + y_N)^2]} \tag{2.10}$$

$$\vec{E}_{y,a} = \frac{(Q_{ra} + jQ_{ia}).(y_N - y_a)}{2\pi\varepsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a - y_N)^2]} - \frac{(Q_{ra} + jQ_{ia}).(y_N - y_a)}{2\pi\varepsilon[(x_a - x_N)^2 + (y_a + y_N)^2]} \tag{2.11}$$

$$\vec{E}_x = \vec{E}_{x,a} + \vec{E}_{x,b} + \vec{E}_{x,c} + \ldots \tag{2.12}$$

$$\vec{E}_y = \vec{E}_{y,a} + \vec{E}_{y,b} + \vec{E}_{y,c} + \ldots \tag{2.13}$$

ค่าสนามไฟฟ้ารวม ณ. จุด x,y ใด ๆ (x_N , y_N) คือ

$$E^2 = E_x^2.\cos^2(\omega t + \theta) + E_y^2.\cos^2(\omega t + \phi) \tag{2.14}$$

ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดเมื่อ $dE^2/dt = 0$ ดังนั้น

$$\tan(2\omega t) = -\frac{E_x^2 \sin 2\theta + E_y^2 \sin 2\phi}{E_x^2 \cos 2\theta + E_y^2 \cos 2\phi} \tag{2.15}$$

เมื่อ $\omega t_1 = \omega t + \pi/2$

$$E_{max} = \sqrt{(E_x \cos(\omega t_1 + \theta))^2 + (E_y \cos(\omega t_1 + \phi))^2} \tag{2.16}$$

$$\text{angle} = \tan^{-1}\left[\frac{E_y \cos(\omega t_1 + \phi)}{E_x \cos(\omega t_1 + \theta)}\right] \tag{2.17}$$

2.3.2 การคำนวณสนามแม่เหล็ก (Magnetic field calculation)

การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้พิจารณาจากความเข้มสนามแม่เหล็ก($\vec{H}$) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ากระแสไฟฟ้า(I) และระยะห่างจากสายไฟฟ้าไปยังจุดที่พิจารณา(R) [1] [5]

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi.R} \tag{2.18}$$

กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริงและส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ ดังนั้น $I = I_{real} + I_{image}$ และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายไฟเฟส a,b,c,… ณ.จุด x,y ใด ๆ (x_N , y_N) สามารถหาได้จาก

$$\vec{H}_x = \sum_{j=1}^{n} \frac{I_{real(j)}}{2\pi} \frac{y_j - y_N}{R_{jN}^2} + j\sum_{j=1}^{n} \frac{I_{image(j)}}{2\pi} \frac{y_j - y_N}{R_{jN}^2} \tag{2.19}$$

$$\vec{H}_y = \sum_{j=1}^{n} \frac{I_{real(j)}}{2\pi} \frac{x_j - x_N}{R_{jN}^2} + j\sum_{j=1}^{n} \frac{I_{image(j)}}{2\pi} \frac{x_j - x_N}{R_{jN}^2} \tag{2.20}$$

$$R_{jN} = \sqrt{(x_N - x_j)^2 + (y_N - y_j)^2} \tag{2.21}$$

ค่าสนามแม่เหล็กรวม ณ. จุด x,y ใด ๆ (x_N , y_N) คือ

$$H^2 = H_x^2 . \cos^2(\omega t + \theta) + H_y^2 . \cos^2(\omega t + \phi) \tag{2.22}$$

ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดเมื่อ $dH^2 / dt = 0$ ดังนั้น

$$\tan(2\omega t) = -\frac{H_x^2 \sin 2\theta + H_y^2 \sin 2\phi}{H_x^2 \cos 2\theta + H_y^2 \cos 2\phi} \tag{2.23}$$

เมื่อ $\omega t_1 = \omega t + \pi/2$

$$H_{max} = \sqrt{(H_x \cos(\omega t_1 + \theta))^2 + (H_y \cos(\omega t_1 + \phi))^2} \tag{2.24}$$

$$\text{angle} = \tan^{-1}\left[\frac{H_y \cos(\omega t_1 + \phi)}{H_x \cos(\omega t_1 + \theta)}\right] \tag{2.25}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก($\vec{H}$) และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ($\vec{B}$) จะมีความสัมพันธ์ตามสมการ $\vec{B} = \mu\vec{H}$ โดยที่หน่วยของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะเป็นเกาส์(Gauss) ซึ่ง 1 Tesla จะมีค่าเท่ากับ 10^4 Gauss และมีค่าเพอร์มิบิลิตี (permeability) ของตัวกลางอากาศ (μ) เท่ากับ $4\pi x 10^{-7}$ Henry/meter ดังนั้น

$$\vec{B}_{max} = \mu\vec{H}_{max} \tag{2.26}$$

2.4 การวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

2.4.1 ทฤษฎีและหลักการของเครื่องวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้า [4]

เครื่องวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสามารถแบ่งออกได้ตามเทคนิคของการทำงานได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดFree-Body meter และชนิดGround-Reference-type meter ซึ่งหลักการทำงานของเครื่องวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะอาศัยการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่บนตัวเซนเซอร์ซึ่งทำจากโลหะสองส่วนตรงกลางกั้นด้วยฉนวน ทำให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างโลหะทั้งสอง ซึ่งโครงสร้างของเซนเซอร์สำหรับวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีลักษณะ

ดังรูปที่ 2.3 ค่ากระแสไฟฟ้า(I) ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า(Q) อันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้า($\vec{E}$) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$Q = \int_{S/2} \vec{D}.d\vec{A} \tag{2.27}$$

$$Q = K\varepsilon\vec{E} \tag{2.28}$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = K\omega\varepsilon.E\cos\omega t \tag{2.29}$$

เมื่อ $\vec{D}$ = ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (column/m²)

S = พื้นที่ของเซนเซอร์ที่สะสมประจุไฟฟ้า (m²)

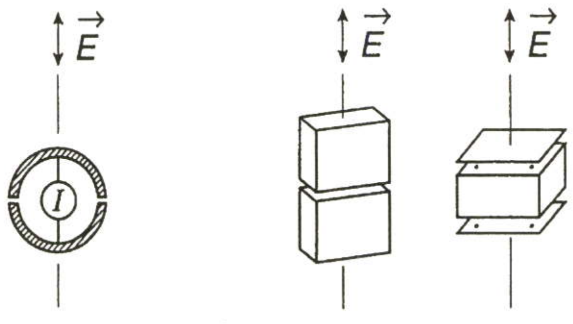
$d\vec{A}$ = พื้นผิวเล็ก ๆ ที่ฟลักซ์ไฟฟ้าตัดผ่าน

K = ค่าคงที่ที่แปรผันตามรูปร่างของเซนเซอร์

$\vec{E}$ = ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)

ε = ค่าเพอร์มิติวิตีของอากาศ

= 8.854×10^{-12} F/m



รูปที่ 2.3 ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์สำหรับวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้า

2.4.2 ทฤษฎีและหลักการของเครื่องวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก [4]

เครื่องวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะอาศัยหลักการของการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กต่อเวลาเคลื่อนที่ตัดกับเซนเซอร์สำหรับวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่ทำจากขดลวดวงปิดตามรูปที่2.4 ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (electromotive force : emf) ขึ้นในขดลวดวงปิดตามกฎของฟาราเดย์ ดังนี้

$$\mathrm{emf} = -\frac{d\phi}{dt} \tag{2.30}$$

$$\mathrm{emf} = \oint \vec{E}.d\vec{L} = -\frac{d}{dt}\int_A \vec{B}.d\vec{A} \tag{2.31}$$

$$\int_A (\nabla x\vec{E}).d\vec{A} = -\int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.d\vec{A} \tag{2.32}$$

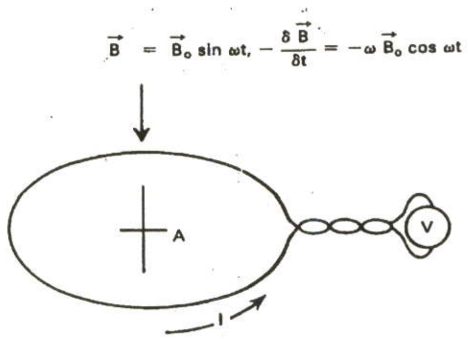
$$\nabla X\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2.33}$$

ดังนั้นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามเวลาในขดลวดวงปิดพื้นที่ A สามารถหาได้จาก

$$V = \oint \vec{E}.d\vec{L} = -\frac{\partial}{\partial t}.(\vec{B}A) \tag{2.34}$$

$$V = \omega.BA.\cos\omega t \tag{2.35}$$

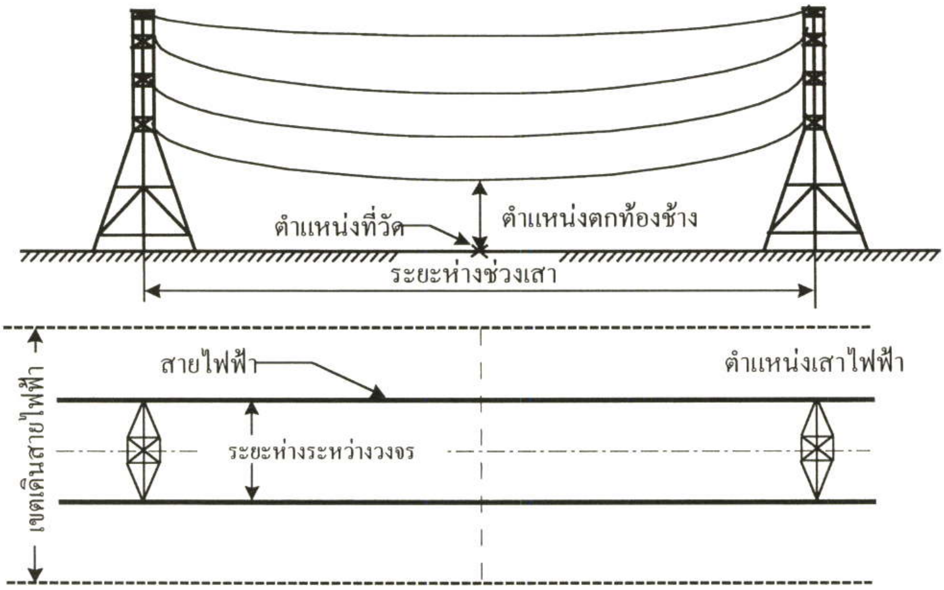
เมื่อ	$\vec{E}$	= ความเข้มสนามไฟฟ้า	(kV/m)
	$d\vec{L}$	= ความยาวเล็ก ๆ ของขดลวดวงปิด	
	$\vec{B}$	= ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	(wb/m^2)
	A	= พื้นที่ขดลวดวงปิด	(m^2)



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของเซนเซอร์สำหรับวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก

2.4.3 วิธีวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

โดยทั่วไปแล้วการวัดค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินใต้แนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ตำแหน่งของเครื่องวัดจะอยู่สูงจากระดับพื้นดินประมาณ 1 เมตร[14] ทั้งนี้เนื่องจากค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ระดับความสูงนี้จะมีค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ (uniform fields)[3] สำหรับการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสูงสุดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะวัดที่ตำแหน่งตรงกลางระหว่างเสาไฟฟ้าหรือที่เราเรียกว่าตำแหน่งตกท้องช้าง (midspan) โดยมีทิศทางการวัดตั้งฉากกับแนวสายส่งภายในเขตเดินสายไฟฟ้า (Right-of-Way : R.O.W) ตามรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งการวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดิน ณ.ตำแหน่งตกท้องช้าง

ค่าผิดพลาดจากการวัดโดยส่วนมากจะเกิดจากปัจจัยหลายอย่างทั้งที่สามารถควบคุมได้และไม่สามารถควบคุมได้ เช่น การรักษาระดับความสูงของเครื่องวัด ผลจากอุณหภูมิ ผลจากระยะห่างระหว่างคนวัดกับเครื่องวัด และจากสาเหตุอื่น ๆ เป็นต้น

2.5 บทสรุป

ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสามารถหาได้ด้วยการคำนวณและการวัด ซึ่งในการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในบริเวณที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดผ่านมีความจำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจริงจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะแวดล้อมปัจจุบันในขณะที่ทำการวัด โดยแฟตเตอร์ต่าง ๆ ที่ส่งผลทำให้ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

เปลี่ยนแปลงไปจะไม่สามารถพิจารณาได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ซึ่งการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรมจะเป็นเพียงการทำนาย (prediction) หรือการคาดการณ์การเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเมื่อจ่ายโหลดที่สภาวะต่าง ๆ ว่าจะมีการกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กออกมาเป็นปริมาณเท่าใด ดังนั้นในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้ข้อมูลจากการวัดมาประกอบกับข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วย

บทที่ 3
โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

3.1 กล่าวนำ

ในส่วนของโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในวิทยานิพนธ์นี้เป็นโปรแกรมที่สร้างจาก MATLAB[6] ซึ่งโปรแกรมนี้สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้ทั้งในแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยมีการแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การแสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแบบตัวเลข การแสดงค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแบบพื้นผิว(surface) การแสดงค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแบบเส้นโครงร่าง(contour) สำหรับการตรวจสอบค่าความถูกต้องของโปรแกรมได้ตรวจสอบค่าความถูกต้องเทียบกับผลการคำนวณจากโปรแกรมที่ชื่อว่า "Corona and Field Effect" ซึ่งเป็นโปรแกรมที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้วิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

3.2 หลักการทำงานของโปรแกรม

สำหรับโปรแกรมที่สร้างขึ้นจะประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ

1) ส่วนของข้อมูลอินพุท (Input data)
2) ส่วนของโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
3) ส่วนของการแสดงผล (Output data)

3.2.1 ข้อมูลอินพุท (Input data)

ในส่วนของข้อมูลอินพุทที่ใช้สำหรับเป็นตัวแปรให้โปรแกรมทำการประมวลผลจะประกอบไปด้วยข้อมูลเกี่ยวกับรายละเอียดของสายตัวนำไฟฟ้าและตำแหน่งการวาง ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง และข้อมูลของตำแหน่งที่ต้องการวิเคราะห์ค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยมีรายละเอียดของตัวแปรในส่วนต่าง ๆ ดังนี้

3.2.1.1 ตัวแปรแสดงรายละเอียดของสายตัวนำไฟฟ้าและตำแหน่งการวาง

NC = Number of conductor (Conductor phase + Overhead ground wire)

ANR = Number of sub-conductor or bundle conductor each phase

SUBSPC = bundle conductor or sub-conductor spacing

DIAM = Sub-conductor diameter

C = Conductor phase and overhead ground wire position

SAG = Sag of conductor

3.2.1.2 ตัวแปรแสดงข้อมูลแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

V = Maximum line voltage (magnitude and angle)

I = Maximum line current (magnitude and angle)

3.2.1.3 ตัวแปรแสดงข้อมูลตำแหน่งที่ต้องการวิเคราะห์

NPTF = Number of calculation point

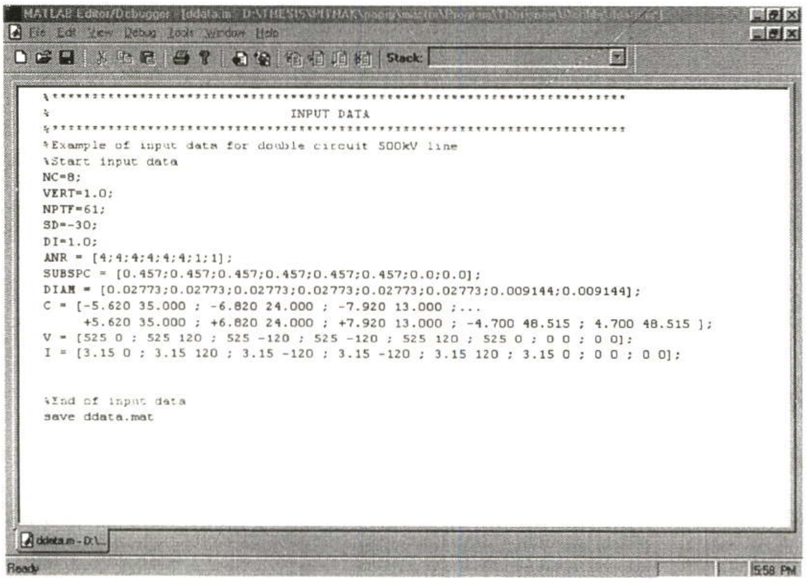
VERT = Electric and magnetic fields sensor height

NPTS = Number of calculation along span length

SD = Calculation horizontal starting point

DI = Calculation distance increment

จากรายละเอียดของตัวแปรต่าง ๆ ดังกล่าว เมื่อจะวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ชนิดวงจรคู่ เราสามารถกำหนดค่าของตัวแปรต่าง ๆ ลงใน MATLAB EDITOR และเก็บข้อมูลไว้ในไฟล์ข้อมูลที่มีนามสกุลเป็น .mat เพื่อให้โปรแกรมนำข้อมูลไปคำนวณและสามารถย้อนกลับมาแก้ไขในภายหลังได้ ซึ่งรายละเอียดการกำหนดค่าให้กับตัวแปรต่าง ๆ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.1

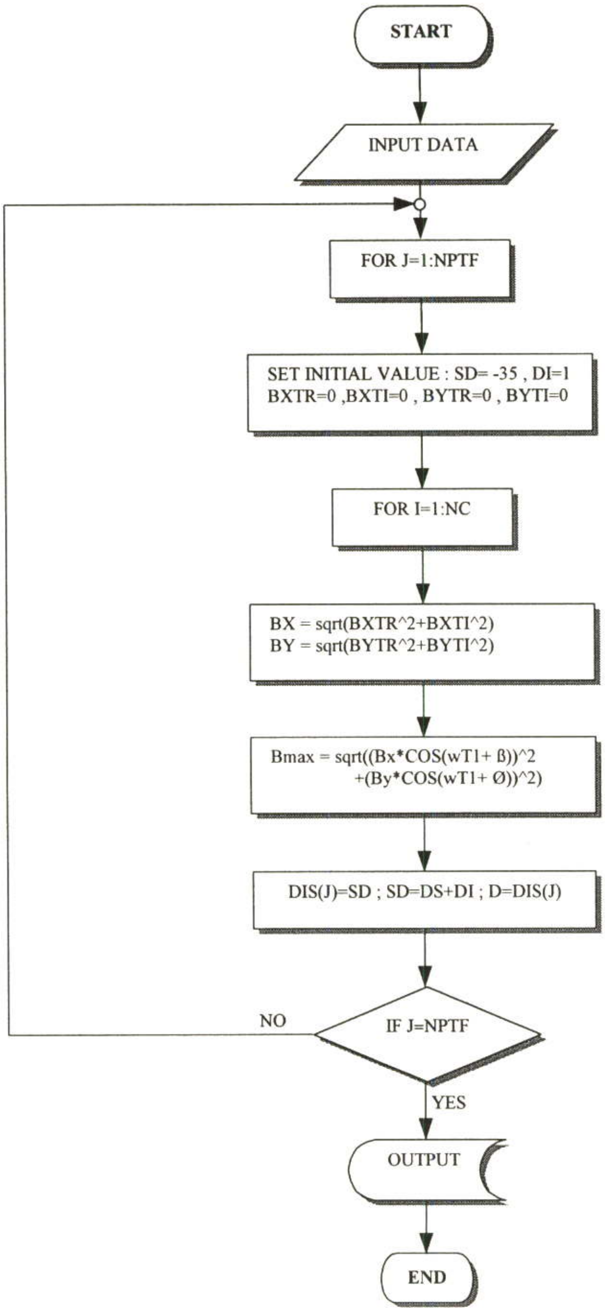


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของข้อมูลอินพุทสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

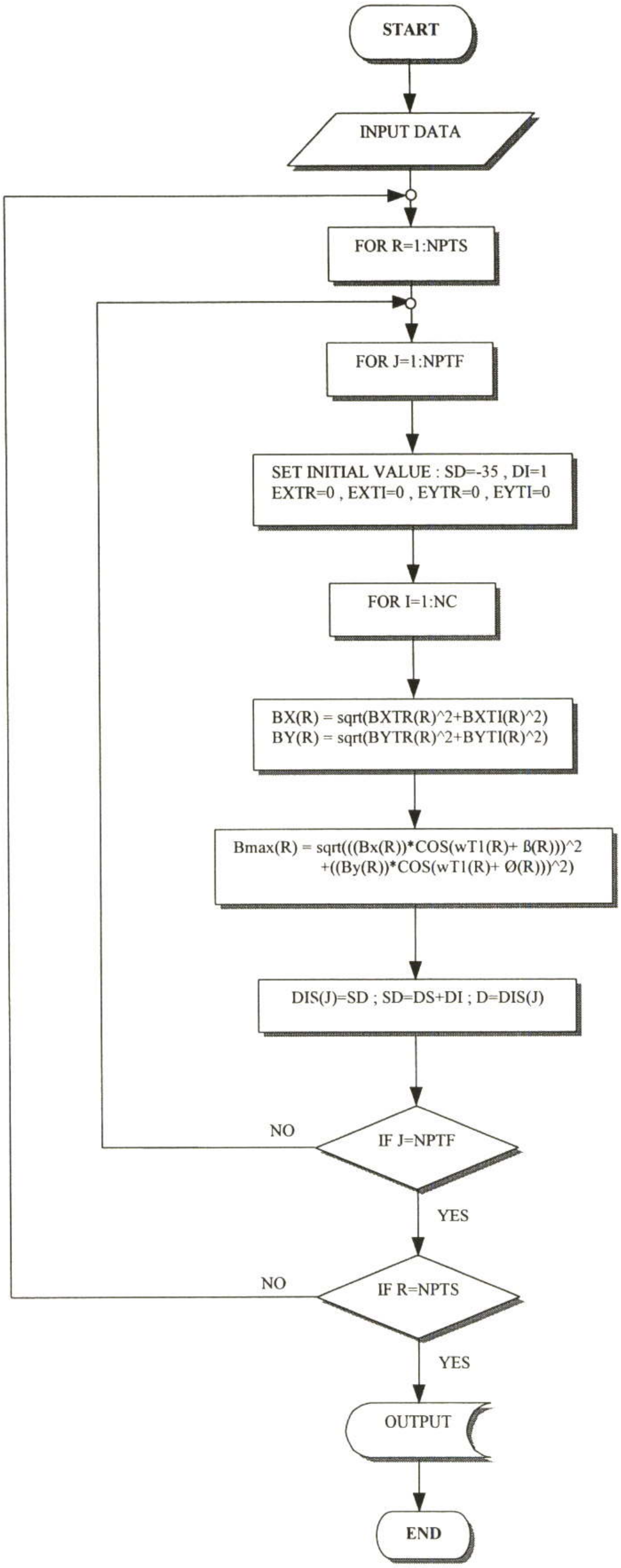
สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

3.2.2 โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

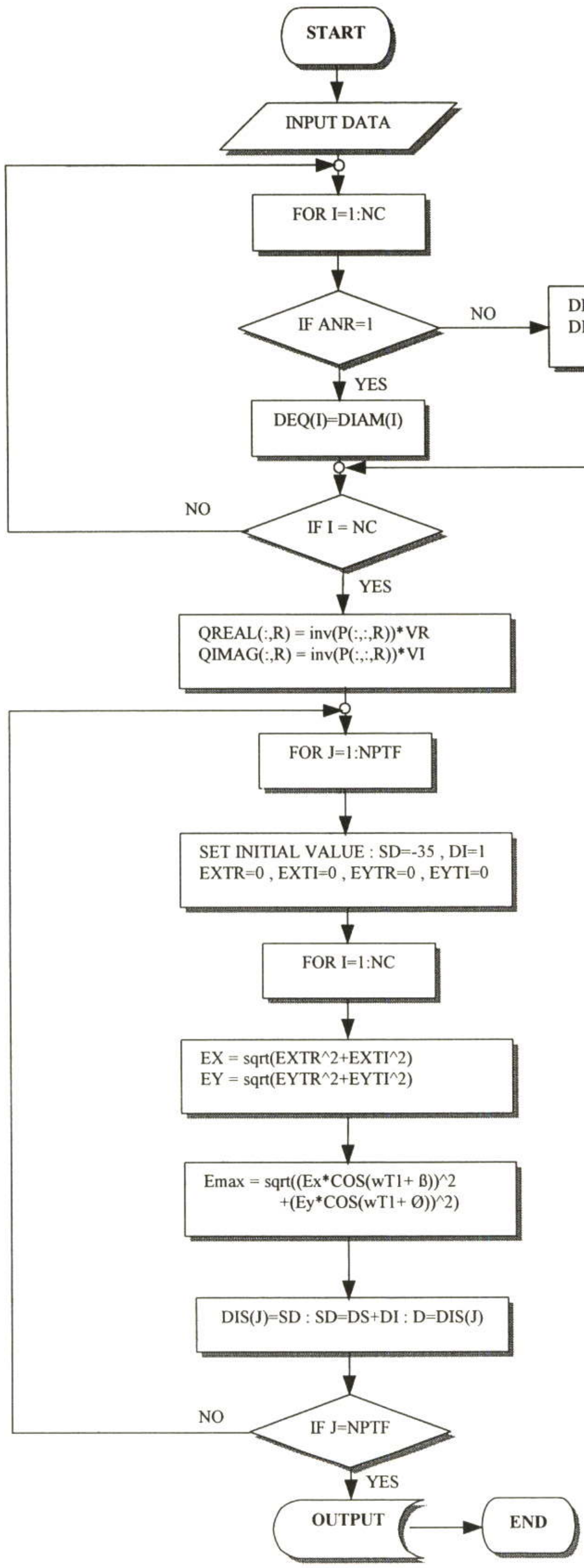
จะประกอบด้วยส่วนของโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแบบ 2 มิติ และโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแบบ 3 มิติ ดังแสดงรายละเอียดของขั้นตอนการคำนวณตามรูปที่ 3.2-3.5



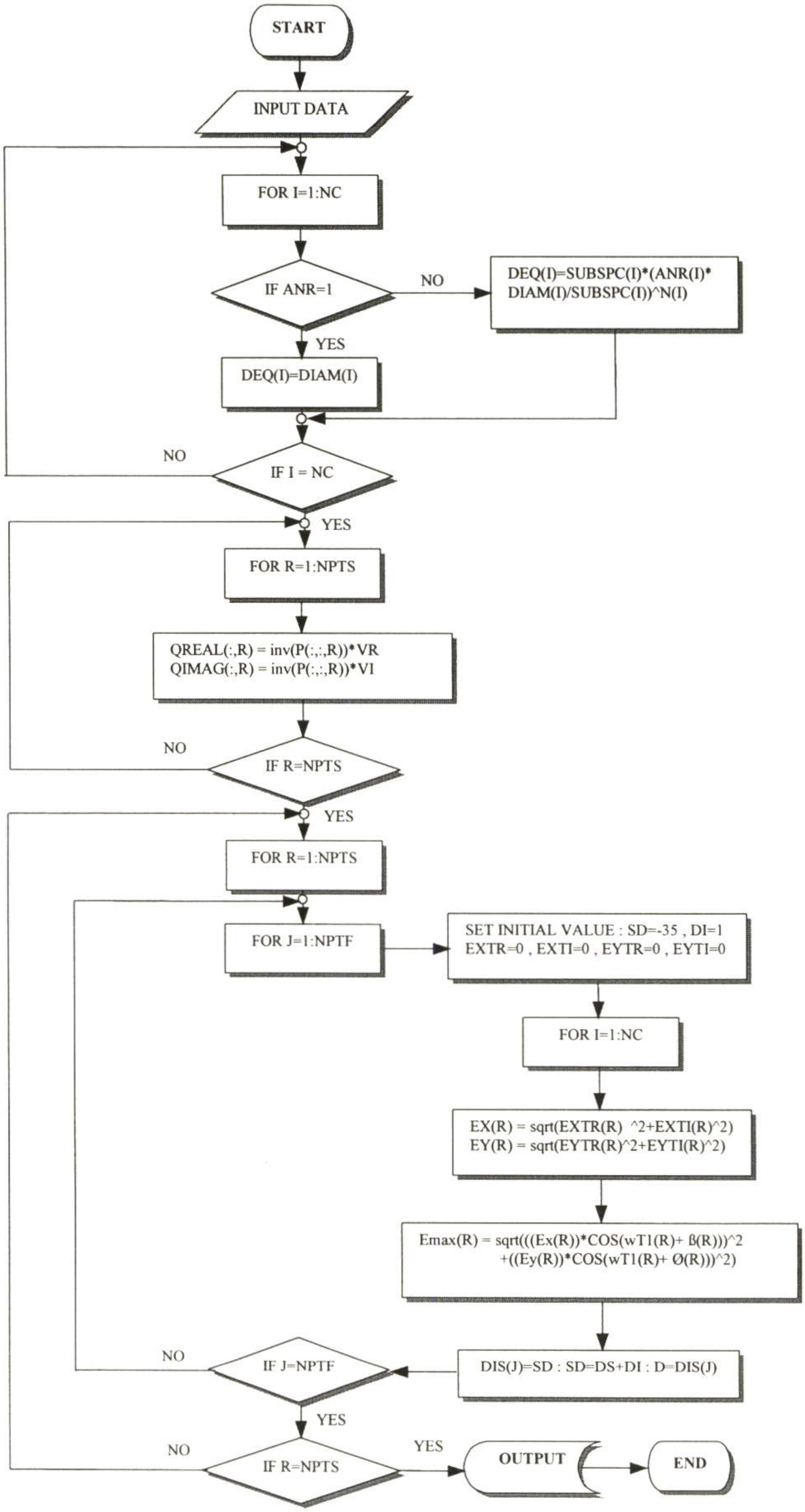
รูปที่ 3.2 โฟล์วชาร์ตการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์สนามแม่เหล็กแบบ 2 มิติ



รูปที่ 3.3 โฟล์วชาร์ตการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์สนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติ



รูปที่ 3.4 โฟล์วชาร์ตการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบ 2 มิติ



รูปที่ 3.5 โฟล์วชาร์ตการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบ 3 มิติ

3.2.3 การแสดงผล (Output data)

ในส่วนของการแสดงผลโปรแกรมสามารถแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ในแบบของตัวเลขและแบบกราฟิก แบบตัวเลขจะแสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามตำแหน่งที่ต้องการวิเคราะห์(ตารางที่ 3.1) สำหรับการแสดงผลในแบบกราฟิกจะแสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทั้งในแบบ 2 มิติและในแบบ 3 มิติ เช่น แสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อระยะทาง(รูปที่ 3.6 และ3.7) แสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก 3 มิติแบบพื้นผิว(รูปที่ 3.8 และ 3.9) และแสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแบบเส้นโครงร่าง(รูปที่ 3.10 และ 3.11) ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่ง 500 kV วงจรคู่

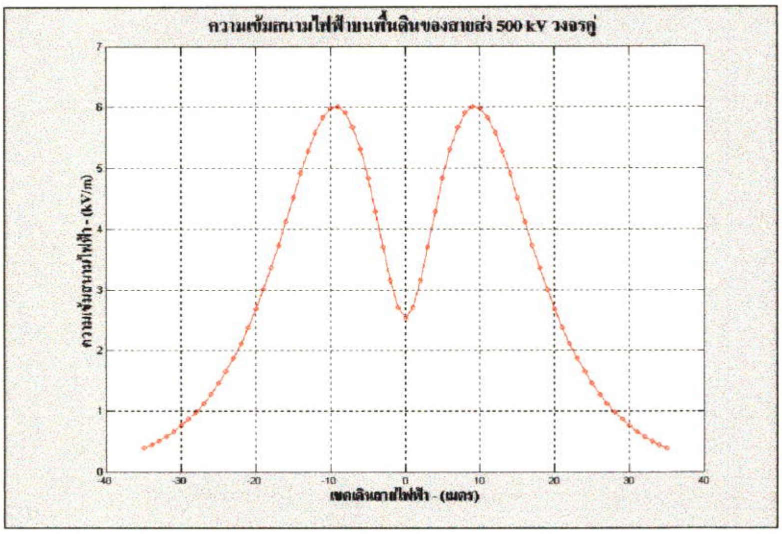
เขตเดินสายไฟฟ้า (เมตร)	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (milliGauss)
-30 (ขอบ R.O.W)	0.764	72.120
-29	0.871	77.092
-28	0.991	82.503
-27	1.126	88.396
-26	1.280	94.818
-25	1.453	101.820
-24	1.648	109.456
-23	1.866	117.780
-22	2.111	126.849
-21	2.382	136.716
-20	2.682	147.429
-19	3.010	159.025
-18	3.365	171.524
-17	3.741	184.921
-16	4.134	199.174
-15	4.531	214.194
-14	4.920	229.833
-13	5.282	245.879
-12	5.596	262.050

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

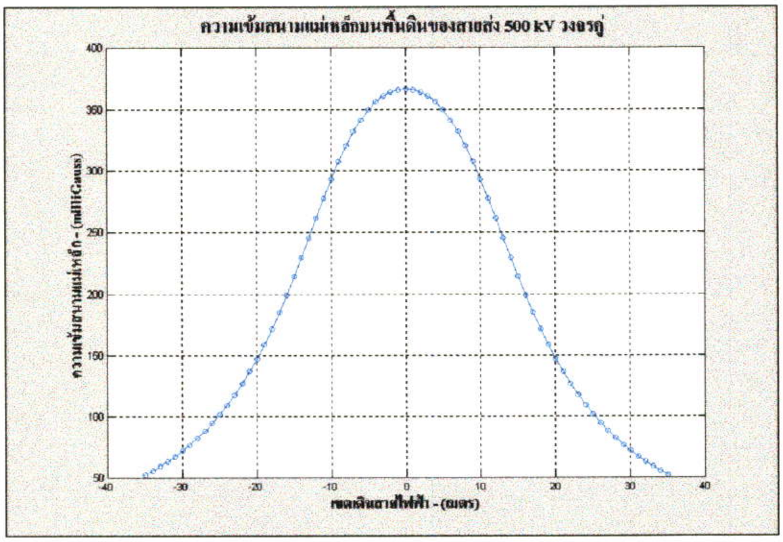
เขตเดินสายไฟฟ้า (เมตร)	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (milliGauss)
-11	5.837	278.008
-10	5.982	293.374
-9	6.012	307.767
-8	5.912	320.844
-7	5.678	332.337
-6	5.318	342.085
-5	4.848	350.042
-4	4.300	356.261
-3	3.715	360.863
-2	3.155	364.003
-1	2.714	365.820
0 (แนวสายส่ง)	2.535	366.414
1	2.714	365.820
2	3.155	364.003
3	3.715	360.864
4	4.300	356.261
5	4.848	350.042
6	5.318	342.085
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

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

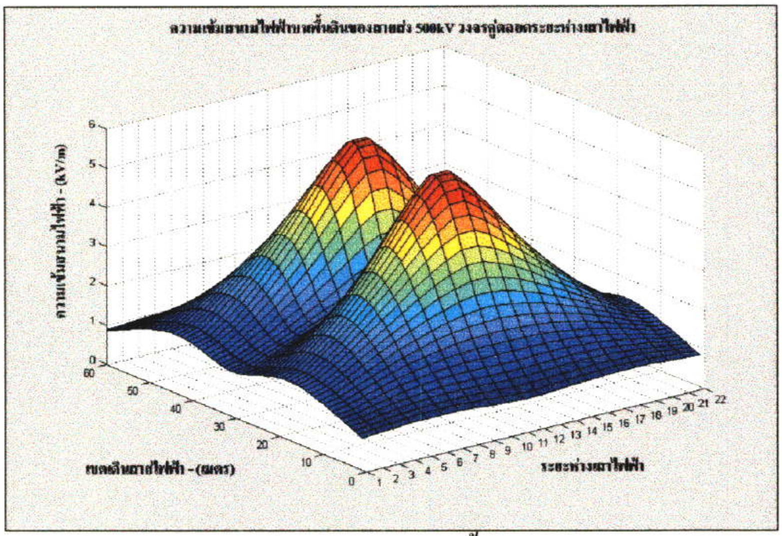
เขตเดินสายไฟฟ้า (เมตร)	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (milliGauss)
17	3.741	184.922
18	3.365	171.525
19	3.010	159.025
20	2.682	147.429
21	2.382	136.716
22	2.111	126.849
23	1.866	117.781
24	1.648	109.456
25	1.453	101.821
26	1.280	94.818
27	1.126	88.396
28	0.991	82.503
29	0.871	77.092
30 (ขอบ R.O.W)	0.764	72.120



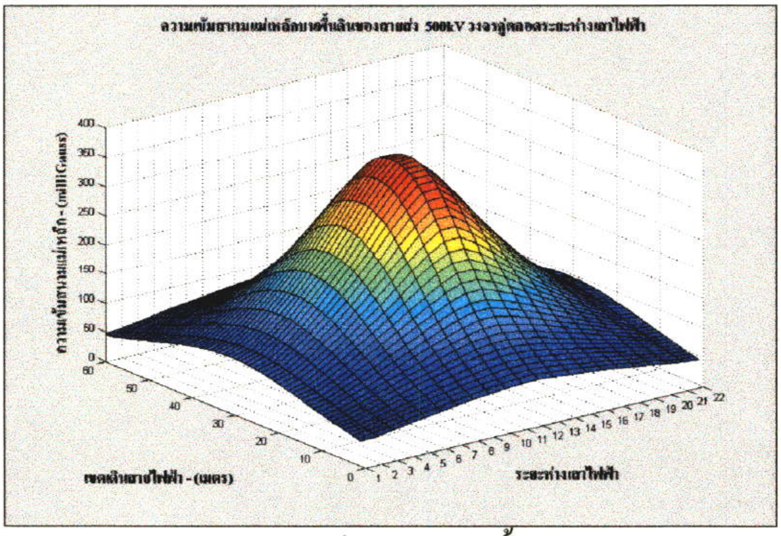
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้าต่อระยะทาง



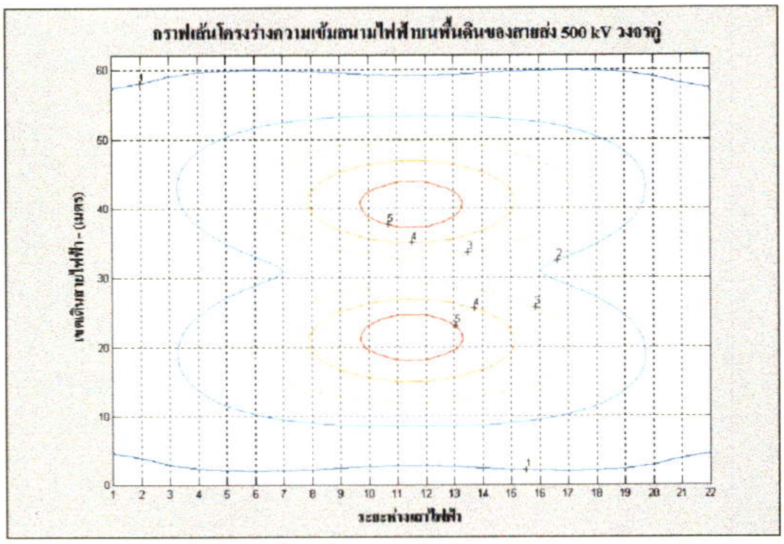
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็กต่อระยะทาง



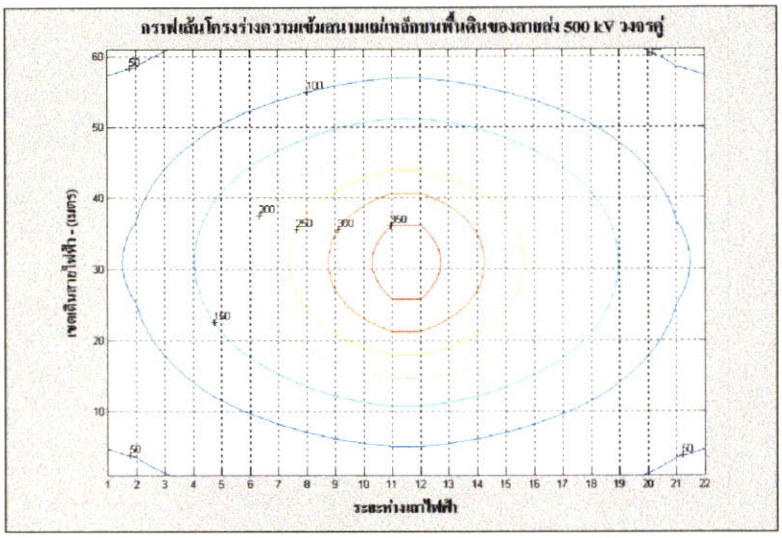
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้า 3มิติ แบบพื้นผิว



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็ก 3 มิติ แบบพื้นผิว



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามไฟฟ้าแบบเส้นโครงร่าง

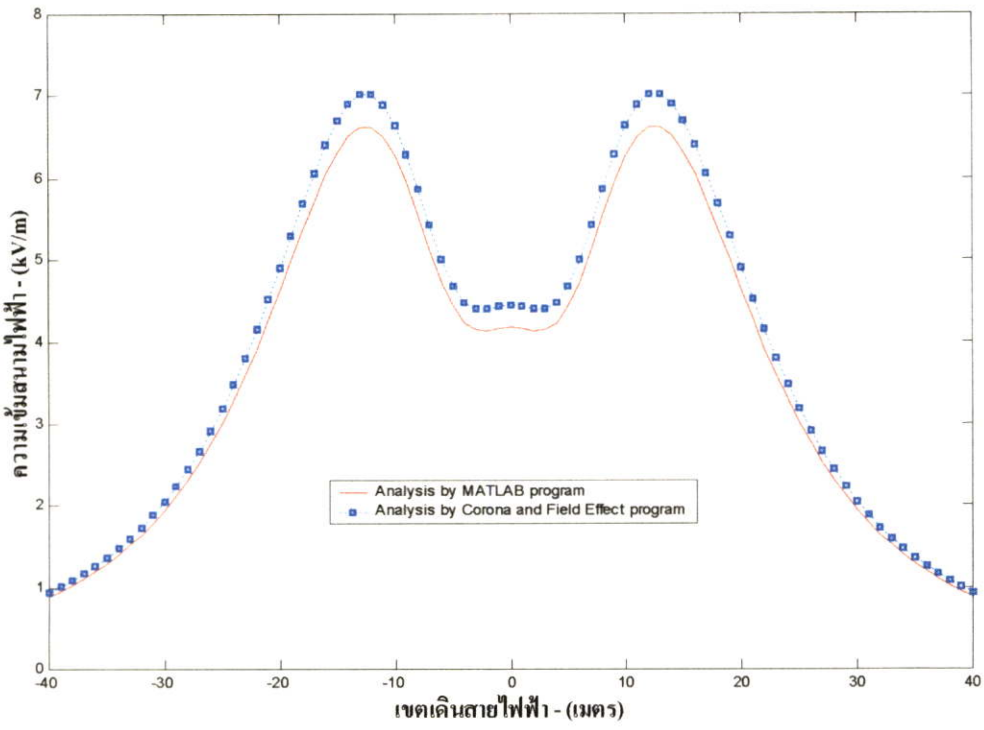


รูปที่ 3.11 ตัวอย่างกราฟความเข้มสนามแม่เหล็กแบบเส้นโครงร่าง

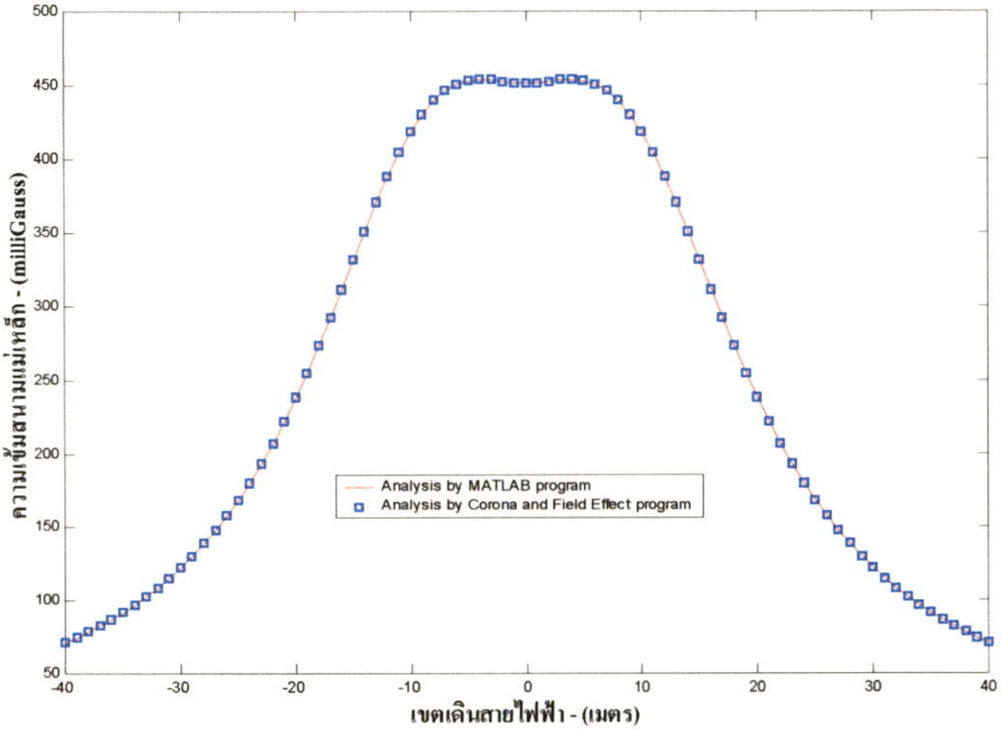
3.3 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

ในขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นจาก MATLAB ได้ดำเนินการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ที่ได้กับโปรแกรมที่มีชื่อว่า"Corona and Field Effect" ซึ่งเป็นโปรแกรมที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยมีการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์หลากหลายรูปแบบทั้งการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kVชนิดวงจรเดี่ยวซึ่งมีผลการวิเคราะห์ตามรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ สำหรับในรูปที่ 3.14 และ3.15 เป็นการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ชนิดวงจรคู่ นอกจากนั้นยังได้ตรวจสอบความถูกต้องของ

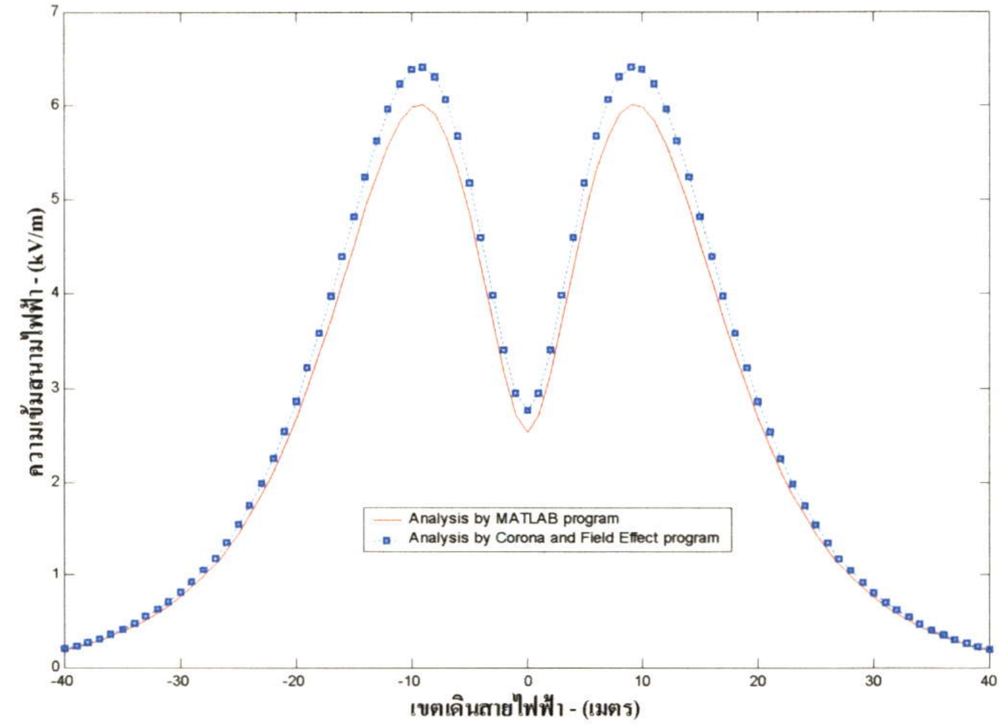
โปรแกรมด้วยการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามการจัดเรียงลำดับของเฟสที่แตกต่างกันของสายส่ง 500 kV ชนิดวงจรคู่ซึ่งนำเอารูปแบบมาจากเอกสารอ้างอิงหมายเลข 2 และจากการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมในหลายรูปแบบดังกล่าวพบว่าในส่วนที่เป็นการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่วิเคราะห์ได้จากโปรแกรม MATLAB จะมีค่าน้อยกว่าการวิเคราะห์จากโปรแกรม Corona and Field Effect แต่เมื่อพิจารณาจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดความเข้มของสนามไฟฟ้าต่อระยะทางแล้วจะเห็นว่ามีลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่ไปในทิศทางเดียวกัน สำหรับสนามแม่เหล็กผลของการวิเคราะห์จากโปรแกรมทั้งสองจะไม่มีความแตกต่างกันเลยทั้งขนาดและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงต่อระยะทาง



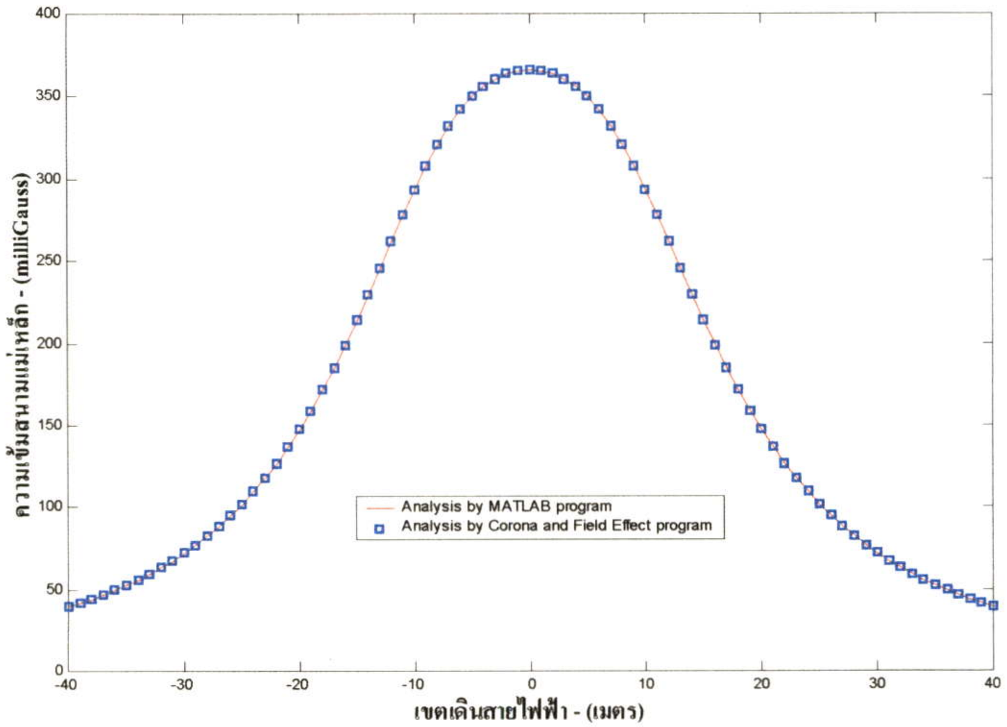
รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างMATLAB กับCorona and Field Effect program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว



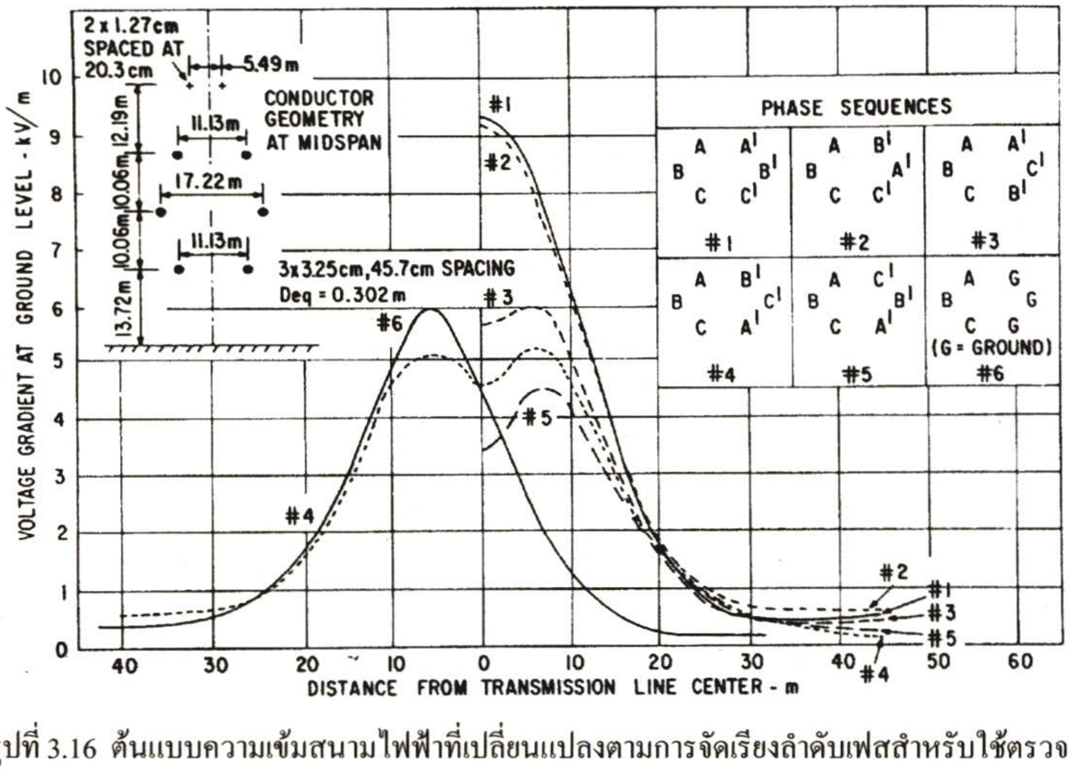
รูปที่ 3.13 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กระหว่างMATLAB กับ Corona and Field Effect program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว



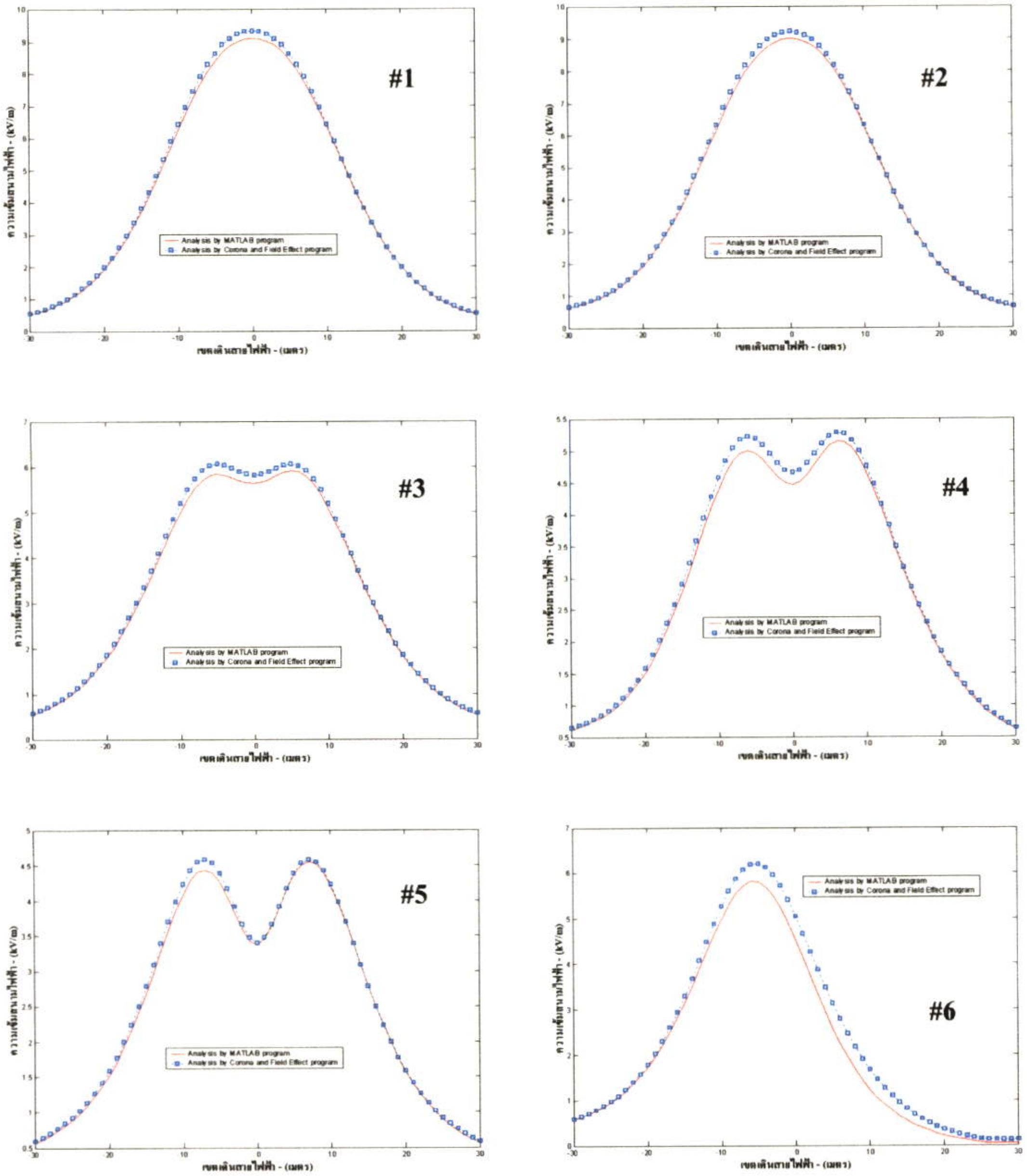
รูปที่ 3.14 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างMATLABกับCorona and Field Effect program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่



รูปที่ 3.15 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กระหว่างMATLAB กับ Corona and Field Effect program ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่



รูปที่ 3.16 ต้นแบบความเข้มสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามการจัดเรียงลำดับเฟสสำหรับใช้ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่สร้างจาก MATLAB [2]



รูปที่ 3.17 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระหว่างMATLAB กับ Corona and Field Effect program กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีการจัดเรียงลำดับเฟสต่าง ๆ ในแบบที่ #1-#6

3.4 บทสรุป

โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สร้างจาก MATLAB นี้เป็นการพัฒนาให้โปรแกรมสามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแบบ 3 มิติได้ และช่วยชดเชยข้อจำกัดของโปรแกรม Corona and Field Effect ที่ไม่สามารถแสดงผลการวิเคราะห์ทางกราฟิกได้ ซึ่งจากการตรวจสอบค่าความถูกต้องของตัวโปรแกรมด้วยการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในหลากหลายรูปแบบพบว่าโปรแกรมที่สร้างจาก MATLAB มีผลการวิเคราะห์ที่แตกต่างเล็กน้อย

เมื่อเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Corona and Field Effect เฉพาะในส่วนที่เป็นการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเท่านั้น แต่สำหรับการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กแล้วจะไม่มีความแตกต่างกันเลย ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าโปรแกรมที่สร้างจาก MATALB มีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับการนำไปวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

บทที่ 4
การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

4.1 กล่าวนำ

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 500 kV เป็นสายส่งไฟฟ้าที่มีระดับของแรงดันในการส่งจ่ายสูงสุดในประเทศไทย ปรกติแล้วระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามระดับของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ส่งจ่าย ด้วยเหตุนี้เองสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV จึงมีอัตราการกำเนิดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมากกว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดันอื่น ๆ ค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งต่าง ๆ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะเป็นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระจายอยู่บนพื้นดิน ซึ่งปรกติแล้วจะพิจารณาที่ระดับความสูง 1 เมตรเหนือพื้นดิน[3]-[4] และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ระดับความสูง 1 เมตรเหนือพื้นดินนี้จะเป็นค่าที่นำไปวิเคราะห์หาผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อไป

4.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV

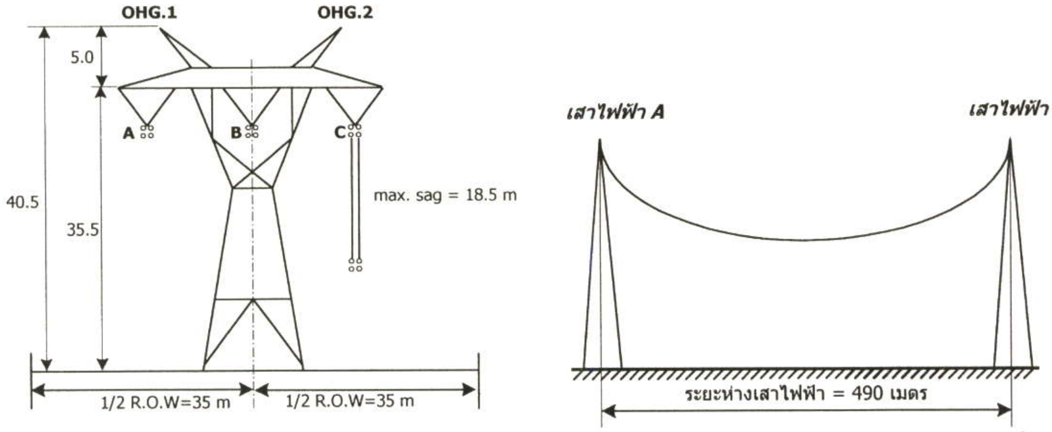
รูปที่ 4.1 ลักษณะเสาโครงเหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่

ปัจจุบันสายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 500 kV ในประเทศไทยมีจำนวนมากกว่า 2,200 วงจร-กิโลเมตร[7] ในจำนวนนี้แบ่งออกเป็นสายส่ง 500 kV ที่ใช้สายตัวนำควบ 4-เส้นขนาด 795 MCM ACSR/GA และสายตัวนำควบ 4-เส้นขนาด 1272 MCM ACSR/GA สำหรับสายส่งที่เลือกวิเคราะห์จะเป็นสายส่ง 500 kV ที่ใช้สายตัวนำควบ 4-เส้นขนาด 795 MCM ACSR/GA ซึ่งมีทั้งชนิดวงจรเดี่ยว(single circuit) และชนิดวงจรคู่(double circuit) ในรูปที่ 4.1 เป็นลักษณะเสาโครงเหล็กของสายส่ง 500 kV ชนิดวงจรเดี่ยวและชนิดวงจรคู่ ซึ่งนอกจากจะมีความแตกต่างกันทางโครงสร้างแล้วยังมีความแตกต่างกันในเรื่องของระยะความกว้างของเขตเดินสายไฟฟ้า (Right-of-

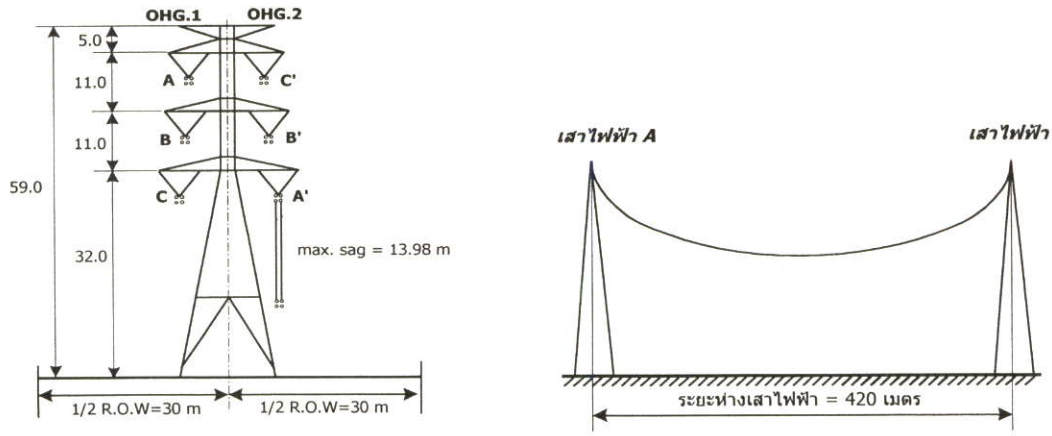
Way : R.O.W) และระยะห่างเสาไฟฟ้า(span length) ตามรายละเอียดที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยวเป็นสายส่งที่ส่งจ่ายจากสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก (THA TAKO SUBSTATION) จ.นครสวรรค์ไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก(NONG CHOK SUBSTATION) จ.กรุงเทพ ใช้สายตัวนำควบ 4-เส้นขนาด 795 MCM ACSR/GA(CONDOR) จำนวน 3 เฟส 1 วงจร และมีสายโอเวอร์เฮดกราวด์ขนาด 3/8 INCH(EHS) จำนวน 2 เส้น (ตามรูปที่ 4.2) โดยมีระยะทางของสายส่งประมาณ 208 กิโลเมตร

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่เป็นสายส่งที่ส่งจ่ายจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ(MAE MOH POWER PLANT) จ.ลำปาง ไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก (THA TAKO SUBSTATION) จ.นครสวรรค์ ใช้สายตัวนำควบ 4-เส้นขนาด 795 MCM ACSR/GA(CONDOR) จำนวน 3 เฟส 2 วงจร และมีสายโอเวอร์เฮดกราวด์ขนาด 3/8 INCH(EHS) จำนวน 2 เส้น (ตามรูปที่ 4.3) โดยมีระยะทางของสายส่งประมาณ 334 กิโลเมตร



รูปที่ 4.2 เสาไฟฟ้าและระยะห่างเสาไฟฟ้ามาตราฐานของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว



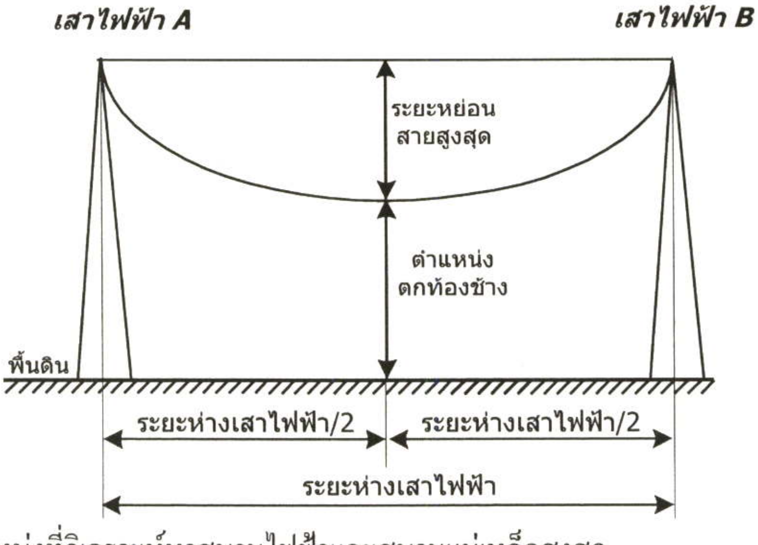
รูปที่ 4.3 เสาไฟฟ้าและระยะห่างเสาไฟฟ้ามาตราฐานของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลทั่วไปของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV

ชื่อสายส่ง	ระยะห่างเสาไฟฟ้ามาตรฐาน	ความกว้างของเขตเดินสายไฟฟ้า	ระยะทางของสายส่ง
สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว ท่าตะโก – หนองจอก	490 เมตร	ข้างละ 35 เมตร	208 กิโลเมตร
สายส่ง 500 kV วงจรคู่ แม่เมาะ - ท่าตะโก	420 เมตร	ข้างละ 30 เมตร	334 กิโลเมตร

4.3 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสูงสุด

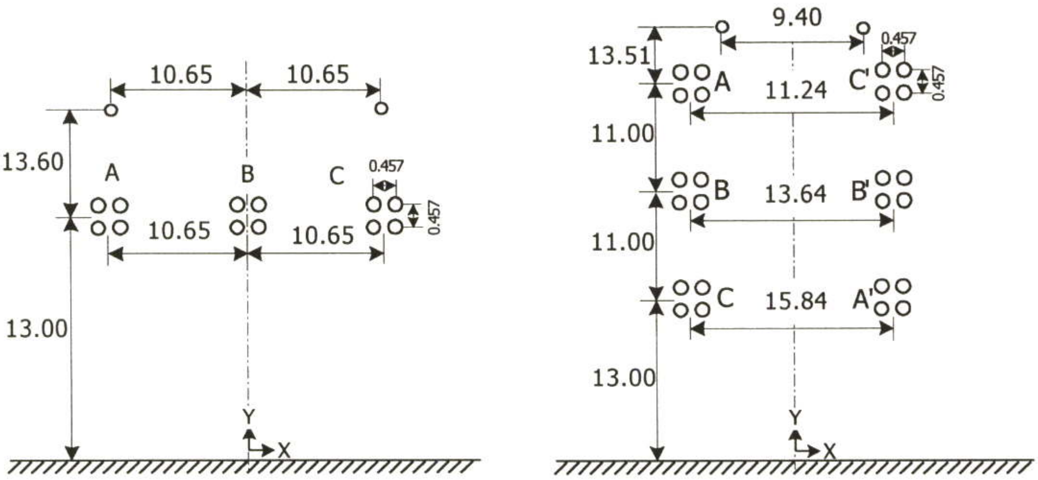
ตามทฤษฎีแล้วสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินที่เกิดขึ้นบริเวณใต้แนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะมีค่าความเข้มสูงสุดในบริเวณที่ตำแหน่งของสายตัวนำอยู่ใกล้กับพื้นดินมากที่สุด นั่นก็คือตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่ง หรือที่เราเรียกว่า Midspan (ตามรูปที่ 4.4) ที่ตำแหน่งนี้สายตัวนำจะมีระยะหย่อนตัวสูงสุด (maximum sag) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการที่ต้องการทราบว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีการกระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กออกมาสูงสุดเป็นปริมาณเท่าใด ก็สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ ณ.ตำแหน่งนี้



รูปที่ 4.4 ตำแหน่งที่วิเคราะห์หาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด

ในการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสูงสุดณ.ตำแหน่งตกท้องช้างนี้จะพิจารณาให้ตัวนำไฟฟ้าอยู่สูงจากพื้นดินเป็นระยะเท่ากับระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้าต่ำสุด (สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้าในแนวดิ่งต่ำสุดสำหรับพื้นที่ทั่วไปจะมีค่าเท่ากับ 13.00 เมตร) นอกจากนั้นระบบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้ถือว่ามีการ

จ่ายโหลดที่สมดุลเนื่องจากในทางปฏิบัติแล้วจะมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนนี้น้อยมาก และตำแหน่งของตัวนำ ณ.ตำแหน่งตกท้องช้างในรูปที่ 4.5 เราสามารถกำหนดค่าของตำแหน่งสายไฟฟ้าในแนวแกน x และ y ได้ตามตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.5 ตำแหน่งของตัวนำ ณ.ตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่ง 500 kV

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์สำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรเดี่ยว)			สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรคู่)		
1. ตำแหน่งสายตัวนำ		X	Y		X	Y
	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
	OHG.1	-10.65	26.60	OHG.1	-4.70	48.51
	OHG.2	10.65	26.60	OHG.2	4.70	48.51

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

ลักษณะข้อมูล	สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรเดี่ยว)			สายส่งไฟฟ้า 500 kV (วงจรคู่)		
2. แรงดันของสายส่ง		ขนาด	มุม		ขนาด	มุม
	A	525 kV	0 °	A	525 kV	0 °
	B	525 kV	120 °	B	525 kV	120 °
	C	525 kV	-120 °	C	525 kV	-120 °
	-			C’	525 kV	-120 °
	-			B’	525 kV	120 °
	-			A’	525 kV	0 °
3. กระแสไฟฟ้าของสายส่ง		ขนาด	มุม		ขนาด	มุม
	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 °
4. ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าของสายโอเวอร์เฮดกราวด์		ขนาด	มุม		ขนาด	มุม
	OHG.1	0.0 kV	0.0 °	OHG.1	0.0 kV	0.0 °
	OHG.2	0.0 kV	0.0 °	OHG.2	0.0 kV	0.0 °
5. ข้อมูลกระแสไฟฟ้าของสายโอเวอร์เฮดกราวด์		ขนาด	มุม		ขนาด	มุม
	OHG.1	0.0 kA	0.0 °	OHG.1	0.0 kA	0.0 °
	OHG.2	0.0 kA	0.0 °	OHG.2	0.0 kA	0.0 °
6. ข้อมูลสายไฟฟ้า (795 MCM ACSR/GA)	เส้นผ่าศูนย์กลาง = 0.02772 m					
7. ข้อมูลสายโอเวอร์เฮดกราวด์ (3/8 INCH (EHS))	เส้นผ่าศูนย์กลาง = 0.009144 m					

จากข้อมูลพารามิเตอร์ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ในตารางที่ 4.2 เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่สร้างจาก MATLAB จะได้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นสูง

สุดสำหรับสายส่งไฟฟ้า 500 kV ภายในเขตเดินสายไฟฟ้า ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ระดับความสูง 1 เมตรเหนือพื้นดิน

ตารางที่ 4.3 ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV

เขตเดินสายไฟฟ้า (เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV			
	วงจรเดี่ยว		วงจรคู่	
	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mGauss)	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mGauss)
-35	1.219	91.813	0.393	52.565
-34	1.397	96.977	0.450	55.874
-33	1.515	102.562	0.515	59.455
-32	1.645	108.612	0.588	63.336
-31	1.788	115.173	0.671	67.547
-30	1.946	122.296	0.764	72.120
-29	2.121	130.038	0.871	77.092
-28	2.314	138.458	0.991	82.503
-27	2.526	147.622	1.126	88.396
-26	2.760	157.598	1.280	94.818
-25	3.016	168.454	1.453	101.820
-24	3.295	180.259	1.648	109.456
-23	3.598	193.078	1.866	117.780
-22	3.923	206.962	2.111	126.849
-21	4.268	221.949	2.382	136.716
-20	4.629	238.045	2.682	147.429
-19	5.000	255.218	3.010	159.025
-18	5.369	273.378	3.365	171.524
-17	5.724	292.368	3.741	184.921
-16	6.048	311.946	4.134	199.174
-15	6.321	331.781	4.531	214.194
-14	6.522	351.454	4.290	229.833
-13	6.630	370.483	5.282	245.879

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

เขตเดินสายไฟฟ้า (เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV			
	วงจรเดี่ยว		วงจรคู่	
	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mGauss)	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mGauss)
-12	6.629	388.352	5.596	262.050
-11	6.511	404.568	5.837	278.008
-10	6.278	418.710	5.982	293.374
-9	5.947	430.479	6.012	307.767
-8	5.549	439.725	5.912	320.844
-7	5.128	446.461	5.678	332.337
-6	4.736	450.850	5.318	342.085
-5	4.425	453.193	4.848	350.042
-4	4.230	453.909	4.300	356.261
-3	4.149	453.521	3.715	360.863
-2	4.145	452.618	3.155	364.003
-1	4.169	451.779	2.714	365.820
0	4.181	451.444	2.535	366.414
1	4.169	451.779	2.714	365.820
2	4.145	452.618	3.155	364.003
3	4.149	453.521	3.715	360.864
4	4.230	453.909	4.300	356.261
5	4.425	453.193	4.848	350.042
6	4.736	450.850	5.318	342.086
7	5.128	446.461	5.678	332.337
8	5.549	439.725	5.912	320.844
9	5.947	430.479	6.012	307.767
10	6.278	418.710	5.982	293.374
11	6.511	404.568	5.837	278.008
12	6.629	388.352	5.596	262.051
13	6.630	370.482	5.282	245.879

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

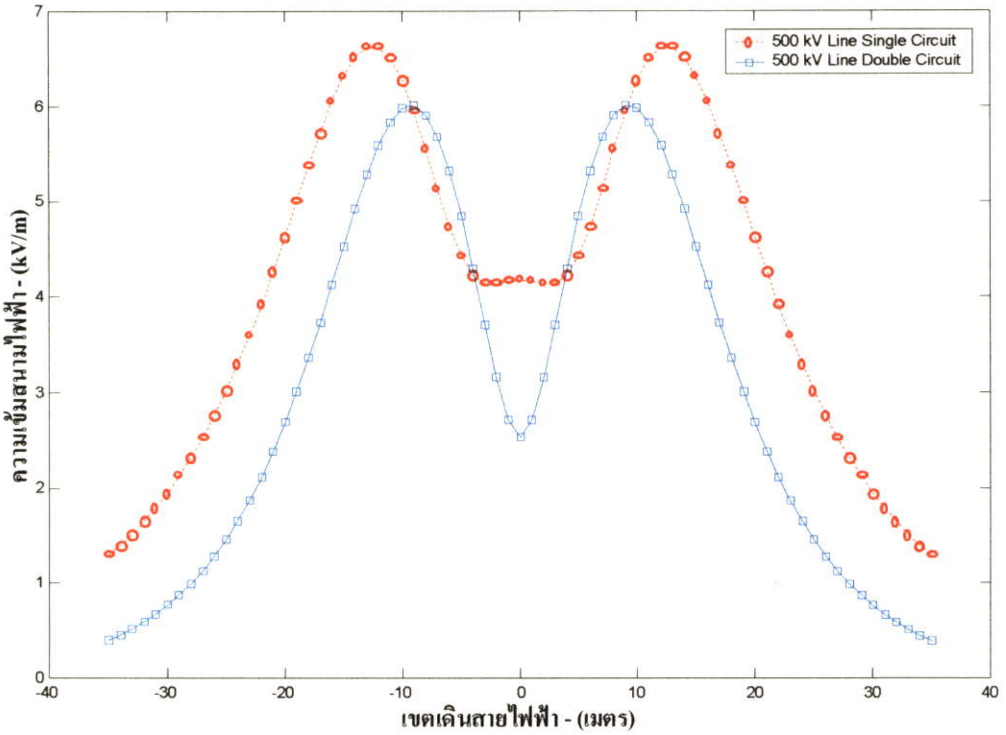
เขตเดินสายไฟฟ้า (เมตร)	สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV			
	วงจรเดี่ยว		วงจรคู่	
	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mGauss)	สนามไฟฟ้า (kV/m)	สนามแม่เหล็ก (mGauss)
14	6.522	351.454	4.920	229.834
15	6.321	331.781	4.531	214.195
16	6.048	311.946	4.134	199.175
17	5.724	292.368	3.741	184.922
18	5.369	273.378	3.365	171.525
19	5.000	255.218	3.010	159.025
20	4.629	238.045	2.682	147.429
21	4.268	221.949	2.382	136.716
22	3.923	206.962	2.111	126.849
23	3.598	193.077	1.866	117.781
24	3.295	180.259	1.648	109.456
25	3.016	168.454	1.453	101.821
26	2.760	157.598	1.280	94.818
27	2.526	147.622	1.126	88.396
28	2.314	138.458	0.991	82.503
29	2.121	130.038	0.871	77.092
30	1.946	122.296	0.764	72.120
31	1.788	115.173	0.671	67.547
32	1.645	108.612	0.588	63.336
33	1.151	102.562	0.515	59.455
34	1.397	96.977	0.450	55.874
35	1.219	91.813	0.393	52.566

ผลจากการวิเคราะห์พบว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนพื้นดินจะมีความเข้มสูงสุดบริเวณตำแหน่งใต้สายตัวนำ แต่สำหรับสนามแม่เหล็กจะมีความเข้มสูงสุดบริเวณกลางแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง(center line) และจะค่อย ๆ มีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างออกไปจากสายตัวนำเช่นเดียวกันกับ

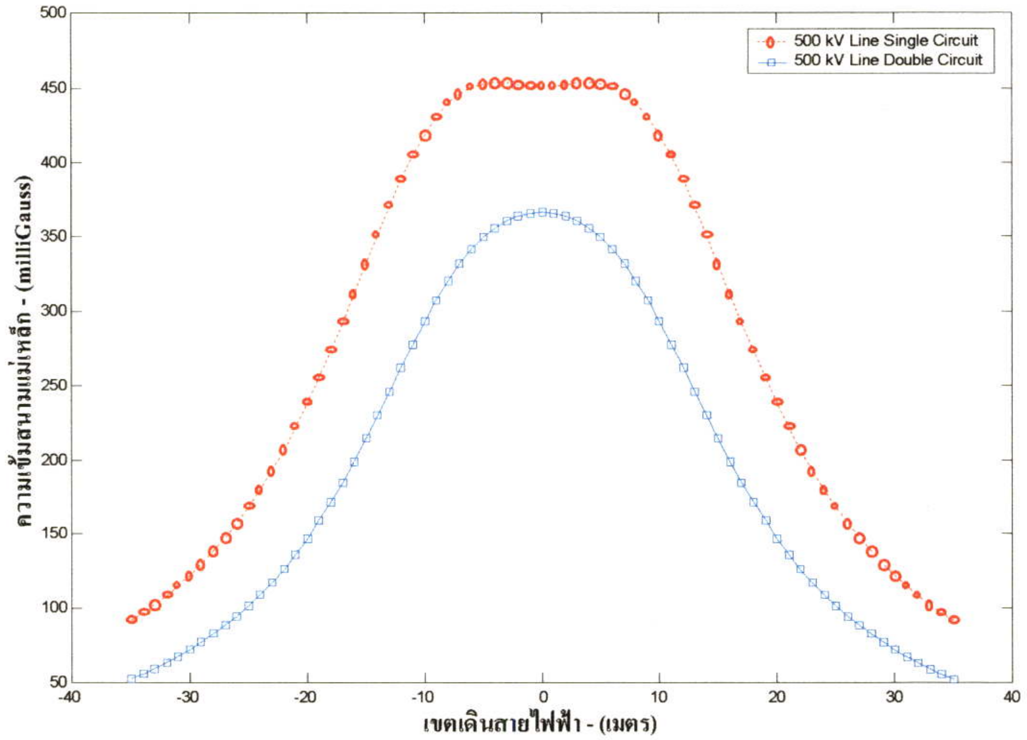
สนามไฟฟ้า ซึ่งจากการพล๊อตกราฟค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อระยะทางภายในเขตเดินสายไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV(รูปที่ 4.6 และ 4.7) ปรากฎว่าการกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กระหว่างสายส่งไฟฟ้าวงจรเดี่ยวกับสายส่งไฟฟ้าวงจรคู่ก็จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันทั้งนี้เป็นผลมาจากการจัดวางตัวนำ (line configuration) ที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.4 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุด

สายส่ง	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (mG)
1. 500 kV วงจรเดี่ยว	6.630 (13 เมตรจากแนวสายส่ง)	453.909 (4 เมตรจากแนวสายส่ง)
2. 500 kV วงจรคู่	6.012 (9 เมตรจากแนวสายส่ง)	366.414 (ที่แนวสายส่ง)



รูปที่ 4.6 กราฟความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินสูงสุดของสายส่ง 500 kV ในเขตเดินสายไฟฟ้า



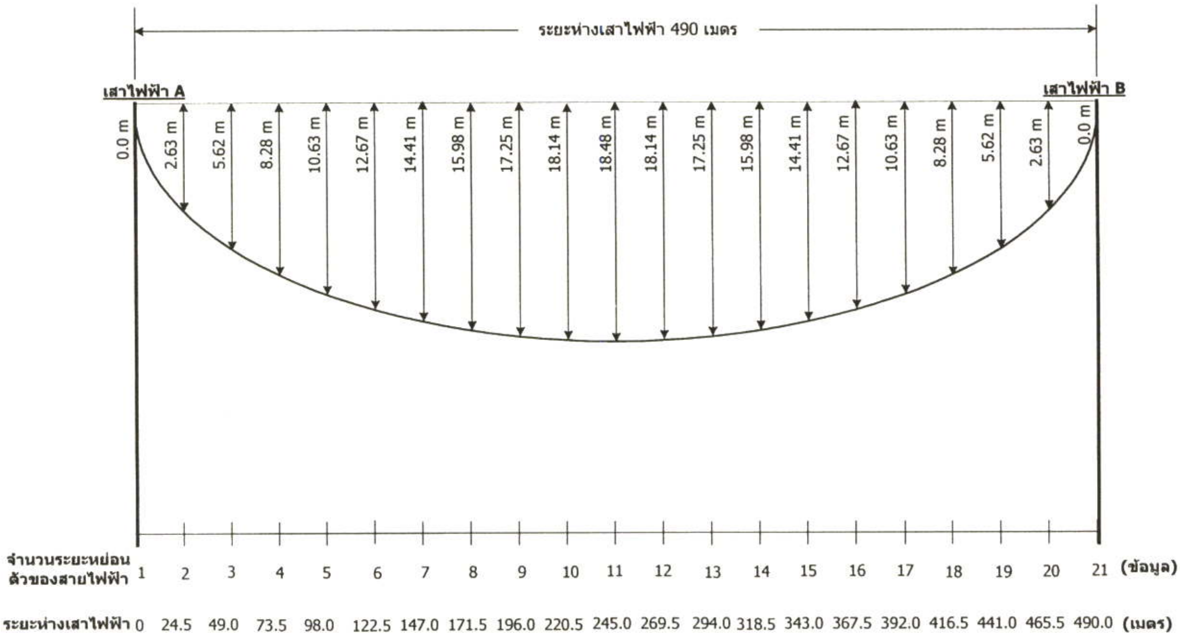
รูปที่ 4.7 กราฟความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินสูงสุดของสายส่ง 500 kV ในเขตเดินสายไฟฟ้า

4.4 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า

จากโครงสร้างของสายส่งโดยทั่วไป ตำแหน่งของสายตัวนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้า(sag) ซึ่งที่จุดยึดสายไฟฟ้าระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับศูนย์และจะค่อย ๆ มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงตรงกลางของระยะห่างเสาไฟฟ้า ซึ่งระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าจะมีค่ามากที่สุด(maximum sag) ทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(span length) สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะมีความเข้มสูงสุดบริเวณตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่งและจะมีค่าลดลงไปตามระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าที่มีค่าลดลง ผลจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถวิเคราะห์ให้เห็นได้ชัดเจนเมื่อวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในรูปแบบของ 3 มิติ(3-dimensions)[8]-[9] โดยทำการวิเคราะห์ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและชนิดวงจรคู่ และเนื่องจากต้องการรู้ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดจึงกำหนดให้สายส่งมีภาระในการจ่ายโหลดสูงสุด ดังมีรายละเอียดของข้อมูลตามตารางที่ 4.2 และเพิ่มข้อมูลในส่วนของระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า โดยเริ่มต้นจากจุดยึดสายที่มีระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าเท่ากับศูนย์และเพิ่มระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าไปตามตำแหน่งที่กำหนด ดังนี้

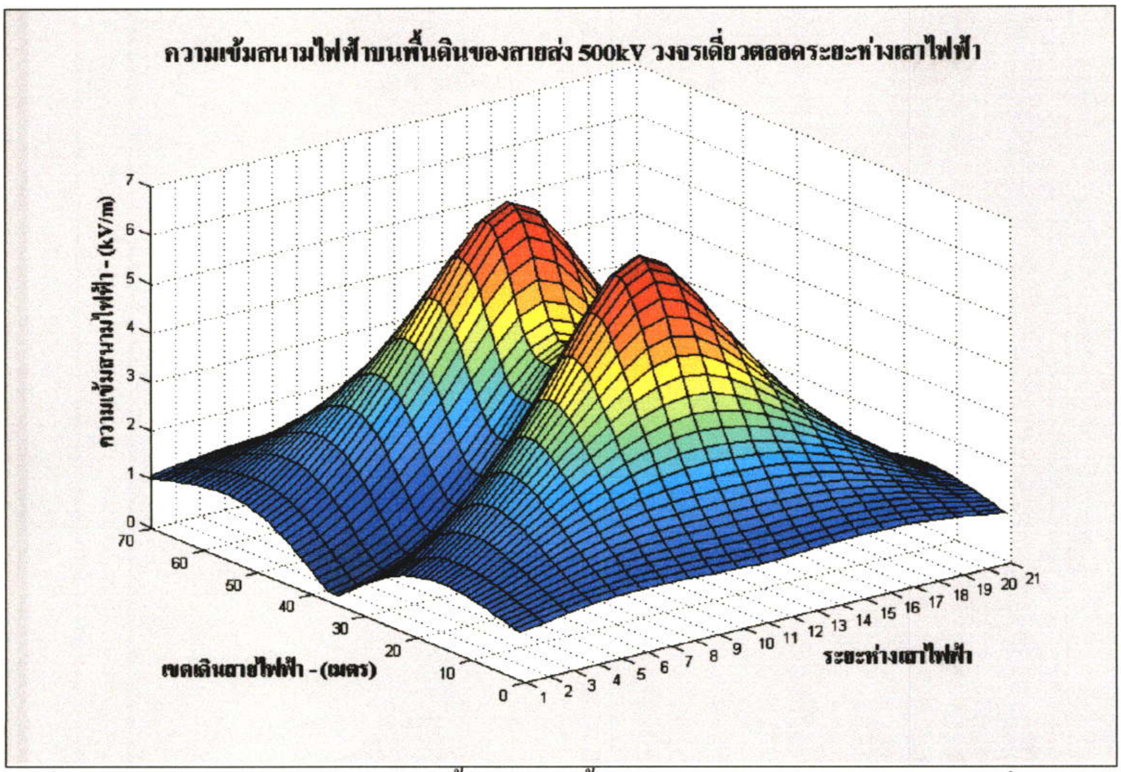
4.4.1 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว

ลักษณะของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kVวงจรเดี่ยวจะมีระยะห่างเสาไฟฟ้า(span length) เท่ากับ 490 เมตร เมื่อจะพิจารณาหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้าจะต้องแบ่งระยะห่างของเสาไฟฟ้านั้นออกเป็นช่วงสั้น ๆ เพื่อหาระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้า(sag) ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงดังรายละเอียดในรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นการแบ่งระยะห่างเสาไฟฟ้าออกเป็นช่วงสั้น ๆ โดยกำหนดให้แต่ละช่วงจะมีค่าเท่ากับ 24.5 เมตร และเมื่อแบ่งระยะห่างช่วงเสาออกเป็น 20 ช่วงก็จะได้ระยะห่างช่วงเสาไฟฟ้าเป็น 490 เมตร

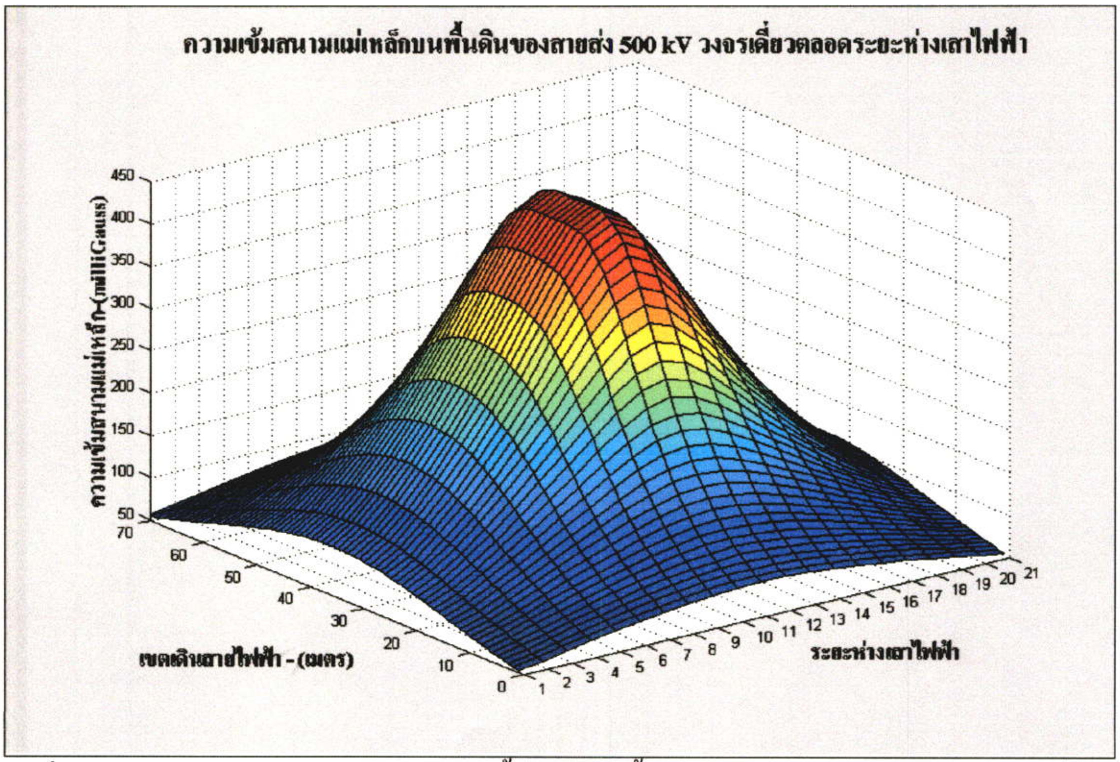


รูปที่ 4.8 ระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ ของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรเดี่ยว

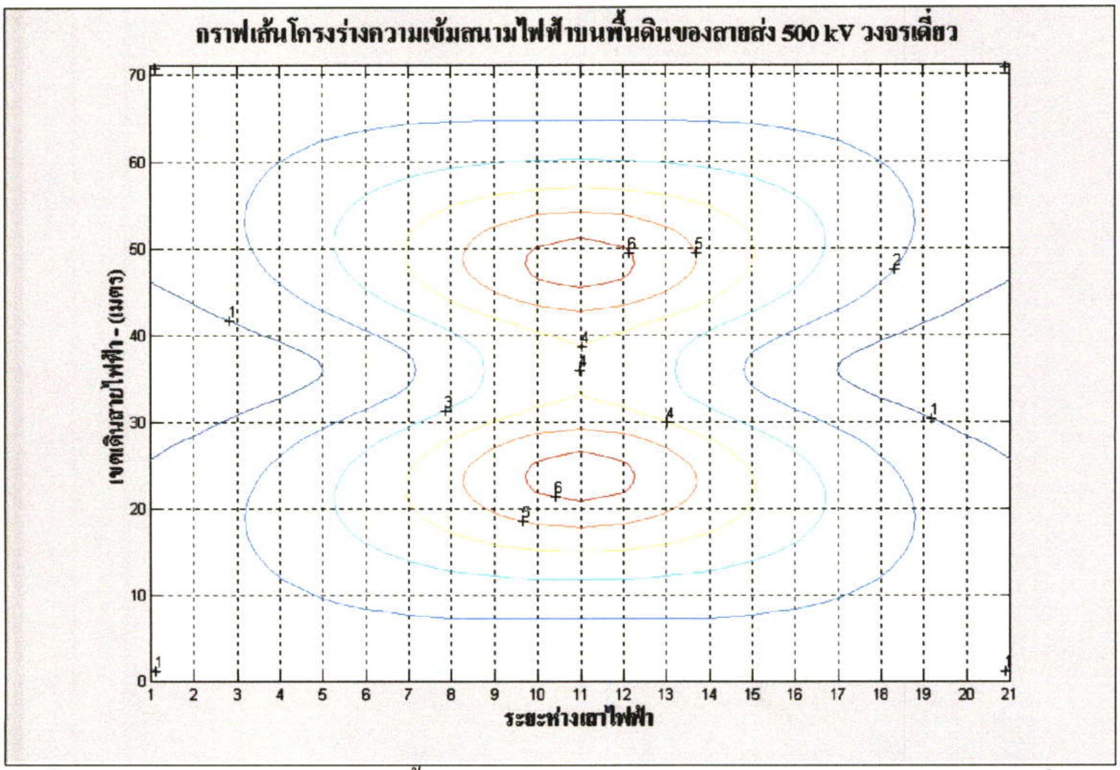
ซึ่งจากข้อมูลระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนดเมื่อนำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้าจะได้ความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก 3 มิติแบบกราฟพื้นผิว(surface) ดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ สำหรับรูปที่ 4.11 และ 4.12 เป็นกราฟเส้นโครงร่าง(contour) ของความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า และในตารางที่ 4.5 เป็นการสรุปค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกราฟแบบเส้นโครงร่างของความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างเสาไฟฟ้ากับเขตเดินสายไฟฟ้า



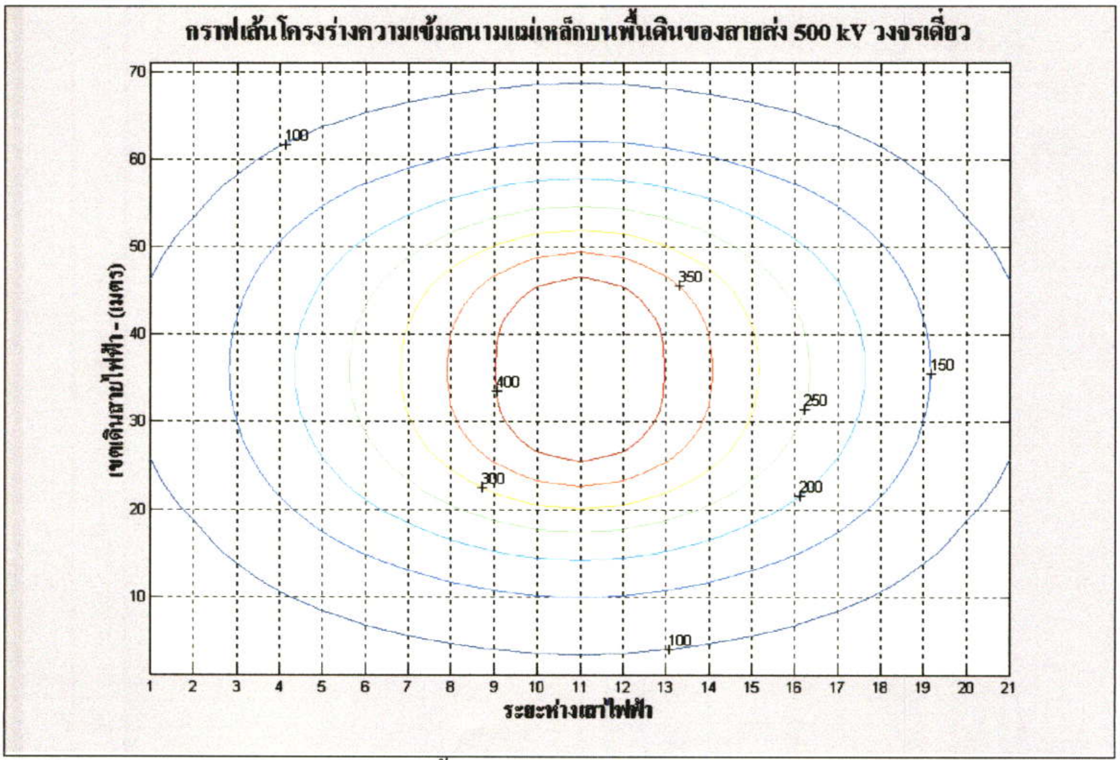
รูปที่4.9 ความเข้มสนามไฟฟ้า 3มิติบนพื้นดินแบบพื้นผิวตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรเดี่ยว)



รูปที่ 4.10 ความเข้มสนามแม่เหล็ก 3มิติบนพื้นดินแบบพื้นผิวตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า (วงจรเดี่ยว)



รูปที่ 4.11 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินแบบเส้นโครงร่างตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า (วงจรเดี่ยว)



รูปที่ 4.12 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินแบบเส้นโครงร่างตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรเดี่ยว)

ตารางที่ 4.5 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินเมื่อพิจารณาจากกราฟแบบเส้นโครงร่างตามรูปที่ 4.11 และ 4.12

ตำแหน่งที่พิจารณา (ระยะห่างเสาไฟฟ้า,เขตเดินสายไฟฟ้า)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (milliGauss)
(2,10)	1-2	0-100
(2,20)	1-2	100-150
(2,30)	0-1	100-150
(2,40)	0-1	100-150
(2,50)	1-2	100-150
(2,60)	1-2	0-100
(2,70)	1-2	0-100
(3,10)	1-2	0-100
(3,20)	1-2	100-150
(3,30)	1-2	150-200
(3,40)	0-1	150-200
(3,50)	1-2	100-150
(3,60)	1-2	0-100
(3,70)	1-2	0-100
(4,10)	1-2	0-100
(4,20)	2-3	100-150
(4,30)	1-2	150-200
(4,40)	1-2	150-200
(4,50)	2-3	150-200
(4,60)	2-3	100-150
(4,70)	1-2	0-100
(5,10)	2-3	100-150
(5,20)	2-3	150-200
(5,30)	1-2	200-250
(5,40)	1-2	200-250

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ตำแหน่งที่พิจารณา (ระยะห่างเสาไฟฟ้า,เขตเดินสายไฟฟ้า)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (milliGauss)
(5,50)	2-3	150-200
(5,60)	2-3	100-150
(5,70)	1-2	0-100
(6,10)	2-3	100-150
(6,20)	3-4	150-200
(6,30)	2-3	200-250
(6,40)	1-2	200-250
(6,50)	3-4	150-200
(6,60)	2-3	100-150
(6,70)	1-2	0-100
(7,10)	2-3	100-150
(7,20)	3-4	200-250
(7,30)	2-3	300-350
(7,40)	2-3	300-350
(7,50)	4-5	250-300
(7,60)	2-3	100-150
(7,70)	1-2	0-100
(8,10)	2-3	100-150
(8,20)	4-5	200-250
(8,30)	3-4	300-350
(8,40)	2-3	350-400
(8,50)	4-5	250-300
(8,60)	2-3	150-200
(8,70)	1-2	0-100
(9,10)	2-3	100-150
(9,20)	5-6	250-300

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ตำแหน่งที่พิจารณา (ระยะห่างเสาไฟฟ้า,เขตเดินสายไฟฟ้า)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (milliGauss)
(9,30)	4-5	350-400
(9,40)	3-4	350-400
(9,50)	5-6	300-350
(9,60)	3-4	150-200
(9,70)	1-2	0-100
(10,10)	2-3	100-150
(10,20)	5-6	250-300
(10,30)	4-5	400
(10,40)	3-4	400
(10,50)	5-6	300-350
(10,60)	3-4	150-200
(10,70)	1 -2	0-100
(11,10)	2-3	100-150
(11,20)	5-6	250-300
(11,30)	4-5	400
(11,40)	4-5	400
(11,50)	5-6	300-350
(11,60)	3-4	150-200
(11,70)	1-2	0-100
(12,10)	2-3	100-150
(12,20)	5-6	250-300
(12,30)	4-5	400
(12,40)	3-4	400
(12,50)	5-6	300-350
(12,60)	2-3	150-200
(12,70)	1-2	0-100

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ตำแหน่งที่พิจารณา (ระยะห่างเสาไฟฟ้า,เขตเดินสายไฟฟ้า)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (milliGauss)
(13,10)	2-3	100-150
(13,20)	5-6	250-300
(13,30)	4-5	350-400
(13,40)	3-4	350-400
(13,50)	5-6	300-350
(13,60)	3-4	150-200
(13,70)	1-2	0-100
(14,10)	2-3	100-150
(14,20)	4-5	200-250
(14,30)	3-4	300-350
(14,40)	2-3	300-350
(14,50)	4-5	250-300
(14,60)	2-3	150-200
(14,70)	1-2	0-100
(15,10)	2-3	100-150
(15,20)	3-4	200-250
(15,30)	2-3	250-300
(15,40)	2-3	300-350
(15,50)	4-5	200-250
(15,60)	2-3	100-150
(15,70)	1-2	0-100
(16,10)	2-3	100-150
(16,20)	3-4	150-200
(16,30)	2-3	250-300
(16,40)	1-2	250-300
(16,50)	3-4	200-250

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ตำแหน่งที่พิจารณา (ระยะห่างเสาไฟฟ้า,เขตเดินสายไฟฟ้า)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (milliGauss)
(16,60)	2-3	100-150
(16,70)	1-2	0-100
(17,10)	2-3	100-150
(17,20)	2-3	150-200
(17,30)	1-2	200-250
(17,40)	1-2	200-250
(17,50)	2-3	150-200
(17,60)	2-3	100-150
(17,70)	1-2	0-100
(18,10)	1-2	0-100
(18,20)	2-3	100-150
(18,30)	1-2	150-200
(18,40)	1-2	150-200
(18,50)	2-3	150-200
(18,60)	2-3	100-150
(18,70)	1-2	0-100
(19,10)	1-2	0-100
(19,20)	1-2	100-150
(19,30)	1-2	100-150
(19,40)	0-1	150-200
(19,50)	1-2	100-150
(19,60)	1-2	0-100
(19,70)	1-2	0-100
(20,10)	1-2	0-100
(20,20)	1-2	100-150
(20,30)	0-1	100-150

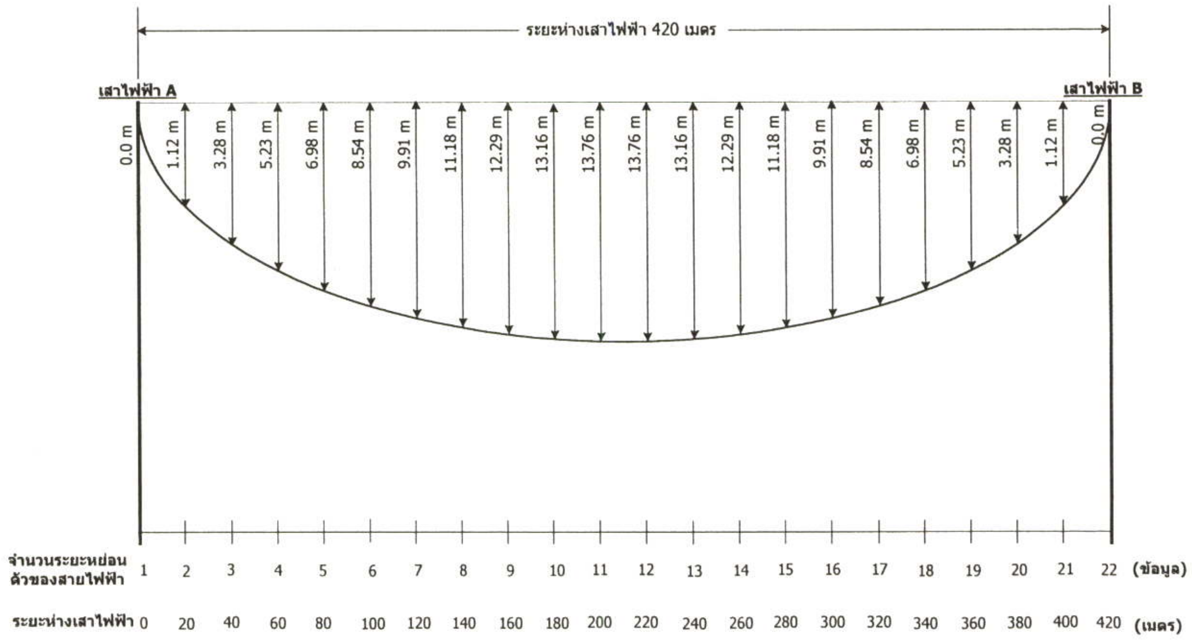
ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ตำแหน่งที่พิจารณา (ระยะห่างเสาไฟฟ้า,เขตเดินสายไฟฟ้า)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (milliGauss)
(20,40)	0-1	100-150
(20,50)	1-2	100-150
(20,60)	1-2	0-100
(20,70)	1-2	0-100

ในตารางที่ 4.5 เป็นค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยวที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า โดยเป็นความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเขตเดินสายไฟฟ้าตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า เช่น ที่ตำแหน่ง (9,20) จะหมายถึงตำแหน่งจากเสาไฟฟ้า A ออกมาเป็นระยะทาง 196 เมตร(ตามรูปที่ 4.8) และระยะห่างจากขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าเข้ามาเป็นระยะทางเท่ากับ 20 เมตร จะมีความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่าง 5 - 6 kV/m และมีความเข้มสนามแม่เหล็กระหว่าง 250 – 300 mG ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วสามารถบอกได้ว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยวเมื่อมีค่าภาระทางโหลดสูงสุดจะมีค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินเกิดขึ้นในเขตเดินสายไฟฟ้าตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 1 – 6 kV/m และ 100 – 400 mG ตามลำดับ

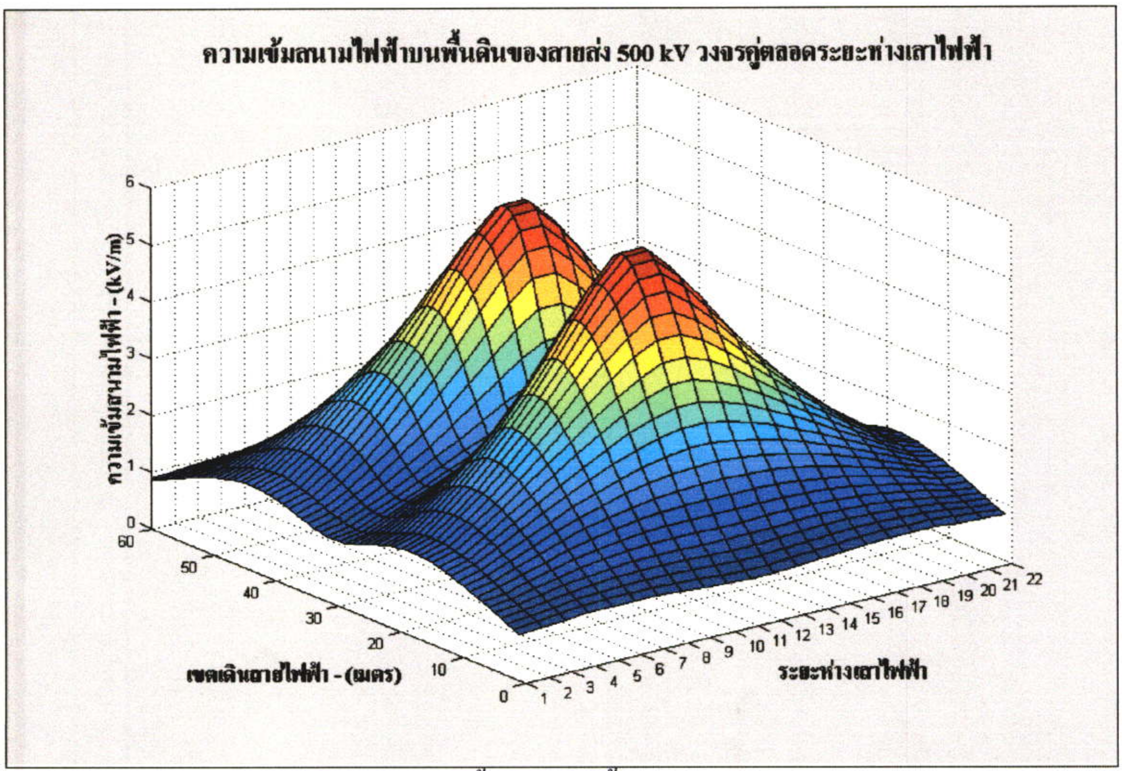
4.4.2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่

ลักษณะของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kVวงจรคู่จะมีระยะห่างเสาไฟฟ้าเท่ากับ 420 เมตร เมื่อจะพิจารณาหาค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้าจะต้องแบ่งระยะห่างของเสาไฟฟ้านั้นออกเป็นช่วงสั้น ๆ เพื่อหาระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงดังรายละเอียดในรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นการแบ่งระยะห่างเสาไฟฟ้าออกเป็นช่วงสั้น ๆ โดยกำหนดให้แต่ละช่วงจะมีค่าเท่ากับ 20 เมตร และเมื่อแบ่งระยะห่างช่วงเสาออกเป็น 21 ช่วงก็จะได้ระยะห่างช่วงเสาไฟฟ้าเป็น 420 เมตร

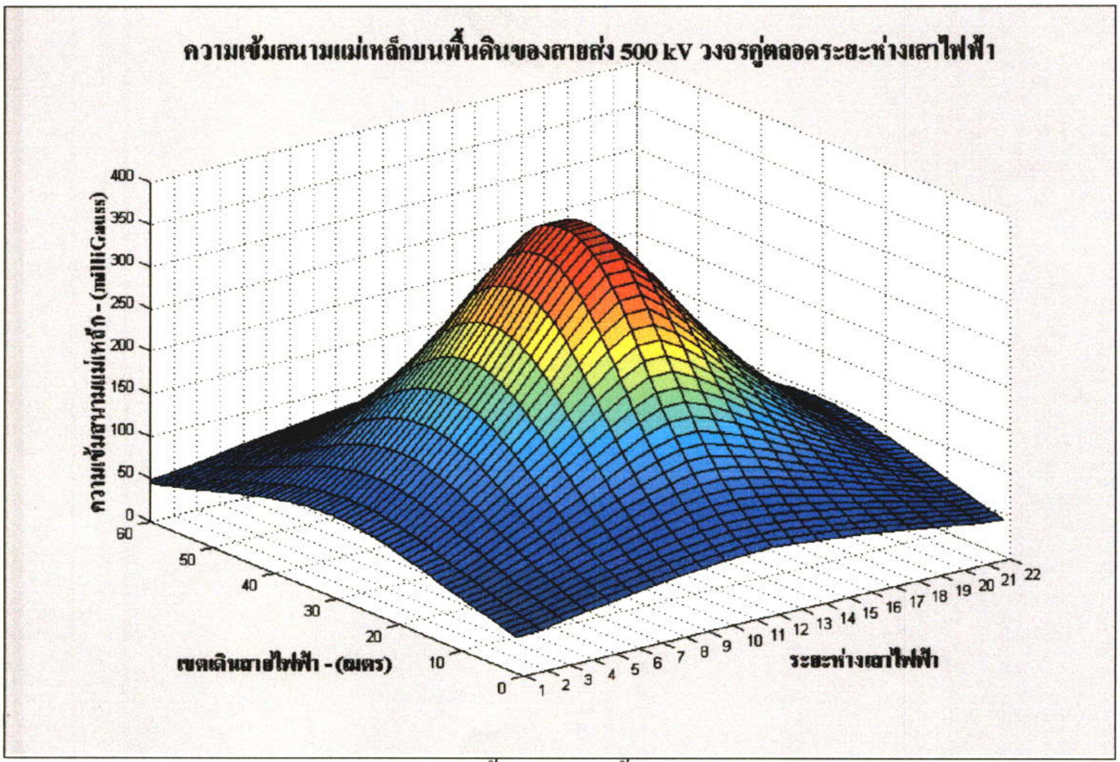


รูปที่ 4.13 ระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ ของสายส่งไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่

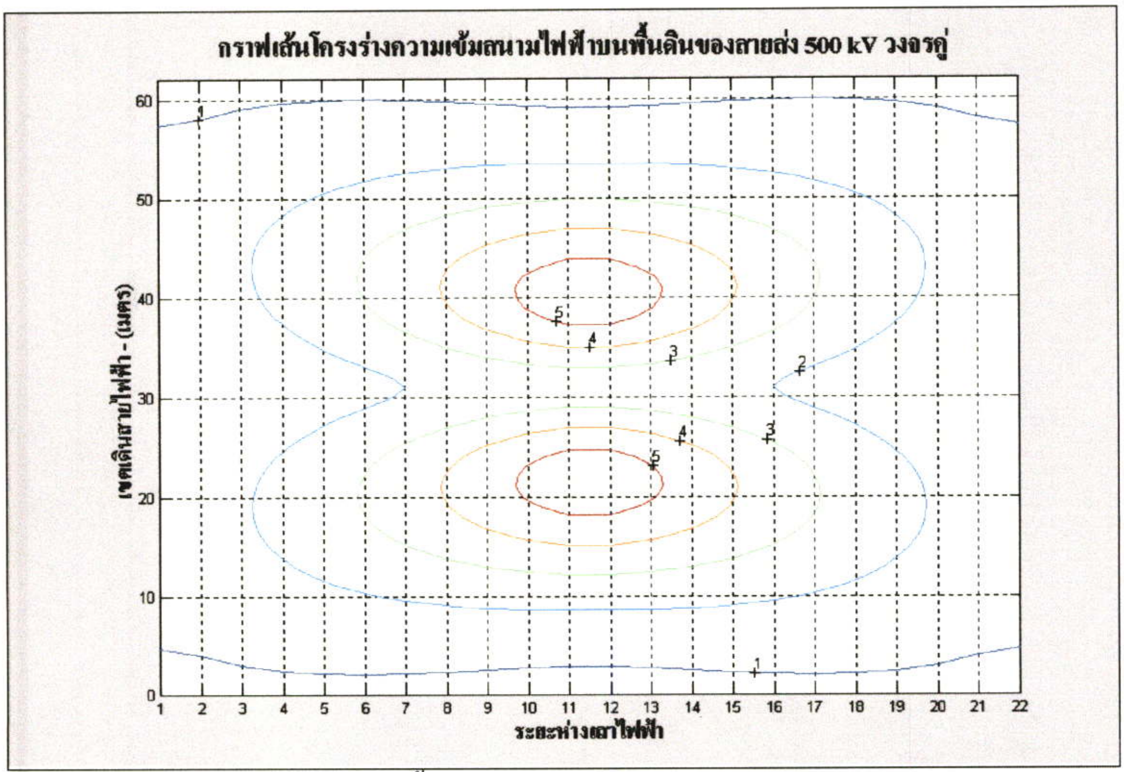
ซึ่งจากข้อมูลระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ ที่กำหนดเมื่อนำไปวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้าจะได้ความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก 3 มิติแบบกราฟพื้นผิว(surface) ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 สำหรับรูปที่ 4.16 และ 4.17 เป็นกราฟเส้นโครงร่าง(contour) ของความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า และในตารางที่ 4.6 เป็นการสรุปค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกราฟแบบเส้นโครงร่างของความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากรูปที่ 4.16 และ 4.17 ตามความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างเสาไฟฟ้ากับเขตเดินสายไฟฟ้า



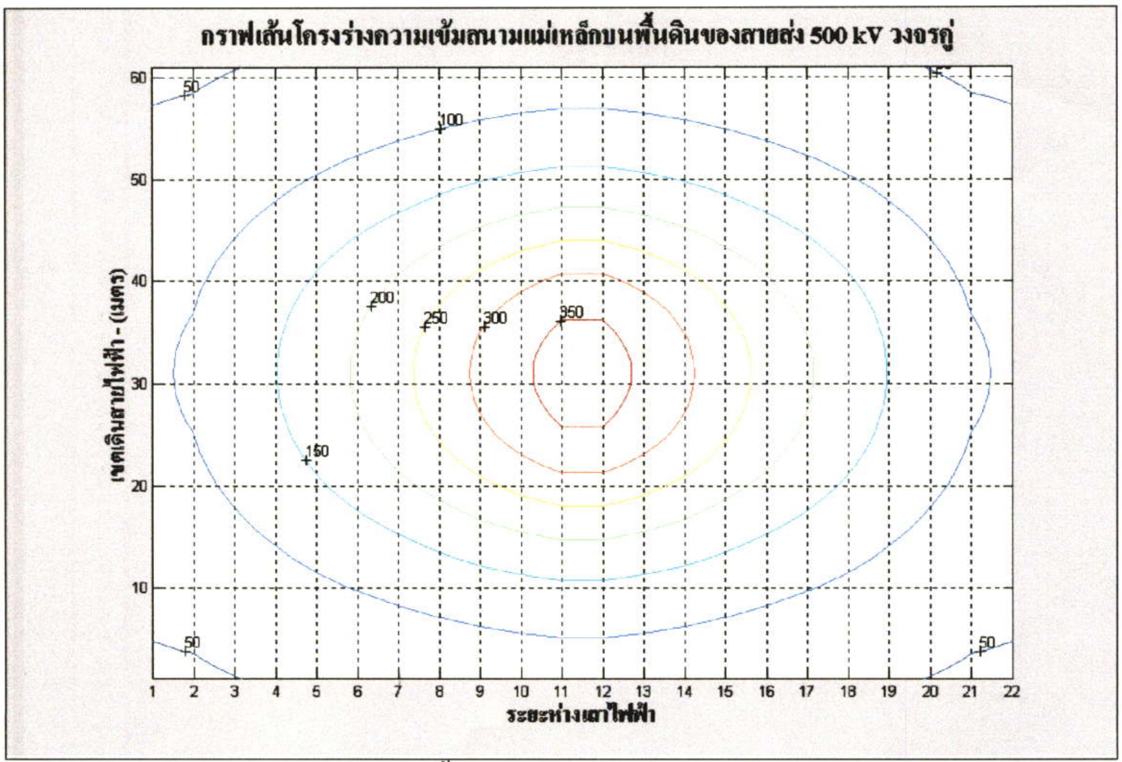
รูปที่ 4.14 ความเข้มสนามไฟฟ้า 3มิติบนพื้นดินแบบพื้นผิวตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า (วงจรคู่)



รูปที่4.15 ความเข้มสนามแม่เหล็ก 3มิติบนพื้นดินแบบพื้นผิวตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรคู่)



รูปที่ 4.16 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินแบบเส้นโครงร่างตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรคู่)



รูปที่ 4.17 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินแบบเส้นโครงร่างตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า(วงจรคู่)

ตารางที่ 4.6 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินเมื่อพิจารณาจากกราฟแบบเส้นโครงร่างตามรูปที่ 4.16 และ 4.17

ตำแหน่งที่พิจารณา (ระยะห่างเสาไฟฟ้า/เขตเดินสายไฟฟ้า)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (milliGauss)
(2,10)	1-2	50-100
(2,20)	1-2	50-100
(2,30)	1-2	100-150
(2,40)	1-2	50-100
(2,50)	1-2	50-100
(2,60)	0-1	0-50
(3,10)	1-2	50-100
(3,20)	1-2	100-150
(3,30)	1-2	100-150
(3,40)	1-2	100-150
(3,50)	1-2	50-100
(3,60)	0-1	50-100
(4,10)	1-2	50-100
(4,20)	2-3	100-150
(4,30)	1-2	100-150
(4,40)	2-3	100-150
(4,50)	1-2	50-100
(4,60)	0-1	50-100
(5,10)	1-2	50-100
(5,20)	2-3	100-150
(5,30)	1-2	150-200
(5,40)	2-3	150-200
(5,50)	2-3	100-150
(5,60)	1-2	50-100
(6,10)	1-2	100-150

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตำแหน่งที่พิจารณา (ระยะห่างเสาไฟฟ้า/เขตเดินสายไฟฟ้า)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (milliGauss)
(6,20)	3-4	150-200
(6,30)	1-2	200-250
(6,40)	3-4	150-200
(6,50)	2-3	100-150
(6,60)	1-2	50-100
(7,10)	1-2	100-150
(7,20)	3-4	150-200
(7,30)	2-3	200-250
(7,40)	3-4	200-250
(7,50)	2-3	100-150
(7,60)	1-2	50-100
(8,10)	2-3	100-150
(8,20)	4-5	200-250
(8,30)	2-3	250-300
(8,40)	4-5	200-250
(8,50)	2-3	100-150
(8,60)	1-2	50-100
(9,10)	2-3	100-150
(9,20)	4-5	200-250
(9,30)	2-3	300-350
(9,40)	4-5	250-300
(9,50)	2-3	150-200
(9,60)	0-1	50-100
(10,10)	2-3	100-150
(10,20)	5	250-300
(10,30)	2-3	300-350

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตำแหน่งที่พิจารณา (ระยะห่างเสาไฟฟ้า/เขตเดินสายไฟฟ้า)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (milliGauss)
(10,40)	5	250-300
(10,50)	2-3	150-200
(10,60)	0-1	50-100
(11,10)	2-3	100-150
(11,20)	5	250-300
(11,30)	2-3	350
(11,40)	5	300-350
(11,50)	2-3	150-200
(11,60)	0-1	50-100
(12,10)	2-3	100-150
(12,20)	5	250-300
(12,30)	2-3	350
(12,40)	5	300-350
(12,50)	2-3	150-200
(12,60)	0-1	50-100
(13,10)	2-3	100-150
(13,20)	5	250-300
(13,30)	2-3	300-350
(13,40)	5	250-300
(13,50)	2-3	150-200
(13,60)	0-1	50-100
(14,10)	2-3	100-150
(14,20)	4-5	200-250
(14,30)	2-3	300-350
(14,40)	4-5	250-300
(14,50)	2-3	150-200

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตำแหน่งที่พิจารณา (ระยะห่างเสาไฟฟ้า/เขตเดินสายไฟฟ้า)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (milliGauss)
(14,60)	0-1	50-100
(15,10)	2-3	100-150
(15,20)	4-5	200-250
(15,30)	2-3	250-300
(15,40)	4-5	200-250
(15,50)	2-3	100-150
(15,60)	0-1	50-100
(16,10)	2-3	100-150
(16,20)	3-4	150-200
(16,30)	2-3	200-250
(16,40)	3-4	200-250
(16,50)	2-3	100-150
(16,60)	1-2	50-100
(17,10)	1-2	100-150
(17,20)	3-4	150-200
(17,30)	1-2	200-250
(17,40)	3-4	150-200
(17,50)	2-3	100-150
(17,60)	1-2	50-100
(18,10)	1-2	50-100
(18,20)	2-3	100-150
(18,30)	1-2	150-200
(18,40)	2-3	150-200
(18,50)	2-3	100-150
(18,60)	1-2	50-100
(19,10)	1-2	50-100

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ตำแหน่งที่พิจารณา (ระยะห่างเสาไฟฟ้า/เขตเดินสายไฟฟ้า)	ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	ความเข้มสนามแม่เหล็ก (milliGauss)
(19,20)	2-3	100-150
(19,30)	1-2	100-150
(19,40)	2-3	100-150
(19,50)	1-2	50-100
(19,60)	0-1	50-100
(20,10)	1-2	50-100
(20,20)	1-2	100-150
(20,30)	1-2	100-150
(20,40)	1-2	100-150
(20,50)	1-2	50-100
(20,60)	0-1	50-100
(21,10)	1-2	50-100
(21,20)	1-2	50-100
(21,30)	1-2	100-150
(21,40)	1-2	50-100
(21,50)	1-2	50-100
(21,60)	0-1	0-50

ในตารางที่ 4.6 เป็นค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่ที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า โดยเป็นความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในตำแหน่งต่าง ๆ ภายในเขตเดินสายไฟฟ้าตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้า เช่น ที่ตำแหน่ง (9,20) จะหมายถึงตำแหน่งจากเสาไฟฟ้า A ออกมาเป็นระยะทาง 160 เมตร(ตามรูปที่ 4.13) และระยะห่างจากขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าเข้ามาเป็นระยะทางเท่ากับ 20 เมตร จะมีความเข้มสนามไฟฟ้าระหว่าง 4 - 5 kV/m และมีความเข้มสนามแม่เหล็กระหว่าง 200 – 250 mG ซึ่งเมื่อพิจารณาโดยรวมแล้วสามารถบอกได้ว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่เมื่อมีค่าภาระทางโหลดสูงสุดจะมีค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินเกิดขึ้นในเขตเดินสายไฟฟ้าตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 1 – 5 kV/m และ 50 – 350 mG ตามลำดับ

4.5 การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณสายส่ง 500 kV

4.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ได้แก่ EMDEX II ซึ่งมีคุณสมบัติตามตารางที่ 4.7

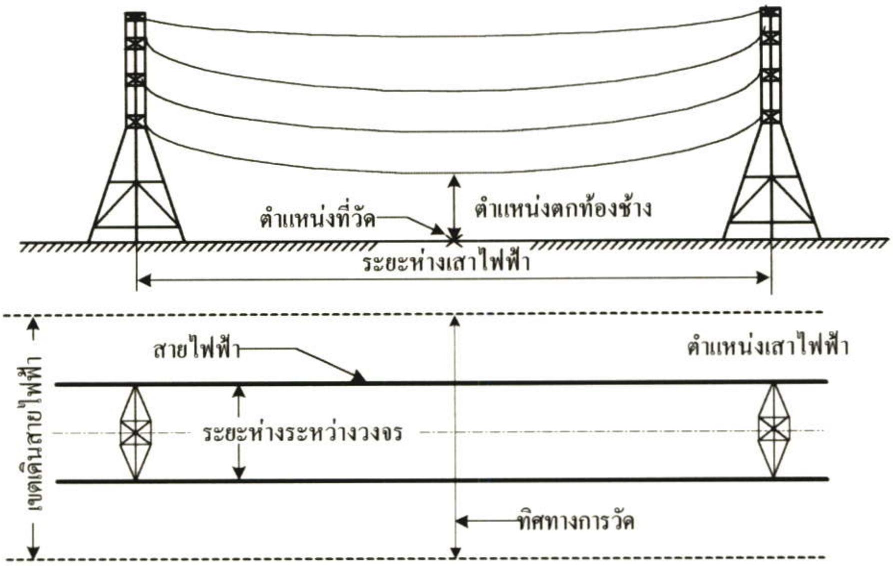
ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติของเครื่องมือวัด EMDEX II [10]

รุ่นของเครื่องมือวัด	EMDEX II	
ลักษณะที่ใช้วัด	สนามไฟฟ้า	สนามแม่เหล็ก
ขนาดของเครื่องวัด	170 x 70 x 40 มิลลิเมตร	
น้ำหนักของเครื่องวัด	340 กรัม	
ตัวเซนเซอร์	แผ่นโลหะทรงสี่เหลี่ยม	ขดลวด Orthogonally mounted coil
พิสัยการวัด	1-200 kV/m	0.1 mG – 3 G
ค่าที่อ่านได้จากมิเตอร์	สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ในแนวแกน x , y และ z
แบตเตอรี่	9 โวลต์	
การวิเคราะห์ผล	วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม EMCALC 95	

รูปที่ 4.18 เครื่องมือวัด EMDEX II

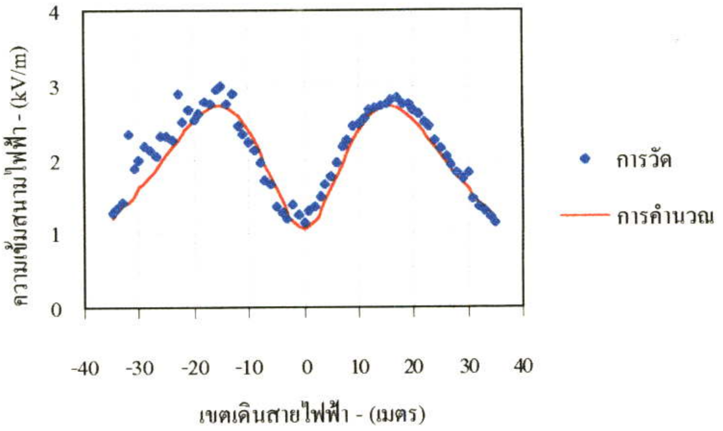
4.5.2 วิธีการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ในการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงสามารถทำได้โดยกำหนดให้ตำแหน่งของเครื่องวัดอยู่สูงจากระดับพื้นดิน 1 เมตร[4] สำหรับการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงสุดที่เกิดขึ้นภายในเขตเดินสายไฟฟ้า สามารถทำได้ด้วยการวัดที่ตำแหน่งตกท้องช้างและวัดในทิศทางตั้งฉากกับแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง(รูปที่ 4.19) สำหรับในรูปที่ 4.20 เป็นการแสดงให้เห็นถึงวิธีการวัดซึ่งตำแหน่งของเครื่องวัดจะอยู่สูงจากพื้นดินประมาณ 1 เมตร

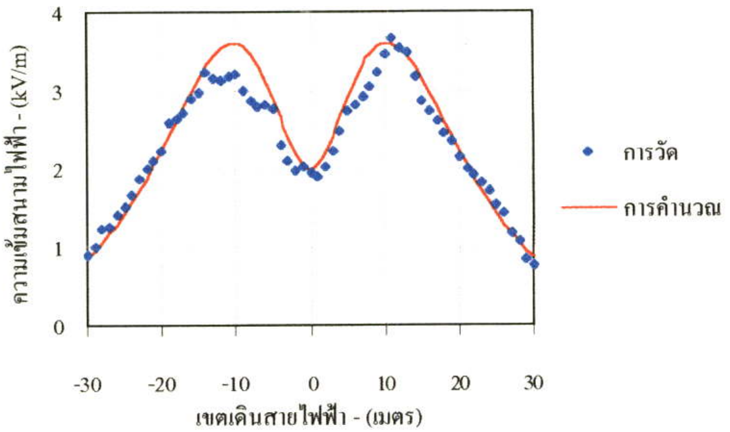


รูปที่ 4.19 ตำแหน่งและทิศทางการวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กใต้สายส่งไฟฟ้า 500 kV

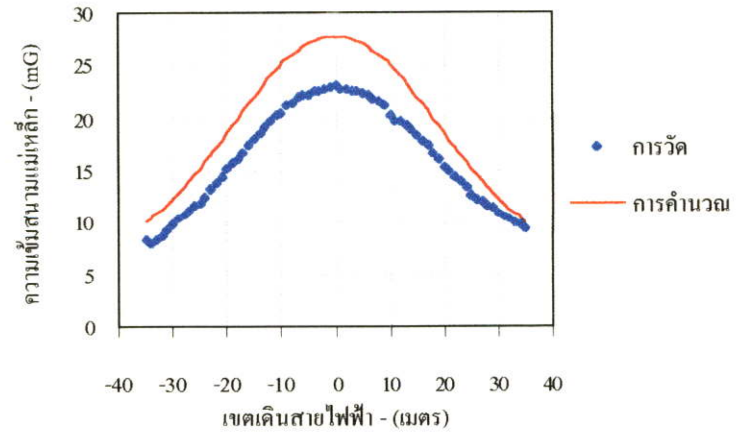
รูปที่ 4.20 การวัดค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กใต้แนวสายส่งด้วยเครื่องมือวัด EMDEXII



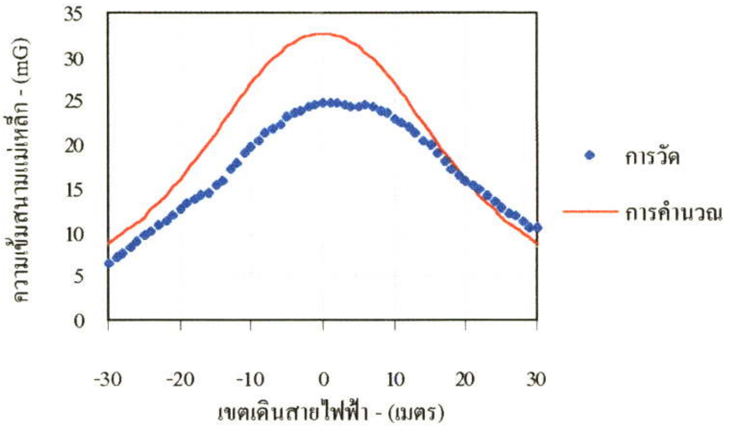
รูปที่ 4.21 ผลการวัดและการคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV (วงจรเดี่ยว)



รูปที่ 4.22 ผลการวัดและการคำนวณความเข้มสนามไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV (วงจรคู่)



รูปที่ 4.23 ผลการวัดและการคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็กของสายส่ง 500 kV (วงจรเดี่ยว)



รูปที่ 4.24 ผลการวัดและการคำนวณความเข้มสนามแม่เหล็กของสายส่ง 500 kV (วงจรคู่)

ในรูปที่ 4.21-4.24 เป็นผลการวัดและการคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนพื้นดิน ณ.ตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและชนิดวงจรคู่ ซึ่งในขณะที่วัดสายส่งมีค่าของภาระในการจ่ายโหลดตามตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่วัดได้จะมีค่าที่แตกต่างไปจากการคำนวณ เมื่อพิจารณาที่สายส่งมีค่าภาระทางโหลดเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาพแวดล้อมในบริเวณที่วัดมีความแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงกับค่าที่ตั้งไว้ตอนคำนวณรวมทั้งค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นในขณะที่วัด

ตารางที่ 4.8 ค่าภาระทางโหลดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยวขณะที่วัด

Date DD/MM/YY	Time HH:MM	500 kV THA TAKO – NONG CHOK	
		BUS VOLTAGE (kV)	CURRENT (Amp)
06/08/01	10.00	508.16	230.12
06/08/01	**11.00**	**507.84**	**251.70**
06/08/01	12.00	513.43	190.61
06/08/01	13.00	503.54	212.16

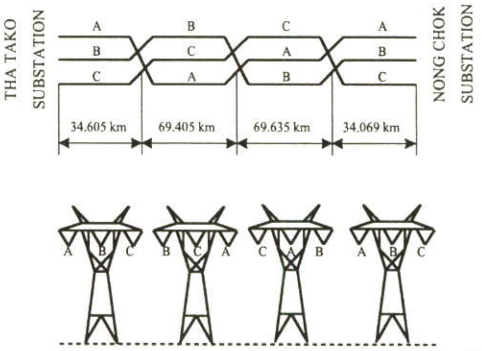
หมายเหตุ : เวลาในขณะที่วัด คือ 11.00 น.

ตารางที่ 4.9 ค่าภาระทางโหลดของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่ขณะที่วัด

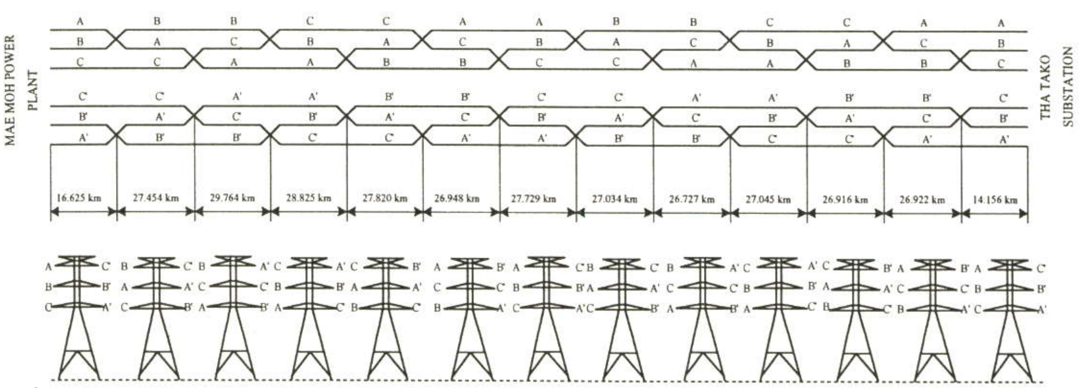
Date DD/MM/YY	Time HH:MM	500 kV MAE MOH - THA TAKO			
		BUS VOLTAGE (kV)		CURRENT (AMP)	
		Circuit 1	Circuit 2	Circuit 1	Circuit 2
12/02/01	14.00	514.96	514.96	606.81	604.82
12/02/01	15.00	516.44	516.44	596.16	594.18
12/02/01	**16.00**	**517.81**	**517.81**	**592.61**	**590.63**
12/02/01	17.00	519.98	519.98	582.26	581.28

หมายเหตุ : เวลาในขณะที่วัด คือ 16.00 น.

4.6 สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งระยะไกล



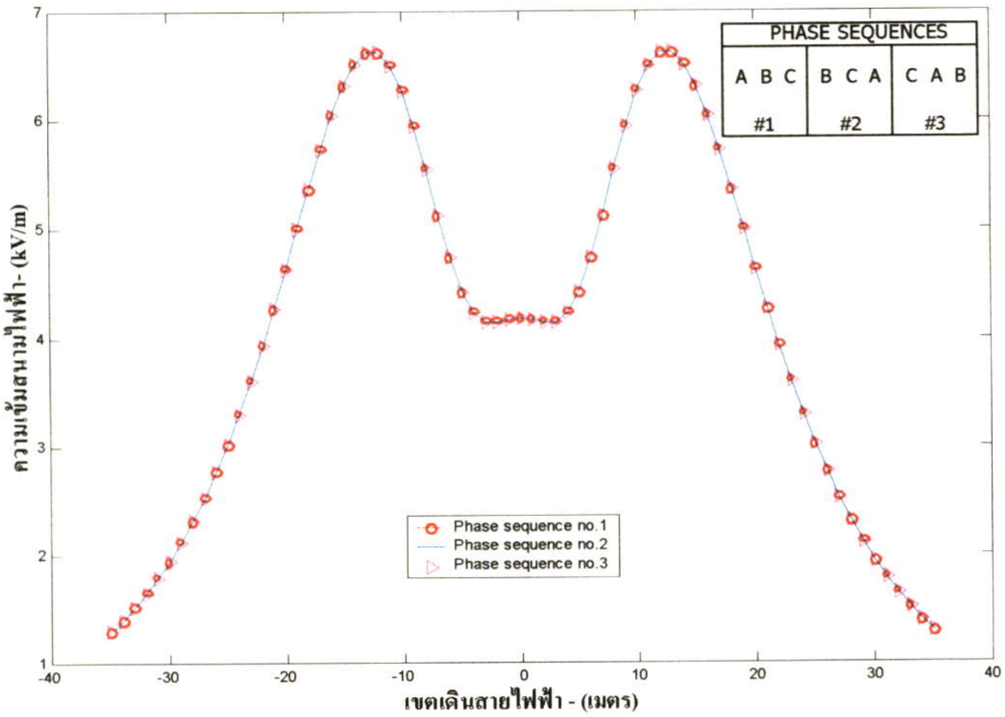
รูปที่ 4.25 ลักษณะของการจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว



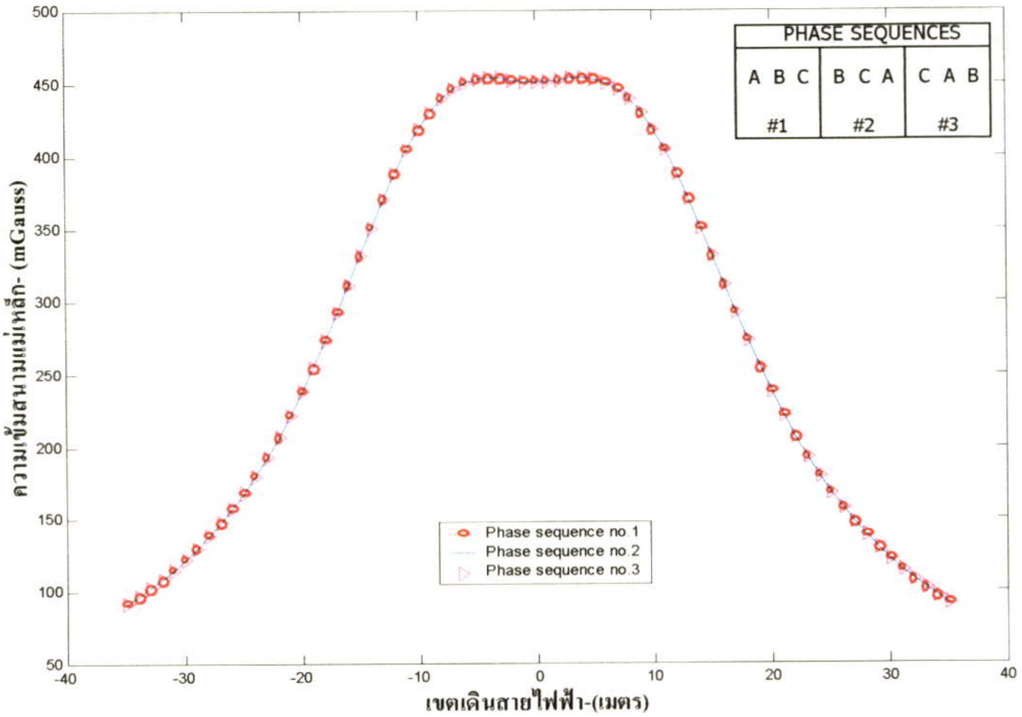
รูปที่ 4.26 ลักษณะของการจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่ง 500 kV วงจรคู่

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงระดับแรงดัน 500 kV เป็นสายส่งที่มีระดับแรงดันสูงพิเศษใช้ส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่มีระยะทางไกลมาก ๆ ทั้งนี้เพื่อต้องการลดแรงดันตกคร่อมในสายส่ง และตัวของ

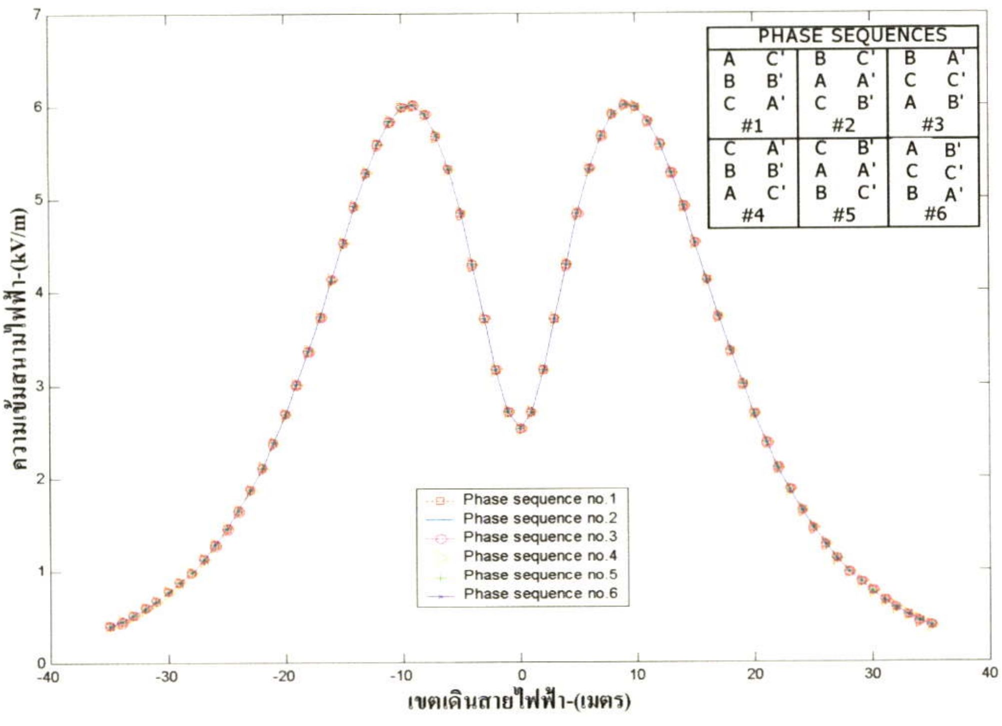
สายส่งเองต้องมีการไขว้สายหรือสลับสายส่ง (transposed) เพื่อแก้ปัญหาเรื่องการเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสายไฟฟ้าแต่ละเฟสไม่เท่ากัน สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kVวงจรเดี่ยวที่ส่งจ่ายจากสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก จ.นครสวรรค์ ไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงหนองจอก จ.กรุงเทพ ระยะทาง 208 กิโลเมตร มีการสลับสายทั้งหมด 4 ช่วงและมีรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.25 และสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่ที่ส่งจ่ายจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง ไปยังสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก จ.นครสวรรค์ ระยะทางประมาณ 334 กิโลเมตร มีการสลับสายทั้งหมด 13 ช่วงและมีรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสที่แตกต่างกัน 6 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.26 ซึ่งการวิเคราะห์ผลของการจัดเรียงลำดับเฟสที่แตกต่างกันที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.27–4.30 ตามลำดับ



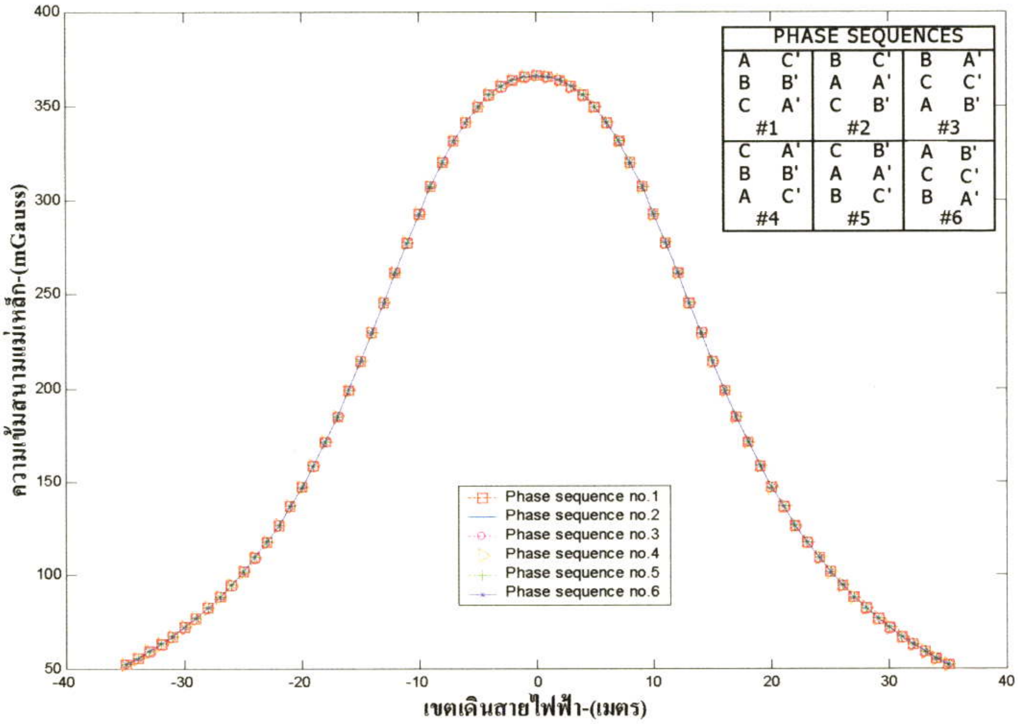
รูปที่ 4.27 ความเข้มสนามไฟฟ้าตามรูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 3 รูปแบบของสายส่ง 500 kV : ท่าตะโก – หนองจอก



รูปที่ 4.28 ความเข้มสนามแม่เหล็กตามรูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 3 รูปแบบของสายส่ง 500 kV : ท่าตะโก – หนองจอก



รูปที่ 4.29 ความเข้มสนามไฟฟ้าตามรูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 6 รูปแบบของสายส่ง 500 kV : แม่เมาะ - ท่าตะโก



รูปที่ 4.30 ความเข้มสนามแม่เหล็กตามรูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟส 6 รูปแบบของสายส่ง 500 kV : แม่เมาะ – ท่าตะโก

4.7 บทสรุป

จากการวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและชนิดวงจรคู่พบว่าค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงสุด ณ.ตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและจะมีค่าลดลงไปตามระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้า ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยการวิเคราะห์ในแบบ 3 มิติและแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปของกราฟเชิงพื้นผิวและกราฟแบบเส้นโครงร่าง สำหรับการเปลี่ยนแปลงลำดับเฟสของสายส่งระยะไกลทั้ง 3 รูปแบบ(สำหรับสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว) และ 6 รูปแบบ (สำหรับสายส่ง 500 kV วงจรคู่) จะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

บทที่ 5
ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

5.1 กล่าวนำ

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะส่งผลกระทบต่อสิ่งต่าง ๆ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยที่สนามไฟฟ้าจะเป็นแหล่งกำเนิดของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(induced current) และสนามแม่เหล็กก็จะก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(induced voltage) ซึ่งจะเหนี่ยวนำกับวัตถุตัวนำที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เช่น บ้านพักอาศัย ยุ้งฉาง รถยนต์ รั้วโลหะ และอื่น ๆ เป็นต้น และเมื่อวัตถุตัวนำเหล่านั้นไม่มีส่วนใดสัมผัสกับพื้นดินจะทำให้กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นสะสมอยู่บนตัวนำ ซึ่งเมื่อปริมาณของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีปริมาณที่มากพอก็จะทำอันตรายกับคนที่เข้าไปสัมผัสกับวัตถุตัวนำที่อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากวัตถุตัวนำผ่านร่างกายลงสู่ดิน

5.2 ผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของการเหนี่ยวนำ

5.2.1 การเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามไฟฟ้า [11]

เมื่อมีวัตถุตัวนำวางอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เส้นแรงจากสนามไฟฟ้าจะทำให้มีประจุไฟฟ้าสะสมอยู่ภายในวัตถุตัวนำเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งปริมาณของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าและขนาดของวัตถุตัวนำ และเมื่อมีคนเข้าไปสัมผัสกับวัตถุตัวนำจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายลงสู่ดิน

5.2.2 การเหนี่ยวนำเนื่องจากสนามแม่เหล็ก [11]

จากกฎของฟาราเดย์(Faraday's Law) กล่าวว่าค่าของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงค่าตามเวลา(เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดกับวัตถุ) จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นบนวัตถุตัวนำและจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำก็จะแปรเปลี่ยนไปเป็นสนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นบนวัตถุตัวนำ ซึ่งปริมาณของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของสนามแม่เหล็ก ความยาวของวัตถุตัวนำที่เส้นแรงแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านและลักษณะการวางของวัตถุตัวนำกับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น

5.3 การวิเคราะห์ผลการเหนี่ยวนำกับวัตถุขนาดใหญ่ใกล้สายส่ง

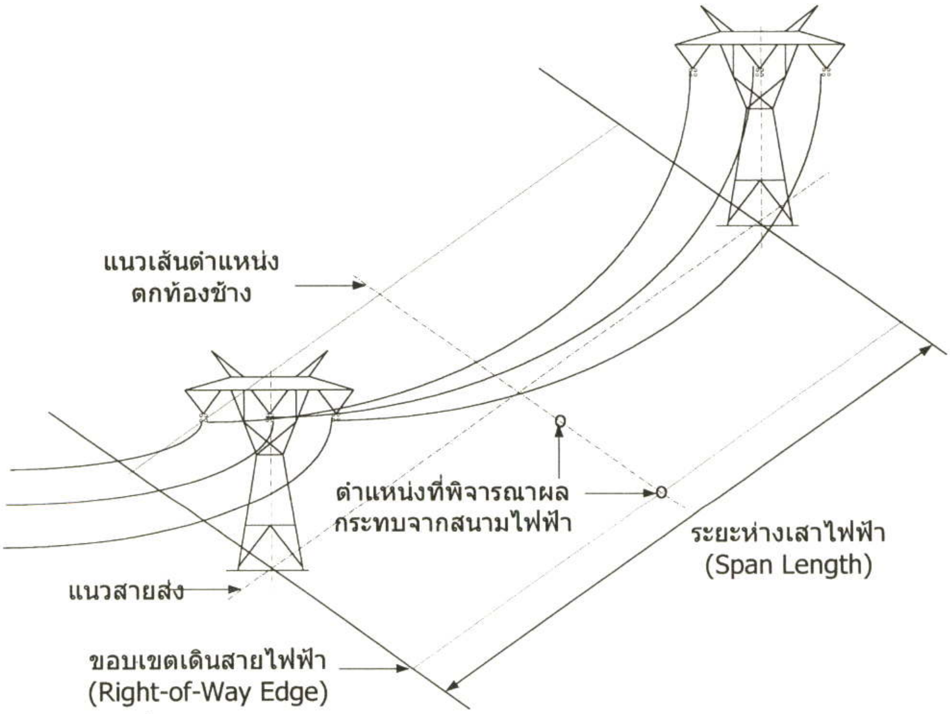
การคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีแหล่งกำเนิดมาจากสนามไฟฟ้าบนพื้นดินที่มีต่อวัตถุตัวนำขนาดใหญ่ สามารถคำนวณได้ในรูปของกระแสช็อตเซอร์กิต(short-circuit current)[2] ที่ไหลจากวัตถุตัวนำลงสู่กราวด์ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการพิจารณาผลกระทบที่เกิดขึ้น คือ

$$I_{SC} = j\omega\varepsilon ES \quad (5.1)$$

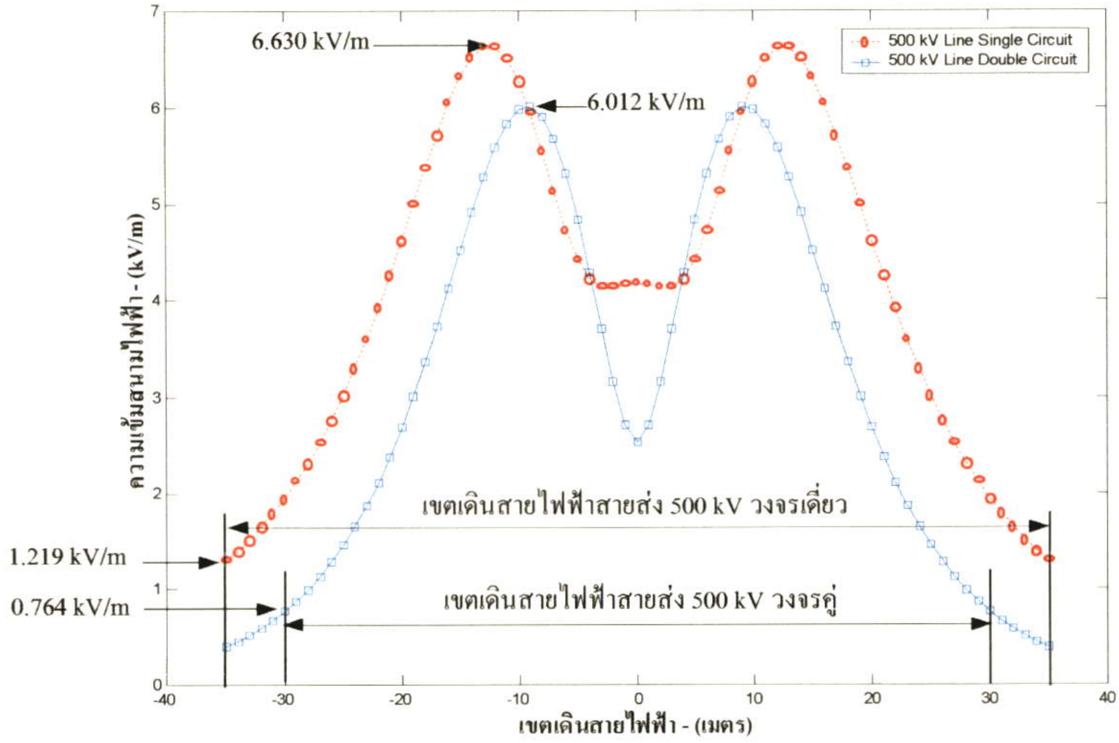
เมื่อ	I_{SC}	= กระแสช็อตเซอร์กิตที่ไหลจากวัตถุตัวนำลงสู่กราวด์	(mA)
	ω	= $2\pi f$; f = ความถี่ของระบบไฟฟ้า	(Hz)
	E	= สนามไฟฟ้าที่เป็นผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ	(kV/m)
	S	= พื้นที่สมมูลของวัตถุตัวนำ	(m^2)

สำหรับการคำนวณหาค่ากระแสช็อตเซอร์กิตมีขั้นตอน ดังนี้

1. หาค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ณ.ตำแหน่งที่วัตถุตัวนำตั้งอยู่ ซึ่งสามารถหาได้จากการคำนวณหรือการวัด
2. หาพื้นที่สมมูลของวัตถุตัวนำ
3. คำนวณค่ากระแสช็อตเซอร์กิตที่เกิดขึ้นภายใต้สนามไฟฟ้าดังกล่าว



รูปที่ 5.1 ตำแหน่งที่วิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV

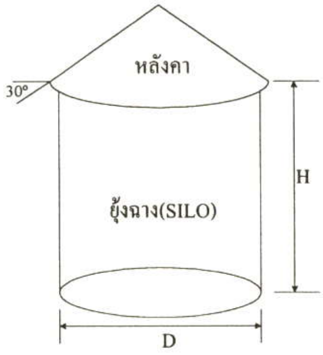


รูปที่ 5.2 ความเข้มสนามไฟฟ้า ณ.ตำแหน่งที่วิเคราะห์ผลกระทบจากการเหนี่ยวนำ

ในรูปที่ 5.1 เป็นการแสดงให้เห็นตำแหน่งในการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV และกำหนดตำแหน่งในการวิเคราะห์ไว้ 2 ตำแหน่ง คือ ตำแหน่งขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าและตำแหน่งใต้สายไฟฟ้า(ซึ่งเมื่อพิจารณาที่จุดตกท้องช้างแล้วจะเป็นตำแหน่งที่มีค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด) โดยที่ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งดังกล่าวของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและชนิดวงจรคู่จะมีค่าตามที่กำหนดไว้ในรูปที่ 5.2 และจากความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเราสามารถคำนวณหาค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อมีวัตถุที่เป็นตัวนำขนาดใหญ่ตั้งอยู่ ซึ่งค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่คำนวณได้นี้จะสามารถบอกให้ทราบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นจะมีอันตรายมากหรือน้อยเท่าใดต่อคนที่เข้ามาสัมผัส

ในการวิเคราะห์ให้เห็นผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้วิเคราะห์กับวัตถุที่มีขนาดใหญ่และตั้งอยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง[12] ซึ่งจากหลายพื้นที่ที่มีสายส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดผ่านพบว่าวัตถุขนาดใหญ่เหล่านั้นได้แก่ บ้านพักอาศัยและยุ้งฉางที่อาจจะมีโครงสร้างบางส่วนที่ทำมาจากโลหะ หรือรถยนต์ที่จอดอยู่ใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อวัตถุขนาดใหญ่บางชนิดเท่านั้น โดยแสดงเป็นตัวอย่างการคำนวณดังรายละเอียด ดังนี้

ตัวอย่างที่ 5.1 การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับยุ้งฉางภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้าในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV โดยใช้ค่าพื้นที่สมมูลของยุ้งฉางตามสมการที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5.1



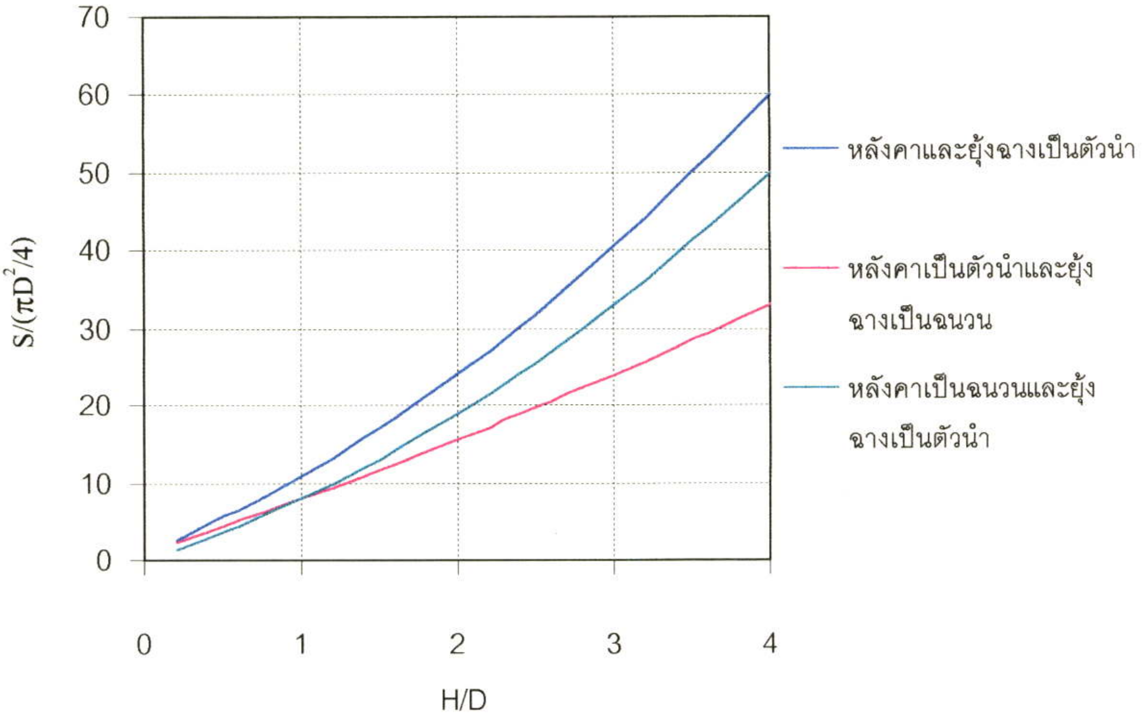
EMPIRICAL DATA LIMITS 1<H/D<4

รูปที่ 5.3 ลักษณะของยุ้งฉางสำหรับใช้วิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 5.1 สมการพื้นที่สมมูลของยุ้งฉาง

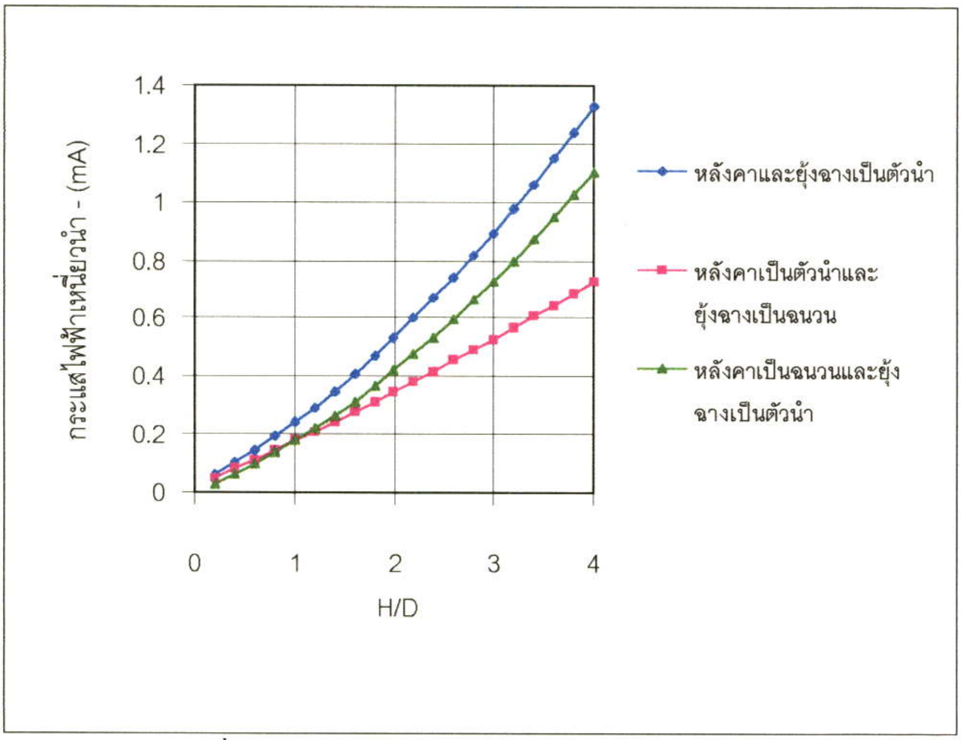
ลักษณะของยุ้งฉาง	สมการพื้นที่สมมูลของยุ้งฉาง *
1. หลังคาและยุ้งฉางเป็นตัวนำ	$S_1 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \left(1 + 8.32\frac{H}{D} + 1.62\left(\frac{H}{D}\right)^2 \right)$
2. หลังคาเป็นตัวนำและยุ้งฉางเป็นฉนวน	$S_2 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \left(1 + 6.67\frac{H}{D} + 0.33\left(\frac{H}{D}\right)^2 \right)$
3. หลังคาเป็นฉนวนและยุ้งฉางเป็นตัวนำ	$S_3 = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \left(6.5\frac{H}{D} + 1.5\left(\frac{H}{D}\right)^2 \right)$

หมายเหตุ *เป็นสมการพื้นที่สมมูลของยุ้งฉางตามเอกสารอ้างอิงหมายเลข [2]

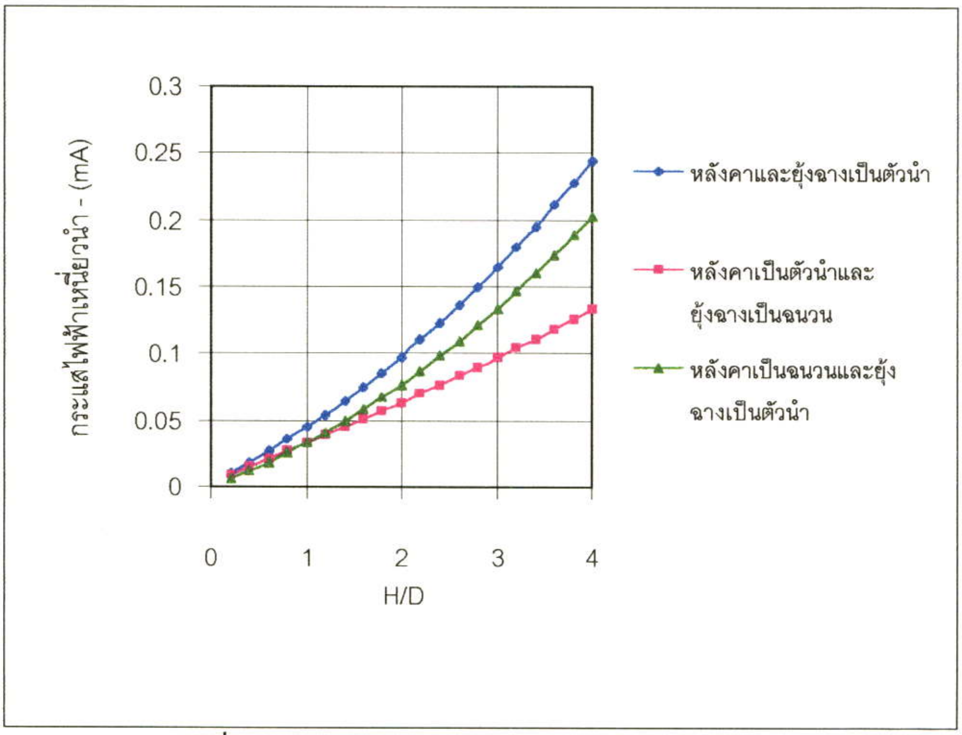


รูปที่ 5.4 Shape factor ของยุ้งฉาง

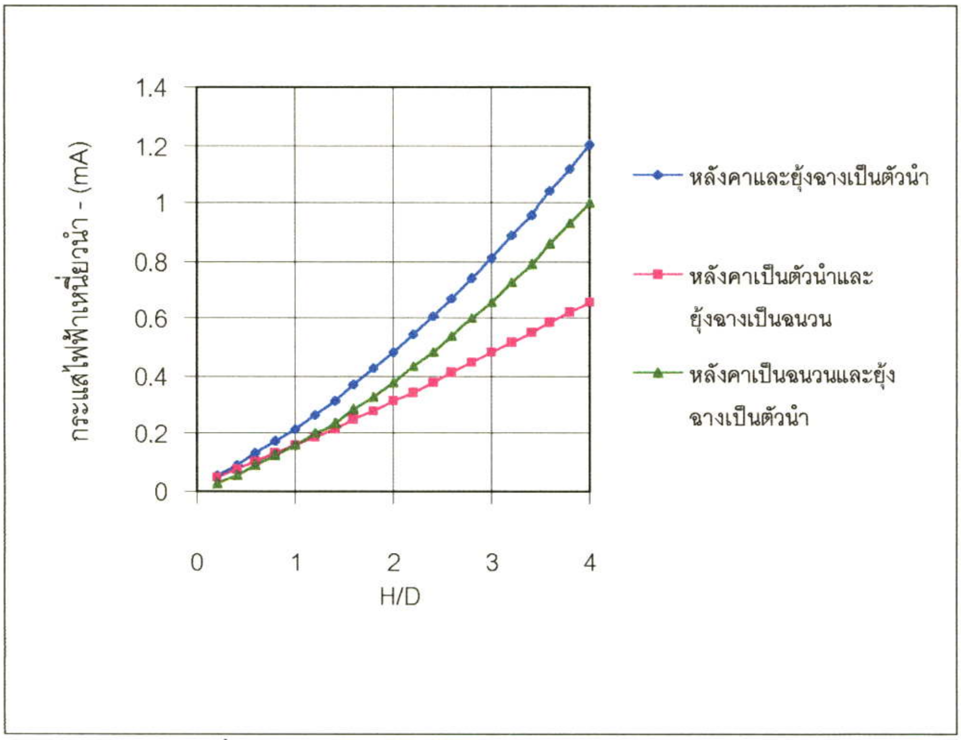
ในรูปที่ 5.4 เป็น shape factor ของยุ้งฉางที่ได้จากการพล๊อตกราฟตามสมการในตารางที่ 5.1 โดยมีแกน y แทนอัตราส่วนของ $S/(\pi D^2/4)$ และแกน x แทนอัตราส่วนของ H/D ซึ่ง shape factor จะเป็นตัวบอกให้รู้ว่าเมื่ออัตราส่วนของ H/D มีการเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลอย่างไรต่อพื้นที่สมมูลของยุ้งฉาง(S) ดังนั้นถ้าต้องการคำนวณหาค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับยุ้งฉางก็สามารถคำนวณได้ด้วยการหาพื้นที่สมมูลของยุ้งฉางจาก shape factor และค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ณ.ตำแหน่งที่พิจารณา และจากรูปที่ 5.4 เมื่อทราบพื้นที่สมมูลของยุ้งฉางและค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ณ.ตำแหน่งที่ยุ้งฉางตั้งอยู่เราสามารถวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับยุ้งฉางที่มีลักษณะโครงสร้างและพื้นที่ต่าง ๆ ได้โดยแสดงให้เห็นดังในรูปที่ 5.5-5.8 ดังนี้



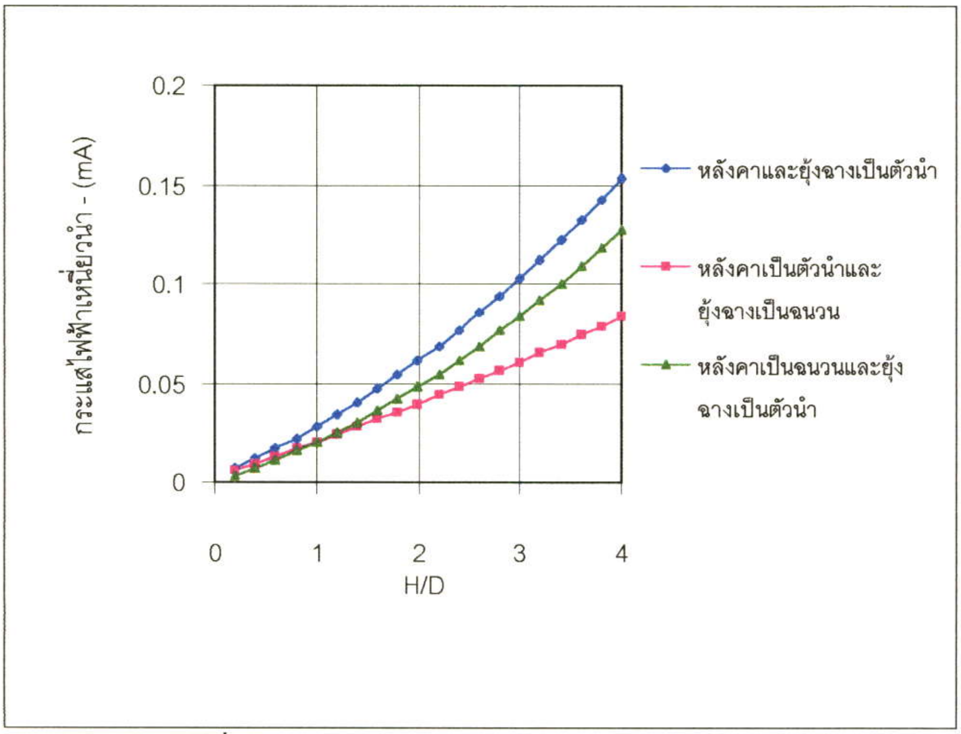
รูปที่ 5.5 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางภายใต้สนามไฟฟ้า 6.630 kV/m



รูปที่ 5.6 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางภายใต้สนามไฟฟ้า 1.219 kV/m



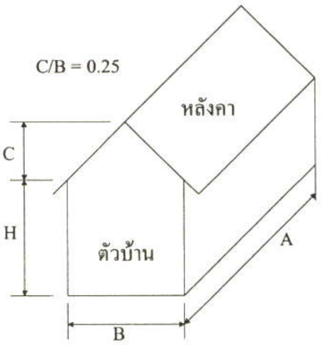
รูปที่ 5.7 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางภายใต้สนามไฟฟ้า 6.012 kV/m



รูปที่ 5.8 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางภายใต้สนามไฟฟ้า 0.764 kV/m

ในรูปที่ 5.5-5.8 เป็นกราฟแสดงผลการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางเมื่อยุ้งฉางมีโครงสร้างต่าง ๆ ทั้งที่สร้างจากวัสดุที่เป็นฉนวนผสมวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า หรือสร้างจากวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างเดียว ซึ่งผลจากการวิเคราะห์สามารถบอกได้ว่านอกจากค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่มีผลโดยตรงต่อค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำแล้ว พื้นที่หรือขนาดของยุ้งฉางที่เป็นพื้นที่สมมูลก็ส่งผลให้ค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

ตัวอย่างที่ 5.2 การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัยภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้าในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV โดยใช้ค่าพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัยตามสมการที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5.2

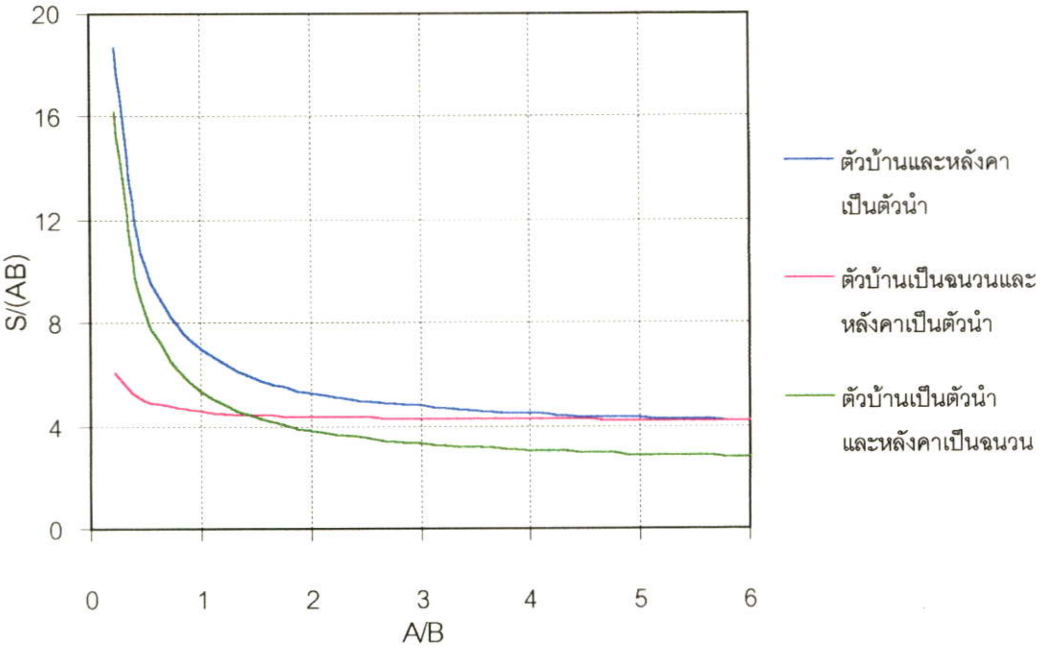


รูปที่ 5.9 ลักษณะของบ้านพักอาศัยสำหรับใช้วิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ตารางที่ 5.2 สมการพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัย

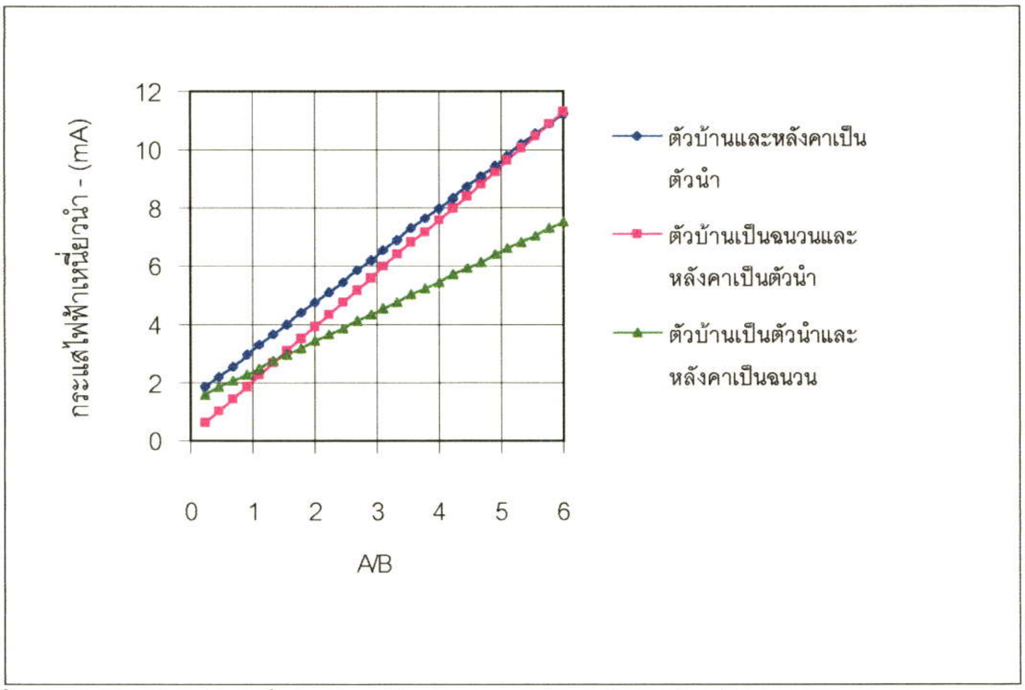
ลักษณะของบ้านพักอาศัย	สมการพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัย *
1. ตัวบ้านและหลังคาเป็นตัวนำ	$S_1 = AB.\left(1 + (3.94 + 5/(\frac{A}{B}))\frac{H}{B}\right)$
2. ตัวบ้านเป็นฉนวนและหลังคาเป็นตัวนำ	$S_2 = AB.\left(1 + (4.7 + 0.64/(\frac{A}{B}))\frac{H}{B}\right)$
3. ตัวบ้านเป็นตัวนำและหลังคาเป็นฉนวน	$S_3 = AB.\left(1 + (1.92 + 4.6/(\frac{A}{B}))\frac{H}{B}\right)$

หมายเหตุ *เป็นสมการพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัยตามเอกสารอ้างอิงหมายเลข [2]

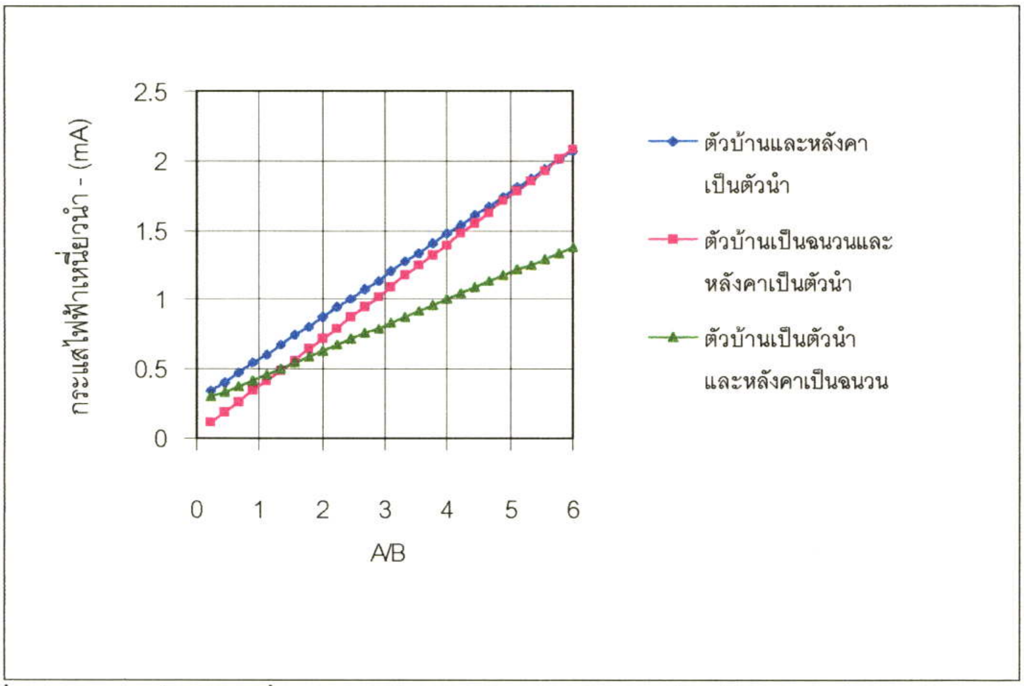


รูปที่ 5.10 Shape factor ของบ้านพักอาศัย (H/B = 0.67)

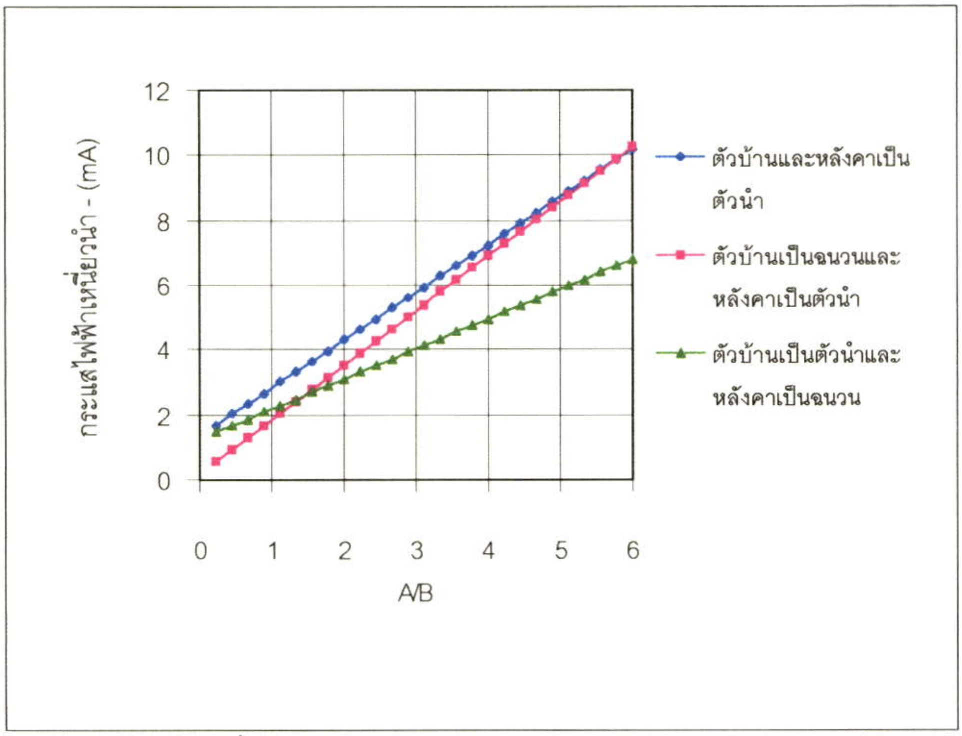
ในรูปที่ 5.10 เป็นshape factorที่อัตราส่วน H/B = 0.67 ของบ้านพักอาศัยที่ได้จากการพล๊อตกราฟตามสมการในตารางที่ 5.2 โดยมีแกน y แทนอัตราส่วนของ S/(AB) และแกน x แทนค่าของ A/B ซึ่ง shape factor จะเป็นตัวบอกให้รู้ว่าเมื่ออัตราส่วนของ H/B และ A/B มีการเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลอย่างไรต่อพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัย(S) ดังนั้นถ้าต้องการคำนวณหาค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัย ก็สามารถคำนวณได้ด้วยการหาพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัยจาก shape factor และค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ณ.ตำแหน่งที่พิจารณา และจากรูปที่ 5.10 เมื่อทราบพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัยและค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ณ.ตำแหน่งที่บ้านพักอาศัยตั้งอยู่เราสามารถวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหรี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัยที่มีลักษณะโครงสร้างและพื้นที่ต่าง ๆ ได้โดยแสดงให้เห็นดังในรูปที่ 5.11-5.14 ดังนี้



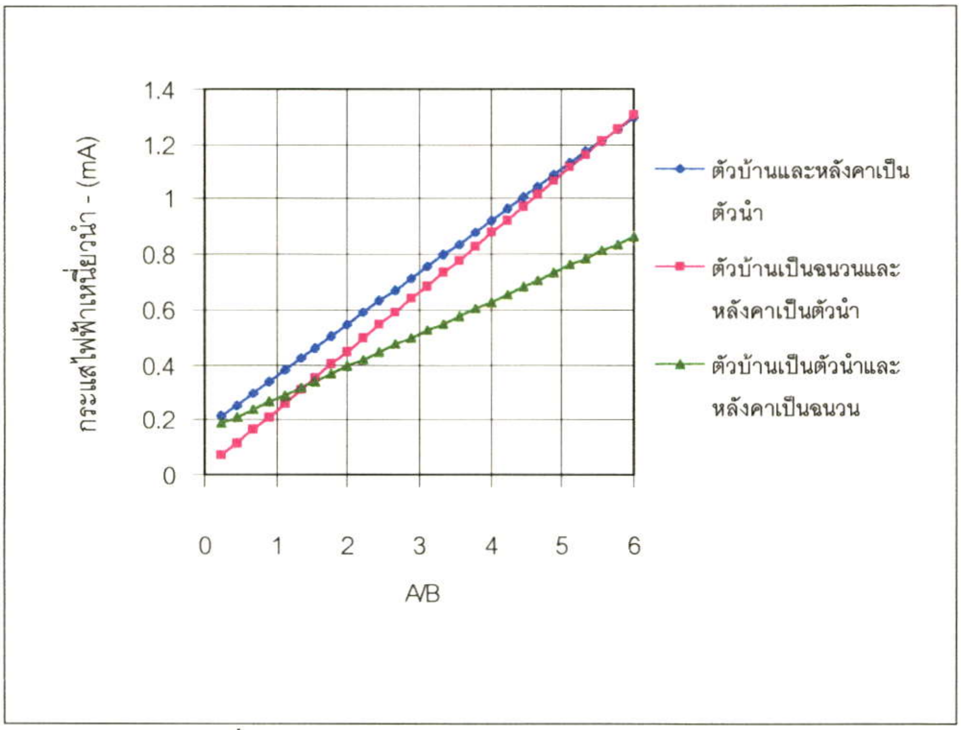
รูปที่ 5.11 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 6.630 kV/m (H/B=0.67)



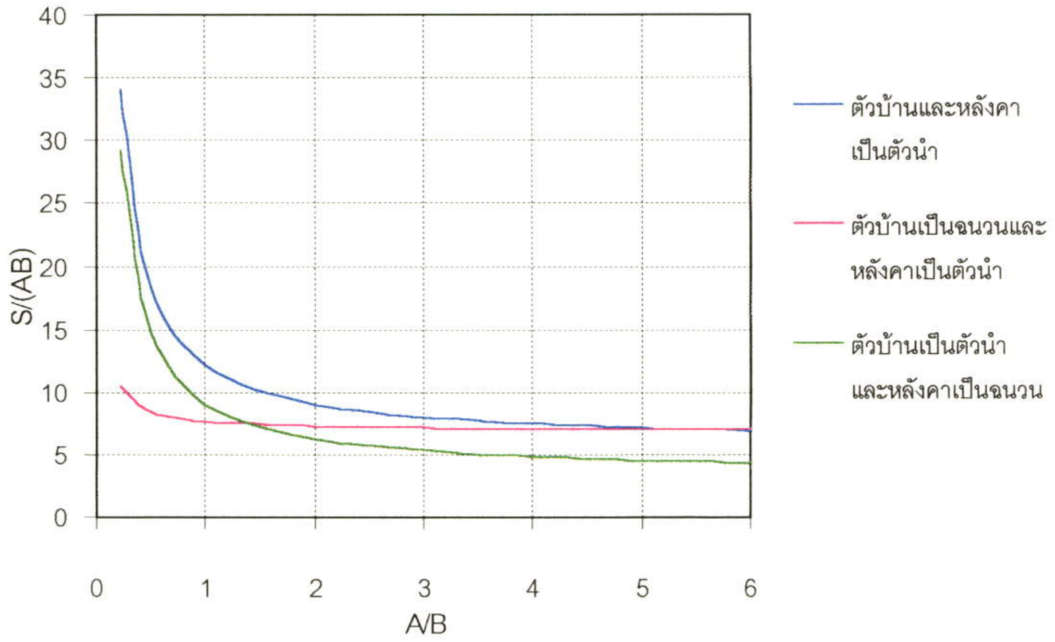
รูปที่ 5.12 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 1.219 kV/m (H/B=0.67)



รูปที่ 5.13 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 6.012 kV/m (H/B=0.67)

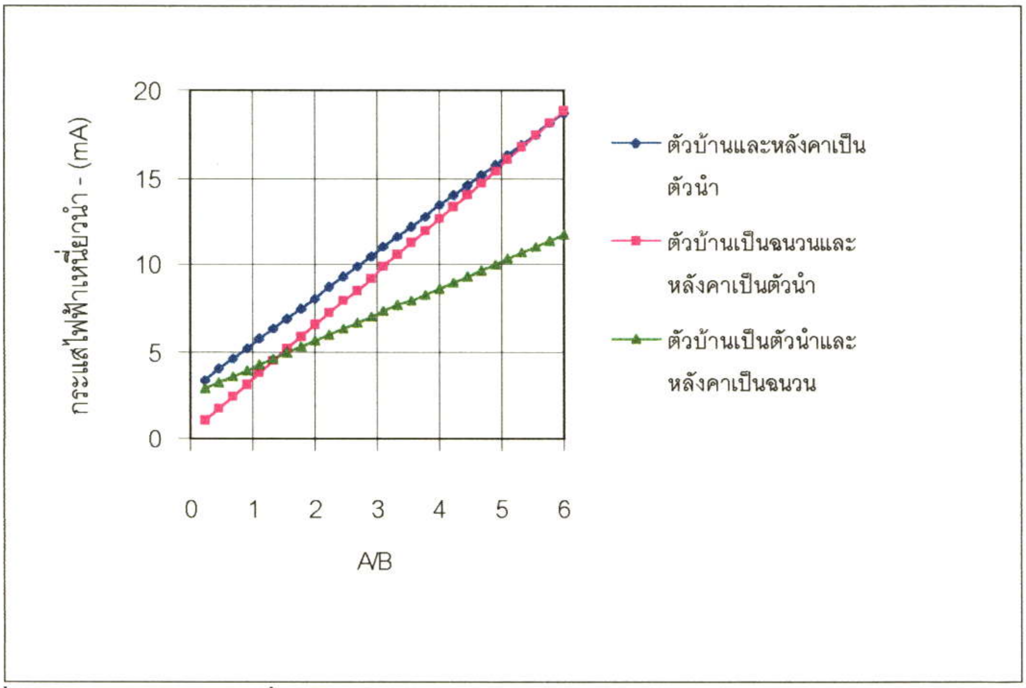


รูปที่ 5.14 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 0.764 kV/m (H/B=0.67)

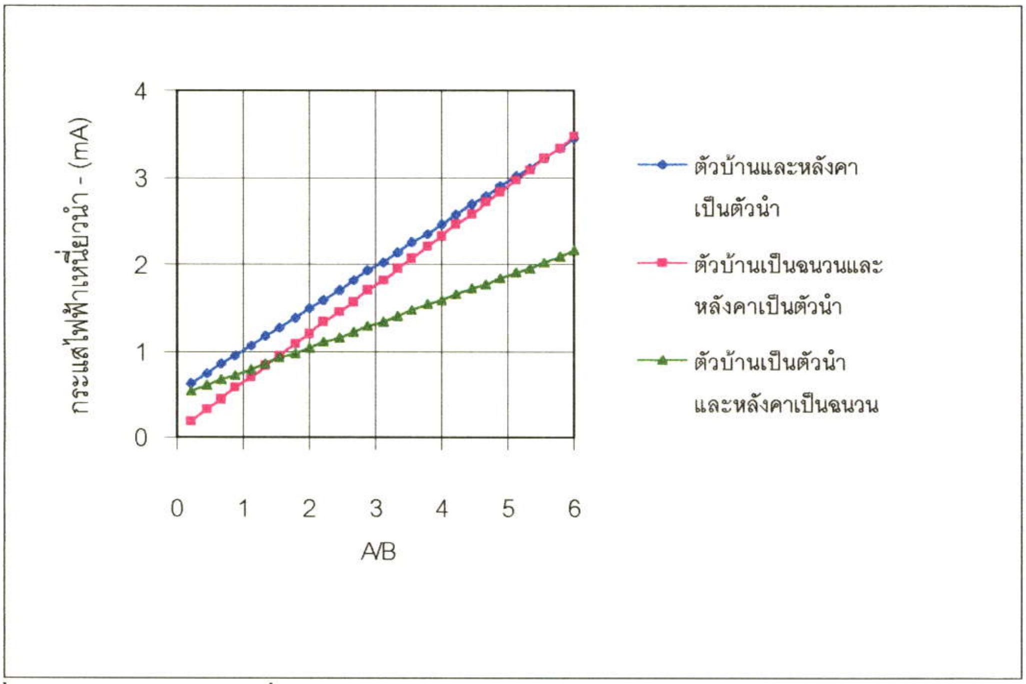


รูปที่ 5.15 Shape factor ของบ้านพักอาศัย (H/B = 1.25)

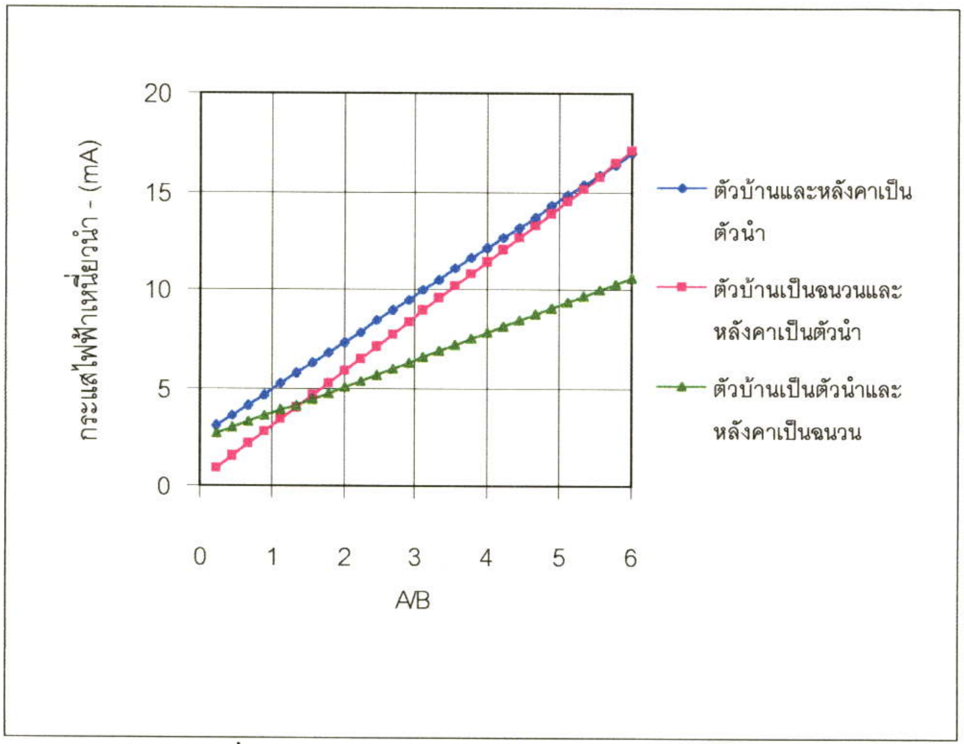
ในรูปที่ 5.15 เป็นshape factorที่อัตราส่วน H/B = 1.25 ของบ้านพักอาศัยที่ได้จากการพล๊อตกราฟตามสมการในตารางที่ 5.2 โดยมีแกน y แทนอัตราส่วนของ S/(AB) และแกน x แทนค่าของ A/B ซึ่ง shape factor จะเป็นตัวบอกให้รู้ว่าเมื่ออัตราส่วนของ H/B และ A/B มีการเปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลอย่างไรต่อพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัย(S) ดังนั้นถ้าต้องการคำนวณหาค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัย ก็สามารถคำนวณได้ด้วยการหาพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัยจาก shape factor และค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ณ.ตำแหน่งที่พิจารณา และจากรูปที่ 5.15 เมื่อทราบพื้นที่สมมูลของบ้านพักอาศัยและค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ณ.ตำแหน่งที่บ้านพักอาศัยงตั้งอยู่เราสามารถวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหรี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัยที่มีลักษณะโครงสร้างและพื้นที่ต่าง ๆ ได้โดยแสดงให้เห็นดังในรูปที่ 5.16-5.19ดังนี้



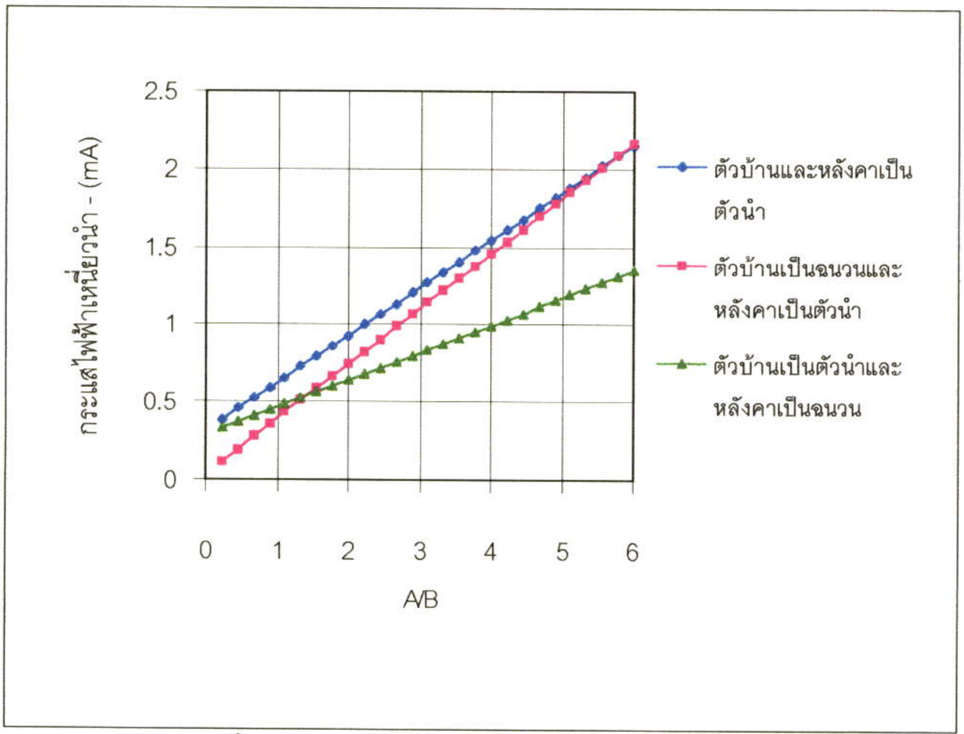
รูปที่ 5.16 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 6.630 kV/m (H/B=1.25)



รูปที่ 5.17 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 1.219 kV/m (H/B=1.25)



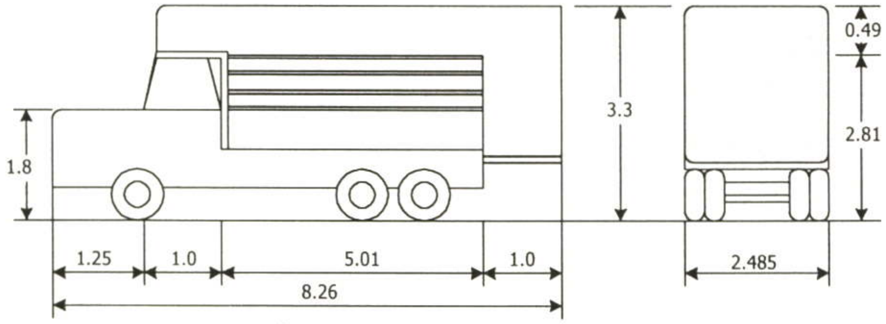
รูปที่ 5.18 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 6.012 kV/m (H/B=1.25)



รูปที่ 5.19 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 0.764 kV/m (H/B=1.25)

ในตัวอย่างที่ 5.2 เป็นการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัย ซึ่งตัวของบ้านพักอาศัยก็จะมีโครงสร้างที่ทำจากวัสดุที่เป็นฉนวนผสมกับวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้า หรือเป็นวัสดุที่เป็นตัวนำไฟฟ้าอย่างเดียว ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ก็จะเหมือนกับยุ้งฉางนั่นก็คือขนาดของบ้านพักอาศัยและค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีผลโดยตรงต่อกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัย แต่เนื่องจากในกรณีของบ้านพักอาศัยขนาดของบ้านพักอาศัยจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ A/B และ H/B ซึ่งในตัวอย่างนี้ได้แสดงการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้าขนาดต่าง ๆ ที่อัตราส่วนของ H/B = 0.67 และ H/B = 1.25 เพื่อเปรียบเทียบให้เห็นว่ายิ่งขนาดของบ้านพักอาศัยมีค่าเพิ่มขึ้น(H/B เพิ่มขึ้น)ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับบ้านพักอาศัยก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

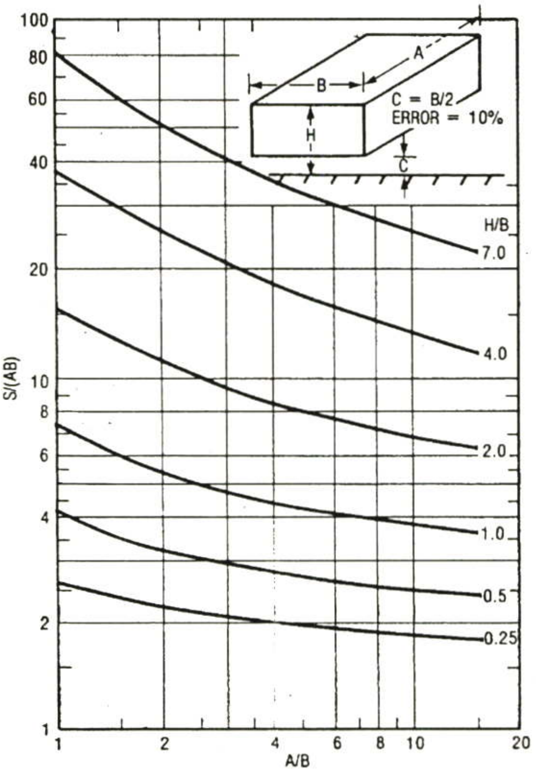
ตัวอย่างที่ 5.3 การวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับรถบรรทุกที่มีลักษณะดังรูปที่ 5.20 เมื่อรถบรรทุกเคลื่อนที่ผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงภายใต้ความเข้มสนามไฟฟ้าในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV



รูปที่ 5.20 ลักษณะของรถบรรทุกที่วิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้า

เนื่องจากรถบรรทุกไม่มีลักษณะเป็นรูปทรงเลขาคณิตที่แน่นอนจึงต้องคำนวณหาจากค่าของพื้นที่สมมูล โดยที่รูปทรงของรถบรรทุกจะเทียบเท่ากับทรงสี่เหลี่ยมทึบที่ไม่สัมผัสกับพื้นดิน (เนื่องจากยางของรถบรรทุกมีสภาพเป็นฉนวน) ดังนั้นเราสามารถคำนวณหาพื้นที่สมมูลของรถบรรทุกได้โดยพิจารณาจากขนาดของรถบรรทุกได้ ดังนี้

1. ความยาวของตัวรถ (A) 8.26 เมตร
2. ความกว้างของตัวรถ (B) 2.485 เมตร
3. ความสูงของตัวรถด้านหน้า 1.80 เมตร
4. ความสูงของรถเมื่อบรรทุกของ 3.30 เมตร



รูปที่ 5.21 Shape factor for rectangular solids [2]

ดังนั้นค่าความสูงเฉลี่ย (H)

$$H = [(1.25x1.8) + ((1.0+5.01+1.0) \times 3.3)] / 8.26$$

$H = 3.07$ เมตร

อัตราส่วนที่มีผลต่อขนาดของรถบรรทุกจะประกอบด้วย A/B และ H/B ซึ่งมีค่าเท่ากับ

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

$$AB = 8.26 \times 2.485 = 20.52 \ m^2$$

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

พิจารณาจากรูปที่ 5.21 เมื่อ H/B = 1.24 และ A/B =3.32 จะได้ S/(AB) = 8.8 ดังนั้น

$$S = 8.8 \times (AB)$$

$$S = 8.8 \times 20.52 = 180.57 \ m^2$$

จากสมการที่ 5.1 เราสามารถหาค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับรถบรรทุกได้ ดังนี้

$$I_{SC} = j\omega\varepsilon ES$$

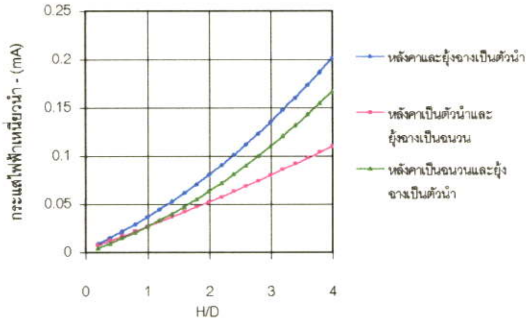
$$I_{SC} = ES/(3 \times 10^{8})$$

โดยที่ความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีค่าเป็น 6630 , 1219 , 6012 และ 764 V/m ตามรูปที่ 5.2 ดังนั้น

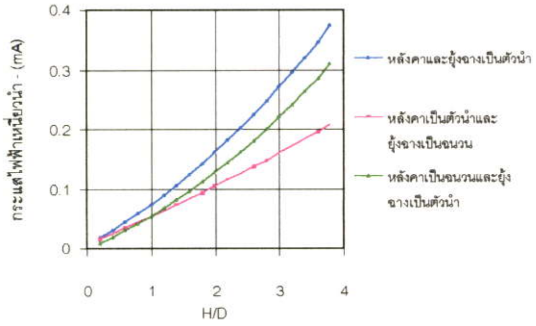
$$I(6630) = (6630 \times 180.57) / (3 \times 10^{8})$$
$$= 3.99 \quad mA$$
$$I(1219) = (1219 \times 180.57) / (3 \times 10^{8})$$
$$= 0.733 \quad mA$$
$$I(6012) = (6012 \times 180.57) / (3 \times 10^{8})$$
$$= 3.61 \quad mA$$
$$I(764) = (764 \times 180.57) / (3 \times 10^{8})$$
$$= 0.459 \quad mA$$

5.4 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนวัตถุในเขตเดินสายไฟฟ้า

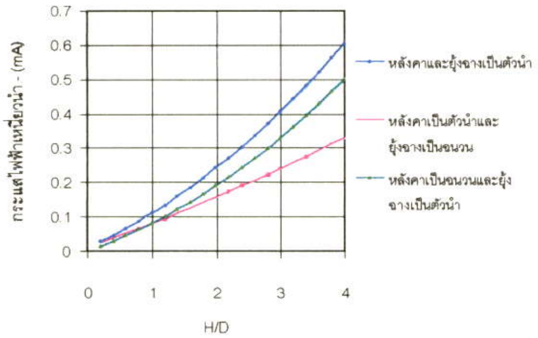
จากตัวอย่างที่ 5.1 – 5.3 เป็นการคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับวัตถุขนาดใหญ่บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ทราบค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แน่นอน ซึ่งเป็นผลมาจากการกำหนดตำแหน่งที่วิเคราะห์ แต่เนื่องจากในทางปฏิบัติตำแหน่งที่ตั้งของวัตถุขนาดใหญ่เหล่านั้นมีความไม่แน่นอนและอาจจะตั้งอยู่ที่ใดก็ได้บริเวณเขตเดินสายไฟฟ้า(Right-of-Way) ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงทำให้ยากลำบากในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่แน่นอน แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้เราสามารถใช้การวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในแบบ 3 มิติ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตลอดระยะห่างเสาไฟฟ้าภายในเขตเดินสายไฟฟ้า โดยใช้กราฟแบบกราฟเส้นโครงร่าง(contour) ของความเข้มสนามไฟฟ้าในรูปที่ 4.11 และ 4.16 ซึ่งเป็นค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่ง 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและชนิดวงจรคู่โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1-6 kV/m และจากความเข้มของสนามไฟฟ้าดังกล่าวเราสามารถนำมาประเมินค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกับยุ้งฉาง บ้านพักอาศัย และรถบรรทุกได้ตามรายระเอียด ดังนี้



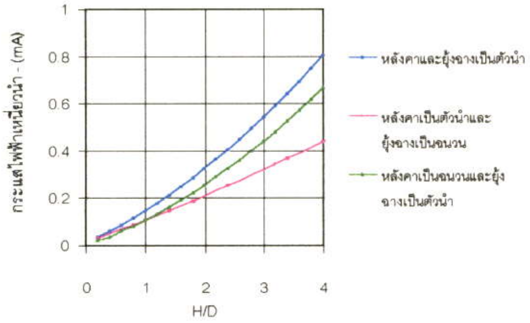
1 kV/m



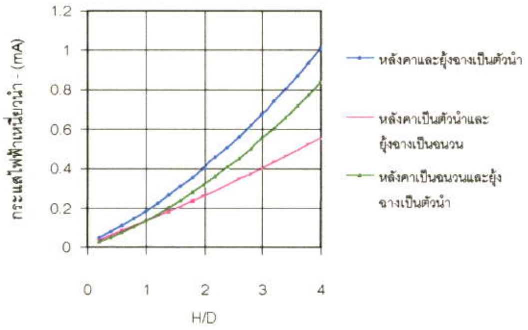
2 kV/m



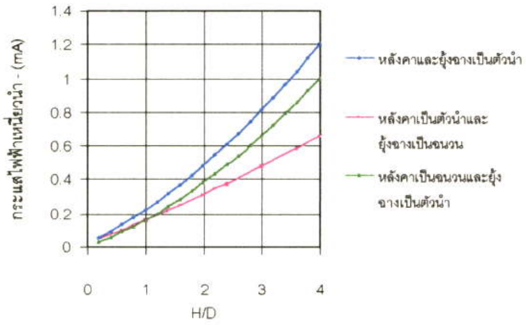
3 kV/m



4 kV/m

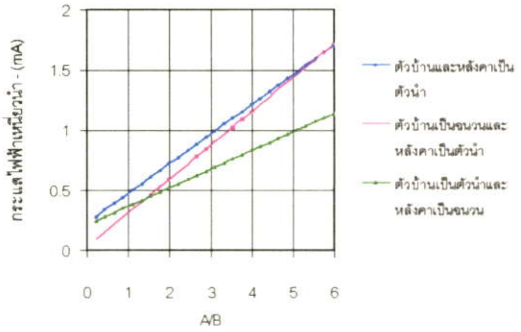


5 kV/m

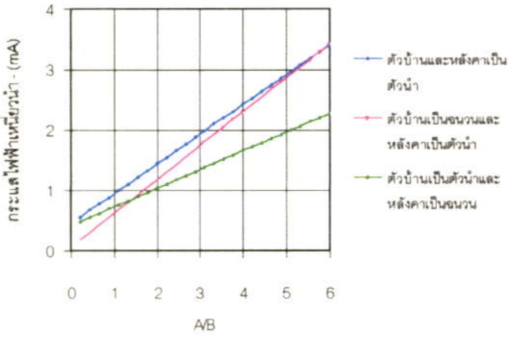


6 kV/m

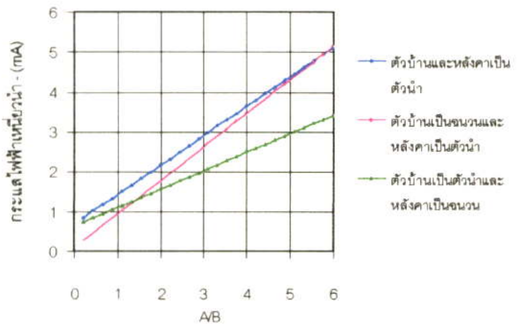
รูปที่ 5.22 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของยุ้งฉางภายใต้สนามไฟฟ้า 1-6 kV/m



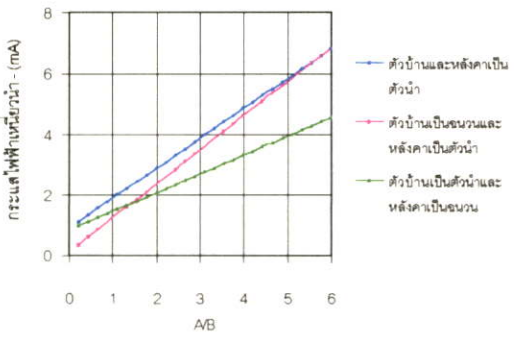
1 kV/m



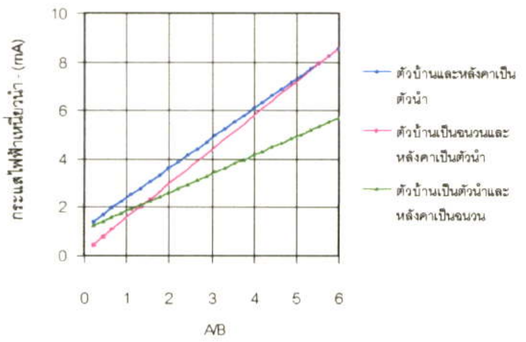
2 kV/m



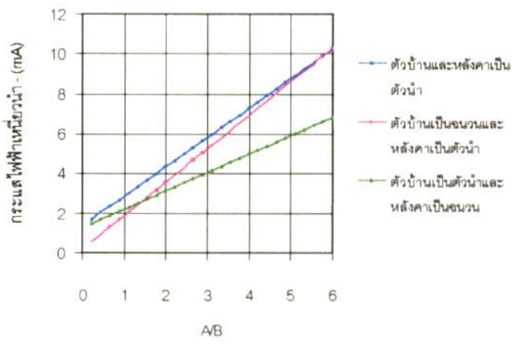
3 kV/m



4 kV/m

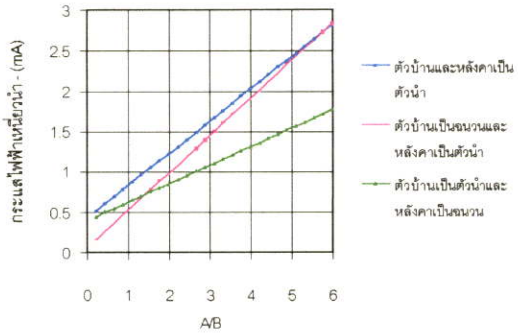


5 kV/m

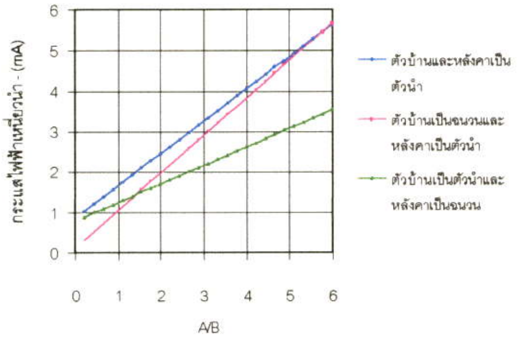


6 kV/m

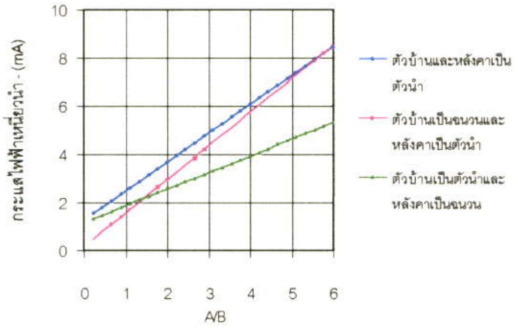
รูปที่ 5.23 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 1-6 kV/m (H/B=0.67)



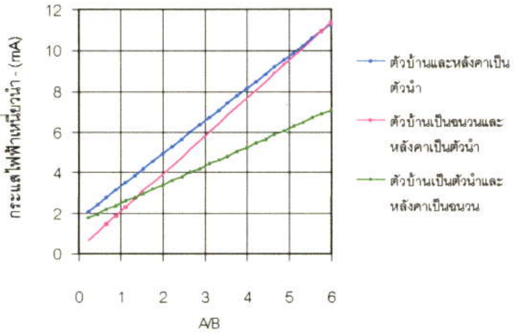
1 kV/m



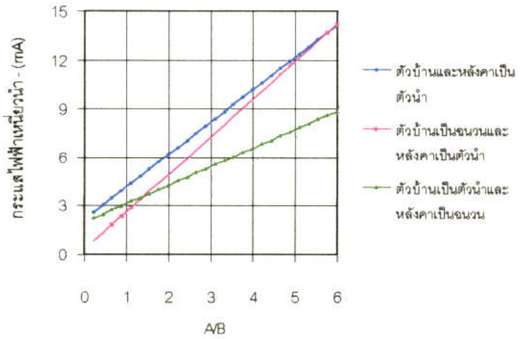
2 kV/m



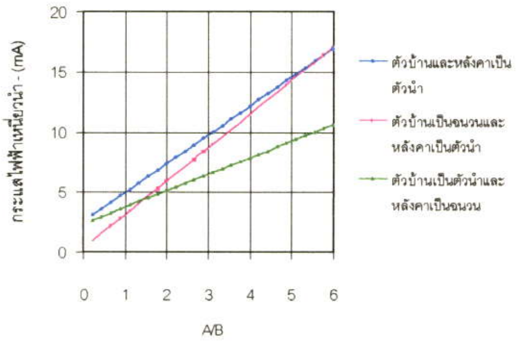
3 kV/m



4 kV/m



5 kV/m



6 kV/m

รูปที่ 5.24 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้า 1-6 kV/m (H/B=1.25)

ตารางที่ 5.3 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับรถบรรทุกภายใต้สนามไฟฟ้า 1-6 kV/m

ความเข้มสนามไฟฟ้า (kV/m)	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของรถบรรทุก (mA)
1	0.3762
2	0.7524
3	1.1286
4	1.5048
5	1.8810
6	2.2572

ในรูปที่ 5.22-5.24 เป็นผลการวิเคราะห์ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับยุ้งฉางและบ้านพักอาศัยภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีระดับความเข้มตั้งแต่ 1 kV/m ไปจนถึง 6 kV/m ซึ่งเป็นระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าตามกราฟแบบเส้นโครงร่างที่เกิดจากการวิเคราะห์สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยว(รูปที่ 4.11) และชนิดวงจรคู่(รูปที่ 4.16) และเมื่อยุ้งฉางหรือบ้านพักอาศัยตั้งอยู่ในตำแหน่งที่มีระดับความเข้มสนามไฟฟ้าเท่าใดก็ตามเราสามารถประเมินค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับยุ้งฉางหรือบ้านพักอาศัยได้ โดยอาศัยผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5.22-5.24 ตามลำดับ สำหรับในกรณีของรถบรรทุกเราก็สามารถประเมินค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกับรถบรรทุกได้เช่นเดียวกัน โดยที่ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ได้จากการวิเคราะห์สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV จะมีระดับความเข้มตั้งแต่ 1 kV/m ไปจนถึง 6 kV/m ดังนั้นค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดกับรถบรรทุกภายในเขตเดินสายไฟฟ้าจะมีค่าเป็นไปตามตารางที่ 5.3

5.5 บทสรุป

จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าที่มีต่อวัตถุขนาดใหญ่บริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงพบว่าค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนวัตถุขนาดใหญ่จะขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุและความเข้มสนามไฟฟ้า ซึ่งการเลือกชนิดของวัสดุที่นำมาสร้างจะเป็นตัวกำหนดขนาดของพื้นที่สมมูลของวัตถุนั้น ๆ และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบหรืออาจจะเป็นอัตรายกับคนที่เข้ามาสัมผัสจะมีค่าเท่ากับ 5 mA ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดโดยมาตราฐาน National Electrical Safety Code (NESC)[14] ในกรณีที่ตำแหน่งที่ตั้งของวัตถุขนาดใหญ่มีค่าไม่แน่นอนเราสามารถใช้ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ 3 มิติโดยใช้กราฟแบบเส้นโครงร่างแสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้ามาเป็นข้อมูลคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้

บทที่ 6
การลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

6.1 กล่าวนำ

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

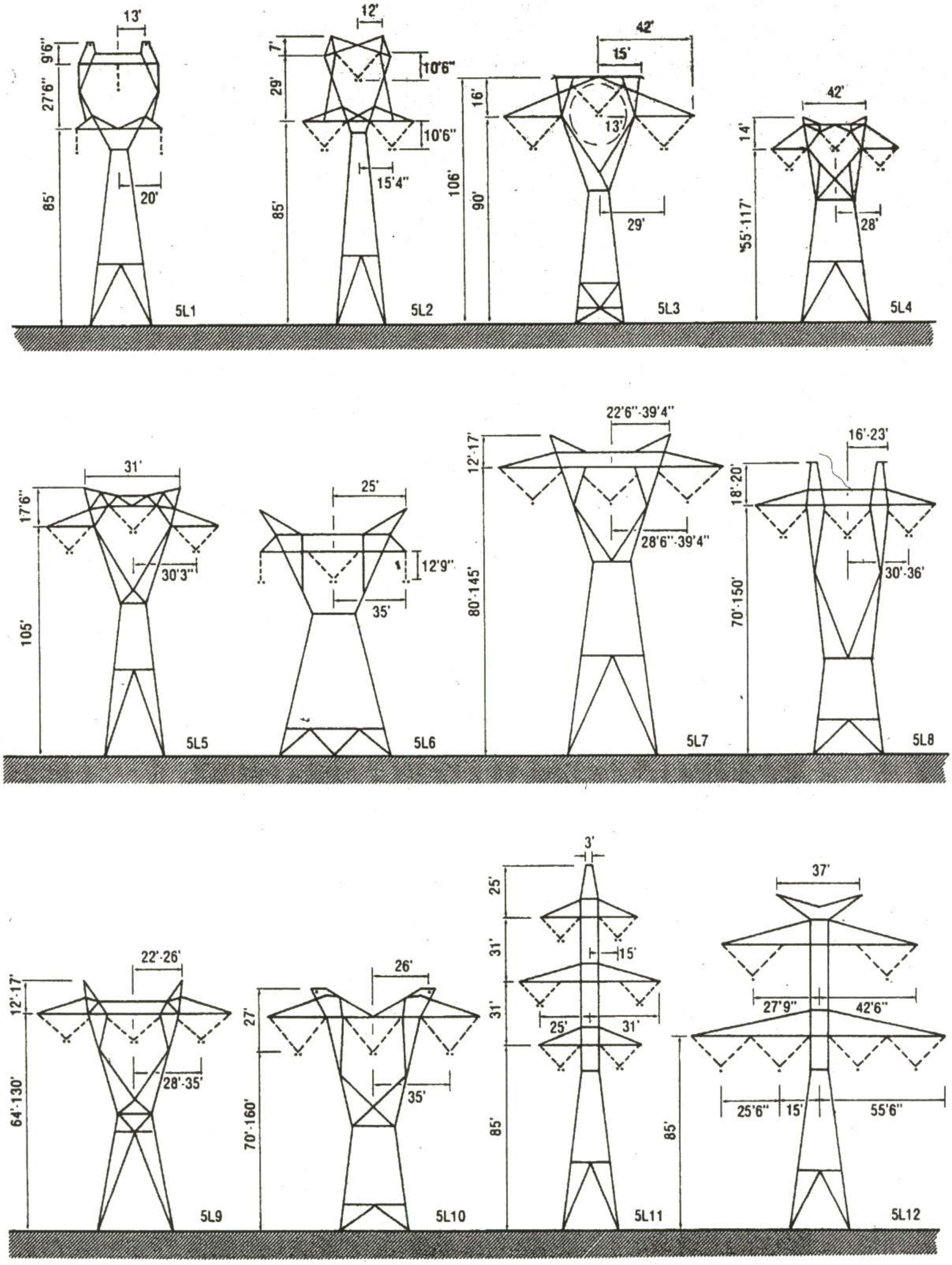
6.2 การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

6.2.1 พิจารณาจากการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง [15]-[16]

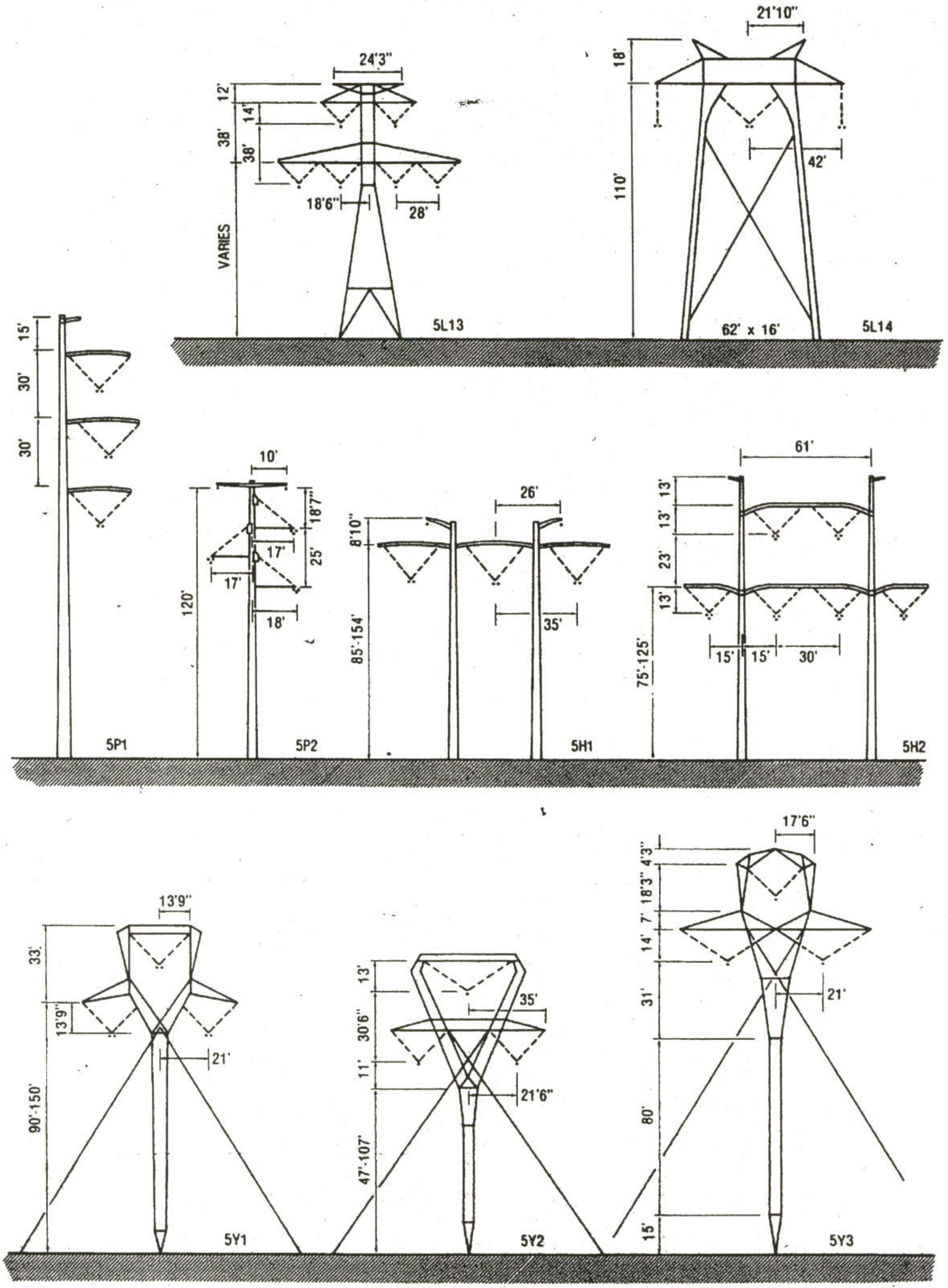
สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระจายออกมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามลักษณะโครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เช่น ลักษณะของการจัดวางตัวนำ(line configuration) ความสูงของสายส่ง(line height) การจัดเรียงลำดับของเฟส(phase sequences) ขนาดของสายไฟฟ้า(conductor dimension) ระยะห่างระหว่างเฟส(phase spacing) และสายโอเวอร์เฮดกราวด์(overhead ground wire) เป็นต้น ซึ่งการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อสิ่งต่าง ๆ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงน้อยที่สุดนั้น จำเป็นต้องพิจารณาเลือกโครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่เหมาะสม ด้วยการพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ดังนี้

6.2.1.1 ลักษณะของการจัดวางตัวนำ (line configuration)

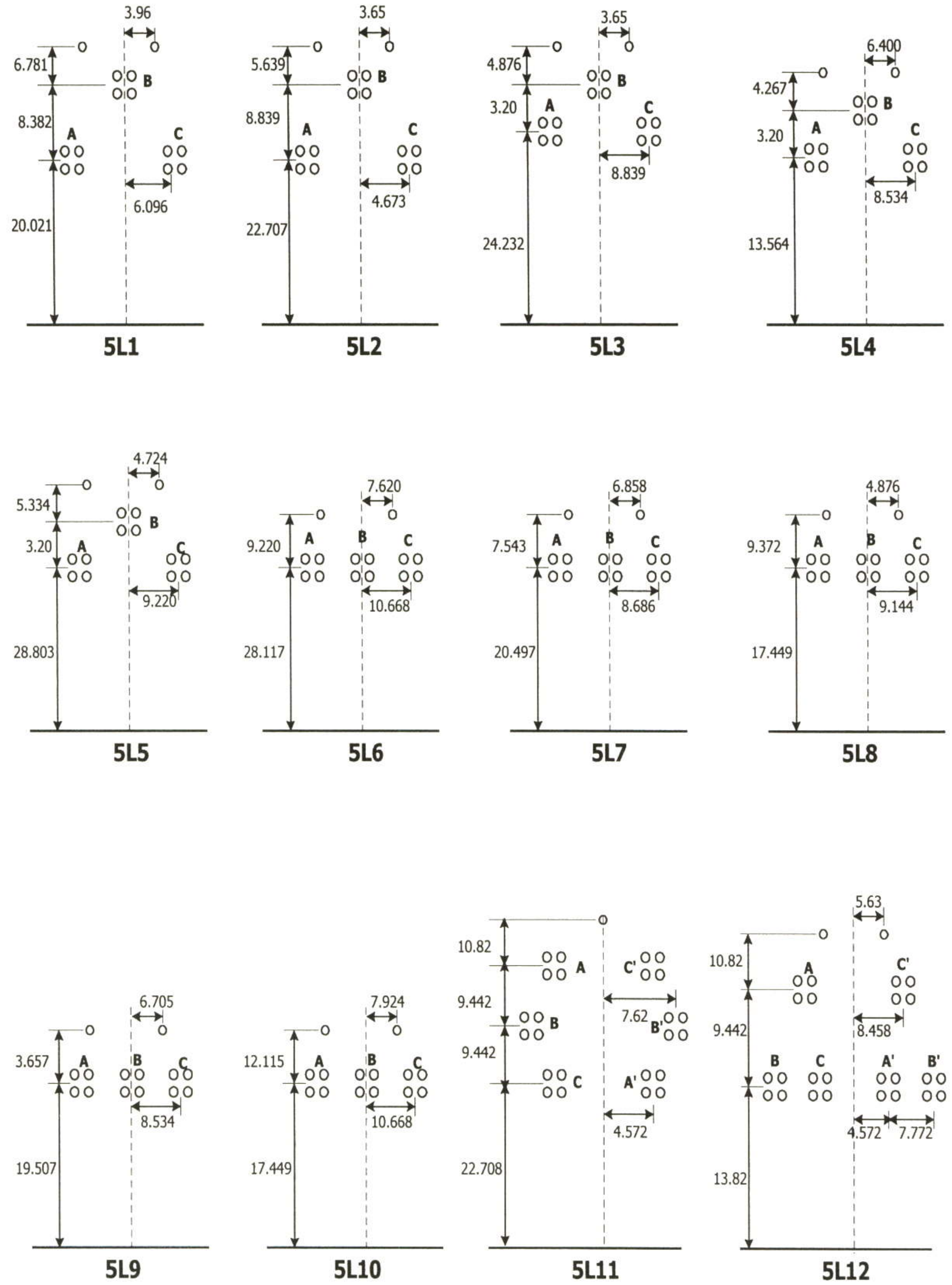
ลักษณะของการจัดวางตัวนำไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ การจัดวางตัวนำแบบสามเหลี่ยม(delta configuration) การจัดวางตัวนำแบบแนวนอน(flat configuration) และการจัดวางตัวนำแบบแนวดิ่ง(vertical configuration)



รูปที่ 6.1 ลักษณะเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500 kV [2]

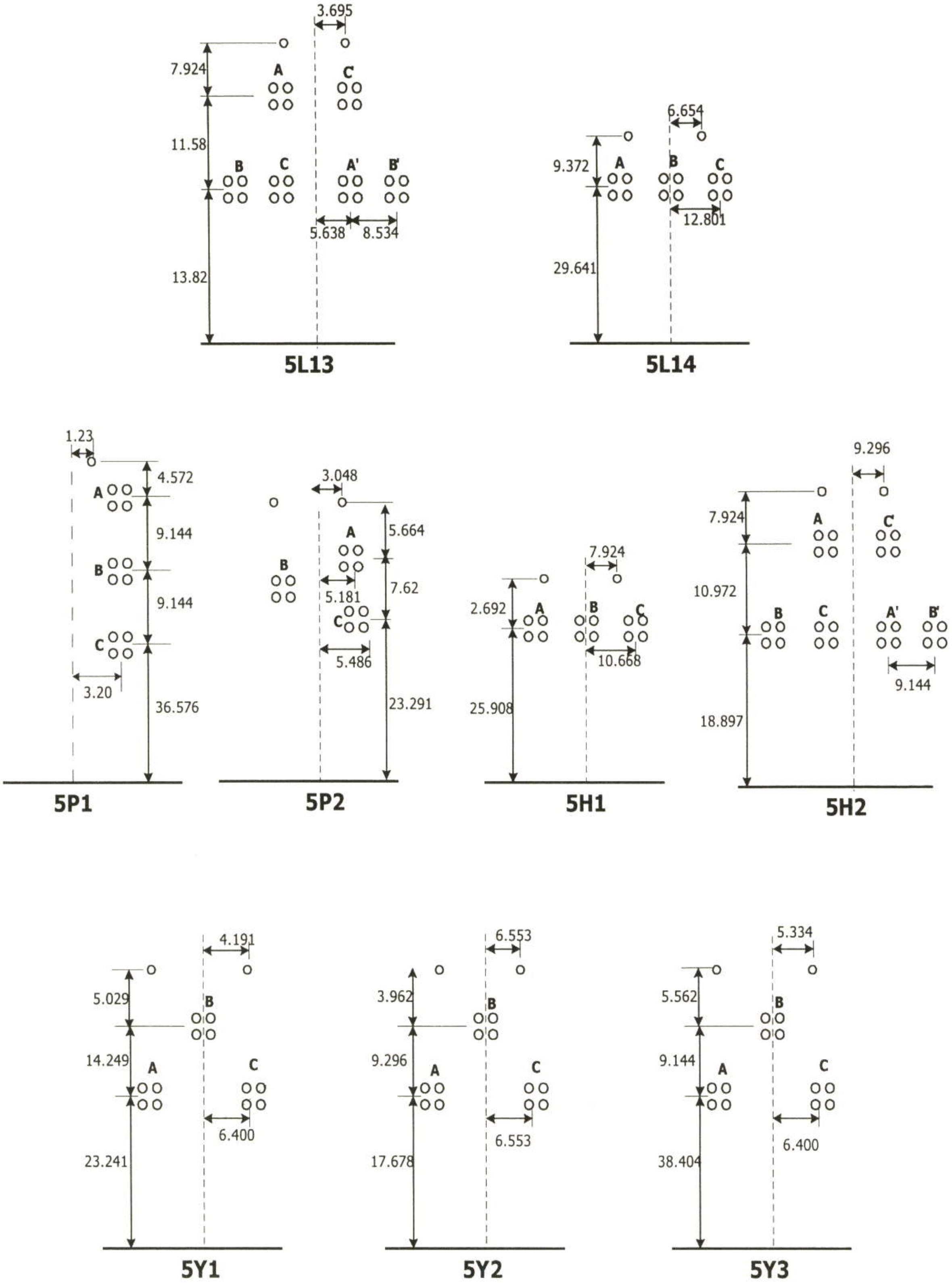


รูปที่ 6.2 ลักษณะเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500 kV[2] (ต่อ)



หมายเหตุ : ระยะต่าง ๆ ที่แสดงมีหน่วยเป็นเมตร

รูปที่ 6.3 ตำแหน่งตัวนำของเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500 kV ตามรูปที่ 6.1

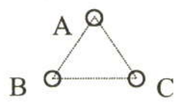
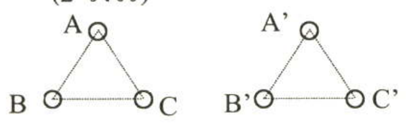
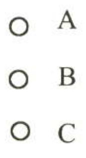
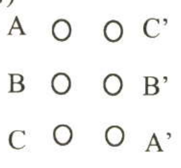
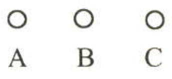


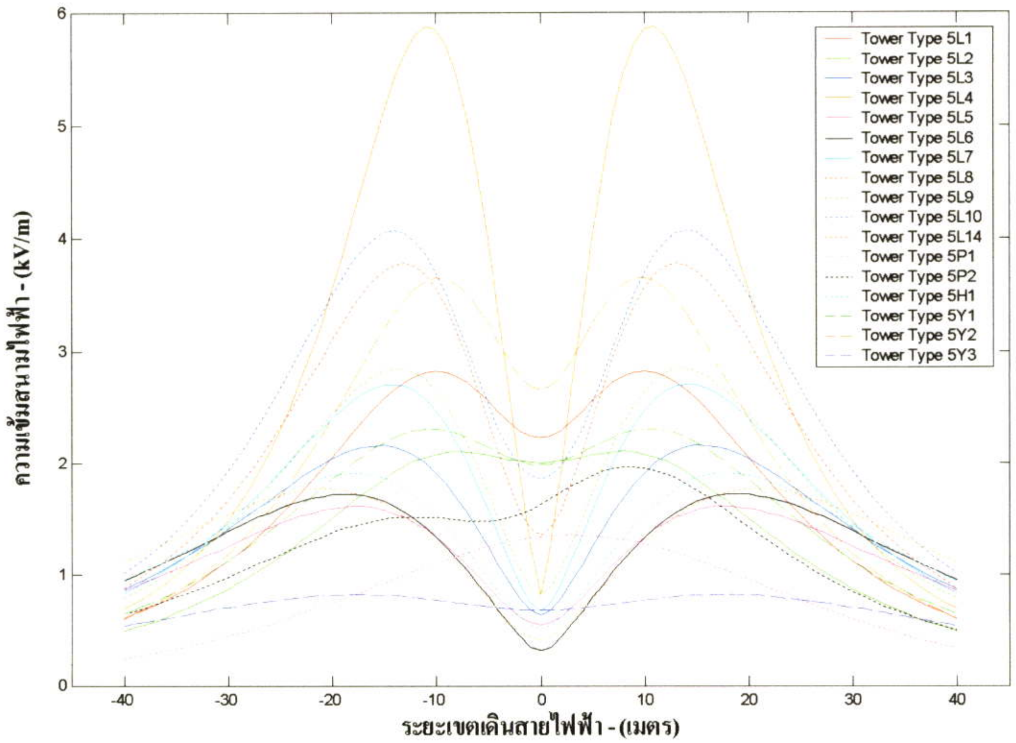
หมายเหตุ : ระยะต่าง ๆ ที่แสดงมีหน่วยเป็นเมตร

รูปที่ 6.4 ตำแหน่งตัวนำของเสาไฟฟ้าในระบบแรงดัน 500 kV ตามรูปที่ 6.2

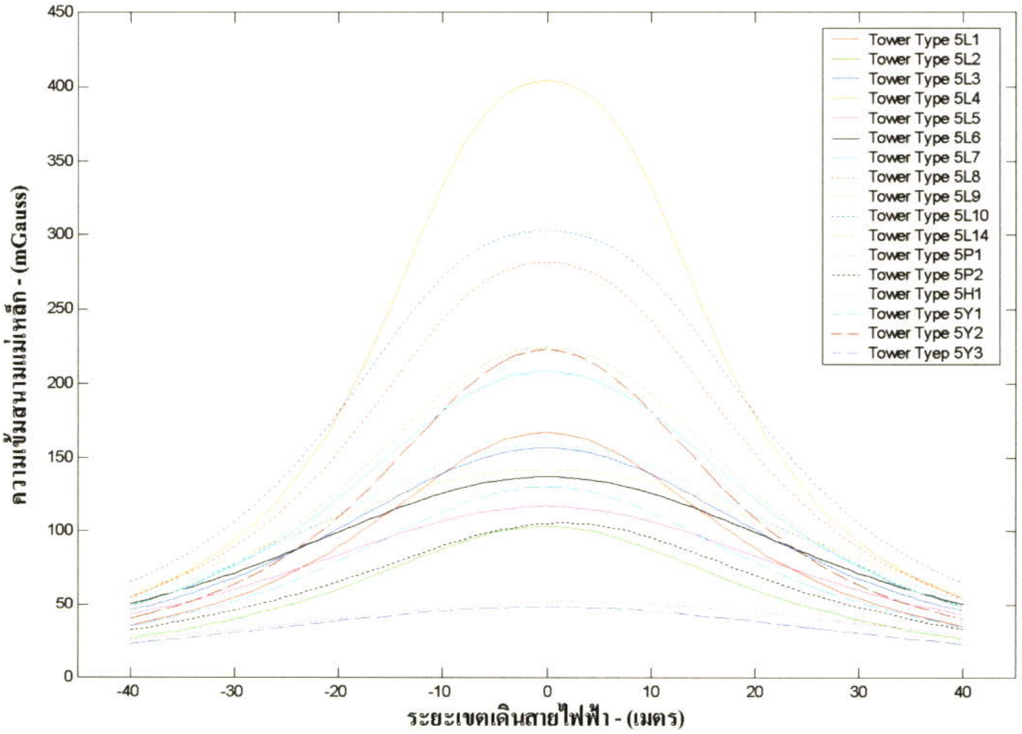
ซึ่งลักษณะการจัดวางตัวนำทั้ง 3 รูปแบบจะส่งผลให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กระจายออกมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป จากรูปที่ 6.1 และ 6.2 เป็นเสาไฟฟ้าของสายส่งในระบบแรงดัน 500 kV ที่ใช้งานอยู่ทั่วไปและมีลักษณะของการจัดวางตัวนำในรูปแบบต่าง ๆ การวิเคราะห์ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากเสาไฟฟ้ารูปแบบต่าง ๆ จะเป็นข้อมูลอย่างหนึ่งเพื่อช่วยในการตัดสินใจเลือกรูปแบบของเสาไฟฟ้าในการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงให้มีความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นไปตามความต้องการของผู้ออกแบบ ในตารางที่ 6.1 เป็นลักษณะการจัดวางตัวนำของเสาไฟฟ้าแบบต่าง ๆ

ตารางที่ 6.1 รูปแบบของการจัดวางตัวนำและเฟสของเสาไฟฟ้าตามรูปที่ 6.1 และ 6.2

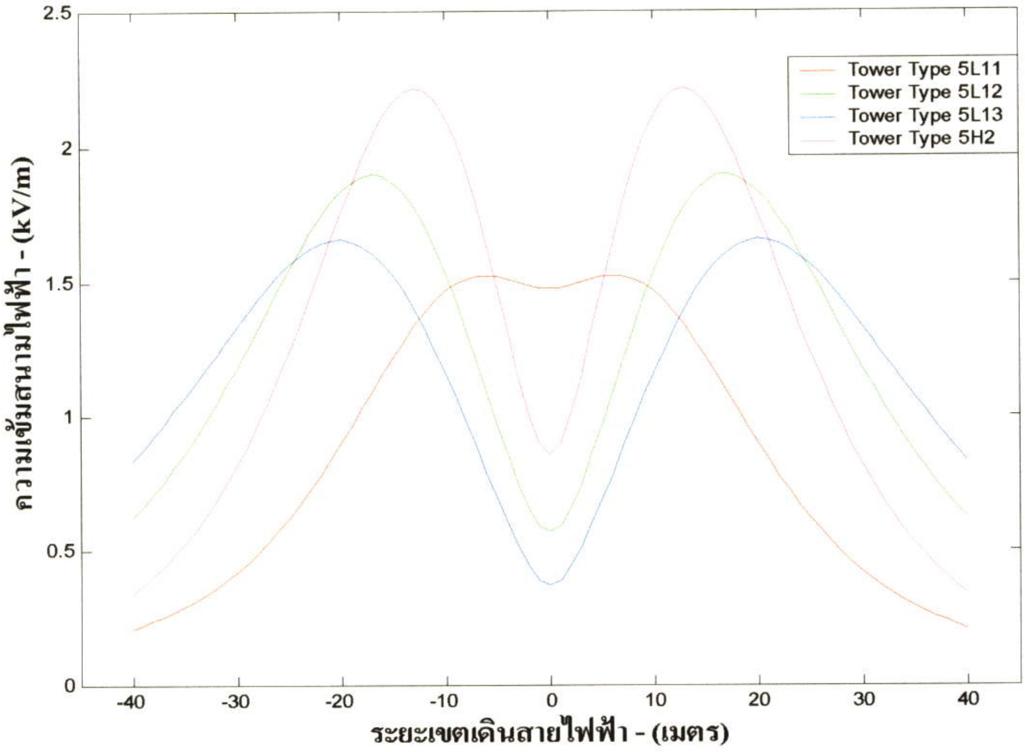
รูปแบบการจัดวางตัวนำ	หมายเลขเสาไฟฟ้า
1. การจัดวางตัวนำแบบสามเหลี่ยม (1-วงจร) 	5L1 , 5L2 , 5L3 , 5L4 , 5L5 , 5P1 , 5Y1 , 5Y2 และ 5Y3
2. การจัดวางตัวนำแบบสามเหลี่ยม (2-วงจร) 	5L12 , 5L13 , และ 5H2
3. การจัดวางตัวนำแบบแนวดิ่ง (1-วงจร) 	5P1
4. การจัดวางตัวนำแบบแนวดิ่ง (2-วงจร) 	5L11
5. การจัดวางตัวนำแบบแนวนอน 	5L6 , 5L7 , 5L8 , 5L9 , 5L10 , 5L14 และ 5H1



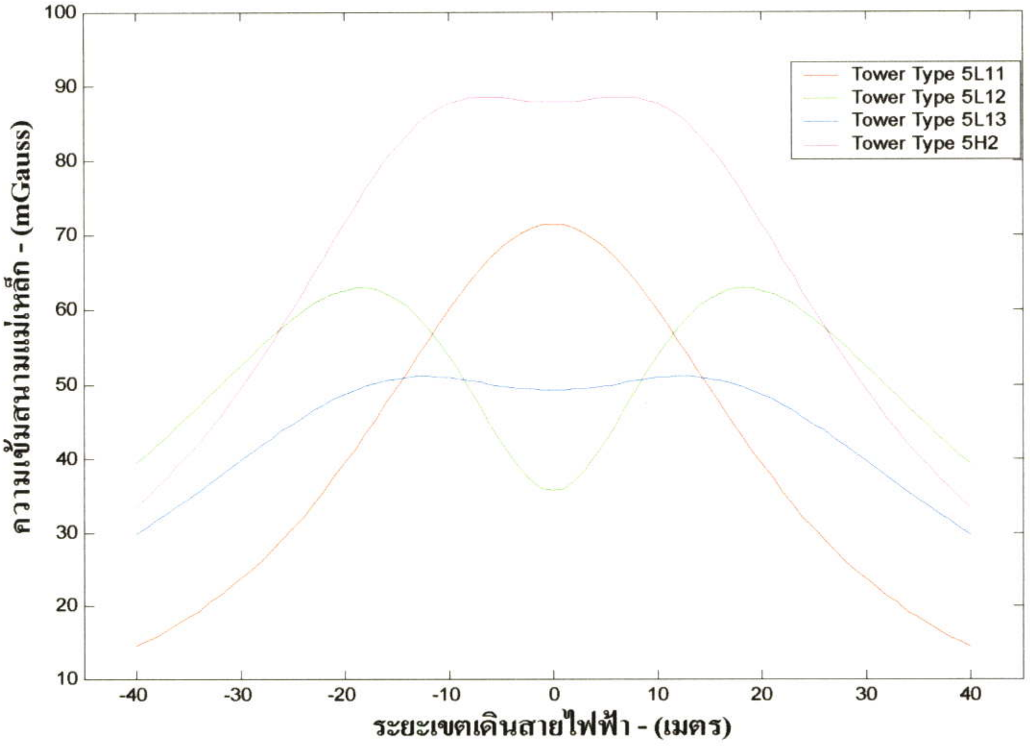
รูปที่ 6.5 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kVวงจรเดี่ยวตามรูปที่ 6.1 และ 6.2



รูปที่ 6.6 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kVวงจรเดี่ยวตามรูปที่ 6.1 และ 6.2



รูปที่ 6.7 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่ตามรูปที่ 6.1 และ 6.2

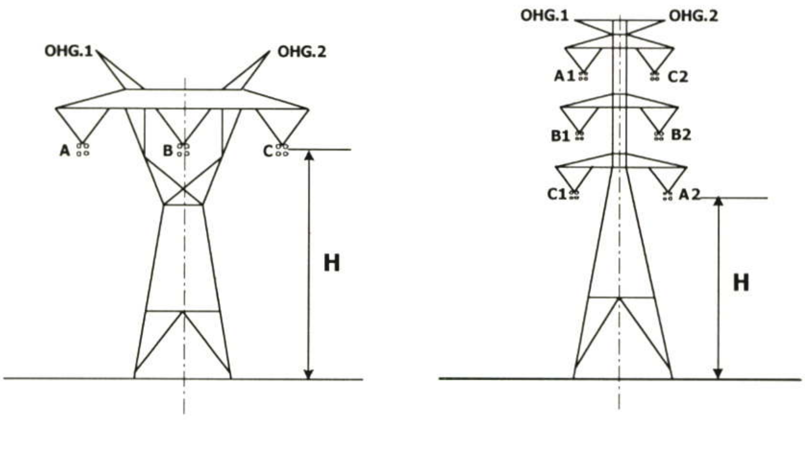


รูปที่ 6.8 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของเสาไฟฟ้า 500 kV วงจรคู่ตามรูปที่ 6.1 และ 6.2

รูปที่ 6.5–6.8 เป็นผลจากการวิเคราะห์ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของการจัดวางตัวนำในรูปแบบต่าง ๆ ของสายส่งระบบแรงดันไฟฟ้า 500 kV ตามรูปที่ 6.1 และ 6.2 ในการวิเคราะห์ได้กำหนดให้สายไฟฟ้าเป็นแบบควบจำนวน 4 เส้น ขนาด 795 MCM ACSR/GA(CONDOR) และมีค่าของภาระทางโหลดสูงสุดเท่ากับ 3.15 กิโลแอมป์ต่อเฟส โดยมีระยะห่างของตัวนำและรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสตามรูปที่ 6.3 และ 6.4

6.2.1.2 ความสูงของสายส่ง (line height)

การกำหนดความสูงให้กับสายส่งโดยทั่วไปจะพิจารณาตามลักษณะของพื้นที่ที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงพาดผ่าน ซึ่งในบางครั้งอาจจะมีผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กส่งผลกระทบต่อสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ทำให้จำเป็นต้องเพิ่มความสูงให้กับเสาไฟฟ้าเพื่อให้สายส่งมีความสูงเพิ่มขึ้น การเพิ่มความสูงให้กับสายส่งเปรียบเสมือนกับการเพิ่มระยะห่างระหว่างสิ่งที่ได้รับผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กกับแหล่งจ่ายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ในรูปที่ 6.9 เป็นการเพิ่มความสูงให้กับสายส่งโดยการเพิ่มความสูงให้กับเสาไฟฟ้า(H) ซึ่งเป็นเสาไฟฟ้าระดับแรงดัน 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ สำหรับรูปที่ 6.12 และ 6.13 เป็นกราฟความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเพิ่มความสูงให้กับสายส่ง โดยพิจารณาที่สายส่งมีค่าของภาระในการจ่ายโหลดสูงสุด (3.15 กิโลแอมป์ต่อเฟส)

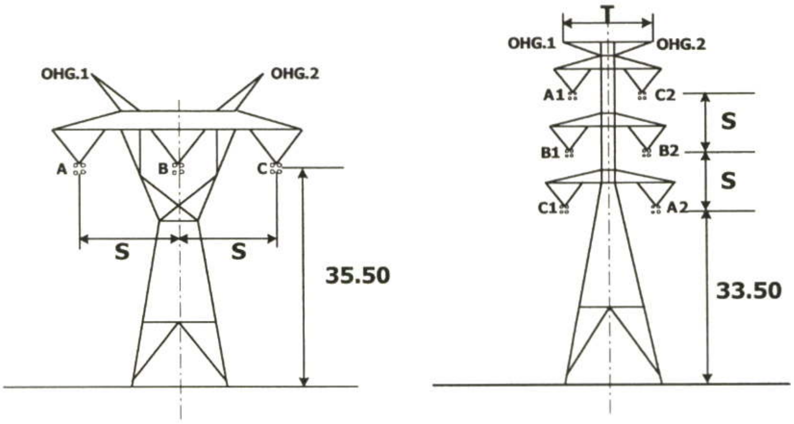


รูปที่ 6.9 การเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่

6.2.1.3 ระยะห่างระหว่างเฟส (phase spacing)

ระยะห่างระหว่างเฟสของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะถูกกำหนดจากระยะความปลอดภัยทางไฟฟ้าตามระดับแรงดันของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยที่สายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบวงจรเดี่ยวจะ

มีระยะห่างระหว่างเฟสอยู่ในแนวนอน และสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบวงจรคู่จะมีระยะห่างระหว่างเฟสทั้งในแนวนอนและในแนวดิ่ง(ตามรูปที่ 6.10) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างเฟสจะส่งผลทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเปลี่ยนแปลงไป รูปที่ 6.14 - 6.17 เป็นกราฟความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเพิ่มระยะห่างระหว่างเฟสให้กับสายส่ง โดยพิจารณาที่สายส่งมีค่าของภาระในการจ่ายโหลดสูงสุด (3.15 กิโลแอมป์ต่อเฟส)



รูปที่ 6.10 ระยะห่างระหว่างเฟสของเสาไฟฟ้าระบบแรงดัน 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและวงจรคู่

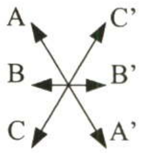
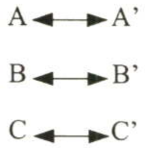
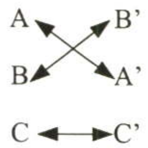
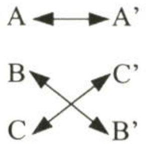
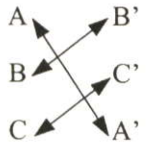
6.2.1.4 ขนาดของสายไฟฟ้า(conductor dimension)

สายไฟฟ้าของสายส่งระบบแรงดัน 500 kV จะมีลักษณะเป็นสายควบจำนวน 4 เส้น ดังนั้นขนาดของสายไฟฟ้าต่อเฟสจึงเป็นขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของสายควบ การเปลี่ยนแปลงขนาดของสายไฟฟ้าในที่นี้จึงหมายถึงการเปลี่ยนชนิดของสายตัวนำ การเปลี่ยนแปลงจำนวนของสายไฟควบต่อเฟส และการเปลี่ยนแปลงระยะห่างของสายไฟควบ ซึ่งจะทำให้ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของสายไฟฟ้าเปลี่ยนไปด้วย การเปลี่ยนแปลงขนาดของสายไฟฟ้าเมื่อพิจารณาจากสมการในการคำนวณสนามไฟฟ้าแล้วจะเห็นว่าค่า Maxwell potential coefficient ตามสมการที่(2.4) จะเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่คำนวณได้ แต่สำหรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในส่วนนี้(เนื่องจากค่า Maxwell potential coefficient จะมีผลต่อการคำนวณของสนามไฟฟ้าเท่านั้น)

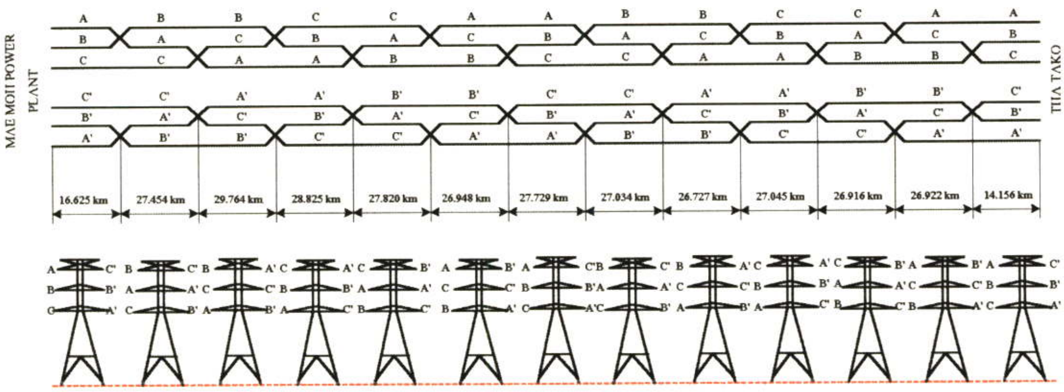
6.2.1.5 การจัดเรียงลำดับเฟส (phase sequences)

การจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่งจะทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะกับสายส่งที่เป็นแบบวงจรคู่เนื่องมาจากมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าของสายส่งเกิดการหักล้างและเสริมซึ่งกันและกัน สำหรับสายส่งที่มีรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสที่มีการหักล้างกันจะทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย ซึ่งเราเรียกรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสแบบนี้ว่า low-reactance[2] ส่วนสายส่งที่มีรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสที่เสริมกันจะทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่ามากเราเรียกรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสแบบนี้ว่า superbundle[2]

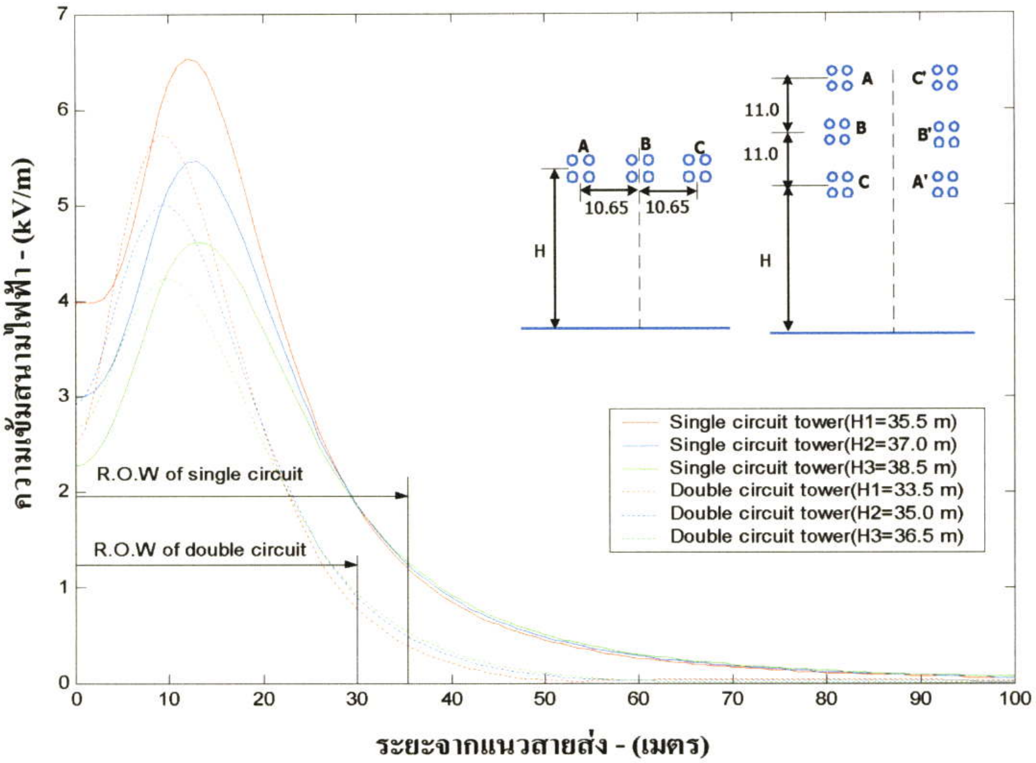
ตารางที่ 6.2 การจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่งวงจรคู่ในแบบต่าง ๆ

รูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟส	ลักษณะ
1. การจัดเรียงลำดับเฟสแบบ low-reactance	
2. การจัดเรียงลำดับเฟสแบบ superbundle	
3. การจัดเรียงลำดับเฟสแบบอื่น ๆ	  

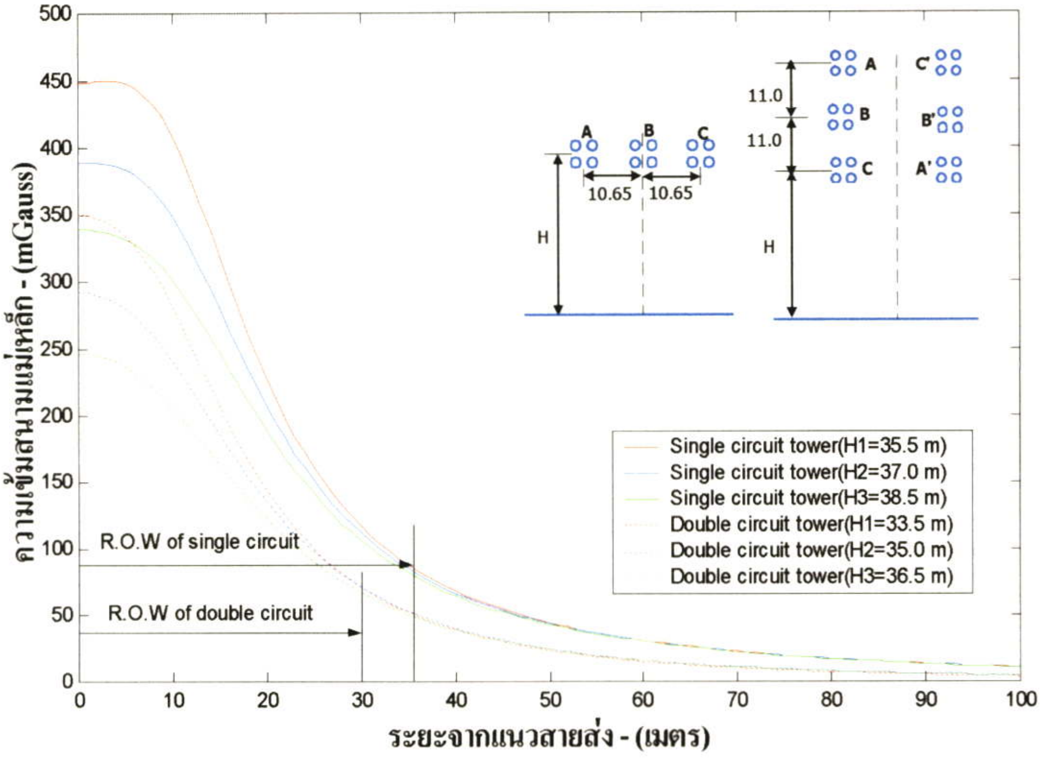
สำหรับสายส่ง 500 kV วงจรคู่ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้มีการจัดเรียงลำดับเฟส (สำหรับสายส่งที่มีระยะทางไกล ๆ) โดยมีรูปแบบของการจัดเรียงลำดับเฟสตามรูปที่ 6.11 ซึ่งจะเห็นว่าเป็นการจัดเรียงลำดับของเฟสในแบบ low-reactance ทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากันตลอดความยาวสายส่ง ในรูปที่ 6.18 และ 6.19 เป็นผลของการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นผลมาจากการจัดเรียงลำดับของเฟส



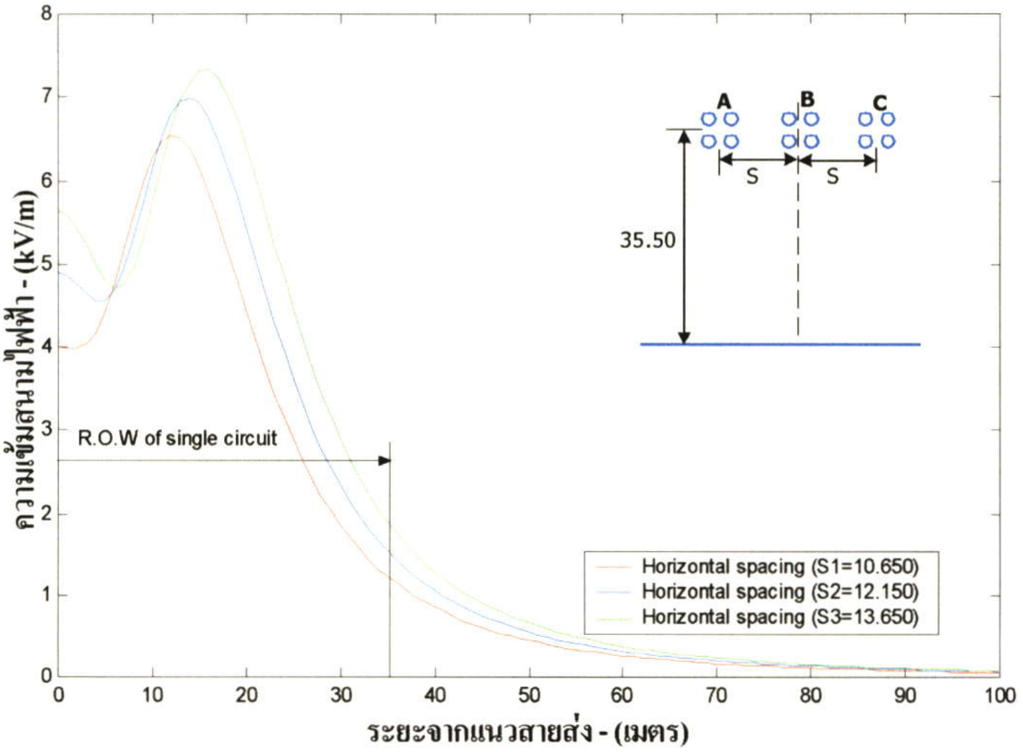
รูปที่ 6.11 รูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่ง 500 kV วงจรคู่ของ กฟผ.



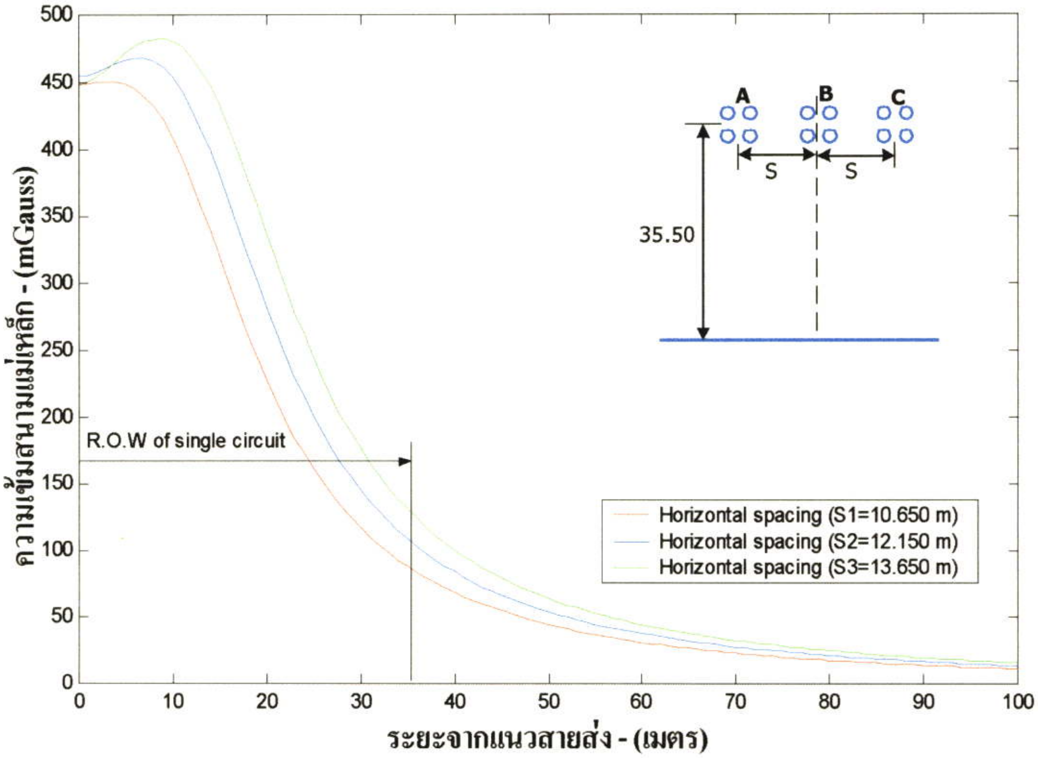
รูปที่ 6.12 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงเสา



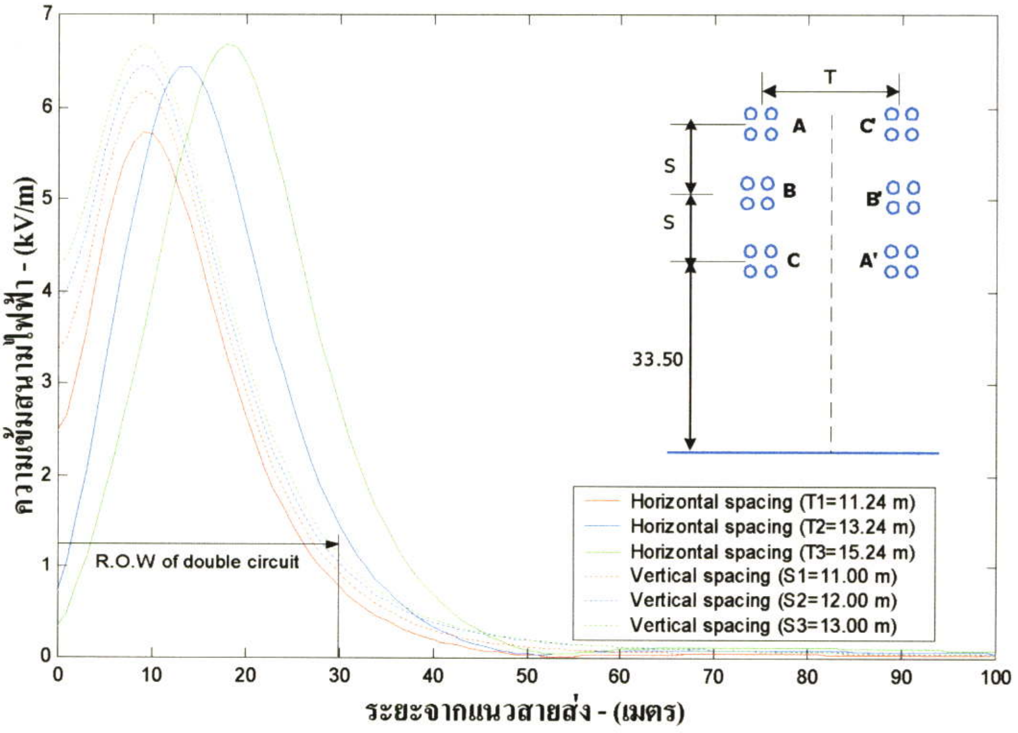
รูปที่ 6.13 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามความสูงเสา



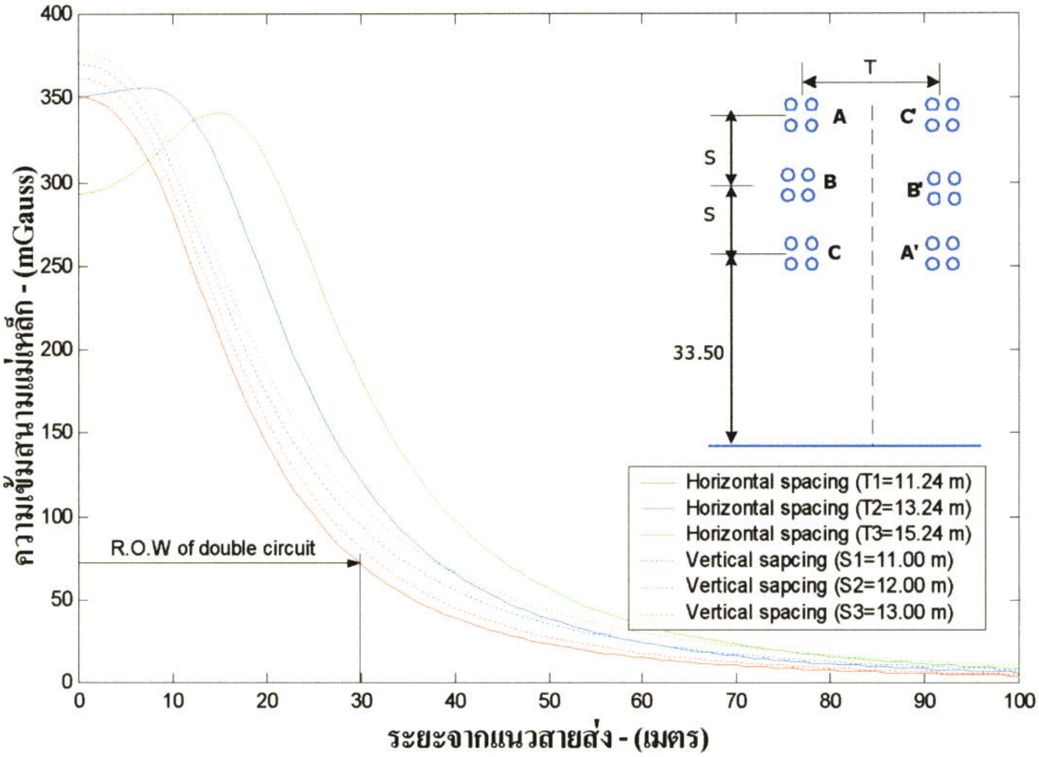
รูปที่ 6.14 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส (วงจรเดี่ยว)



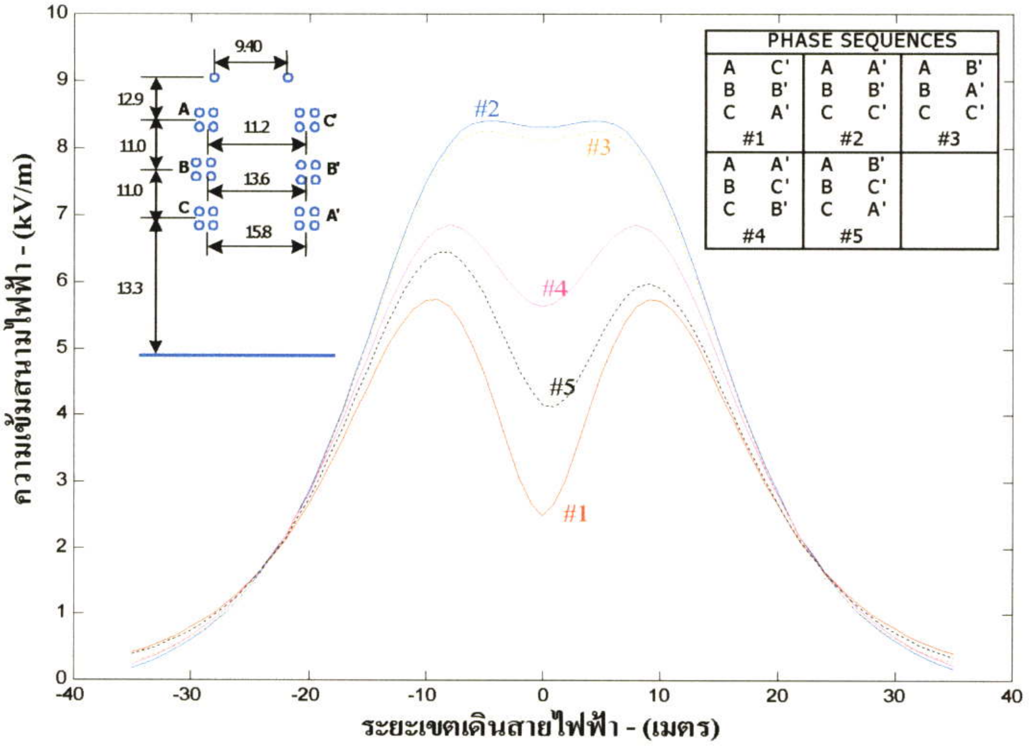
รูปที่ 6.15 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส (วงจรเดี่ยว)



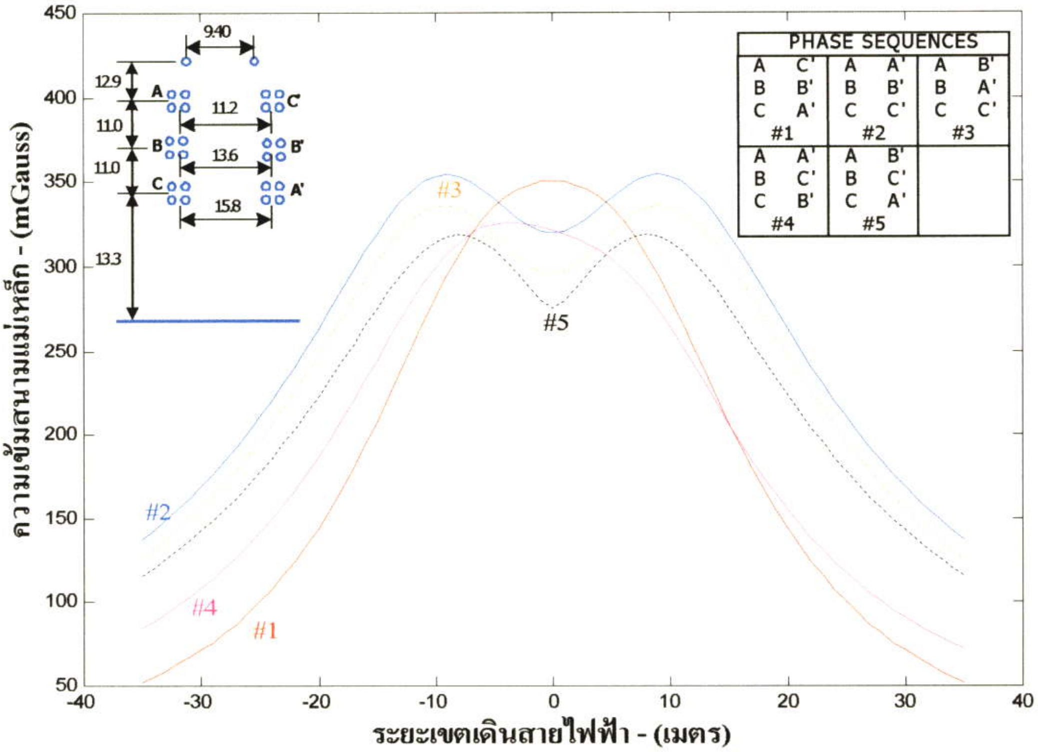
รูปที่ 6.16 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส (วงจรคู่)



รูปที่ 6.17 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างเฟส (วงจรคู่)



รูปที่ 6.18 ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนตามการจัดเรียงของเฟส



รูปที่ 6.19 ความเข้มสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่ง 500 kV ที่เปลี่ยนตามการจัดเรียงของเฟส

6.2.2 วิธีการชิลด์ (shielding methods)

การชิลด์เป็นวิธีการหนึ่งในการช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เช่น การทำระบบกราวด์ให้กับวัตถุเพื่อลดผลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ , การใช้โลหะที่มีค่าเปอร์มิบิลิตี้สูงป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็ก เป็นต้น สำหรับสนามไฟฟ้าการชิลด์จะทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้า ณ.บริเวณที่ชิลด์มีค่าลดลง ซึ่งประสิทธิภาพของการชิลด์ (shielding efficiency : SE) สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความเข้มสนามไฟฟ้าก่อนการชิลด์และหลังการชิลด์[2] ได้ตามสมการ ดังนี้

$$E_S = E_U.SF \tag{6.1}$$

$$SE = 1 - SF = \frac{E_U - E_S}{E_U} \tag{6.2}$$

$$E_S = E_U(1 - SE) \tag{6.3}$$

เมื่อ E_S = ความเข้มสนามไฟฟ้าหลังการชิลด์ (kV/m)

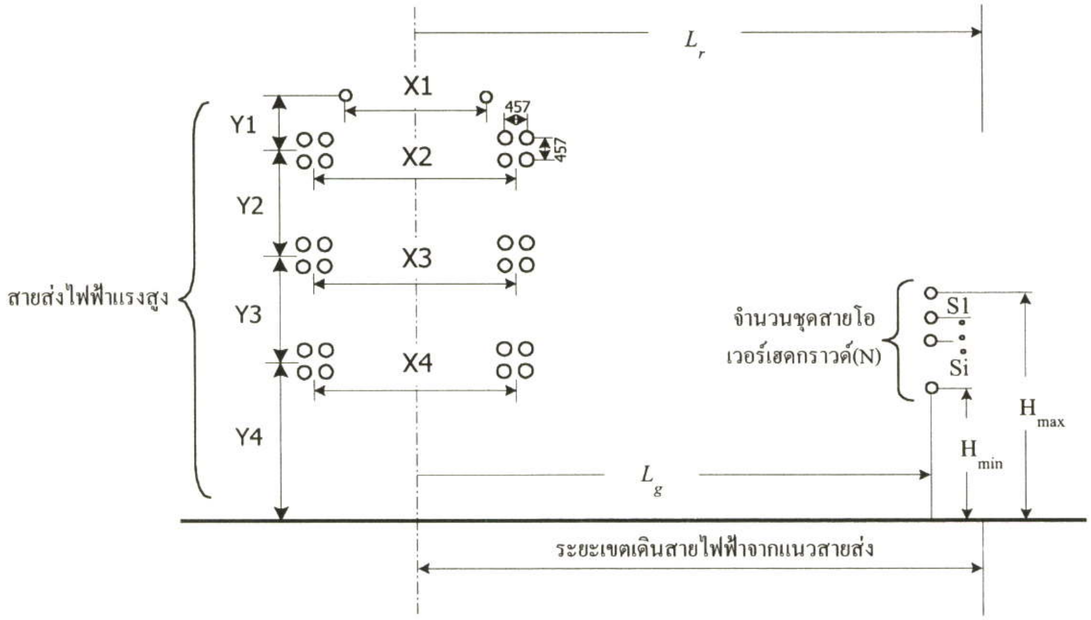
E_U = ความเข้มสนามไฟฟ้าก่อนการชิลด์ (kV/m)

SF = ชิลดิ้งแฟตเตอร์

SE = ประสิทธิภาพของการชิลด์ (shielding efficiency)

6.2.2.1 การชิลด์โดยใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์วางในแนวดิ่ง

การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของเขตเดินสายไฟฟ้า (edge of right-of-way) สามารถทำได้ด้วยการใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ติดตั้งในตำแหน่งที่เหมาะสมบริเวณเขตเดินสายไฟฟ้าตามรูปที่ 6.20



รูปที่ 6.20 การใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.20 จะประกอบด้วยตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

L_r = ระยะเขตเดินสายจากแนวสายส่ง

L_g = ระยะจากแนวสายส่งถึงตำแหน่งติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์

H_{max} = ความสูงจากพื้นดินถึงสายโอเวอร์เฮดกราวด์เส้นบนสุด

H_{min} = ความสูงจากพื้นดินถึงสายโอเวอร์เฮดกราวด์เส้นล่างสุด

N = จำนวนของชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของสายโอเวอร์เฮดกราวด์

S_i = ระยะห่างระหว่างสายโอเวอร์เฮดกราวด์เส้นที่ i และ i-1

สำหรับข้อจำกัดในการติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์จะประกอบไปด้วยระยะห่างระหว่างชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์กับพื้นดิน และระยะห่างระหว่างสายโอเวอร์เฮดกราวด์เส้นบนสุดกับสายไฟฟ้าเมื่อเกิดการแกว่งเนื่องจากแรงลม

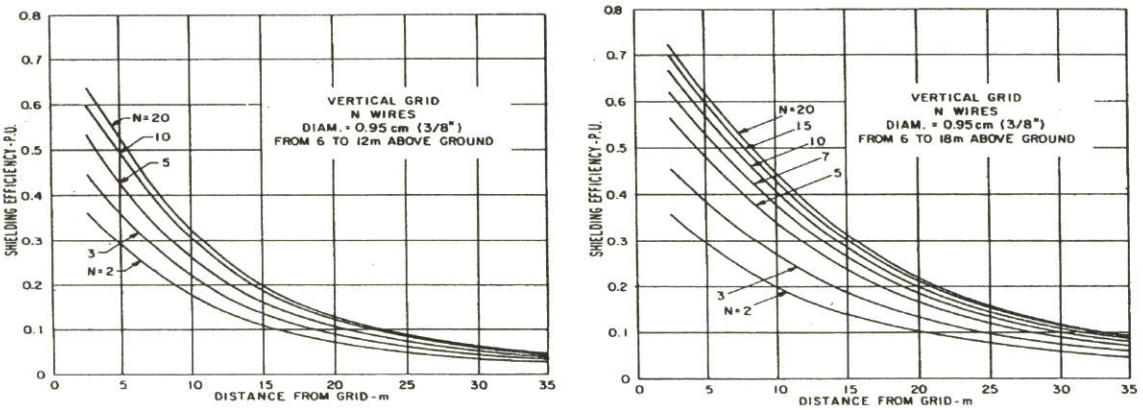
การออกแบบชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดระดับความเข้มสนามไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

1. คำนวณค่าสนามไฟฟ้า ณ.ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้า (L_r)
2. กำหนดตำแหน่งที่ติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ ($L_r - L_g$) โดยที่ตำแหน่งดังกล่าว จะมีค่าเท่ากับหนึ่งในสามของความสูงเฉลี่ยของชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ตามรูปที่ 6.20
3. หาค่าของสนามไฟฟ้า ณ.ตำแหน่งที่ติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ ($L_r - L_g$) ก่อนการชิลด์ (E_u) จากสมการ

$$E(L) \approx k.\frac{H.L}{(H^2 + L^2)^2} \tag{6.4}$$

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

$$E_S = E_U - E_G \tag{6.5}$$



รูปที่ 6.21 ประสิทธิภาพการชิลด์ของการใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ในแนวดิ่ง[2]

ตัวอย่างที่ 6.1 การวิเคราะห์เพื่อลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าด้วยการออกแบบชุดสายโฮเวอร์เฮดกราวด์ติดตั้งบริเวณขอบเขตเดินสายไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV ทั้งวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ และต้องการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้ามีน้อยกว่า 0.5 kV/m โดยใช้สายโอเวอร์เฮดกราวด์แกนเหล็กตีเกลียว 7 เส้นที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 3/8 นิ้ว ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพในการชิลด์ของการใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์วางในแนวดิ่งตามรูปที่ 6.21

ขั้นตอนการออกแบบและวิเคราะห์

1. ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ขอบของเขตการเดินสายไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV ที่ได้จากการคำนวณ
   - ความเข้มสนามไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยวมีค่าเท่ากับ 1.219V/m
   - ความเข้มสนามไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV วงจรคู่มีค่าเท่ากับ 0.764 kV/m

2. เลือกตำแหน่งที่ติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์($L_r - L_g$) โดยใช้ข้อมูล H_{min} และ H_{max} จากรูปที่ 6.21 ดังนี้

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

$H_{max} = 12$ m ; $H_{min} = 6$ m ; $L_r - L_g = 3$ m

$H_{max} = 18$ m ; $H_{min} = 6$ m ; $L_r - L_g = 4$ m

3. หาค่าสนามไฟฟ้า ณ. ตำแหน่งที่ติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ ($L_r - L_g$) ก่อนการชิลด์ (E_u) จากสมการที่ 6.4 โดยสมมุติให้ความสูงเบื้องต้นของชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ (H) มีค่าเท่ากับ 20 m

   3.1 สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว

$$E(L) = k\frac{(20x35)}{(20^2 + 35^2)^2} \quad ; E(L) = 1.219 \text{ kV/m}$$

$$k = 4598.46$$

$$E(32) = 4598.46 \frac{(20x32)}{(20^2 + 32^2)^2}$$

$$E(32) = 1.45 \quad \text{kV/m (สำหรับ } H_{max} = 12 \text{ m)}$$

$$E(31) = 4598.46 \frac{(20x31)}{(20^2 + 31^2)^2}$$

$$E(31) = 1.54 \quad \text{kV/m (สำหรับ } H_{max} = 18 \text{ m)}$$

3.2 สายส่ง 500 kVวงจรคู่

$$E(L) = k \frac{(20x30)}{(20^2 + 30^2)^2} \quad ; E(L) = 0.764 \text{ kV/m}$$

$$k = 2151.93$$

$$E(27) = 2151.93 \frac{(20x27)}{(20^2 + 27^2)^2}$$

$$E(27) = 0.911 \quad \text{kV/m (สำหรับ } H_{max} = 12 \text{ m)}$$

$$E(26) = 2151.93 \frac{(20x26)}{(20^2 + 26^2)^2}$$

$$E(26) = 0.967 \quad \text{kV/m (สำหรับ } H_{max} = 18 \text{ m)}$$

4. ต้องการให้ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่า 0.5 kV/m (E_{max}= 0.5 kV/m) ดังนั้นประสิทธิภาพของการชิลด์จะมีค่าเท่ากับ

4.1 สายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว

$$SE(32) = \frac{(1.219 - 0.5)}{1.45} = 0.5$$

$$SE(31) = \frac{(1.219 - 0.5)}{1.54} = 0.47$$

จากรูปที่ 6.21 H_{max} = 12 m ; H_{min} = 6 m ; $L_r - L_g$ = 3 m ; SE =0.5 ; N=5

จากรูปที่ 6.21 H_{max} = 18 m ; H_{min} = 6 m ; $L_r - L_g$ = 4 m ; SE =0.47 ; N=3

เลือกจำนวนสายของชุดโอเวอร์เฮดกราวด์เท่ากับ 5 (N=5) โดยมี H_{max} = 12 m ; H_{min} = 6 m ทั้งนี้เพื่อต้องการลดผลจากการเกิดแฟลกซ์โอเวอร์ระหว่างสายไฟฟ้ากับชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์

4.2 สายส่ง 500 kV วงจรคู่

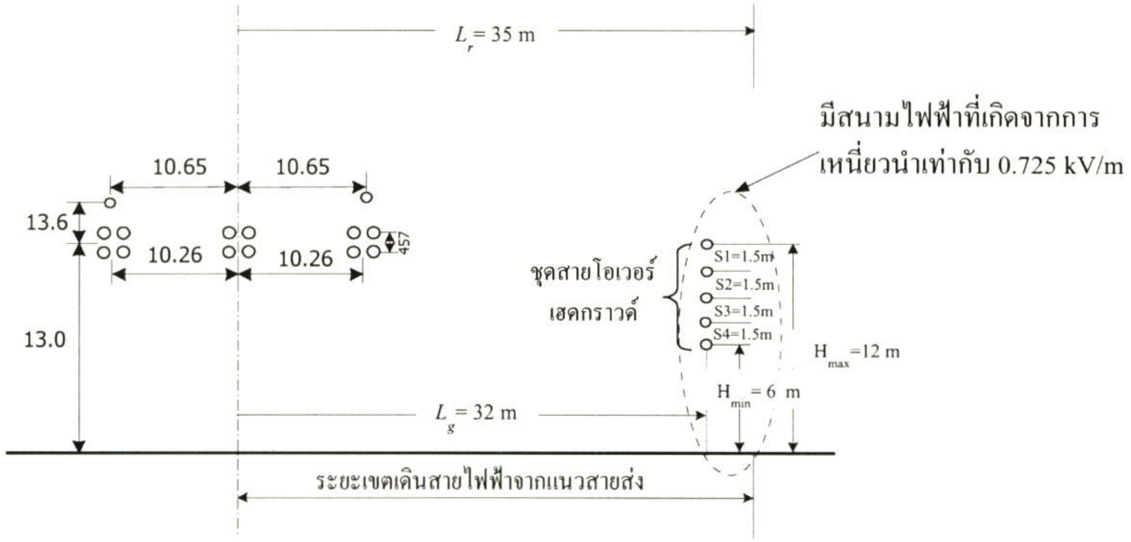
$$SE(27) = \frac{(0.764 - 0.5)}{0.911} = 0.289$$

$$SE(26) = \frac{(0.764 - 0.5)}{0.967} = 0.273$$

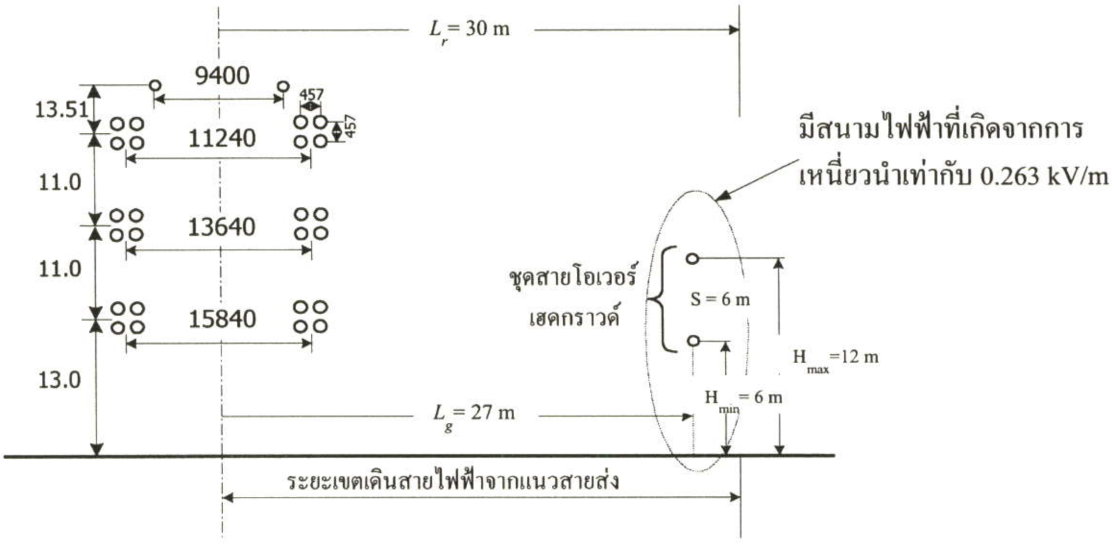
จากรูปที่ 6.21 H_{max} = 12 m ; H_{min} = 6 m ; $L_r - L_g$ = 3 m ; SE =0.289 ; N=2

จากรูปที่ 6.21 H_{max} = 18 m ; H_{min} = 6 m ; $L_r - L_g$ = 4 m ; SE =0.273 ; N=2

เลือกจำนวนสายของชุดโอเวอร์เฮดกราวด์เท่ากับ 2 (N=2) โดยมี H_{max} = 12 m ; H_{min} = 6 m ทั้งนี้เพื่อต้องการลดผลจากการเกิดแฟลกซ์โอเวอร์ระหว่างสายไฟฟ้ากับชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์



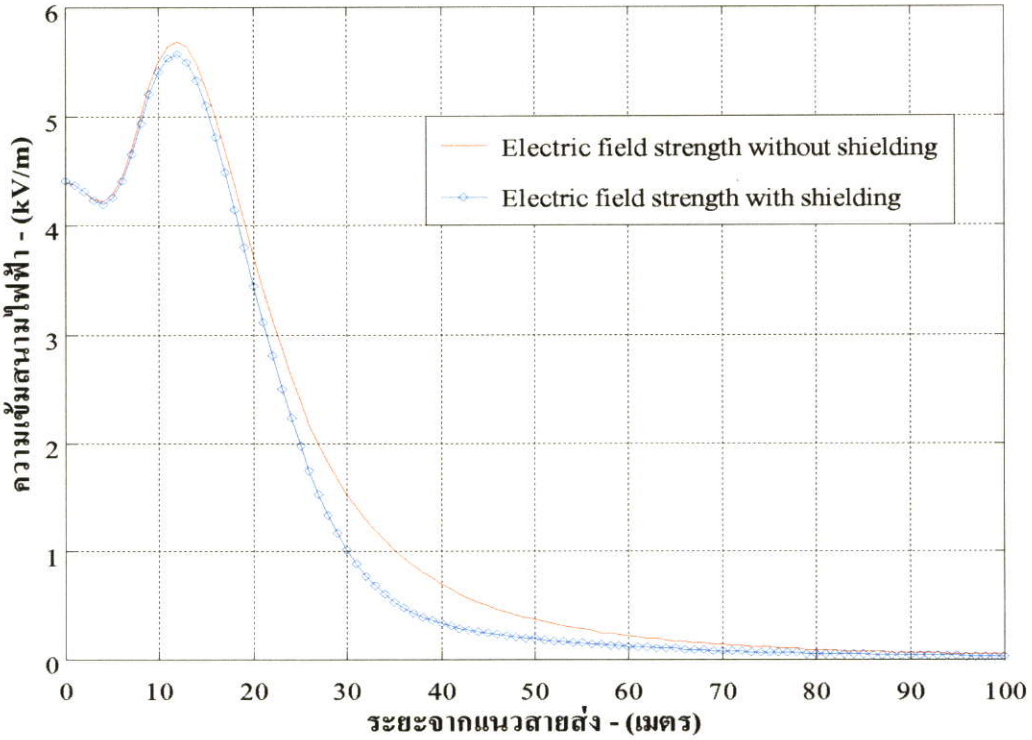
รูปที่ 6.22 การติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว



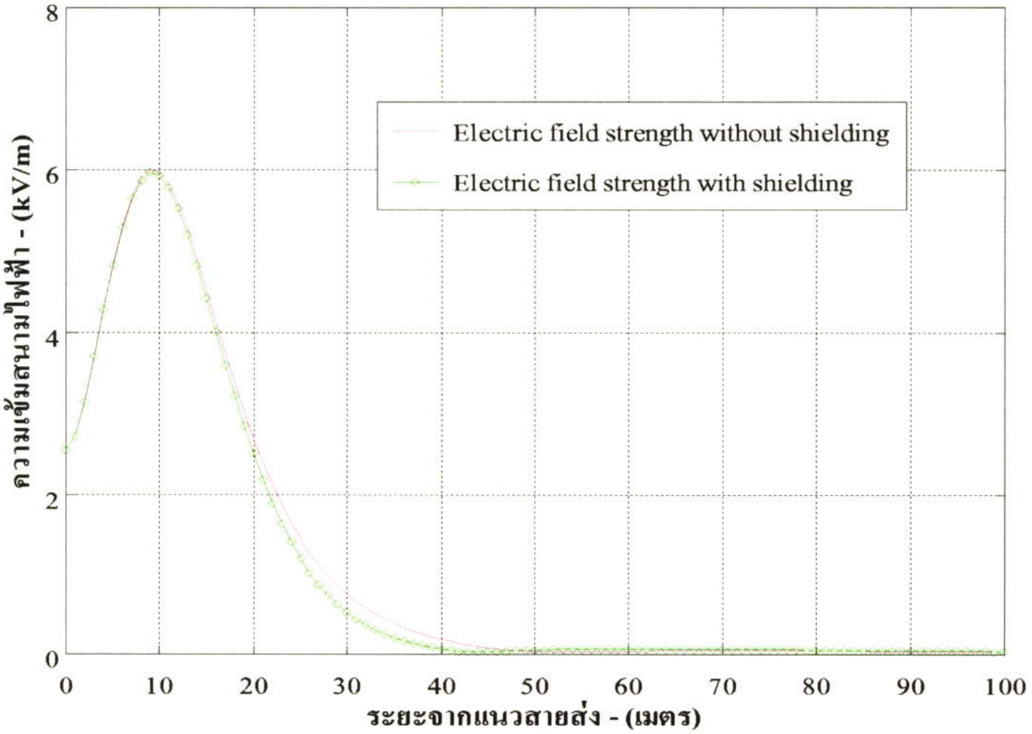
รูปที่ 6.23 การติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์เพื่อลดสนามไฟฟ้าของสายส่ง 500 kV วงจรคู่

จากตัวอย่างการวิเคราะห์และออกแบบชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ติดตั้งในแนวดิ่งเพื่อลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของเขตเดินสายไฟฟ้า โดยใช้ชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ที่มีขนาด 3/8 นิ้ว พบว่าในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kVวงจรเดี่ยวซึ่งมีเขตเดินสายไฟฟ้าข้างละ 35 เมตร เมื่อต้องการลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าให้มีค่าลดลงน้อยกว่า 0.5 kV/m จะต้องติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ในแนวดิ่งจำนวน 5 เส้นโดยมีระยะห่างระหว่างเส้นเท่ากับ 1.5 เมตรวางห่างจากขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าเข้ามา 3 เมตร และชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์มีความสูงเส้นบนสุด 12 เมตรดังรายละเอียดในรูปที่ 6.22 สำหรับในกรณีของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่ซึ่งมีเขตเดินสายไฟฟ้าข้างละ 30 เมตร เมื่อต้องการลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าให้มีค่าลดลงน้อยกว่า 0.5 kV/m จะต้องติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ในแนวดิ่งจำนวน 2 เส้นโดยมีระยะห่างระหว่างเส้นเท่ากับ 6 เมตรวางห่างจากขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าเข้ามา 3 เมตร และชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์มีความสูงเส้นบนสุด 12 เมตรดังรายละเอียดในรูปที่ 6.23

ในรูปที่ 6.24 และ 6.25 เป็นการวิเคราะห์ความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินเมื่อได้ติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์ในตำแหน่งที่กำหนดแล้ว ซึ่งผลการวิเคราะห์พบว่าระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าจะมีค่าลดลงไปจากเดิมก่อนการติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์



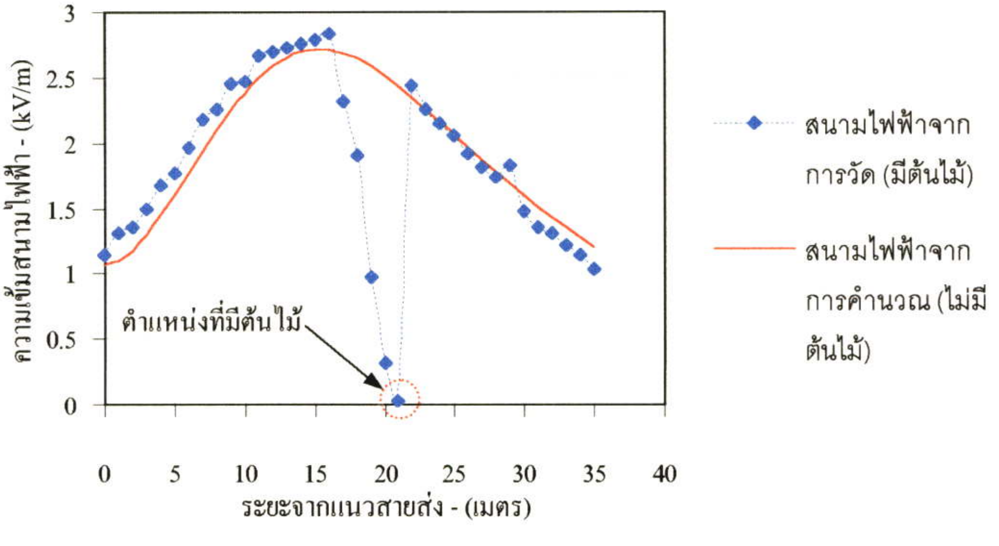
รูปที่ 6.24 การลดลงของสนามไฟฟ้าเมื่อติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์สำหรับสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว



รูปที่ 6.25 การลดลงของสนามไฟฟ้าเมื่อติดตั้งชุดสายโอเวอร์เฮดกราวด์สำหรับสายส่ง 500 kV วงจรคู่

6.2.2.2 การชิลด์โดยธรรมชาติ

ธรรมชาติของสนามไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่ออยู่ภายใต้สิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้าหรือโลหะ สำหรับสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติที่สามารถลดระดับความเข้มสนามไฟฟ้าลงได้ก็คือ ต้นไม้ ต้นไม้จะทำให้ประจุไฟฟ้าถ่ายเทจากอากาศโดยรอบลงสู่ตัวมันเองทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าในบริเวณที่มีต้นไม้อยู่มีระดับความเข้มลดลง แต่สิ่งที่ต้องคำนึงเมื่อจะใช้ต้นไม้ช่วยลดระดับความเข้มสนามไฟฟ้าก็คือ การกำหนดระยะห่างระหว่างสายไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกับต้นไม้จะต้องมีค่ามากเพียงพอเพื่อหลีกเลี่ยงผลของการเกิดแฟลซ์โอเวอร์ระหว่างสายไฟฟ้ากับต้นไม้ หรือความเสียหายของสายไฟฟ้าที่เกิดจากต้นไม้ล้ม สำหรับผลของต้นไม้ที่มีต่อระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าได้แสดงให้เห็นในรูปที่ 6.26 เป็นผลการวัดความเข้มสนามไฟฟ้าบนพื้นดินที่มีต้นไม้อยู่ ซึ่งผลการวัดพบว่า ณ.ตำแหน่งที่มีต้นไม้จะส่งผลทำให้ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงจนเกือบจะเป็นศูนย์



รูปที่ 6.26 การลดลงของสนามไฟฟ้าเมื่อมีต้นไม้

6.3 บทสรุป

จากการเสนอแนวทางการศึกษาเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าในลักษณะต่าง ๆ ที่กล่าวมาจะเป็นการเสนอแนวทางเพื่อลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าลง ซึ่งก็จะทำให้ระดับความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงด้วย โดยวิธีการดังกล่าวจะประกอบด้วย 2 วิธีการ คือ การออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเพื่อให้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีการกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กออกมาเป็นปริมาณที่น้อย และวิธีการชิลด์เพื่อลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าที่เกิดจาก

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งวิธีการต่าง ๆ ที่นำเสนอมาเป็นกรณีศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการใช้แก้ปัญหาผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้

บทที่ 7
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้สามารถสรุปผลการวิจัยออกเป็น 4 ส่วนได้ ดังนี้

7.1.1 โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ในส่วนของโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สร้างจาก MATLAB นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงแบบ 3 มิติได้ ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาโปรแกรมให้มีความสามารถทัดเทียมกับโปรแกรมจากต่างประเทศ และจากการตรวจสอบค่าความถูกต้องในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของโปรแกรมที่สร้างจาก MATLAB พบว่ามีความน่าเชื่อถือเพียงพอและสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงได้ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรม Corona and Field Effect ที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยใช้งานอยู่ในปัจจุบันแล้วโปรแกรมที่สร้างขึ้นมานี้สามารถช่วยชดเชยจุดด้อยของโปรแกรมเดิมที่ไม่มีความสามารถทางด้านกราฟิก และไม่สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงในแบบ 3 มิติได้

7.1.2 ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ทั้งชนิดวงจรเดี่ยวและชนิดวงจรคู่ สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ ดังนี้

1. ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV เมื่อสายส่งมีค่าภาระในการจ่ายโหลดสูงสุด จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(ตารางที่ 7.1)
2. การหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงด้วยวิธีการวัดจะให้ผลที่แตกต่างกับวิธีการคำนวณ ทั้งนี้เนื่องจากการวัดจะวัดภายใต้สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า รวมทั้งค่าผิดพลาดที่เกิดจากการวัด และอื่น ๆ เป็นต้น สำหรับวิธีการคำนวณจะพิจารณาภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ถูกกำหนดขึ้น

ตารางที่ 7.1 ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามข้อกำหนดของ กฟผ. และการวิเคราะห์

ตำแหน่งที่พิจารณา	สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV					
	ข้อกำหนดของ กฟผ.		ผลจากการวิเคราะห์			
	สนามไฟฟ้า	สนามแม่เหล็ก	สนามไฟฟ้า		สนามแม่เหล็ก	
			วงจรเดี่ยว	วงจรคู่	วงจรเดี่ยว	วงจรคู่
1. ภายในเขตเดินสายไฟฟ้า	15 kV/m	-	6.630 kV/m	6.012 kV/m	453.909 mG	366.414 mG
2. ที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้า	2 kV/m	200 mG	1.219 kV/m	0.764 kV/m	91.813 mG	52.565 mG

7.1.3 ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

จากการวิเคราะห์ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในรูปของการเหนี่ยวนำ สามารถบอกได้ว่าผลกระทบที่มีต่อวัตถุบริเวณสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะเกิดจากสนามไฟฟ้าเป็นหลัก และค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับขนาดของวัตถุและค่าความเข้มสนามไฟฟ้า ซึ่งการเลือกชนิดของวัสดุที่จะนำมาสร้างก็จะมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการลดผลกระทบจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำได้ทางหนึ่ง สำหรับการที่จะบอกว่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำปริมาณเท่าใดจะเกิดอันตรายกับคนที่ไปสัมผัสจะพิจารณาจากมาตรฐาน National Electrical Safety Code[14]

7.1.4 การลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ในการลดผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เน้นไปที่การลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กำเนิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งในการลดระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้เสนอแนวทางไว้ ดังนี้

1. โดยวิธีการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง (Design methods)
2. โดยวิธีการชิลด์ (Shielding methods)

7.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยที่นำเสนอนี้เป็นเพียงการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีแหล่งเกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสสลับ (High Voltage Alternating Current : HVAC) และผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของการเหนี่ยวนำเท่านั้น แต่ในภาพรวมแล้วปัญหาจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เป็นผลมาจากระบบการส่งจ่ายจะมีทั้งระบบการส่งจ่ายที่เป็นสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกระแสตรง (High Voltage Direct Current : HVDC) และระบบการส่งจ่ายที่เป็นสายส่งไฟฟ้าแรงสูงใต้ดิน

(Underground Cable System) ซึ่งผลกระทบที่เกิดขึ้นก็จะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป ทำให้งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กยังต้องดำเนินต่อไป ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อได้ ดังนี้

1. การพัฒนาโปรแกรมให้สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากระบบการส่งจ่ายในแบบต่าง ๆ
2. วิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในรูปแบบต่าง ๆ ที่นอกเหนือจากผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของการเหนี่ยวนำ

เอกสารอ้างอิง

[1] Donald W.Zipse "Health Effects of Extremely Low-Frequency (50 - and 60- Hz) Electric and Magnetic Fields" IEEE Transactions on Industry Applications., Vol.29 , No. 2 , March/April 1993. pp.447-458.

[2] Electric Power Research Institute. **Transmission Line Reference Book 345 and Above.** 2 nd Ed. Calfornia 1982.

[3] Martin Misakian "ELF Electric and Magnetic Field Measurement Methods" National Institute of Standards and Technology. pp. 150-155.

[4] IEEE Std 644-1994 , IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines.

[5] Govindarajan B. Iyyuni and Stephen A Sebo " Study of Transmission Line Magnetic Fields" , IEEE . 1990. pp.222-231.

[6] รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์ และ วรรัตน์ ภัทรอมรกุล. **คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์.** สำนักพิมพ์อินโพเพรส.2543.

[7] ฝ่ายวางแผนระบบไฟฟ้า การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย "สรุปสายส่งและสถานีไฟฟ้าแรงสูง" [Online] Avaible :http//spdeis/menu_trans.html พฤษภาคม 2544.

[8] R.Maruthi and et. "Computation and Measurement of AC Electric and Magnetic Field Lateral Profiles and Longitudinal Contours Under Transmission Lines" IEEE Catalogue No. 95 TH 8130 , 1995. pp.209-214.

[9] Miguel O.B.C. Melo Luiz C.A. Fonseca and et. "Electric and Magnetic Fields of Compact Transmission Lines" IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 14 , No. 1 , January 1999. pp.200-204.

[10] Enertech Consultants , EMDEX II , Electric Power Research Institute.

[11] CIGRE Working Group 36.01 1991. **Electric Power Transmission and the Environment : Fields , Noise and Interference.** No. 74 : CIGRE.

[12] พิทักษ์ ปิ่นอนงค์ และ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. 2543 " การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 กิโลโวลท์" หน้า 53-56 ใน **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 23** เชียงใหม่ : คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

[13] J. Swanson and D.C. Renew "Power-Frequency Fields and People" Engineering Science and Education Journal , April 1994. pp.71-79.

[14] American National Standards Institute. National Electrical Safety Code. 1993 Edition.

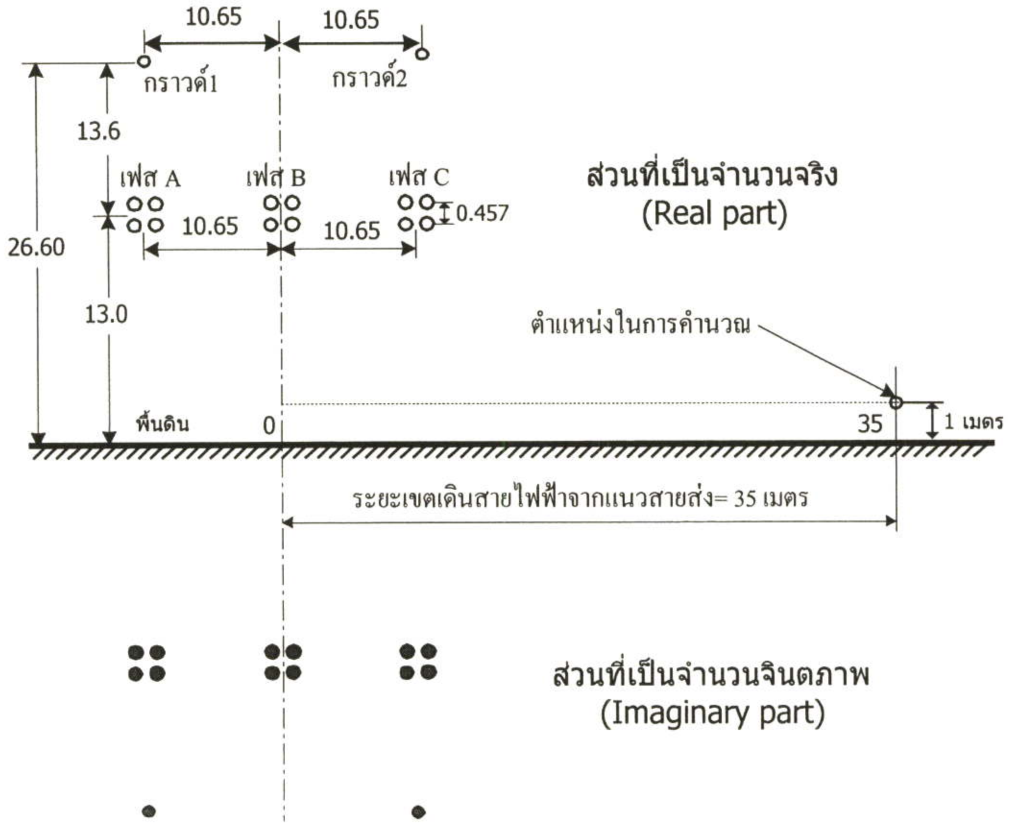
[15] Gerry George " Line Designs Reduce EMF Emissions" Transmission & Distribution World , April 1998. pp.68-72.

[16] B.J. Maddock "Overhead Line Design in Relation to Electric and Magnetic Field Limits" POWER ENGINEERING JOURNAL , SEPTEMBER 1992. pp.217-224.

ภาคผนวก ก
การคำนวณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV

การคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

1. สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว



รูปที่ ก-1 ภาพแนวขวางของตัวนำที่ตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่ง 500 kVวงจรเดี่ยว

<u>**การคำนวณสนามไฟฟ้า**</u>

ตารางที่ ก-1 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าสนามไฟฟ้า(วงจรเดี่ยว)

ลักษณะข้อมูล	ค่าพารามิเตอร์		
		X	Y
1. ตำแหน่งสายตัวนำ	ตัวนำที่ 1 (เฟส A)	X_1 = -10.65	Y_1 = 13.00
	ตัวนำที่ 2 (เฟส B)	X_2 = 0.0	Y_2 = 13.00
	ตัวนำที่ 3 (เฟส C)	X_3 = 10.65	Y_3 = 13.00
	ตัวนำที่4(กราวด์1)	X_4 = -10.65	Y_4 = 26.60
	ตัวนำที่5(กราวด์1)	X_5 = 10.65	Y_5 = 26.60

ตารางที่ ก-1 (ต่อ)

ลักษณะข้อมูล	ค่าพารามิเตอร์		
		ขนาด	มุม
2. แรงดันของสายส่ง (แรงดันสูงสุดของระบบ)	ตัวนำที่ 1 (เฟส A)	$V_1 = 525$ kV	0 °
	ตัวนำที่ 2 (เฟส B)	$V_2 = 525$ kV	120 °
	ตัวนำที่ 3 (เฟส C)	$V_3 = 525$ kV	-120 °
	ตัวนำที่4(กราวด์1)	$V_4 = 0.0$ kV	0 °
	ตัวนำที่5(กราวด์1)	$V_5 = 0.0$ kV	0 °

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยวประกอบด้วยสายตัวนำไฟฟ้าแบบควบ 4-เส้นขนาด 795 MCM ACSR/GA (CONDOR) จำนวน 3 เฟส และสายโอเวอร์เฮดกราวด์ขนาด 3/8 " (EHS) จำนวน 2 เส้น โดยที่สายตัวนำไฟฟ้าเป็นสายแบบควบ ดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของสายควบสามารถหาได้จาก

$$D_{eq} = D.\sqrt[n]{\frac{n.d}{D}}$$

เมื่อ D = ระยะห่างสายควบ

= 0.457 m

n = จำนวนสายควบ

= 4

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของสายไฟขนาด 795 MCM ACSR/GA

= 0.02772 m

$$D_{eq} = (0.457).\sqrt[4]{\frac{(4x0.02772)}{0.457}}$$

$$= 0.3207 \quad m$$

ค่าประจุไฟฟ้า (Q) ที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยวสามารถหาได้จากสมการที่ (2.4) ดังนี้

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

โดยที่ประจุไฟฟ้า (Q) และแรงดันไฟฟ้า (V) จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริงและส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ ดังนั้นสมการที่ (2.4) สามารถเขียนใหม่ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Q_{r1} \\ Q_{r2} \\ Q_{r3} \\ Q_{r4} \\ Q_{r5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} \end{bmatrix}^{-1} . \begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \\ V_{r4} \\ V_{r5} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{i1} \\ Q_{i2} \\ Q_{i3} \\ Q_{i4} \\ Q_{i5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} \\ P_{51} & P_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} \end{bmatrix}^{-1} . \begin{bmatrix} V_{i1} \\ V_{i2} \\ V_{i3} \\ V_{i4} \\ V_{i5} \end{bmatrix}$$

เมื่อเมตริกซ์ P เป็นค่าสัมประสิทธิ์ Maxwell potential coefficient ซึ่งมีสมาชิกในเมตริกซ์เท่ากับจำนวนของตัวนำทั้งหมดที่พิจารณา โดยมีค่า $\varepsilon = 8.854\text{x}10^{-12}\ \text{F/m}$ และค่าเอลิเมนต์ภายในเมตริกซ์ P สามารถหาได้ ดังนี้

$$P_{11} = \frac{1}{2\pi\varepsilon}\ln\left[\frac{(4\text{x}13.0)}{0.3207}\right]$$

$$P_{11} = \frac{1}{(2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12})}\ln\left[\frac{(4\text{x}13.0)}{0.3207}\right]$$

$$P_{11} = 0.9159\text{x}10^{11}$$

$$P_{12} = \frac{1}{(2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12})}\ln\left[\frac{(-10.65-0)^2+(13+13)^2}{(-10.65-0)^2+(13-13)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{12} = 0.1746\text{x}10^{11}$$

$$P_{13} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln \left[\frac{(-10.65-10.65)^2 + (13+13)^2}{(-10.65-10.65)^2 + (13-13)^2} \right]^{1/2}$$

$$P_{13} = 0.0821 x 10^{11}$$

$$P_{14} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln \left[\frac{(-10.65+10.65)^2 + (13+26.60)^2}{(-10.65+10.65)^2 + (13-26.60)^2} \right]^{1/2}$$

$$P_{14} = 0.1923 x 10^{11}$$

$$P_{15} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln \left[\frac{(-10.65-10.65)^2 + (13+26.60)^2}{(-10.65-10.65)^2 + (13-26.60)^2} \right]^{1/2}$$

$$P_{15} = 0.1037 x 10^{11}$$

$$P_{21} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln \left[\frac{(0+10.65)^2 + (13+13)^2}{(0+10.65)^2 + (13-13)^2} \right]^{1/2}$$

$$P_{21} = 0.1746 x 10^{11}$$

$$P_{22} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln \left[\frac{(4 x 13.0)}{0.3207} \right]$$

$$P_{22} = 0.9159 x 10^{11}$$

$$P_{23} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln \left[\frac{(0-10.65)^2 + (13+13)^2}{(0-10.65)^2 + (13-13)^2} \right]^{1/2}$$

$$P_{23} = 0.1746 x 10^{11}$$

$$P_{24} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln \left[\frac{(0+10.65)^2 + (13+26.60)^2}{(0+10.65)^2 + (13-26.60)^2} \right]^{1/2}$$

$$P_{24} = 0.1556 x 10^{11}$$

$$P_{25} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(0-10.65)^2 + (13+26.60)^2}{(0-10.65)^2 + (13-26.60)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{25} = 0.1556 x 10^{11}$$

$$P_{31} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(10.65+10.65)^2 + (13+13)^2}{(10.65+10.65)^2 + (13-13)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{31} = 0.0821 x 10^{11}$$

$$P_{32} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(10.65-0)^2 + (13+13)^2}{(10.65-0)^2 + (13-13)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{32} = 0.1746 x 10^{11}$$

$$P_{33} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4 x 13.0)}{0.3207}\right]$$

$$P_{33} = 0.9159 x 10^{11}$$

$$P_{34} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(10.65+10.65)^2 + (13+26.60)^2}{(10.65+10.65)^2 + (13-26.60)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{34} = 0.1037 x 10^{11}$$

$$P_{35} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(10.65-10.65)^2 + (13+26.60)^2}{(10.65-10.65)^2 + (13-26.60)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{35} = 0.1923 x 10^{11}$$

$$P_{41} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-10.65+10.65)^2 + (26.60+13)^2}{(-10.65+10.65)^2 + (26.60-13)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{41} = 0.1923 x 10^{11}$$

$$P_{42} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-10.65-0)^2+(26.60+13)^2}{(-10.65-0)^2+(26.60-13)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{42} = 0.1556x10^{11}$$

$$P_{43} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-10.65-10.65)^2+(26.60+13)^2}{(-10.65-10.65)^2+(20-13)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{43} = 0.1037x10^{11}$$

$$P_{44} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4x26.60)}{0.009144}\right]$$

$$P_{44} = 1.6852x10^{11}$$

$$P_{45} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-10.65-10.65)^2+(26.60+26.60)^2}{(-10.65-10.65)^2+(26.60-26.60)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{45} = 0.1782x10^{11}$$

$$P_{51} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(10.65+10.65)^2+(26.60+13)^2}{(10.65+10.65)^2+(26.60-13)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{51} = 0.1037x10^{11}$$

$$P_{52} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(10.65-0)^2+(26.60+13)^2}{(10.65-0)^2+(26.60-13)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{52} = 0.1556x10^{11}$$

$$P_{53} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(10.65-10.65)^2+(26.60+13)^2}{(10.65-10.65)^2+(26.60-13)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{53} = 0.1923x10^{11}$$

$$P_{54} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(10.65+10.65)^2 + (26.60+26.60)^2}{(10.65+10.65)^2 + (26.60-26.60)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{54} = 0.1782 x 10^{11}$$

$$P_{55} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4 x 26.60)}{0.009144}\right]$$

$$P_{55} = 1.6852 x 10^{11}$$

$V_{r1} = [(500x1.05)/\sqrt{3}] \cos 0^{o}$	$=303.1$ kV	$V_{i1} = [(500x1.05)/\sqrt{3}] \sin 0^{o}$	$= 0$ kV
$V_{r2} = [(500x1.05)/\sqrt{3}] \cos 120^{o}$	$=-151.5$ kV	$V_{i2} = [(500x1.05)/\sqrt{3}] \sin 120^{o}$	$= 262.5$ kV
$V_{r3} = [(500x1.05)/\sqrt{3}] \cos -120^{o}$	$=-151.5$ kV	$V_{i3} = [(500x1.05)/\sqrt{3}] \sin -120^{o}$	$= -262.5$ kV
$V_{r4} = 0$	$= 0$ kV	$V_{i4} = 0$	$= 0$ kV
$V_{r5} = 0$	$= 0$ kV	$V_{i5} = 0$	$= 0$ kV

$$\begin{bmatrix} Q_{r1} \\ Q_{r2} \\ Q_{r3} \\ Q_{r4} \\ Q_{r5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9159x10^{11} & 0.1746x10^{11} & 0.0821x10^{11} & 0.1923x10^{11} & 0.1037x10^{11} \\ 0.1746x10^{11} & 0.9159x10^{11} & 0.1746x10^{11} & 0.1556x10^{11} & 0.1556x10^{11} \\ 0.0821x10^{11} & 0.1746x10^{11} & 0.9159x10^{11} & 0.1037x10^{11} & 0.1923x10^{11} \\ 0.1923x10^{11} & 0.1556x10^{11} & 0.1037x10^{11} & 1.6852x10^{11} & 0.1782x10^{11} \\ 0.1037x10^{11} & 0.1556x10^{11} & 0.1923x10^{11} & 0.1782x10^{11} & 1.6852x10^{11} \end{bmatrix}^{-1} . \begin{bmatrix} 303.1 \\ -151.5 \\ -151.5 \\ 0.0 \\ 0.0 \end{bmatrix}$$

$$QREAL = \begin{bmatrix} Q_{r1} \\ Q_{r2} \\ Q_{r3} \\ Q_{r4} \\ Q_{r5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3869x10^{-8} \\ -0.2082x10^{-8} \\ -0.1619x10^{-8} \\ -0.0166x10^{-8} \\ 0.0156x10^{-8} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{i1} \\ Q_{i2} \\ Q_{i3} \\ Q_{i4} \\ Q_{i5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9159x10^{11} & 0.1746x10^{11} & 0.0821x10^{11} & 0.1923x10^{11} & 0.1037x10^{11} \\ 0.1746x10^{11} & 0.9159x10^{11} & 0.1746x10^{11} & 0.1556x10^{11} & 0.1556x10^{11} \\ 0.0821x10^{11} & 0.1746x10^{11} & 0.9159x10^{11} & 0.1037x10^{11} & 0.1923x10^{11} \\ 0.1923x10^{11} & 0.1556x10^{11} & 0.1037x10^{11} & 1.6852x10^{11} & 0.1782x10^{11} \\ 0.1037x10^{11} & 0.1556x10^{11} & 0.1923x10^{11} & 0.1782x10^{11} & 1.6852x10^{11} \end{bmatrix}^{-1} . \begin{bmatrix} 0.0 \\ 262.5 \\ -262.5 \\ 0.0 \\ 0.0 \end{bmatrix}$$

$$QIMAG = \begin{bmatrix} Q_{i1} \\ Q_{i2} \\ Q_{i3} \\ Q_{i4} \\ Q_{i5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0365x10^{-8} \\ 0.3606x10^{-8} \\ -0.3533x10^{-8} \\ -0.0085x10^{-8} \\ 0.0102x10^{-8} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (2.10) เราสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวแกน X ที่เกิดจากสายไฟฟ้าที่ 1,2,3,4 และ 5 ณ.ตำแหน่ง 35 เมตรจากแนวสายส่ง (X_N)ได้ ดังนี้

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจริง</u>

$$\vec{E}_X(r,a) = \frac{Q_{ra}(X_N - X_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a - X_N)^2 + (Y_a - Y_N)^2]} - \frac{Q_{ra}(X_N - X_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a - X_N)^2 + (Y_a + Y_N)^2]}$$

$$\vec{E}_X(r,1) = \frac{(0.3869x10^{-8})(35 + 10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65 - 35)^2 + (13 - 1)^2]} - \frac{(0.3869x10^{-8})(35 + 10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65 - 35)^2 + (13 + 1)^2]}$$

$$= 0.0325$$

$$\vec{E}_X(r,2)=\frac{(-0.2082x10^{-8})(35-0)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(0-35)^2+(13-1)^2]}-\frac{(-0.2082x10^{-8})(35-0)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(0-35)^2+(13+1)^2]}$$

$$=-0.035$$

$$\vec{E}_X(r,3)=\frac{(-0.1619x10^{-8})(35-10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2+(13-1)^2]}-\frac{(-0.1619x10^{-8})(35-10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2+(13+1)^2]}$$

$$=-0.0634$$

$$\vec{E}_X(r,4)=\frac{(-0.0166x10^{-8})(35+10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2+(26.60-1)^2]}-\frac{(-0.0166x10^{-8})(35+10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2+(26.60+1)^2]}$$

$$=-0.0019$$

$$\vec{E}_X(r,5)=\frac{(0.0156x10^{-8})(35-10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2+(26.60-1)^2]}-\frac{(0.0156x10^{-8})(35-10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2+(26.60+1)^2]}$$

$$=0.0043$$

$$EXTR=\vec{E}_X(r,1)+\vec{E}_X(r,2)+\vec{E}_X(r,3)+\vec{E}_X(r,4)+\vec{E}_X(r,5)$$

$$EXTR=(0.0325)+(-0.035)+(-0.0634)+(-0.0019)+(0.0043)$$

$$EXTR=-0.0635$$

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ</u>

$$\vec{E}_X(i,a)=\frac{Q_{ia}(X_N-X_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a-X_N)^2+(Y_a-Y_N)^2]}-\frac{Q_{ia}(X_N-X_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a-X_N)^2+(Y_a+Y_N)^2]}$$

$$\vec{E}_X(i,1) = \frac{(-0.0365x10^{-8})(35+10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2+(13-1)^2]} - \frac{(-0.0365x10^{-8})(35+10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2+(13+1)^2]}$$

$$= -0.0031$$

$$\vec{E}_X(i,2) = \frac{(0.3606x10^{-8})(35-0)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(0-35)^2+(13-1)^2]} - \frac{(0.3606x10^{-8})(35-0)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(0-35)^2+(13+1)^2]}$$

$$= 0.0606$$

$$\vec{E}_X(i,3) = \frac{(-0.3533x10^{-8})(35-10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2+(13-1)^2]} - \frac{(-0.3533x10^{-8})(35-10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2+(13+1)^2]}$$

$$= -0.1383$$

$$\vec{E}_X(i,4) = \frac{(-0.0085x10^{-8})(35+10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2+(26.60-1)^2]} - \frac{(-0.0085x10^{-8})(35+10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2+(26.60+1)^2]}$$

$$= -9.5205x10^{-4}$$

$$\vec{E}_X(i,5) = \frac{(0.0102x10^{-8})(35-10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2+(26.60-1)^2]} - \frac{(0.0102x10^{-8})(35-10.65)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2+(26.60+1)^2]}$$

$$= 0.0028$$

$$EXTI = \vec{E}_X(i,1) + \vec{E}_X(i,2) + \vec{E}_X(i,3) + \vec{E}_X(i,4) + \vec{E}_X(i,5)$$

$$EXTI = (-0.0031) + (0.0606) + (-0.1383) + (-9.5205x10^{-4}) + (0.0028)$$

$$EXTI = -0.0789$$

จากสมการที่ (2.11) เราสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y ที่เกิดจากสายไฟฟ้าที่ 1,2,3,4 และ 5 ณ.ตำแหน่ง 35 เมตรจากแนวสายส่ง (X_N)ได้ ดังนี้

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจริง</u>

$$\vec{E}_Y(r,a) = \frac{Q_{ra}(Y_N - Y_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a - X_N)^2 + (Y_a - Y_N)^2]} - \frac{Q_{ra}(Y_N + Y_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a - X_N)^2 + (Y_a + Y_N)^2]}$$

$$\vec{E}_Y(r,1) = \frac{(0.3869x10^{-8})(1-13)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2 + (13-1)^2]} - \frac{(0.3869x10^{-8})(1+13)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2 + (13+1)^2]}$$

$$= -0.801$$

$$\vec{E}_Y(r,2) = \frac{(-0.2082x10^{-8})(1-13)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(0-35)^2 + (13-1)^2]} - \frac{(-0.2082x10^{-8})(1+13)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(0-35)^2 + (13+1)^2]}$$

$$= 0.696$$

$$\vec{E}_Y(r,3) = \frac{(-0.1619x10^{-8})(1-13)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2 + (13-1)^2]} - \frac{(-0.1619x10^{-8})(1+13)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2 + (13+1)^2]}$$

$$= 0.9903$$

$$\vec{E}_Y(r,4)=\frac{(-0.0166x10^{-8})(1-26.60)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2+(26.60-1)^2]}-\frac{(-0.0166x10^{-8})(1+26.60)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2+(26.60+1)^2]}$$

$$=0.0568$$

$$\vec{E}_Y(r,5)=\frac{(-0.0156x10^{-8})(1-26.60)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2+(26.60-1)^2]}-\frac{(-0.0156x10^{-8})(1+26.60)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(10.65-35)^2+(26.60+1)^2]}$$

$$=-0.1140$$

$$EYTR=\vec{E}_Y(r,1)+\vec{E}_Y(r,2)+\vec{E}_Y(r,3)+\vec{E}_Y(r,4)+\vec{E}_Y(r,5)$$

$$EYTR=(-0.801)+(0.696)+(0.9903)+(0.0568)+(-0.1140)$$

$$EYTR=0.8276$$

ในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ

$$\vec{E}_Y(i,a)=\frac{Q_{ia}(Y_N-Y_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a-X_N)^2+(Y_a-Y_N)^2]}-\frac{Q_{ia}(Y_N+Y_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a-X_N)^2+(Y_a+Y_N)^2]}$$

$$\vec{E}_Y(i,1)=\frac{(-0.3606x10^{-8})(1-13)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2+(13-1)^2]}-\frac{(-0.3606x10^{-8})(1+13)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-10.65-35)^2+(13+1)^2]}$$

$$=0.0756$$

$$\vec{E}_Y(i,2)=\frac{(0.3606x10^{-8})(1-13)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(0-35)^2+(13-1)^2]}-\frac{(0.3606x10^{-8})(1+13)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(0-35)^2+(13+1)^2]}$$

$$=-1.2068$$

$$\vec{E}_Y(i,3)=\frac{(-0.3533\text{x}10^{-8})(1-13)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(10.65-35)^2+(13-1)^2]}-\frac{(-0.3533\text{x}10^{-8})(1+13)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(10.65-35)^2+(13+1)^2]}$$

$$=2.1611$$

$$\vec{E}_Y(i,4)=\frac{(-0.0085\text{x}10^{-8})(1-26.60)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(-10.65-35)^2+(26.60-1)^2]}-\frac{(-0.0085\text{x}10^{-8})(1+26.60)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(-10.65-35)^2+(26.60+1)^2]}$$

$$=0.0291$$

$$\vec{E}_Y(i,5)=\frac{(-0.0102\text{x}10^{-8})(1-26.60)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(10.65-35)^2+(26.60-1)^2]}-\frac{(-0.0102\text{x}10^{-8})(1+26.60)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(10.65-35)^2+(26.60+1)^2]}$$

$$=-0.075$$

$$\text{EYTI}=\vec{E}_Y(i,1)+\vec{E}_Y(i,2)+\vec{E}_Y(i,3)+\vec{E}_Y(i,4)+\vec{E}_Y(i,5)$$

$$\text{EYTI}=(0.0756)+(-1.2068)+(2.1611)+(0.0291)+(-0.075)$$

$$\text{EYTI}=0.9841$$

ค่าของสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดขึ้นในแนวแกน X และ Y ซึ่งมีทั้งขนาดและทิศทางได้ ดังนี้

$$E_X=\sqrt{[(\text{EXTR})^2+(\text{EXTI})^2]}$$

$$=\sqrt{[(-0.0635)^2+(-0.0789)^2]}$$

$$=0.1012$$

$$\theta_X=\tan^{-1}(\text{EXTI}/\text{EXTR})$$

$$=\tan^{-1}(-0.0789/-0.0635)$$

$$=51.17$$

$$E_Y = \sqrt{[(EYTR)^2 + (EYTI)^2]}$$
$$= \sqrt{[(0.8276)^2 + (0.9841)^2]}$$
$$= 1.2859$$

$$\theta_Y = \tan^{-1}(EYTI / EYTR)$$
$$= \tan^{-1}(0.9841 / 0.8276)$$
$$= 49.93$$

ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดเมื่อ $dE^2 / dt = 0$ ดังนั้น

$$2\omega t = \tan^{-1}\left[-\frac{(E_X^2 . \sin(2\theta_X) + E_Y^2 . \sin(2\theta_Y))}{(E_X^2 . \cos(2\theta_X) + E_Y^2 . \cos(2\theta_Y))} \right]$$

$$2\omega t = \tan^{-1}\left[-\frac{(0.1012)^2 \sin(2x51.17) + (1.2859)^2 . \sin(2x49.93))}{(0.1012)^2 . \cos(2x51.17) + (1.2859)^2 . \cos(2x49.93))} \right]$$
$$\omega t = -40.06$$

$$E_{max} = \sqrt{(E_X . \cos(\omega t + \theta_X))^2 + (E_Y . \cos(\omega t + \theta_Y))^2}$$

$$= \sqrt{(0.1012 . \cos(-40.06 + 51.17))^2 + (1.2859 . \cos(-40.06 + 49.93))^2}$$
$$= 1.2707 kV / m$$

และมุมของสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ

$$\theta_{max} = \tan^{-1}\left[\frac{E_Y \cos(\omega t + \theta_Y)}{E_X \cos(\omega t + \theta_X)} \right]$$

$$= \tan^{-1}\left[\frac{1.2859 . \cos(-40.06 + 49.93)}{0.1012 . \cos(-40.06 + 51.17)} \right]$$
$$= 85.51$$

การคำนวณสนามแม่เหล็ก

ตารางที่ ก-2 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าสนามแม่เหล็ก(วงจรเดี่ยว)

ลักษณะข้อมูล	ค่าพารามิเตอร์		
		X	Y
1. ตำแหน่งสายตัวนำ	ตัวนำที่ 1 (เฟส A)	X_1 = -10.65	Y_1 = 13.00
	ตัวนำที่ 2 (เฟส B)	X_2 = 0.0	Y_2 = 13.00
	ตัวนำที่ 3 (เฟส C)	X_3 = 10.65	Y_3 = 13.00
	ตัวนำที่4(กราวด์1)	X_4 = -10.65	Y_4 = 26.60
	ตัวนำที่5(กราวด์1)	X_5 = 10.65	Y_5 = 26.60
2. กระแสไฟฟ้าของสายส่ง (กระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ)		ขนาด	มุม
	ตัวนำที่ 1 (เฟส A)	I_1 = 3.15 kA	0 °
	ตัวนำที่ 2 (เฟส B)	I_2 =3.15 kA	120 °
	ตัวนำที่ 3 (เฟส C)	I_3 = 3.15 kA	-120 °
	ตัวนำที่4(กราวด์1)	I_4 = 0.0 kA	0 °
	ตัวนำที่5(กราวด์1)	I_5 = 0.0 kA	0 °

ในการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าของสายส่งในส่วนที่เป็นจำนวนจริงและส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ ดังนั้นค่าของกระแสไฟฟ้าของสายส่งจะมีค่า ดังนี้

$I_{r1} = 3.15(\cos 0^o)$	=3.15 kA	$I_{i1} = 3.15(\sin 0^o)$	= 0 kA
$I_{r2} = 3.15(\cos 120^o)$	=-1.575 kA	$I_{i2} = 3.15(\sin 120^o)$	= 2.727 kA
$I_{r3} = 3.15(\cos -120^o)$	=-1.575 kA	$I_{i3} = 3.15(\sin -120^o)$	= -2.727 kA
$I_{r4} = 0$	= 0 kA	$I_{i4} = 0$	= 0 kA
$I_{r5} = 0$	= 0 kA	$I_{i5} = 0$	= 0 kA

จากสมการที่(2.19)และ(2.21) เราสามารถหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวแกน X จากสายส่งไฟฟ้าที่ 1,2,3,4 และ 5 ณ.ตำแหน่ง 35 เมตรจากแนวสายส่ง (X_N)ได้ ดังนี้

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจริง</u>

$$\vec{B}_X(r,a) = \frac{\mu.I_{ra}.(y_a - y_N)}{(2.\pi).[(x_N - x_a)^2 + (y_N - y_a)^2]}$$

เมื่อ $\mu = 4\pi x10^{-7}$ Henry/m

$$\vec{B}_X(r,1) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(3.15x10^3).(13-1)}{(2\pi).[(35+10.65)^2 + (1-13)^2]}$$
$$= 3.3933x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(r,2) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^3).(13-1)}{(2\pi).[(35-0)^2 + (1-13)^2]}$$
$$= -2.7611x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(r,3) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^3).(13-1)}{(2\pi).[(35-10.65)^2 + (1-13)^2]}$$
$$= -5.1294x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(r,4) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(26.6-1)}{(2\pi).[(35+10.65)^2 + (1-26.6)^2]}$$
$$= 0$$

$$\vec{B}_X(r,5) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(26.6-1)}{(2\pi).[(35-10.65)^2 + (1-26.6)^2]}$$
$$= 0$$

$$BXTR = \vec{B}_X(r,1) + \vec{B}_X(r,2) + \vec{B}_X(r,3) + \vec{B}_X(r,4) + \vec{B}_X(r,5)$$

$$BXTR = (3.3933x10^{-6}) + (-2.7611x10^{-6}) + (-5.1294x10^{-6}) + (0) + (0)$$

$$BXTR = -4.4973x10^{-6}$$

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ</u>

$$\vec{B}_X(i,a) = \frac{\mu.I_{ia}.(y_a - y_N)}{(2.\pi).[(x_N - x_a)^2 + (y_N - y_a)^2]}$$

เมื่อ $\mu = 4\pi x10^{-7}$ Henry/m

$$\vec{B}_X(i,1) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(13-1)}{(2\pi).[(35+10.65)^2 + (1-13)^2]}$$

$$= 0$$

$$\vec{B}_X(i,2) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(2.727x10^3).(13-1)}{(2\pi).[(35-0)^2 + (1-13)^2]}$$

$$= 4.7824x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(i,3) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-2.727x10^3).(13-1)}{(2\pi).[(35-10.65)^2 + (1-13)^2]}$$

$$= -8.8845x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(i,4) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(26.6-1)}{(2\pi).[(35+10.65)^2 + (1-26.6)^2]}$$

$$= 0$$

$$\vec{B}_X(i,5) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(26.6-1)}{(2\pi).[(35-10.65)^2 + (1-26.6)^2]}$$

$$= 0$$

$$BXTI = \vec{B}_X(i,1) + \vec{B}_X(i,2) + \vec{B}_X(i,3) + \vec{B}_X(i,4) + \vec{B}_X(i,5)$$

$$BXTI = (0) + (4.7824x10^{-6}) + (-8.8845x10^{-6}) + (0) + (0)$$

$$BXTI = -4.102x10^{-6}$$

จากสมการที่(2.20)และ(2.21) เราสามารถหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y จากสายส่งไฟฟ้าที่ 1,2,3,4 และ 5 ณ.ตำแหน่ง 35 เมตรจากแนวสายส่ง (X_N)ได้ ดังนี้

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจริง</u>

$$\vec{B}_Y(r,a) = \frac{\mu.I_{ra}.(x_a - x_N)}{(2.\pi).[(x_N - x_a)^2 + (y_N - y_a)^2]}$$

เมื่อ $\mu = 4\pi x10^{-7}$ Henry/m

$$\vec{B}_Y(r,1) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(3.15x10^3).(-10.65 - 35)}{(2\pi).[(35 + 10.65)^2 + (1 - 13)^2]}$$
$$= -1.2909x10^{-5}$$

$$\vec{B}_Y(r,2) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^3).(0 - 35)}{(2\pi).[(35 - 0)^2 + (1 - 13)^2]}$$
$$= 8.0533x10^{-6}$$

$$\vec{B}_Y(r,3) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^3).(10.65 - 35)}{(2\pi).[(35 - 10.65)^2 + (1 - 13)^2]}$$
$$= 1.0408x10^{-5}$$

$$\vec{B}_Y(r,4) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(-10.65 - 35)}{(2\pi).[(35 + 10.65)^2 + (1 - 26.6)^2]}$$
$$= 0$$

$$\vec{B}_Y(r,5) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(10.65-35)}{(2\pi).[(35-10.65)^2+(1-26.6)^2]}$$

$$=0$$

$$BYTR = \vec{B}_Y(r,1)+\vec{B}_Y(r,2)+\vec{B}_Y(r,3)+\vec{B}_Y(r,4)+\vec{B}_Y(r,5)$$

$$BYTR = (-1.2909x10^{-5})+(8.0533x10^{-6})+(1.0408x10^{-5})+(0)+(0)$$

$$BYTR = 5.5532x10^{-6}$$

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ</u>

$$\vec{B}_Y(i,a) = \frac{\mu.I_{ia}.(x_a - x_N)}{(2.\pi).[(x_N - x_a)^2+(y_N - y_a)^2]}$$

เมื่อ $\mu = 4\pi x10^{-7}$ Henry/m

$$\vec{B}_Y(i,1) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(-10.65-35)}{(2\pi).[(35+10.65)^2+(1-13)^2]}$$

$$=0$$

$$\vec{B}_Y(i,2) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(2.727x10^3).(0-35)}{(2\pi).[(35-0)^2+(1-13)^2]}$$

$$=-1.3949x10^{-6}$$

$$\vec{B}_Y(i,3) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-2.727x10^3).(10.65-35)}{(2\pi).[(35-10.65)^2+(1-13)^2]}$$

$$=1.8028x10^{-6}$$

$$\vec{B}_Y(i,4) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(-10.65-35)}{(2\pi).[(35+10.65)^2+(1-26.6)^2]}$$

$$=0$$

$$\vec{B}_Y(i,5) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(10.65-35)}{(2\pi).[(35-10.65)^2+(1-26.6)^2]}$$

$$= 0$$

$$BYTI = \vec{B}_Y(i,1) + \vec{B}_Y(i,2) + \vec{B}_Y(i,3) + \vec{B}_Y(i,4) + \vec{B}_Y(i,5)$$

$$BYTI = (0) + (-1.3949x10^{-6}) + (1.8028x10^{-6}) + (0) + (0)$$

$$BYTI = 4.0793x10^{-6}$$

หาค่าของสนามแม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้นในแนวแกน X และ Y ซึ่งมีทั้งขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กได้ ดังนี้

$$B_X = \sqrt{[(BXTR)^2 + (BXTI)^2]}$$

$$= \sqrt{[(-4.4973x10^{-6})^2 + (-4.102x10^{-6})^2]}$$

$$= 6.087x10^{-6}$$

$$\theta_X = \tan^{-1}(BXTI / BXTR)$$

$$= \tan^{-1}((-4.4973x10^{-6})/(-4.102x10^{-6}))$$

$$= 47.63$$

$$B_Y = \sqrt{[(BYTR)^2 + (BYTI)^2]}$$

$$= \sqrt{[(5.5532x10^{-6})^2 + (4.0793x10^{-6})^2]}$$

$$= 6.8904x10^{-6}$$

$$\theta_Y = \tan^{-1}(BYTI / BYTR)$$

$$= \tan^{-1}(5.5532x10^{-6} / 4.0793x10^{-6})$$

$$= 53.69$$

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดเมื่อ $dB^2 / dt = 0$ ดังนั้น

$$2\omega t = \tan^{-1}\left[-\frac{(B_X^2.\sin(2\theta_X) + B_Y^2.\sin(2\theta_Y))}{(B_X^2.\cos(2\theta_X) + B_Y^2.\cos(2\theta_Y))}\right]$$

$$2\omega t = \tan^{-1}\left[-\frac{(6.087x10^{-6})^2 \sin(2x47.63) + (6.8904x10^{-6})^2.\sin(2x53.69))}{(6.087x10^{-6})^2.\cos(2x47.63) + (6.8904x10^{-6})^2.\cos(2x53.69))}\right]$$

$$\omega t = -38.96$$

$$B_{max} = \sqrt{(B_X.\cos(\omega t + \theta_X))^2 + (B_Y.\cos(\omega t + \theta_Y))^2}$$

$$= \sqrt{(6.087x10^{-6}.\cos(-38.96 + 47.63))^2 + (6.8904x10^{-6}.\cos(-38.96 + 53.69))^2}$$

$$= 91.94\,\text{mGauss}$$

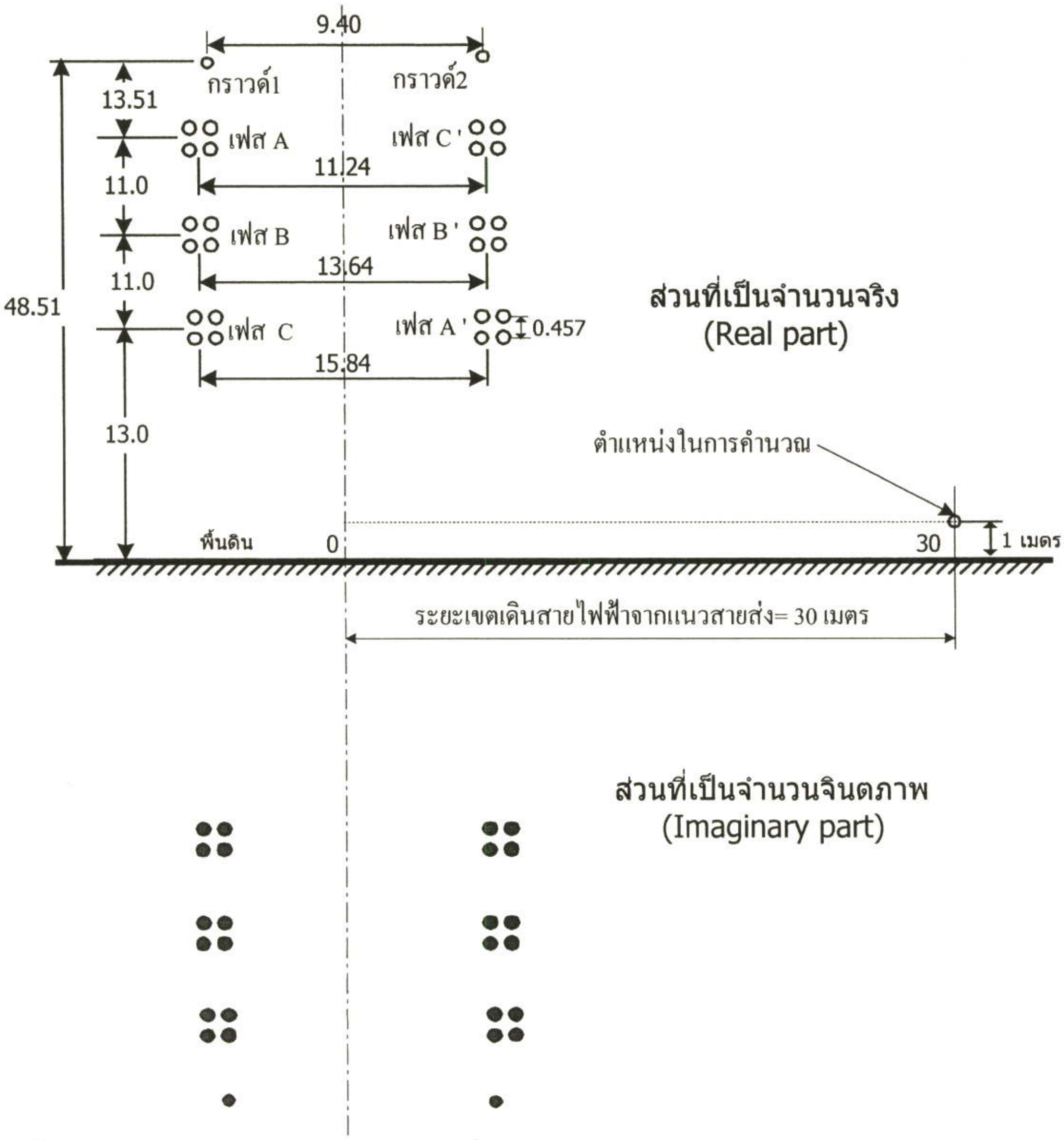
และมุมของสนามแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับ

$$\theta_{max} = \tan^{-1}\left[\frac{B_Y \cos(\omega t + \theta_Y)}{B_X \cos(\omega t + \theta_X)}\right]$$

$$= \tan^{-1}\left[\frac{(6.8904x10^{-6}).\cos(62.98 + 53.69)}{(6.087x10^{-6}).\cos(62.98 + 47.63)}\right]$$

$$= 85.34$$

2 สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่



รูปที่ ก-2 ภาพแนวขวางของตำแหน่งตัวนำที่ตำแหน่งตกท้องช้างของสายส่ง 500 kVวงจรคู่

การคำนวณสนามไฟฟ้า

ตารางที่ ก-3 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าสนามไฟฟ้า(วงจรคู่)

ลักษณะข้อมูล	ค่าพารามิเตอร์		
		X	Y
1. ตำแหน่งสายตัวนำ	ตัวนำที่ 1 (เฟส A)	X_1 = -5.620	Y_1 = 35.00
	ตัวนำที่ 2 (เฟส B)	X_2 = -6.820	Y_2 = 24.00
	ตัวนำที่ 3 (เฟส C)	X_3 = -7.920	Y_3 = 13.00
	ตัวนำที่ 4 (เฟส C')	X_4 = 5.620	Y_4 = 35.00
	ตัวนำที่ 5 (เฟส B')	X_5 = 6.820	Y_5 = 24.00
	ตัวนำที่ 6 (เฟส C')	X_6 = 7.920	Y_6 = 13.00
	ตัวนำที่7(กราวด์1)	X_7 = -4.70	Y_7 = 48.51
	ตัวนำที่8กราวด์1)	X_8 = 4.70	Y_8 = 48.51
2. แรงดันของสายส่ง (แรงดันสูงสุดของระบบ)		ขนาด	มุม
	ตัวนำที่ 1 (เฟส A)	V_1 = 525 kV	0 °
	ตัวนำที่ 2 (เฟส B)	V_2 = 525 kV	120 °
	ตัวนำที่ 3 (เฟส C)	V_3 = 525 kV	-120 °
	ตัวนำที่ 4 (เฟส C')	V_4 = 525 kV	-120 °
	ตัวนำที่ 5 (เฟส B')	V_5 = 525 kV	120 °
	ตัวนำที่ 6 (เฟส C')	V_6 = 525 kV	0 °
	ตัวนำที่7(กราวด์1)	V_7 = 0.0 kV	0 °
	ตัวนำที่8กราวด์1)	V_8 = 0.0 kV	0 °

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่ประกอบด้วยสายตัวนำไฟฟ้าแบบควบ 4-เส้นขนาด 795 MCM ACSR/GA (CONDOR) จำนวน 3 เฟส และสายโอเวอร์เฮดกราวด์ขนาด 3/8 “ (EHS) จำนวน 2 เส้น โดยที่สายตัวนำไฟฟ้าเป็นสายแบบควบดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลของสายควบสามารถหาได้จาก

$$D_{eq} = D.\sqrt[n]{\frac{n.d}{D}}$$

เมื่อ D = ระยะห่างสายควบ

= 0.457 m

n = จำนวนสายควบ

= 4

d = เส้นผ่าศูนย์กลางของสายไฟขนาด 795 MCM ACSR/GA

= 0.02772 m

$$D_{eq} = (0.457).\sqrt[4]{\frac{(4 \mathrm{x} 0.02772)}{0.457}}$$

$$= 0.3207 \quad \mathrm{m}$$

ค่าประจุไฟฟ้า (Q) ที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV วงจรคู่สามารถหาได้จากสมการที่ (2.4) ดังนี้

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

โดยที่ประจุไฟฟ้า (Q) และแรงดันไฟฟ้า (V) จะประกอบด้วยส่วนที่เป็นจำนวนจริงและส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ ดังนั้นสมการที่ (2.10) จะเป็น

$$\begin{bmatrix} Q_{r1} \\ Q_{r2} \\ Q_{r3} \\ Q_{r4} \\ Q_{r5} \\ Q_{r6} \\ Q_{r7} \\ Q_{r8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} & P_{17} & P_{18} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} & P_{27} & P_{28} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} & P_{37} & P_{38} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} & P_{46} & P_{47} & P_{48} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} & P_{56} & P_{57} & P_{58} \\ P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & P_{66} & P_{67} & P_{68} \\ P_{71} & P_{72} & P_{73} & P_{74} & P_{75} & P_{76} & P_{77} & P_{78} \\ P_{81} & P_{82} & P_{83} & P_{84} & P_{85} & P_{86} & P_{87} & P_{88} \end{bmatrix}^{-1} . \begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \\ V_{r4} \\ V_{r5} \\ V_{r6} \\ V_{r7} \\ V_{r8} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{i1} \\ Q_{i2} \\ Q_{i3} \\ Q_{i4} \\ Q_{i5} \\ Q_{i6} \\ Q_{i7} \\ Q_{i8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & P_{15} & P_{16} & P_{17} & P_{18} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} & P_{25} & P_{26} & P_{27} & P_{28} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} & P_{35} & P_{36} & P_{37} & P_{38} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} & P_{45} & P_{46} & P_{47} & P_{48} \\ P_{51} & P_{52} & P_{53} & P_{54} & P_{55} & P_{56} & P_{57} & P_{58} \\ P_{61} & P_{62} & P_{63} & P_{64} & P_{65} & P_{66} & P_{67} & P_{68} \\ P_{71} & P_{72} & P_{73} & P_{74} & P_{75} & P_{76} & P_{77} & P_{78} \\ P_{81} & P_{82} & P_{83} & P_{84} & P_{85} & P_{86} & P_{87} & P_{88} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{i1} \\ V_{i2} \\ V_{i3} \\ V_{i4} \\ V_{i5} \\ V_{i6} \\ V_{i7} \\ V_{i8} \end{bmatrix}$$

เมื่อเมตริกซ์ P เป็นค่าสัมประสิทธิ์ Maxwell potential coefficient ซึ่งมีสมาชิกในเมตริกซ์เท่ากับจำนวนของตัวนำทั้งหมดที่พิจารณา และค่าเอลิเมนต์ภายในเมตริกซ์ P สามารถหาได้ ดังนี้

$$P_{11} = \frac{1}{2\pi\varepsilon} \ln\left[\frac{(4x35.0)}{0.3207}\right]$$

$$P_{11} = \frac{1}{(2\pi x 8.854x10^{-12})} \ln\left[\frac{(4x35.0)}{0.3207}\right]$$

$$P_{11} = 1.0942x10^{11}$$

$$P_{12} = \frac{1}{(2\pi x 8.854x10^{-12})} \ln\left[\frac{(-5.620+6.820)^2 + (35.0+24.0)^2}{(-5.620+6.820)^2 + (35.0-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{12} = 0.3013x10^{11}$$

$$P_{13} = \frac{1}{(2\pi x 8.854x10^{-12})} \ln\left[\frac{(-5.620+7.920)^2 + (35.0+13.0)^2}{(-5.620+7.920)^2 + (35.0-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{13} = 0.1397x10^{11}$$

$$P_{14} = \frac{1}{(2\pi x 8.854x10^{-12})} \ln\left[\frac{(-5.620-5.620)^2 + (35.0+35.0)^2}{(-5.620-5.620)^2 + (35.0-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{14} = 0.3315x10^{11}$$

$$P_{15} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-5.620-6.820)^2+(35.0+24.0)^2}{(-5.620-6.820)^2+(35.0-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{15} = 0.2321x10^{11}$$

$$P_{16} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-5.620-7.920)^2+(35.0+13.0)^2}{(-5.620-7.920)^2+(35.0-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{16} = 0.1184x10^{11}$$

$$P_{17} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-5.620+4.70)^2+(35.0+48.51)^2}{(-5.620+4.70)^2+(35.0-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{17} = 0.3274x10^{11}$$

$$P_{18} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-5.620-4.70)^2+(35.0+48.51)^2}{(-5.620-4.70)^2+(35.0-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{18} = 0.2878x10^{11}$$

$$P_{21} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-6.820+5.620)^2+(24.0+35.0)^2}{(-6.820+5.620)^2+(24.0-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{21} = 0.3013x10^{11}$$

$$P_{22} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4x24.0)}{0.3207}\right]$$

$$P_{22} = 1.0262x10^{11}$$

$$P_{23} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-6.820+7.920)^2+(24.0+13.0)^2}{(-6.820+7.920)^2+(24.0-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{23} = 0.2175x10^{11}$$

$$P_{24} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-6.820-5.620)^2+(24.0+35.0)^2}{(-6.820-5.620)^2+(24.0-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{24} = 0.2321 x 10^{11}$$

$$P_{25} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-6.820-6.820)^2+(24.0+24.0)^2}{(-6.820-6.820)^2+(24.0-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{25} = 0.2335 x 10^{11}$$

$$P_{26} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-6.820-7.920)^2+(24.0+13.0)^2}{(-6.820-7.920)^2+(24.0-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{26} = 0.1391 x 10^{11}$$

$$P_{27} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-6.820+4.70)^2+(24.0+48.51)^2}{(-6.820+4.70)^2+(24.0-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{27} = 0.1946 x 10^{11}$$

$$P_{28} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-6.820-4.70)^2+(24.0+48.51)^2}{(-6.820-4.70)^2+(24.0-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{28} = 0.1795 x 10^{11}$$

$$P_{31} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-7.920+5.620)^2+(13.0+35.0)^2}{(-7.920+5.620)^2+(13.0-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{31} = 0.1379 x 10^{11}$$

$$P_{32} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-7.920+6.820)^2+(13.0+24.0)^2}{(-7.920+6.820)^2+(13.0-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{32} = 0.2175 x 10^{11}$$

$$P_{33} = \frac{1}{(2\pi x 8.854x10^{-12})} \ln\left[\frac{(4x13.0)}{0.3207}\right]$$

$$P_{33} = 0.9159x10^{11}$$

$$P_{34} = \frac{1}{(2\pi x 8.854x10^{-12})} \ln\left[\frac{(-7.920 - 5.620)^2 + (13.0 + 35.0)^2}{(-7.920 - 5.620)^2 + (13.0 - 35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{34} = 0.1184x10^{11}$$

$$P_{35} = \frac{1}{(2\pi x 8.854x10^{-12})} \ln\left[\frac{(-7.920 - 6.820)^2 + (13.0 + 24.0)^2}{(-7.920 - 6.820)^2 + (13.0 - 24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{35} = 0.1391x10^{11}$$

$$P_{36} = \frac{1}{(2\pi x 8.854x10^{-12})} \ln\left[\frac{(-7.920 - 7.920)^2 + (13.0 + 13.0)^2}{(-7.920 - 7.920)^2 + (13.0 - 13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{36} = 0.1176x10^{11}$$

$$P_{37} = \frac{1}{(2\pi x 8.854x10^{-12})} \ln\left[\frac{(-7.920 + 4.70)^2 + (13.0 + 48.51)^2}{(-7.920 + 4.70)^2 + (13.0 - 48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{37} = 0.0984x10^{11}$$

$$P_{38} = \frac{1}{(2\pi x 8.854x10^{-12})} \ln\left[\frac{(-7.920 - 4.70)^2 + (13.0 + 48.51)^2}{(-7.920 - 4.70)^2 + (13.0 - 48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{38} = 0.0919x10^{11}$$

$$P_{41} = \frac{1}{(2\pi x 8.854x10^{-12})} \ln\left[\frac{(5.620 + 5.620)^2 + (35.0 + 35.0)^2}{(5.620 + 5.620)^2 + (35.0 - 35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{41} = 0.3315x10^{11}$$

$$P_{42} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(5.620+6.820)^2+(35.0+24.0)^2}{(5.620+6.820)^2+(35.0-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{42} = 0.2321 x 10^{11}$$

$$P_{43} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(5.620+7.920)^2+(35.0+13.0)^2}{(5.620+7.920)^2+(35.0-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{43} = 0.1184 x 10^{11}$$

$$P_{44} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4 x 35.0)}{0.3207}\right]$$

$$P_{44} = 1.0942 x 10^{11}$$

$$P_{45} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(5.620-6.820)^2+(35.0+24.0)^2}{(5.620-6.820)^2+(35.0-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{45} = 0.3013 x 10^{11}$$

$$P_{46} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(5.620-7.920)^2+(35.0+13.0)^2}{(5.620-7.920)^2+(35.0-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{46} = 0.1397 x 10^{11}$$

$$P_{47} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(5.620+4.70)^2+(35.0+48.51)^2}{(5.620+4.70)^2+(35.0-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{47} = 0.2878 x 10^{11}$$

$$P_{48} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(5.620-4.70)^2+(35.0+48.51)^2}{(5.620-4.70)^2+(35.0-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{48} = 0.3274 x 10^{11}$$

$$P_{51} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(6.820+5.620)^2+(24.0+35.0)^2}{(6.820+5.620)^2+(24.0-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{51} = 0.2321 x 10^{11}$$

$$P_{52} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(6.820+6.820)^2+(24.0+24.0)^2}{(6.820+6.820)^2+(24.0-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{52} = 0.2335 x 10^{11}$$

$$P_{53} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(6.820+7.920)^2+(24.0+13.0)^2}{(6.820+7.920)^2+(24.0-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{53} = 0.1391 x 10^{11}$$

$$P_{54} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(6.820-5.620)^2+(24.0+35.0)^2}{(6.820-5.620)^2+(24.0-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{54} = 0.3013 x 10^{11}$$

$$P_{55} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4 x 24.0)}{0.3207}\right]$$

$$P_{55} = 1.0262 x 10^{11}$$

$$P_{56} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(6.820-7.920)^2+(24.0+13.0)^2}{(6.820-7.920)^2+(24.0-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{56} = 0.2175 x 10^{11}$$

$$P_{57} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(6.820+4.70)^2+(24.0+48.51)^2}{(6.820+4.70)^2+(24.0-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{57} = 0.1795 x 10^{11}$$

$$P_{58} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(6.820-4.70)^2+(24.0+48.51)^2}{(6.820-4.70)^2+(24.0-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{58} = 0.1946 x 10^{11}$$

$$P_{61} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(7.920+5.620)^2+(13.0+35.0)^2}{(7.920+5.620)^2+(13.0-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{61} = 0.1184 x 10^{11}$$

$$P_{62} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(7.920+6.820)^2+(13.0+24.0)^2}{(7.920+6.820)^2+(13.0-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{62} = 0.1391 x 10^{11}$$

$$P_{63} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(7.920+7.920)^2+(13.0+13.0)^2}{(7.920+7.920)^2+(13.0-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{63} = 0.1176 x 10^{11}$$

$$P_{64} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(7.920-5.620)^2+(13.0+35.0)^2}{(7.920-5.620)^2+(13.0-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{64} = 0.1397 x 10^{11}$$

$$P_{65} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(7.920-6.820)^2+(13.0+24.0)^2}{(7.920-6.820)^2+(13.0-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{65} = 0.2175 x 10^{11}$$

$$P_{66} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4 x 13.0)}{0.3207}\right]$$

$$P_{66} = 0.9159 x 10^{11}$$

$$P_{67} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(7.920+4.70)^2+(13.0+48.51)^2}{(7.920+4.70)^2+(13.0-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{67} = 0.0919 x 10^{11}$$

$$P_{68} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(7.920-4.70)^2+(13.0+48.51)^2}{(7.920-4.70)^2+(13.0-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{68} = 0.0984 x 10^{11}$$

$$P_{71} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-4.70+5.620)^2+(48.51+35.0)^2}{(-4.70+5.620)^2+(48.51-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{71} = 0.3274 x 10^{11}$$

$$P_{72} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-4.70+6.820)^2+(48.51+24.0)^2}{(-4.70+6.820)^2+(48.51-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{72} = 0.1946 x 10^{11}$$

$$P_{73} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-4.70+7.920)^2+(48.51+13.0)^2}{(-4.70+7.920)^2+(48.51-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{73} = 0.0984 x 10^{11}$$

$$P_{74} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-4.70-5.620)^2+(48.51+35.0)^2}{(-4.70-5.620)^2+(48.51-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{74} = 0.2878 x 10^{11}$$

$$P_{75} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-4.70-6.820)^2+(48.51+24.0)^2}{(-4.70-6.820)^2+(48.51-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{75} = 0.1795 x 10^{11}$$

$$P_{76} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-4.70-7.920)^2+(48.51+13.0)^2}{(-4.70-7.920)^2+(48.51-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{76} = 0.0919 x 10^{11}$$

$$P_{77} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4 x 48.51)}{0.3207}\right]$$

$$P_{77} = 1.7933 x 10^{11}$$

$$P_{78} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(-4.70-4.70)^2+(48.51+48.51)^2}{(-4.70-4.70)^2+(48.51-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{78} = 0.4210 x 10^{11}$$

$$P_{81} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4.70+5.620)^2+(48.51+35.0)^2}{(4.70+5.620)^2+(48.51-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{81} = 0.2878 x 10^{11}$$

$$P_{82} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4.70+6.820)^2+(48.51+24.0)^2}{(4.70+6.820)^2+(48.51-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{82} = 0.1795 x 10^{11}$$

$$P_{83} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4.70+7.920)^2+(48.51+13.0)^2}{(4.70+7.920)^2+(48.51-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{83} = 0.0919 x 10^{11}$$

$$P_{84} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4.70-5.620)^2+(48.51+35.0)^2}{(4.70-5.620)^2+(48.51-35.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{84} = 0.3274 x 10^{11}$$

$$P_{85} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4.70-6.820)^2+(48.51+24.0)^2}{(4.70-6.820)^2+(48.51-24.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{85} = 0.1946x10^{11}$$

$$P_{86} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4.70-7.920)^2+(48.51+13.0)^2}{(4.70-7.920)^2+(48.51-13.0)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{86} = 0.0984x10^{11}$$

$$P_{87} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4.70+4.70)^2+(48.51+48.51)^2}{(4.70+4.70)^2+(48.51-48.51)^2}\right]^{1/2}$$

$$P_{87} = 0.4210x10^{11}$$

$$P_{88} = \frac{1}{(2\pi x 8.854 x 10^{-12})} \ln\left[\frac{(4x48.51)}{0.3207}\right]$$

$$P_{88} = 1.7933x10^{11}$$

V_{r1} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\cos 0^o$	=303.1 kV	V_{i1} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\sin 0^o$	= 0 kV
V_{r2} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\cos 120^o$	=-151.5 kV	V_{i2} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\sin 120^o$	= 262.5 kV
V_{r3} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\cos -120^o$	=-151.5 kV	V_{i3} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\sin -120^o$	= -262.5 kV
V_{r4} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\cos -120^o$	=-151.5 kV	V_{i4} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\sin -120^o$	= -262.5 kV
V_{r5} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\cos 120^o$	=-151.5 kV	V_{i5} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\sin 120^o$	= 262.5 kV
V_{r6} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\cos 0^o$	=303.1 kV	V_{i6} =	$[(500x1.05)/\sqrt{3}]\sin 0^o$	= 0 kV
V_{r7} =	0	= 0 kV	V_{i7} =	0	= 0 kV
V_{r8} =	0	= 0 kV	V_{i8} =	0	= 0 kV

$$\begin{bmatrix} Q_{r1} \\ Q_{r2} \\ Q_{r3} \\ Q_{r4} \\ Q_{r5} \\ Q_{r6} \\ Q_{r7} \\ Q_{r8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0942 & 0.3013 & 0.1397 & 0.3315 & 0.2321 & 0.1184 & 0.3274 & 0.2878 \\ 0.3013 & 1.0262 & 0.2175 & 0.2321 & 0.2335 & 0.1391 & 0.1946 & 0.1795 \\ 0.1397 & 0.2175 & 0.9159 & 0.1184 & 0.1391 & 0.1176 & 0.0984 & 0.0919 \\ 0.3315 & 0.2321 & 0.1184 & 1.0942 & 0.3013 & 0.1397 & 0.2878 & 0.3274 \\ 0.2321 & 0.2335 & 0.1391 & 0.3013 & 1.0262 & 0.2175 & 0.1795 & 0.1946 \\ 0.1184 & 0.1391 & 0.1176 & 0.1397 & 0.2175 & 0.9159 & 0.0919 & 0.0984 \\ 0.3274 & 0.1946 & 0.0984 & 0.2878 & 0.1795 & 0.0919 & 1.7933 & 0.4210 \\ 0.2878 & 0.1795 & 0.0919 & 0.3274 & 0.1946 & 0.0984 & 0.4210 & 1.7933 \end{bmatrix}^{-1} x10^{11}. \begin{bmatrix} 303.1 \\ -151.5 \\ -151.5 \\ -151.5 \\ -151.5 \\ 303.1 \\ 0.0 \\ 0.0 \end{bmatrix}$$

$$QREAL = \begin{bmatrix} Q_{r1} \\ Q_{r2} \\ Q_{r3} \\ Q_{r4} \\ Q_{r5} \\ Q_{r6} \\ Q_{r7} \\ Q_{r8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4154x10^{-8} \\ -0.1974x10^{-8} \\ -0.1777x10^{-8} \\ -0.1974x10^{-8} \\ -0.1995x10^{-8} \\ 0.4085x10^{-8} \\ -0.0144x10^{-8} \\ 0.0006x10^{-8} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Q_{i1} \\ Q_{i2} \\ Q_{i3} \\ Q_{i4} \\ Q_{i5} \\ Q_{i6} \\ Q_{i7} \\ Q_{i8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0942 & 0.3013 & 0.1397 & 0.3315 & 0.2321 & 0.1184 & 0.3274 & 0.2878 \\ 0.3013 & 1.0262 & 0.2175 & 0.2321 & 0.2335 & 0.1391 & 0.1946 & 0.1795 \\ 0.1397 & 0.2175 & 0.9159 & 0.1184 & 0.1391 & 0.1176 & 0.0984 & 0.0919 \\ 0.3315 & 0.2321 & 0.1184 & 1.0942 & 0.3013 & 0.1397 & 0.2878 & 0.3274 \\ 0.2321 & 0.2335 & 0.1391 & 0.3013 & 1.0262 & 0.2175 & 0.1795 & 0.1946 \\ 0.1184 & 0.1391 & 0.1176 & 0.1397 & 0.2175 & 0.9159 & 0.0919 & 0.0984 \\ 0.3274 & 0.1946 & 0.0984 & 0.2878 & 0.1795 & 0.0919 & 1.7933 & 0.4210 \\ 0.2878 & 0.1795 & 0.0919 & 0.3274 & 0.1946 & 0.0984 & 0.4210 & 1.7933 \end{bmatrix}^{-1} x10^{11}. \begin{bmatrix} 0.0 \\ 262.5 \\ -262.5 \\ -262.5 \\ 262..5 \\ 0.0 \\ 0.0 \\ 0.0 \end{bmatrix}$$

$$QIMAG = \begin{bmatrix} Q_{i1} \\ Q_{i2} \\ Q_{i3} \\ Q_{i4} \\ Q_{i5} \\ Q_{i6} \\ Q_{i7} \\ Q_{i8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0118x10^{-8} \\ 0.3427x10^{-8} \\ -0.3691x10^{-8} \\ -0.3657x10^{-8} \\ 0.3399x10^{-8} \\ -0.0306x10^{-8} \\ 0.0076x10^{-8} \\ 0.0163x10^{-8} \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (2.10) เราสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวแกน X ที่เกิดจากสายไฟฟ้าที่ 1,2,3,4,5,6,7 และ 8 ณ.ตำแหน่ง 30 เมตรจากแนวสายส่ง (X_N)ได้ ดังนี้

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจริง</u>

$$\vec{E}_X(r,a) = \frac{Q_{ra}(X_N - X_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a - X_N)^2 + (Y_a - Y_N)^2]} - \frac{Q_{ra}(X_N - X_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a - X_N)^2 + (Y_a + Y_N)^2]}$$

$$\vec{E}_X(r,1) = \frac{(0.4154x10^{-8})(30 + 5.62)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-5.62 - 30)^2 + (35.0 - 1)^2]} - \frac{(0.4154x10^{-8})(30 + 5.62)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-5.62 - 30)^2 + (35 + 1)^2]}$$

$$= 0.06$$

$$\vec{E}_X(r,2) = \frac{(-0.1947x10^{-8})(30 + 6.82)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-6.82 - 30)^2 + (24 - 1)^2]} - \frac{(-0.1947x10^{-8})(30 + 6.82)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-6.82 - 30)^2 + (24 + 1)^2]}$$

$$= -0.033$$

$$\vec{E}_X(r,3) = \frac{(-0.1777x10^{-8})(30+7.92)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-7.92-30)^2+(13-1)^2]} - \frac{(-0.1777x10^{-8})(30+7.92)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-7.92-30)^2+(13+1)^2]}$$

$$= -0.024$$

$$\vec{E}_X(r,4) = \frac{(-0.1974x10^{-8})(30-5.62)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(5.62-30)^2+(35-1)^2]} - \frac{(-0.0166x10^{-8})(30-5.62)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(5.62-30)^2+(35+1)^2]}$$

$$= -0.037$$

$$\vec{E}_X(r,5) = \frac{(-0.1995x10^{-8})(30-6.82)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(6.82-30)^2+(24-1)^2]} - \frac{(-0.1995x10^{-8})(30-6.82)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(6.82-30)^2+(24+1)^2]}$$

$$= -0.064$$

$$\vec{E}_X(r,6) = \frac{(0.4085x10^{-8})(30-7.92)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(7.92-30)^2+(13-1)^2]} - \frac{(0.4085x10^{-8})(30-7.92)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(7.92-30)^2+(13+1)^2]}$$

$$= 0.195$$

$$\vec{E}_X(r,7) = \frac{(-0.0144x10^{-8})(30+4.70)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-4.70-30)^2+(48.51-1)^2]} - \frac{(-0.0144x10^{-8})(30+4.70)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-4.70-30)^2+(48.51+1)^2]}$$

$$= -1.378x10^{-3}$$

$$\vec{E}_X(r,8)=\frac{(0.0006x10^{-8})(30-4.70)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(4.70-30)^2+(48.51-1)^2]}-\frac{(0.0006x10^{-8})(30-4.70)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(4.70-30)^2+(48.51+1)^2]}$$

$$=5.912x10^{-5}$$

$$EXTR=\vec{E}_X(r,1)+\vec{E}_X(r,2)+\vec{E}_X(r,3)+\vec{E}_X(r,4)+\vec{E}_X(r,5)+\vec{E}_X(r,6)+\vec{E}_X(r,7)+\vec{E}_X(r,8)$$

$$EXTR=(0.06)+(-0.033)+(-0.024)+(-0.037)+(-0.064)+(0.195)+(-1.378x10^{-3})+(5.912x10^{-5})$$

$$EXTR=0.095$$

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ</u>

$$\vec{E}_X(i,a)=\frac{Q_{ia}(X_N-X_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a-X_N)^2+(Y_a-Y_N)^2]}-\frac{Q_{ia}(X_N-X_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a-X_N)^2+(Y_a+Y_N)^2]}$$

$$\vec{E}_X(i,1)=\frac{(-0.0118x10^{-8})(30+5.62)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-5.62-30)^2+(35.0-1)^2]}-\frac{(-0.0118x10^{-8})(30+5.62)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-5.62-30)^2+(35+1)^2]}$$

$$=-1.70x10^{-3}$$

$$\vec{E}_X(i,2)=\frac{(0.3427x10^{-8})(30+6.82)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-6.82-30)^2+(24-1)^2]}-\frac{(0.3427x10^{-8})(30+6.82)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-6.82-30)^2+(24+1)^2]}$$

$$=0.058$$

$$\vec{E}_X(i,3)=\frac{(-0.3691x10^{-8})(30+7.92)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-7.92-30)^2+(13-1)^2]}-\frac{(-0.3691x10^{-8})(30+7.92)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-7.92-30)^2+(13+1)^2]}$$

$$=-0.051$$

$$\vec{E}_X(i,4)=\frac{(-0.3657\text{x}10^{-8})(30-5.62)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(5.62-30)^2+(35-1)^2]}-\frac{(-0.3657\text{x}10^{-8})(30-5.62)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(5.62-30)^2+(35+1)^2]}$$

$$=-0.068$$

$$\vec{E}_X(i,5)=\frac{(0.3399\text{x}10^{-8})(30-6.82)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(6.82-30)^2+(24-1)^2]}-\frac{(0.3399\text{x}10^{-8})(30-6.82)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(6.82-30)^2+(24+1)^2]}$$

$$=0.110$$

$$\vec{E}_X(i,6)=\frac{(-0.0306\text{x}10^{-8})(30-7.92)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(7.92-30)^2+(13-1)^2]}-\frac{(-0.0306\text{x}10^{-8})(30-7.92)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(7.92-30)^2+(13+1)^2]}$$

$$=-0.015$$

$$\vec{E}_X(i,7)=\frac{(0.0076\text{x}10^{-8})(30+4.70)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(-4.70-30)^2+(48.51-1)^2]}-\frac{(0.0076\text{x}10^{-8})(30+4.70)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(-4.70-30)^2+(48.51+1)^2]}$$

$$=7.27\text{x}10^{-4}$$

$$\vec{E}_X(i,8)=\frac{(0.0163\text{x}10^{-8})(30-4.70)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(4.70-30)^2+(48.51-1)^2]}-\frac{(0.0163\text{x}10^{-8})(30-4.70)}{2\pi\text{x}8.854\text{x}10^{-12}[(4.70-30)^2+(48.51+1)^2]}$$

$$=1.606\text{x}10^{-3}$$

$$EXTI = \vec{E}_X(i,1) + \vec{E}_X(i,2) + \vec{E}_X(i,3) + \vec{E}_X(i,4) + \vec{E}_X(i,5) + \vec{E}_X(i,6) + \vec{E}_X(i,7) + \vec{E}_X(i,8)$$

$$EXTI = (-1.70x10^{-3}) + (0.058) + (-0.051) + (-0.068) + (0.110) + (-0.015) + (7.27x10^{-4}) + (1.606x10^{-3})$$

$$EXTI = 0.036$$

จากสมการที่ (2.11) เราสามารถหาค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y ที่เกิดจากสายไฟฟ้าที่ 1,2,3,4,5,6,7 และ 8 ณ.ตำแหน่ง 30 เมตรจากแนวสายส่ง (X_N)ได้ ดังนี้

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจริง</u>

$$\vec{E}_Y(r,a) = \frac{Q_{ra}(Y_N - Y_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a - X_N)^2 + (Y_a - Y_N)^2]} - \frac{Q_{ra}(Y_N + Y_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a - X_N)^2 + (Y_a + Y_N)^2]}$$

$$\vec{E}_Y(r,1) = \frac{(0.4154x10^{-8})(1-35)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-5.62-30)^2 + (35-1)^2]} - \frac{(0.4154x10^{-8})(1+35)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-5.62-30)^2 + (35+1)^2]}$$

$$= -2.095$$

$$\vec{E}_Y(r,2) = \frac{(-0.1947x10^{-8})(1-24)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-6.82-30)^2 + (24-1)^2]} - \frac{(-0.1947x10^{-8})(1+24)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-6.82-30)^2 + (24+1)^2]}$$

$$= 0.869$$

$$\vec{E}_Y(r,3) = \frac{(-0.1777x10^{-8})(1-13)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-7.92-30)^2 + (13-1)^2]} - \frac{(-0.1777x10^{-8})(1+13)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-7.92-30)^2 + (13+1)^2]}$$

$$= 0.516$$

$$\vec{E}_Y(r,4) = \frac{(-0.1974x10^{-8})(1-35)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(5.62-30)^2+(35-1)^2]} - \frac{(-0.1974x10^{-8})(1+35)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(5.62-30)^2+(35+1)^2]}$$
$$= 1.365$$

$$\vec{E}_Y(r,5) = \frac{(-0.1995x10^{-8})(1-24)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(6.82-30)^2+(24-1)^2]} - \frac{(-0.1995x10^{-8})(1+24)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(6.82-30)^2+(24+1)^2]}$$
$$= 1.545$$

$$\vec{E}_Y(r,6) = \frac{(-0.4085x10^{-8})(1-13)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(7.92-30)^2+(13-1)^2]} - \frac{(-0.4085x10^{-8})(1+13)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(7.92-30)^2+(13+1)^2]}$$
$$= -2.899$$

$$\vec{E}_Y(r,7) = \frac{(-0.0144x10^{-8})(1-48.51)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-4.70-30)^2+(48.51-1)^2]} - \frac{(-0.0144x10^{-8})(1+48.51)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-4.70-30)^2+(48.51+1)^2]}$$
$$= 0.071$$

$$\vec{E}_Y(r,8) = \frac{(-0.0006x10^{-8})(1-48.51)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(4.70-30)^2+(48.51-1)^2]} - \frac{(-0.0006x10^{-8})(1+48.51)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(4.70-30)^2+(48.51+1)^2]}$$
$$= -3.496x10^{-3}$$

$$EYTR = \vec{E}_Y(r,1) + \vec{E}_Y(r,2) + \vec{E}_Y(r,3) + \vec{E}_Y(r,4) + \vec{E}_Y(r,5) + \vec{E}_Y(r,6) + \vec{E}_Y(r,7) + \vec{E}_Y(r,8)$$

$$EYTR = (-2.095) + (0.869) + (0.516) + (1.365) + (1.545) + (-2.899) + (0.071) + (-3.496x10^{-3})$$

$$EYTR = -0.633$$

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ</u>

$$\vec{E}_Y(i,a) = \frac{Q_{ia}(Y_N - Y_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a - X_N)^2 + (Y_a - Y_N)^2]} - \frac{Q_{ia}(Y_N + Y_a)}{2\pi\varepsilon[(X_a - X_N)^2 + (Y_a + Y_N)^2]}$$

$$\vec{E}_Y(i,1) = \frac{(-0.0118x10^{-8})(1-35)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(-5.62-30)^2 + (35-1)^2]} - \frac{(-0.0118x10^{-8})(1+35)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(-5.62-30)^2 + (35+1)^2]}$$

$$= 0.06$$

$$\vec{E}_Y(i,2) = \frac{(0.3427x10^{-8})(1-24)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(-6.82-30)^2 + (24-1)^2]} - \frac{(0.3427x10^{-8})(1+24)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(-6.82-30)^2 + (24+1)^2]}$$

$$= -1.529$$

$$\vec{E}_Y(i,3) = \frac{(-0.3691x10^{-8})(1-13)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(-7.92-30)^2 + (13-1)^2]} - \frac{(-0.3691x10^{-8})(1+13)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(-7.92-30)^2 + (13+1)^2]}$$

$$= 1.072$$

$$\vec{E}_Y(i,4) = \frac{(-0.3657x10^{-8})(1-35)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(5.62-30)^2 + (35-1)^2]} - \frac{(-0.3657x10^{-8})(1+35)}{2\pi x 8.854x10^{-12}[(5.62-30)^2 + (35+1)^2]}$$

$$= 2.529$$

$$\vec{E}_Y(i,5)=\frac{(0.3399x10^{-8})(1-24)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(6.82-30)^2+(24-1)^2]}-\frac{(0.3399x10^{-8})(1+24)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(6.82-30)^2+(24+1)^2]}$$

$$=-2.632$$

$$\vec{E}_Y(i,6)=\frac{(-0.0306x10^{-8})(1-13)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(7.92-30)^2+(13-1)^2]}-\frac{(-0.0306x10^{-8})(1+13)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(7.92-30)^2+(13+1)^2]}$$

$$=0.217$$

$$\vec{E}_Y(i,7)=\frac{(0.0076x10^{-8})(1-48.51)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-4.70-30)^2+(48.51-1)^2]}-\frac{(0.0076x10^{-8})(1+48.51)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(-4.70-30)^2+(48.51+1)^2]}$$

$$=-0.037$$

$$\vec{E}_Y(i,8)=\frac{(0.0163x10^{-8})(1-48.51)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(4.70-30)^2+(48.51-1)^2]}-\frac{(0.0163x10^{-8})(1+48.51)}{2\pi x8.854x10^{-12}[(4.70-30)^2+(48.51+1)^2]}$$

$$=-0.095$$

$$EYTI=\vec{E}_Y(i,1)+\vec{E}_Y(i,2)+\vec{E}_Y(i,3)+\vec{E}_Y(i,4)+\vec{E}_Y(i,5)+\vec{E}_Y(i,6)+\vec{E}_Y(i,7)+\vec{E}_Y(i,8)$$

$$EYTI=(0.06)+(-1.529)+(1.072)+(2.529)+(-2.632)+(0.217)+(-0.037)+(-0.095)$$

$$EYTI=-0.416$$

ค่าของสนามไฟฟ้ารวมที่เกิดขึ้นในแนวแกน X และ Y ซึ่งมีทั้งขนาดและทิศทางได้ ดังนี้

$$E_X=\sqrt{[(EXTR)^2+(EXTI)^2]}$$

$$=\sqrt{[(0.095)^2+(0.036)^2]}$$

$$=0.102$$

$$\theta_X=\tan^{-1}(EXTI/EXTR)$$

$$=\tan^{-1}(0.036/0.095)$$

$$=20.75$$

$$E_Y=\sqrt{[(EYTR)^2+(EYTI)^2]}$$

$$=\sqrt{[(-0.633)^2+(-0.416)^2]}$$

$$=0.757$$

$$\theta_Y=\tan^{-1}(EYTI/EYTR)$$

$$=\tan^{-1}(-0.416/-0.633)$$

$$=33.31$$

ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดเมื่อ $dE^2/dt=0$ ดังนั้น

$$2\omega t=\tan^{-1}\left[-\frac{(E_X^2.\sin(2\theta_X)+E_Y^2.\sin(2\theta_Y))}{(E_X^2.\cos(2\theta_X)+E_Y^2.\cos(2\theta_Y))}\right]$$

$$2\omega t=\tan^{-1}\left[-\frac{(0.102)^2.\sin(2x20.75)+(0.757)^2.\sin(2x33.31))}{(0.102)^2.\cos(2x20.75)+(0.757)^2.\cos(2x33.31))}\right]$$

$$\omega t=-33.09$$

$$E_{max}=\sqrt{(E_X.\cos(\omega t+\theta_X))^2+(E_Y.\cos(\omega t+\theta_Y))^2}$$

$$=\sqrt{(0.102.\cos(-33.09+20.75))^2+(0.757.\cos(-33.09+33.31))^2}$$

$$=0.7635kV/m$$

และมุมของสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับ

$$\theta_{max} = \tan^{-1}\left[\frac{E_Y \cos(\omega t + \theta_Y)}{E_X \cos(\omega t + \theta_X)}\right]$$

$$= \tan^{-1}\left[\frac{0.757.\cos(-33.09 + 33.31)}{0.102.\cos(-33.09 + 20.75)}\right]$$

$$= 82.50$$

การคำนวณสนามแม่เหล็ก

ตารางที่ ก-4 พารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณค่าสนามแม่เหล็ก(วงจรคู่)

ลักษณะข้อมูล	ค่าพารามิเตอร์		
		X	Y
1. ตำแหน่งสายตัวนำ	ตัวนำที่ 1 (เฟส A)	X_1 = -5.62	Y_1 = 35.00
	ตัวนำที่ 2 (เฟส B)	X_2 = -6.82	Y_2 = 24.00
	ตัวนำที่ 3 (เฟส C)	X_3 = -7.92	Y_3 = 13.00
	ตัวนำที่ 4 (เฟส C')	X_4 = 5.62	Y_4 = 35.00
	ตัวนำที่ 5 (เฟส B')	X_5 = 6.82	Y_5 = 24.00
	ตัวนำที่ 6 (เฟส A')	X_6 = 7.92	Y_6 = 13.00
	ตัวนำที่7(กราวด์1)	X_7 = -4.70	Y_7 = 48.51
	ตัวนำที่8(กราวด์1)	X_8 = 4.70	Y_8 = 48.51
2. กระแสไฟฟ้าของสายส่ง (กระแสไฟฟ้าสูงสุดของระบบ)		ขนาด	มุม
	ตัวนำที่ 1 (เฟส A)	I_1 = 3.15 kA	0 °
	ตัวนำที่ 2 (เฟส B)	I_2 =3.15 kA	120 °
	ตัวนำที่ 3 (เฟส C)	I_3 = 3.15 kA	-120 °
	ตัวนำที่ 4 (เฟส C')	I_4 = 3.15 kA	-120 °
	ตัวนำที่ 5 (เฟส B')	I_5 =3.15 kA	120 °
	ตัวนำที่ 6 (เฟส A')	I_6 = 3.15 kA	0 °
	ตัวนำที่7(กราวด์1)	I_7 = 0.0 kA	0 °
	ตัวนำที่8(กราวด์1)	I_8 = 0.0 kA	0 °

ในการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะพิจารณาค่ากระแสไฟฟ้าของสายส่งในส่วนที่เป็นจำนวนจริงและส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ ดังนั้นค่าของกระแสไฟฟ้าของสายส่งจะมีค่า ดังนี้

$I_{r1} = 3.15(\cos 0^o)$	=3.15 kA	$I_{i1} = 3.15(\sin 0^o)$	= 0 kA
$I_{r2} = 3.15(\cos 120^o)$	=-1.575 kA	$I_{i2} = 3.15(\sin 120^o)$	= 2.727 kA
$I_{r3} = 3.15(\cos -120^o)$	=-1.575 kA	$I_{i3} = 3.15(\sin -120^o)$	= -2.727 kA
$I_{r4} = 3.15(\cos -120^o)$	=1.575 kA	$I_{i4} = 3.15(\sin -120^o)$	= -2.727 kA
$I_{r5} = 3.15(\cos 120^o)$	=-1.575 kA	$I_{i5} = 3.15(\sin 120^o)$	= 2.727 kA
$I_{r6} = 3.15(\cos 0^o)$	=-3.15 kA	$I_{i6} = 3.15(\sin 0^o)$	= 0 kA
$I_{r7} = 0$	= 0 kA	$I_{i7} = 0$	= 0 kA
$I_{r8} = 0$	= 0 kA	$I_{i8} = 0$	= 0 kA

จากสมการที่(2.19)และ(2.21) เราสามารถหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวแกน X จากสายส่งไฟฟ้าที่ 1,2,3,4,5,6,7 และ 8 ณ.ตำแหน่ง 30 เมตรจากแนวสายส่ง (X_N)ได้ ดังนี้

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจริง</u>

$$\vec{B}_X(r,a) = \frac{\mu.I_{ra}.(y_a - y_N)}{(2.\pi).[(x_N - x_a)^2 + (y_N - y_a)^2]}$$

เมื่อ $\mu = 4\pi x10^{-7}$ Henry/m

$$\vec{B}_X(r,1) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(3.15x10^3).(35-1)}{(2\pi).[(30+5.62)^2 + (1-35)^2]}$$
$$= 8.834x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(r,2) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^3).(24-1)}{(2\pi).[(30+6.82)^2 + (1-24)^2]}$$
$$= -3.844x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(r,3) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^3).(13-1)}{(2\pi).[(30+7.92)^2 + (1-13)^2]}$$
$$= -2.389x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(r,4)=\frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^{3}).(35-1)}{(2\pi).[(30-5.62)^2+(1-35)^2]}$$
$$=-6.119x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(r,5)=\frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^{3}).(24-1)}{(2\pi).[(30-6.82)^2+(1-24)^2]}$$
$$=-6.794x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(r,6)=\frac{(4\pi x10^{-7}).(3.15x10^{3}).(13-1)}{(2\pi).[(30-7.92)^2+(1-13)^2]}$$
$$=1.197x10^{-5}$$

$$\vec{B}_X(r,7)=\frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(48.51-1)}{(2\pi).[(30+4.70)^2+(1-48.51)^2]}$$
$$=0$$

$$\vec{B}_X(r,8)=\frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(48.51-1)}{(2\pi).[(30+4.70)^2+(1-48.51)^2]}$$
$$=0$$

$$BXTR=\vec{B}_X(r,1)+\vec{B}_X(r,2)+\vec{B}_X(r,3)+\vec{B}_X(r,4)+\vec{B}_X(r,5)+\vec{B}_X(r,6)+\vec{B}_X(r,7)+\vec{B}_X(r,8)$$

$$BXTR=(8.834x10^{-6})+(-3.844x10^{-6})+(-2.389x10^{-6})+(-6.119x10^{-6})+(-6.794x10^{-6})+(1.197x10^{-5})$$

$$BXTR=1.658x10^{-6}$$

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ</u>

$$\vec{B}_X(i,a)=\frac{\mu.I_{ia}.(y_a-y_N)}{(2.\pi).[(x_N-x_a)^2+(y_N-y_a)^2]}$$

เมื่อ $\mu=4\pi x10^{-7}$ Henry/m

$$\vec{B}_X(i,1) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(35-1)}{(2\pi).[(30+5.62)^2+(1-35)^2]}$$
$$=0$$

$$\vec{B}_X(i,2) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(2.727x10^3).(24-1)}{(2\pi).[(30+6.82)^2+(1-24)^2]}$$
$$=6.658x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(i,3) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-2.727x10^3).(13-1)}{(2\pi).[(30+7.92)^2+(1-13)^2]}$$
$$=-4.139x10^{-6}$$

$$\vec{B}_X(i,4) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-2.727x10^3).(35-1)}{(2\pi).[(30-5.62)^2+(1-35)^2]}$$
$$=-1.06x10^{-5}$$

$$\vec{B}_X(i,5) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(2.727x10^3).(24-1)}{(2\pi).[(30-6.82)^2+(1-24)^2]}$$
$$=1.177x10^{-5}$$

$$\vec{B}_X(i,6) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(13-1)}{(2\pi).[(30-7.92)^2+(1-13)^2]}$$
$$=0$$

$$\vec{B}_X(i,7) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(48.51-1)}{(2\pi).[(30+4.70)^2+(1-48.51)^2]}$$
$$=0$$

$$\vec{B}_X(i,8) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(48.51-1)}{(2\pi).[(30+4.70)^2+(1-48.51)^2]}$$
$$=0$$

$$BXTI = \vec{B}_X(i,1) + \vec{B}_X(i,2) + \vec{B}_X(i,3) + \vec{B}_X(i,4) + \vec{B}_X(i,5) + \vec{B}_X(i,6) + \vec{B}_X(i,7) + \vec{B}_X(i,8)$$

$$BXTI = (6.658x10^{-6}) + (-4.139x10^{-6}) + (-1.06x10^{-5}) + (1.175x10^{-5})$$

$$BXTI = 3.69x10^{-6}$$

จากสมการที่(2.20)และ(2.21) เราสามารถหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวแกน Y จากสายส่งไฟฟ้าที่ 1,2,3,4,5,6,7 และ 8 ณ.ตำแหน่ง 30 เมตรจากแนวสายส่ง (X_N)ได้ ดังนี้

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจริง</u>

$$\vec{B}_Y(r,a) = \frac{\mu.I_{ra}.(x_a - x_N)}{(2.\pi).[(x_N - x_a)^2 + (y_N - y_a)^2]}$$

เมื่อ $\mu = 4\pi x10^{-7}$ Henry/m

$$\vec{B}_Y(r,1) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(3.15x10^3).(-5.62 - 30)}{(2\pi).[(30 + 5.62)^2 + (1 - 35)^2]}$$
$$= -9.255x10^{-6}$$

$$\vec{B}_Y(r,2) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^3).(-6.82 - 30)}{(2\pi).[(30 + 6.82)^2 + (1 - 24)^2]}$$
$$= 6.154x10^{-6}$$

$$\vec{B}_Y(r,3) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^3).(-7.92 - 30)}{(2\pi).[(30 + 7.92)^2 + (1 - 13)^2]}$$
$$= 7.551x10^{-6}$$

$$\vec{B}_Y(r,4) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^3).(5.62 - 30)}{(2\pi).[(30 - 5.62)^2 + (1 - 35)^2]}$$
$$= 4.387x10^{-6}$$

$$\vec{B}_Y(r,5) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-1.575x10^{3}).(6.82-30)}{(2\pi).[(30-6.82)^2+(1-24)^2]}$$

$$= 6.848x10^{-6}$$

$$\vec{B}_Y(r,6) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(3.15x10^{3}).(7.92-30)}{(2\pi).[(30-7.92)^2+(1-13)^2]}$$

$$= -2.203x10^{-5}$$

$$\vec{B}_Y(r,7) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(-4.70-30)}{(2\pi).[(30+4.70)^2+(1-48.51)^2]}$$

$$= 0$$

$$\vec{B}_Y(r,8) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(4.70-30)}{(2\pi).[(30+4.70)^2+(1-48.51)^2]}$$

$$= 0$$

$$BYTR = \vec{B}_Y(r,1)+\vec{B}_Y(r,2)+\vec{B}_Y(r,3)+\vec{B}_Y(r,4)+\vec{B}_Y(r,5)+\vec{B}_Y(r,6)+\vec{B}_Y(r,7)+\vec{B}_Y(r,8)$$

$$BYTR = (-9.255x10^{-6})+(6.154x10^{-6})+(7.551x10^{-6})+(4.387x10^{-6})+(6.848x10^{-6})+(-2.203x10^{-5})$$

$$BYTR = -6.342x10^{-6}$$

<u>ในส่วนที่เป็นจำนวนจินตภาพ</u>

$$\vec{B}_Y(i,a) = \frac{\mu.I_{ia}.(x_a - x_N)}{(2.\pi).[(x_N - x_a)^2+(y_N - y_a)^2]}$$

เมื่อ $\mu = 4\pi x10^{-7}$ Henry/m

$$\vec{B}_Y(i,1) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(-5.62-30)}{(2\pi).[(30+5.62)^2+(1-35)^2]}$$

$$= 0$$

$$\vec{B}_Y(i,2) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(2.727x10^{3}).(-6.82-30)}{(2\pi).[(30+6.82)^2+(1-24)^2]}$$
$$= -1.066x10^{-5}$$

$$\vec{B}_Y(i,3) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-2.727x10^{3}).(-7.92-30)}{(2\pi).[(30+7.92)^2+(1-13)^2]}$$
$$= 1.308x10^{-5}$$

$$\vec{B}_Y(i,4) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(-2.727x10^{3}).(5.62-30)}{(2\pi).[(30-5.62)^2+(1-35)^2]}$$
$$= 7.599x10^{-6}$$

$$\vec{B}_Y(i,5) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(2.727x10^{3}).(6.82-30)}{(2\pi).[(30-6.82)^2+(1-24)^2]}$$
$$= -1.186x10^{-5}$$

$$\vec{B}_Y(i,6) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(7.92-30)}{(2\pi).[(30-7.92)^2+(1-13)^2]}$$
$$= 0$$

$$\vec{B}_Y(i,7) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(-4.70-30)}{(2\pi).[(30+4.70)^2+(1-48.51)^2]}$$
$$= 0$$

$$\vec{B}_Y(i,8) = \frac{(4\pi x10^{-7}).(0).(4.70-30)}{(2\pi).[(30+4.70)^2+(1-48.51)^2]}$$
$$= 0$$

$$BYTI = \vec{B}_Y(i,1) + \vec{B}_Y(i,2) + \vec{B}_Y(i,3) + \vec{B}_Y(i,4) + \vec{B}_Y(i,5) + \vec{B}_Y(i,6) + \vec{B}_Y(i,7) + \vec{B}_Y(i,8)$$

$$BYTI = (-1.066x10^{-5}) + (1.308x10^{-5}) + (7.599x10^{-6}) + (-1.186x10^{-5})$$

$$BYTI = -1.842x10^{-6}$$

หาค่าของสนามแม่เหล็กรวมที่เกิดขึ้นในแนวแกน X และ Y ซึ่งมีทั้งขนาดและทิศทางของสนามแม่เหล็กได้ ดังนี้

$$B_X = \sqrt{[(BXTR)^2 + (BXTI)^2]}$$
$$= \sqrt{[(-1.658x10^{-6})^2 + (3.69x10^{-6})^2]}$$
$$= 4.045x10^{-6}$$

$$\theta_X = \tan^{-1}(BXTI / BXTR)$$
$$= \tan^{-1}((3.69x10^{-6})/(-1.658x10^{-6}))$$
$$= 65.80$$

$$B_Y = \sqrt{[(BYTR)^2 + (BYTI)^2]}$$
$$= \sqrt{[(-6.342x10^{-6})^2 + (-1.842x10^{-6})^2]}$$
$$= 6.604x10^{-6}$$

$$\theta_Y = \tan^{-1}(BYTI / BYTR)$$
$$= \tan^{-1}(-1.842x10^{-6} / - 6.342x10^{-6})$$
$$= 16.20$$

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กสูงสุดเมื่อ $dB^2 / dt = 0$ ดังนั้น

$$2\omega t = \tan^{-1}\left[-\frac{(B_X^2 . \sin(2\theta_X) + B_Y^2 . \sin(2\theta_Y))}{(B_X^2 . \cos(2\theta_X) + B_Y^2 . \cos(2\theta_Y))} \right]$$

$$2\omega t = \tan^{-1}\left[-\frac{(4.045x10^{-6})^2 \sin(2x65.80) + (6.604x10^{-6})^2 .\sin(2x16.20))}{(4.045x10^{-6})^2 .\cos(2x65.80) + (6.604x10^{-6})^2 .\cos(2x16.20))}\right]$$

$\omega t = -26.98$

$$B_{max} = \sqrt{(B_X .\cos(\omega t + \theta_X))^2 + (B_Y .\cos(\omega t + \theta_Y))^2}$$

$$= \sqrt{(4.045x10^{-6} .\cos(-26.98 + 65.80))^2 + (6.604x10^{-6} .\cos(-26.98 + 16.20))^2}$$

$= 72.119 mGauss$

และมุมของสนามแม่เหล็กจะมีค่าเท่ากับ

$$\theta_{max} = \tan^{-1}\left[\frac{B_Y \cos(\omega t + \theta_Y)}{B_X \cos(\omega t + \theta_X)}\right]$$

$$= \tan^{-1}\left[\frac{(6.604x10^{-6}).\cos(-26.98 + 16.20)}{(4.045x10^{-6}).\cos(-26.98 + 65.80)}\right]$$

$= 64.05$

ภาคผนวก ข
โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
สำหรับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบ 2 มิติ

```
%PROGRAM : EMFE.M
%This program is used to calculation the electric fields
%2-dimensions from overhead lines at above ground level
%Written by MR.PITHAK PIN-ANONG

%clc,clear;
ddata
load ddata.mat

%Transfer data for calculation
AL=V(:,1);
PH=V(:,2);
X=C(:,1);
Y=C(:,2);
VPH=PH*(pi/180);
ang1=cos(VPH);
ang2=sin(VPH);
ALT=AL/sqrt(3);
VR=ALT.*ang1;
VI=ALT.*ang2;

%Define constant value EPS1=1/2pi*8.854*10^-12
EPS1=18*10^9;

%Convert angle from radian to degree
degr=pi/180;

%STEP 1: DIAMETER EQUIVALENT AND CHARGE
%************************************************************************
for I=1:NC
  N(I)=1/ANR(I);
  if ANR(I)>1
    DEQ(I)=SUBSPC(I)*(ANR(I)*DIAM(I)/SUBSPC(I))^N(I);
  elseif ANR(I)==1
```

```
    DEQ(I)=DIAM(I);
  elseif ANR(I)==0
    DEQ(I)=0;
  end
end
for M=1:NC
  B(M,1)=0.0;
end
for N=1:NC
  P(M,N)=0.0;
end
for M=1:NC
  for N=1:NC
    if M~=N
    L(M,N)=(X(M)-X(N))^2+(Y(M)+Y(N))^2;
    LL(M,N)=(X(M)-X(N))^2+(Y(M)-Y(N))^2;
    ILL(M,N)=sqrt(L(M,N)/LL(M,N));
    end
  end
end
for M=1:NC
  for N=1:NC
    if M==N
      DEQ(I)=DEQ(M);
      DEQ(I)=DEQ(N);
      P(M,N)=EPS1*log((4*Y(M))/DEQ(I));
    else
      P(M,N)=EPS1*log(ILL(M,N));
    end
  end
end
% Charge from transmission line
QREAL=inv(P)*VR;
QIMAG=inv(P)*VI;
```

%**STEP 2** : CALCULATION ELECTRIC FIELD IN X AND Y DIRECTION

```
%*********************************************************************
for J=1:NPTF
  DIS(J)=SD;
  SD=SD+DI;
  D=DIS(J);
  EXTR=0;
  EXTI=0;
  EYTR=0;
  EYTI=0;
  VSPR=0;
  VSPI=0;
  clc
for I=1:NC
  QR(I)=QREAL(I);
  QI(I)=QIMAG(I);
  R(I)=((Y(I)-VERT)^2+(D-X(I))^2)/EPS1;
  RR(I)=((Y(I)+VERT)^2+(D-X(I))^2)/EPS1;
  FXR=(QR(I)*(D-X(I)))/R(I);
  SXR=(QR(I)*(D-X(I)))/RR(I)
  FXI=(QI(I)*(D-X(I)))/R(I);
  SXI=(QI(I)*(D-X(I)))/RR(I);
  FYR=(QR(I)*(VERT-Y(I)))/R(I);
  SYR=(QR(I)*(VERT+Y(I)))/RR(I);
  FYI=(QI(I)*(VERT-Y(I)))/R(I);
  SYI=(QI(I)*(VERT+Y(I)))/RR(I);
  EXTR=EXTR+(FXR-SXR);
  EXTI=EXTI+(FXI-SXI);
  EYTR=EYTR+(FYR-SYR);
  EYTI=EYTI+(FYI-SYI);
  clc
%Set space potential to be zero if sensor at ground surface
  if VERT<1*10^-10
    VSPR=0;
    VSPI=0;
  else
```

```
    TERM1=log(sqrt((X(I)-D)^2+(Y(I)-VERT)^2)/VERT);
    TERM2=log(sqrt((X(I)-D)^2+(Y(I)+VERT)^2)/VERT);
    VSR1=EPS1*QR(I)*TERM1;
    VSR2=EPS1*QR(I)*TERM2;
    VSI1=EPS1*QI(I)*TERM1;
    VSI2=EPS1*QI(I)*TERM2;
    VSPR=VSPR+(VSR1-VSR2);
    VSPI=VSPI+(VSI1-VSI2);
    VSP(J)=sqrt(VSPR^2+VSPI^2);
  end
end
  EX=sqrt(EXTR^2+EXTI^2);
  if EXTR==0
    THETAX=1.570796327;
  else
    THETAX=atan2(EXTI,EXTR);
  end
  EY=sqrt(EYTR^2+EYTI^2);
  if EYTR==0
    EYTR=EYTR+(0.01^5);
%EYTR has been set to 0.01E-9 to above a zero vector
  end
  if EYTR==0
    THETAY=1.570796327;
  else
    THETAY=atan2(EYTI,EYTR);
  end

%STEP 3 : CALCULATION MAXIMUM ELECTRIC FIELD
%*************************************************************************
%Start E-FIELD MAX and MIN value calculation
%WT is TILT angle of ellipse with horizontal
CHI=EX^2*sin(2.*THETAX)+EY^2*sin(2.*THETAY);
CHI=CHI/(EX^2*cos(2.*THETAX)+EY^2*cos(2.*THETAY));
WT=atan(-CHI)/2;
Z1=sqrt((EX*cos(WT+THETAX))^2+(EY*cos(WT+THETAY))^2);
```

```
%Get extreme value of E-FIELD as Z1
WT1=WT+(pi/2);
Z2=sqrt((EX*cos(WT1+THETAX))^2+(EY*cos(WT1+THETAY))^2);
%Get the other extreme value of E-FIELD as Z2
if Z2>Z1
  E(J)=Z2;
else
  E(J)=Z1;
end
if Z2>Z1
  WT=WT1;
  EYMAX=EY*cos(WT+THETAY);
  EXMAX=EX*cos(WT+THETAX);
  if EXMAX==0
    THETA=1.570796327;
  else
    THETA=atan2(EYMAX,EXMAX);
  end
%End of phasor analysis to get min and max E-FIELD values
%EXMAX and EYMAX are x and y component of E-FIELD
%when E-FIELD attains its max, EYMAX and EXMAX
%are important to determine spatial angle THETA
THETAY=THETAY/degr;
THETAX=THETAX/degr;
THETA=THETA/degr;
ANG(J)=THETA;
end
end
```

โปรแกรมวิเคราะห์สนามแม่เหล็กแบบ 2 มิติ

```
%PROGRAM : EMFB.M
%This program is used to calculation the magnetic fields
%2-dimensions from overhead lines at above ground level
%Written by MR.PITHAK PIN-ANONG

%clc,clear;
ddata
load ddata.mat

%Transfer data to calculation
AMP=I(:,1);
PH=I(:,2);
X=C(:,1);
Y=C(:,2);

%Convert angle from radian to degree
degr=pi/180;

for I=1:NC
  ANG(I)=PH(I)*(pi/180);
end

%STEP 1: CALCULATION MAGNETIC FIELD IN X AND Y DIRECTION
%**********************************************************************
for J=1:NPTF
  DIS(J)=SD;
  SD=SD+DI;
  D=DIS(J);
  BXTR=0;
  BXTI=0;
  BYTR=0;
  BYTI=0;
  for I=1:NC
    R(I)=(Y(I)-VERT)^2+(D-X(I))^2;
```

```
  BXTR=BXTR+2.*AMP(I)*(Y(I)-VERT)*cos(ANG(I))/R(I);
  BXTI=BXTI+2.*AMP(I)*(Y(I)-VERT)*sin(ANG(I))/R(I);
  BYTR=BYTR+2.*AMP(I)*(D-X(I))*cos(ANG(I))/R(I)
  BYTI=BYTI+2.*AMP(I)*(D-X(I))*sin(ANG(I))/R(I);
  clc
end
BX=sqrt(BXTR^2+BXTI^2);
if BXTR==0
  THETAX=1.570796327;
else
  THETAX=atan(BXTI/BXTR);
  if BXTR>0
    THETAX=THETAX+3.141592654;
  end
end
BY=sqrt(BYTR^2+BYTI^2);
if BYTR==0
  THETAY=1.570796327;
else
  THETAY=atan(BYTI/BYTR);
  if BYTR>0
    THETAY=THETAY+3.141592654;
  end
end
if BX==0
  THETA=1.570796327;
else
  THETA=atan(BY/BX);
  if BX>0
    THETA=THETA+3.145926536;
  end
end
%STEP 2 : CALCULATION MAXIMUM MAGNETIC FIELD
%************************************************************************
%Start B-FIELD max and min values calculation
%WT is the TILT angle of ellipse with horizontal
```

```
CHI=BX^2*sin(2.*THETAX)+BY^2*sin(2.*THETAY);
CHI=CHI/(BX^2*cos(2.*THETAX)+BY^2*cos(2.*THETAY));
WT=atan(-CHI)/2;
Z1=sqrt((BX*cos(WT+THETAX))^2+(BY*cos(WT+THETAY))^2);

%Get extreme value of B-FIELD as Z1
WT1=WT+1.570796327;
Z2=sqrt((BX*cos(WT1+THETAX))^2+(BY*cos(WT1+THETAY))^2);

%Get the other extreme value of B-FIELD as Z2
if Z2>Z1
  B(J)=Z2*1000;
else
  B(J)=Z1*1000;
end
if Z2>Z1
  WT=WT1;
  BXMAX=BX*cos(WT+THETAX);
  BYMAX=BY*cos(WT+THETAY);
if BXMAX==0
  THETA=1.570796327;
else
  THETA=atan2(BYMAX,BXMAX);
end
%End of phasor analysis to get min and max B-FIELD values
%BXMAX and BYMAX are x and y component of B-FIELD
%when B-FIELD attains its max, BYMAX and BXMAX
%are important to determine spatial angle THETA
THETAY=THETAY/degr;
THETAX=THETAX/degr;
THETA=THETA/degr;
ANG(J)=THETA;
end
end
```

โปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าแบบ 3 มิติ

```
%PROGRAM : EMFE3DS.M
%This program is used to calculation the 3-dimension electric field
%from overhead lines at above ground level and plot in surface mode
%Written by MR.PITHAK PIN-ANONG
clc,clear;

%Load data from input-data file "data1.mat"
ddata1
load ddata1.mat

%Transfer data to calculation
AL=V(:,1);
PH=V(:,2);
VPH=PH*(pi/180);
ang1=cos(VPH);
ang2=sin(VPH);
ALT=AL/sqrt(3);
VR=ALT.*ang1;
VI=ALT.*ang2;
X=C(:,1);
Y=C(:,2);

%Define constant value EPS1=1/2pi*8.854*10^-12
EPS1=18*10^9;

%Convert angle from radian to degree
degr=pi/180;

%STEP 1 : DIAMETER EQUIVALENT AND CHARGE
%***********************************************************************
%Equivalent diameter of bundle conductor
for I=1:NC
        N(I)=1/ANR(I);
        if ANR(I)>1
```

```
            DEQ(I)=SUBSPC(I)*(ANR(I)*DIAM(I)/SUBSPC(I))^N(I);
            elseif ANR(I)==1
            DEQ(I)=DIAM(I);
            elseif ANR(I)==0
            DEQ(I)=0.0;
            end
            end
%X and Y coordinated when sag changed
for R=1:NPTS
  for I=1:NC
    X(I,R)=X(I);
    Y(I,R)=Y(I)-SAG(R);
  end
end
%Prepare metrix for maxwell potentiaด coefficient
for M=1:NC
  B(M,1)=0.0;
end
for N=1:NC
  A(M,N)=0.0;
end
for R=1:NPTS
  P(M,N,R)=0.0;
end
%Calculated electric charge from each conductor
for R=1:NPTS
            for M=1:NC
            for N=1:NC
            if M~=N
                        L(M,N,R)=(X(M,R)-X(N,R))^2+(Y(M,R)+Y(N,R))^2;
                        LL(M,N,R)=(X(M,R)-X(N,R))^2+(Y(M,R)-Y(N,R))^2;
                        ILL(M,N,R)=sqrt(L(M,N,R)/LL(M,N,R));
            end
            if M==N
            DEQ(I)=DEQ(M);
            DEQ(I)=DEQ(N);
```

```
P(M,N,R)=EPS1*log((4*Y(M,R))/DEQ(I));
PP(M,N,R)=inv(P(M,N,R));
  else
P(M,N,R)=EPS1*log(ILL(M,N,R));
PP(M,N,R)=inv(P(M,N,R));
      end
    end
  end
end
for R=1:NPTS
  QREAL(:,R)=inv(P(:,:,R))*VR;
  QIMAG(:,R)=inv(P(:,:,R))*VI;
end
%End electric charge calculation

%STEP 2 : CALCULATION ELECTRIC FIELD IN X,Y DIRECTION
%**********************************************************************
for J=1:NPTF
  D(J)=0.0;
end
for J=1:NPTF
  DIS(J)=SD;
  SD=SD+DI;
  D(J)=DIS(J);
end
for R=1:NPTS
  for J=1:NPTF
    EXTR(R)=0.0;
                EXTI(R)=0.0;
                EYTR(R)=0.0;
                EYTI(R)=0.0;
    for I=1:NC
                  QR(I,R)=QREAL(I,R);
                QI(I,R)=QIMAG(I,R);
                Z(I,R)=((Y(I,R)-VERT)^2+(D(J)-X(I))^2)/EPS1;
      ZZ(I,R)=((Y(I,R)+VERT)^2+(D(J)-X(I))^2)/EPS1;
```

```
    FXR(R)=(QR(I,R)*(D(J)-X(I)))/Z(I,R);
                    SXR(R)=(QR(I,R)*(D(J)-X(I)))/ZZ(I,R)
                    FXI(R)=(QI(I,R)*(D(J)-X(I)))/Z(I,R);
    SXI(R)=(QI(I,R)*(D(J)-X(I)))/ZZ(I,R);
                    FYR(R)=(QR(I,R)*(VERT-Y(I,R)))/Z(I,R);
                    SYR(R)=(QR(I,R)*(VERT+Y(I,R)))/ZZ(I,R);
                    FYI(R)=(QI(I,R)*(VERT-Y(I,R)))/Z(I,R);
    SYI(R)=(QI(I,R)*(VERT+Y(I,R)))/ZZ(I,R);
                    EXTR(R)=EXTR(R)+(FXR(R)-SXR(R));
                    EXTI(R)=EXTI(R)+(FXI(R)-SXI(R));
                    EYTR(R)=EYTR(R)+(FYR(R)-SYR(R));
    EYTI(R)=EYTI(R)+(FYI(R)-SYI(R));
    clc
         end
EX(R)=sqrt((EXTR(R))^2+(EXTI(R))^2);
if EXTR(R)==0
   THETAX(R)=1.570796327;
  else
   THETAX(R)=atan2(EXTI(R),EXTR(R));
end
EY(R)=sqrt((EYTR(R))^2+(EYTI(R))^2);

if EYTR(R)==0
   EYTR(R)=EYTR(R)+(0.01^5);
%EYTR has been set to 0.01E-9 to above a zero vector
end
if EYTR(R)==0
   THETAY(R)=1.570796327;
  else
   THETAY(R)=atan2(EYTI(R),EYTR(R));
end

%STEP 3: CALCULATION MAXIMUM ELRCTRIC FIELD
%*******************************************************************
%Start E-FIELD MAX and MIN value calculation
%WT is TILT angle of ellipse with horizontal
```

```
CHI(R)=(EX(R))^2*sin(2.*(THETAX(R)))+(EY(R))^2*sin(2.*(THETAY(R)));
CHI(R)=CHI(R)/((EX(R))^2*cos(2.*(THETAX(R)))+(EY(R))^2*cos(2.*(THETAY(R))));
WT(R)=atan(-CHI(R))/2;
Z1(R)=sqrt(((EX(R))*cos(WT(R)+THETAX(R)))^2+((EY(R))*cos(WT(R)+THETAY(R)))^2);
%Get extreme value of E-FIELD as Z1
WT1(R)=WT(R)+(pi/2);
Z2(R)=sqrt(((EX(R))*cos(WT1(R)+THETAX(R)))^2+((EY(R))*cos(WT1(R)+THETAY(R)))^2);
%Get the other extreme value of E-FIELD as Z2
if Z2(R)>Z1(R)
  E(J,R)=Z2(R);
else
  E(J,R)=Z1(R);
end
if Z2(R)>Z1(R)
  WT(R)=WT1(R);
  EYMAX(R)=(EY(R))*cos(WT(R)+THETAY(R));
  EXMAX(R)=(EX(R))*cos(WT(R)+THETAX(R));
  if EXMAX(R)==0
    THETA(R)=1.570796327;
  else
    THETA(R)=atan2(EYMAX(R),EXMAX(R));
  end
%End of phasor analysis to get min and max E-FIELD values
%EXMAX and EYMAX are x and y component of E-FIELD
%when E-FIELD attains its max, EYMAX and EXMAX
%are important to determine spatial angle THETA
THETAY(R)=THETAY(R)/degr;
THETAX(R)=THETAX(R)/degr;
THETA(R)=THETA(R)/degr;
ANG(J,R)=THETA(R);
end
end
end
```

โปรแกรมวิเคราะห์สนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติ

```
%PROGRAM : EMFB3DS.M
%This program is used to calculation the 3-dimension magnetic field
%from overhead lines at above ground level and plot in surface mode
%Written by MR.PITHAK PIN-ANONG

clc,clear;

%Load data from input-data file "data1.mat"
ddata1
load ddata1.mat

%Transfer data to calculation
AMP=I(:,1);
PH=I(:,2);
X=C(:,1);
Y=C(:,2);

%Convert angle from radian to degree
degr=pi/180;

for R=1:NPTS
for I=1:NC
  ANG(I,R)=0.01745329*PH(I);
  AMP(I,R)=AMP(I);
end
end

%STEP 1: CALCULATION MAGNETIC FIELD IN X,Y DIRECTION
%***********************************************************************
%X and Y coordinated when sag changed
for R=1:NPTS
  for I=1:NC
    X(I,R)=X(I);
    Y(I,R)=Y(I)-SAG(R);
```

```
  end
end
for J=1:NPTF
   D(J)=0.0;
end
for J=1:NPTF
  DIS(J)=SD;
  SD=SD+DI;
  D(J)=DIS(J);
end
for R=1:NPTS
            for J=1:NPTF
            BXTR(R)=0;
            BXTI(R)=0;
            BYTR(R)=0;
            BYTI(R)=0;
            for I=1:NC
            Z(I,R)=(Y(I,R)-VERT)^2+(D(J)-X(I))^2;
            BXTR(R)=BXTR(R)+2.*AMP(I)*(Y(I,R)-VERT)*cos(ANG(I))/Z(I,R);
            BXTI(R)=BXTI(R)+2.*AMP(I)*(Y(I,R)-VERT)*sin(ANG(I))/Z(I,R);
            BYTR(R)=BYTR(R)+2.*AMP(I)*(D(J)-X(I))*cos(ANG(I))/Z(I,R)
            BYTI(R)=BYTI(R)+2.*AMP(I)*(D(J)-X(I))*sin(ANG(I))/Z(I,R);
            clc
            end

   BX(R)=sqrt((BXTR(R))^2+(BXTI(R))^2);
   if BXTR(R)==0
     THETAX(R)=1.570796327;
   else
     THETAX(R)=atan(BXTI(R)/BXTR(R));
     if BXTR(R)>0
       THETAX(R)=THETAX(R)+3.141592654;
     end
   end
   BY(R)=sqrt((BYTR(R))^2+(BYTI(R))^2);
   if BYTR(R)==0
```

```
  THETAY(R)=1.570796327;
 else
  THETAY(R)=atan(BYTI(R)/BYTR(R));
  if BYTR(R)>0
   THETAY(R)=THETAY(R)+3.141592654;
  end
 end
 if BX(R)==0
  THETA(R)=1.570796327;
 else
  THETA(R)=atan(BY(R)/BX(R));
  if BX(R)>0
   THETA(R)=THETA(R)+3.145926536;
  end
 end

%STEP 2: CALCULATION MAXIMUM MAGNETIC FIELD
%***************************************************************************
%Start B-FIELD max and min values calculation
%WT is the TILT angle of ellipse with horizontal
 CHI(R)=(BX(R))^2*sin(2.*THETAX(R))+(BY(R))^2*sin(2.*THETAY(R));
CHI(R)=CHI(R)/((BX(R))^2*cos(2.*THETAX(R))+(BY(R))^2*cos(2.*THETAY(R)));
WT(R)=atan(-CHI(R))/2;
 Z1(R)=sqrt(((BX(R))*cos(WT(R)+THETAX(R)))^2+((BY(R))*cos(WT(R)+THETAY(R)))^2);

%Get extreme value of B-FIELD as Z1
WT1(R)=WT(R)+1.570796327;
Z2(R)=sqrt(((BX(R))*cos(WT1(R)+THETAX(R)))^2+((BY(R))*cos(WT1(R)+THETAY(R)))^2);

%Get the other extreme value of B-FIELD as Z2
if Z2(R)>Z1(R)
   B(J,R)=Z2(R)*1000;
else
    B(J,R)=Z1(R)*1000;
end
if Z2(R)>Z1(R)
```

```
  WT(R)=WT1(R);
  BXMAX(R)=(BX(R))*cos(WT(R)+THETAX(R));
  BYMAX(R)=(BY(R))*cos(WT(R)+THETAY(R));
 if BXMAX(R)==0
  THETA(R)=1.570796327;
 else
  THETA(R)=atan2(BYMAX(R),BXMAX(R));
 end

%End of phasor analysis to get min and max B-FIELD values
%BXMAX and BYMAX are x and y component of B-FIELD
%when B-FIELD attains its max, BYMAX and BXMAX
%are important to determine spatial angle THETA
THETAY(R)=THETAY(R)/degr;
THETAX(R)=THETAX(R)/degr;
THETA(R)=THETA(R)/degr;
ANG(J,R)=THETA(R);
end
end
end
```

ข้อมูลอินพุทสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ชนิดวงจรเดี่ยวแบบ 2 มิติ

```
%FILE  : SDATA.M
%**********************************************************************
%                DEFINITION OF INPUT DATA
%**********************************************************************
%NC= number of conductor (conductor + OHG.wire)
%VERT= electric field sensor height or vertical distance (meter)
%NPTF= number of calculation point
%SD= calculation horizontal starting point
%DI= calculation distance increment
%ANR= number of subsconductor or bundle conductor each phase
%SUBSPC= bundle conductor or subconductor spacing in meter
%DIAM= subconductor diameter in meter
%C=conductor position in x and y coordinated in meter
%V= line to ground voltage in kilovolt
%I= line current in kiloampere

%Start input data
NC=5;
VERT=1.0;
NPTF=71;
SD=-35;
DI=1.0;
ANR = [4;4;4;1;1];
SUBSPC = [0.457;0.457;0.457;0.0;0.0];
DIAM = [0.02773;0.02773;0.02773;0.009144;0.009144];
C = [-10.650 13.000 ; 0.000 13.000 ; 10.650 13.000 ;...
    -10.650 26.609 ; 10.650 26.609 ];
V = [525 0 ; 525 120 ; 525 -120 ; 0 0 ; 0 0];
I = [3.15 0 ; 3.15 120 ; 3.15 -120 ; 0 0 ; 0 0];
%End of input data
save sdata.mat
```

ข้อมูลอินพุทสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ชนิดวงจรเดี่ยวแบบ 3 มิติ

```
%FILE : SDATA1.M
%*********************************************************************
%             DEFINITION OF INPUT DATA
%*********************************************************************
%NC= number of conductor (conductor + OHG.wire)
%NPTS= number of calculation along span length
%VERT= electric field sensor height or vertical distance (meter)
%NPTF= number of calculation point
%SD= calculation horizontal starting point
%DI= calculation distance increment
%SAG= sag of conductor along span length in meter
%ANR= number of subsconductor or bundle conductor each phase
%SUBSPC= bundle conductor or subconductor spacing in meter
%DIAM= subconductor diameter in meter
%C=conductor position in x and y coordinated in meter
%V= line to ground voltage in kilovolt
%I= line current in kiloampere

%Start input data
NC=5;
NPTS=21;
VERT=1.0;
NPTF=71;
SD=-35;
DI=1.0;
SAG=[0.0;3.20;6.07;8.63;10.89;12.85;14.53;15.94;17.08;18.05;18.48;18.05;17.08;15.94;14.53;12.85;10.89;8.6
3;6.07;3.20;0.0];
ANR = [4;4;4;1;1];
SUBSPC = [0.457;0.457;0.457;0.0;0.0];
DIAM = [0.02773;0.02773;0.02773;0.009144;0.009144];
C = [-10.650 31.500 ; 0.000 31.500 ; 10.650 31.500 ;...
    -10.650 40.484 ; 10.650 40.484 ];
V = [525 0 ; 525 120 ; 525 -120 ; 0 0 ; 0 0];
```

```
I = [3.15 0 ; 3.15 120 ; 3.15 -120 ; 0 0 ; 0 0];

%End input data
save sdata1.mat
```

ข้อมูลอินพุทสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ชนิดวงจรคู่แบบ 2 มิติ

```
%FILE : DDATA.M
%*********************************************************************
%                DEFINITION OF INPUT DATA
%*********************************************************************
%NC= number of conductor (conductor + OHG.wire)
%VERT= electric field sensor height or vertical distance (meter)
%NPTF= number of calculation point
%SD= calculation horizontal starting point
%DI= calculation distance increment
%ANR= number of subsconductor or bundle conductor each phase
%SUBSPC= bundle conductor or subconductor spacing in meter
%DIAM= subconductor diameter in meter
%C=conductor position in x and y coordinated in meter
%V= line to ground voltage in kilovolt
%I= line current in kiloampere

%Start input data
NC=8;
VERT=1.0;
NPTF=61;
SD=-30;
DI=1.0;
ANR = [4;4;4;4;4;4;1;1];
SUBSPC = [0.457;0.457;0.457;0.457;0.457;0.457;0.0;0.0];
DIAM = [0.02773;0.02773;0.02773;0.02773;0.02773;0.02773;0.009144;0.009144];
C = [-5.620 35.000 ; -6.820 24.000 ; -7.920 13.000 ;...
   +5.620 35.000 ; +6.820 24.000 ; +7.920 13.000 ; -4.700 48.515 ; 4.700 48.515 ];
V = [525 0 ; 525 120 ; 525 -120 ; 525 -120 ; 525 120 ; 525 0 ; 0 0 ; 0 0];
I = [3.15 0 ; 3.15 120 ; 3.15 -120 ; 3.15 -120 ; 3.15 120 ; 3.15 0 ; 0 0 ; 0 0];

%End of input data
save ddata.mat
```

ข้อมูลอินพุทสำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ชนิดวงจรคู่แบบ 3 มิติ

```
%FILE : DDATA1.M
%*********************************************************************
%                DEFINITION OF INPUT DATA
%*********************************************************************
%NC= number of conductor (conductor + OHG.wire)
%NPTS= number of calculation along span length
%VERT= electric field sensor height or vertical distance (meter)
%NPTF= number of calculation point
%SD= calculation horizontal starting point
%DI= calculation distance increment
%SAG= sag of conductor along span length in meter
%ANR= number of subsconductor or bundle conductor each phase
%SUBSPC= bundle conductor or subconductor spacing in meter
%DIAM= subconductor diameter in meter
%C=conductor position in x and y coordinated in meter
%V= line to ground voltage in kilovolt
%I= line current in kiloampere

%Start input data
NC=8;
NPTS=22;
VERT=1.0;
NPTF=61;
SD=-30;
DI=1.0;
SAG=[0.0;1.16;3.31;5.26;7.01;8.57;9.94;11.12;12.13;13.00;13.71;13.71;13.00;12.13;11.12;9.94;8.57;7.01;5.26;
3.31;1.16;0.0];
ANR = [4;4;4;4;4;4;1;1];
SUBSPC = [0.457;0.457;0.457;0.457;0.457;0.457;0.0;0.0];
DIAM = [0.02773;0.02773;0.02773;0.02773;0.02773;0.02773;0.009144;0.009144];
C = [-5.620 49.340 ; -6.820 38.340 ; -7.920 27.340 ;...
    +7.920 27.340 ; +6.820 38.340 ; +5.620 49.340 ; -4.700 62.240 ; 4.700 62.240 ];
V = [525 0 ; 525 120 ; 525 -120 ; 525 0 ; 525 120 ; 525 -120 ; 0 0 ; 0 0];
```

```
I = [3.40 0 ; 3.40 -120 ; 3.40 120 ; 3.40 0 ; 3.40 -120 ; 3.40 120 ; 0 0 ; 0 0];


%End input data
save ddata1.mat
```

ภาคผนวก ค
ระยะหย่อนตัวของสายไฟฟ้าในตำแหน่งต่าง ๆ
ของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ชนิดวงจรเดี่ยว

ALUMINUM COMPANY OF AMERICA SAG AND TENSION DATA

SAG ANG TENSION OF

500 kV LINE SINGLE CIRCUIT

Conductor CONDOR 795.0 Kcmil 54/ 7 Stranding ACSR

AREA= 454.7733 Sq.Mm.

Data from Chart No. 1-838

Metric K Units

SPAN= 49.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	0.11	4348	34.0	0.11	4348	34.0
27	0.0	0.0	0.0	1.524	0.16	2814	22.0*	0.14	3339	26.1
60	0.0	0.0	0.0	1.524	0.37	1244	9.7	0.23	2017	15.8
75	0.0	0.0	0.0	1.524	0.43	1056	8.3	0.31	1455	11.4

* Design Condition

SPAN= 98.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	0.44	4202	32.9	0.44	4202	32.9
27	0.0	0.0	0.0	1.524	0.65	2814	22.0*	0.56	3242	25.3
60	0.0	0.0	0.0	1.524	1.14	1611	12.6	0.87	2114	16.5
75	0.0	0.0	0.0	1.524	1.40	1305	10.2	1.07	1705	13.3

* Design Condition

SPAN= 147.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	1.03	3994	31.2	1.03	3994	31.2
27	0.0	0.0	0.0	1.524	1.46	2814	22.0*	1.32	3123	24.4
60	0.0	0.0	0.0	1.524	2.19	1879	14.7	1.86	2213	17.3
75	0.0	0.0	0.0	1.524	2.54	1622	12.7	2.17	1903	14.9

* Design Condition

SPAN= 196.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	1.94	3766	29.4	1.89	3876	30.3
27	0.0	0.0	0.0	1.524	2.60	2814	22.0*	2.35	3116	24.4
60	0.0	0.0	0.0	1.524	3.53	2077	16.2	3.09	2368	18.5
75	0.0	0.0	0.0	1.524	3.95	1858	14.5	3.47	2112	16.5

* Design Condition

SPAN= 245.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	3.22	3558	27.8	3.04	3759	29.4
27	0.0	0.0	0.0	1.524	4.07	2814	22.0*	3.68	3112	24.3
60	0.0	0.0	0.0	1.524	5.15	2225	17.4	4.59	2494	19.5
75	0.0	0.0	0.0	1.524	5.63	2038	15.9	5.03	2279	17.8

* Design Condition

SPAN= 294.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	4.86	3391	26.5	4.55	3625	28.3
27	0.0	0.0	0.0	1.524	5.86	2814	22.0*	5.34	3088	24.1
60	0.0	0.0	0.0	1.524	7.07	2337	18.3	6.40	2580	20.2
75	0.0	0.0	0.0	1.524	7.59	2177	17.0	6.89	2398	18.7

* Design Condition

SPAN= 343.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	6.88	3264	25.5	6.43	3494	27.3
27	0.0	0.0	0.0	1.524	7.99	2814	22.0*	7.35	3057	23.9
60	0.0	0.0	0.0	1.524	9.28	2423	18.9	8.52	2639	20.6
75	0.0	0.0	0.0	1.524	9.85	2286	17.9	9.05	2485	19.4

* Design Condition

SPAN= 392.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	9.26	3170	24.8	8.68	3381	26.4
27	0.0	0.0	0.0	1.524	10.44	2814	22.0*	9.71	3025	23.7
60	0.0	0.0	0.0	1.524	11.81	2490	19.5	10.97	2679	20.9
75	0.0	0.0	0.0	1.524	12.41	2371	18.5	11.54	2549	19.9

* Design Condition

SPAN= 441.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	11.99	3101	24.2	11.31	3286	25.7
27	0.0	0.0	0.0	1.524	13.23	2814	22.0*	12.41	2997	23.4
60	0.0	0.0	0.0	1.524	14.66	2542	19.9	13.75	2709	21.2
75	0.0	0.0	0.0	1.524	15.28	2439	19.1	14.34	2597	20.3

* Design Condition

SPAN= 490.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	15.08	3049	23.8	14.31	3210	25.1
27	0.0	0.0	0.0	1.524	16.35	2814	22.0*	15.47	2972	23.2
60	0.0	0.0	0.0	1.524	17.83	2583	20.2	16.86	2730	21.3
75	0.0	0.0	0.0	1.524	18.48	2494	19.5	17.48	2635	20.6

* Design Condition

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ชนิดวงจรคู่

ALUMINUM COMPANY OF AMERICA SAG AND TENSION DATA

SAG ANG TENSION OF

500 kV LINE DOUBLE CIRCUIT

Conductor CONDOR 795.0 Kcmil 54/ 7 Stranding ACSR

AREA= 454.7733 Sq.Mm.

Data from Chart No. 1-838

Metric K Units

SPAN= 40.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	0.07	4367	34.1	0.07	4367	34.1
27	0.0	0.0	0.0	1.524	0.11	2816	22.0*	0.09	3354	26.2
60	0.0	0.0	0.0	1.524	0.26	1166	9.1	0.15	2005	15.7
75	0.0	0.0	0.0	1.524	0.30	1012	7.9	0.22	1409	11.0

* Design Condition

SPAN= 80.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	Kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	0.29	4268	33.4	0.29	4268	33.4
27	0.0	0.0	0.0	1.524	0.43	2816	22.0*	0.37	3284	25.7
60	0.0	0.0	0.0	1.524	0.82	1491	11.7	0.59	2079	16.3
75	0.0	0.0	0.0	1.524	1.01	1212	9.5	0.75	1602	12.7

* Design Condition

SPAN= 120.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	Kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	0.67	4117	32.2	0.67	4117	32.2
27	0.0	0.0	0.0	1.524	0.97	2816	22.0*	0.86	3191	24.9
60	0.0	0.0	0.0	1.524	1.58	1743	13.6	1.27	2161	16.9
75	0.0	0.0	0.0	1.524	1.88	1460	11.4	1.52	1801	14.1

* Design Condition

SPAN= 160.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	Kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	1.24	3936	30.8	1.24	3936	30.8
27	0.0	0.0	0.0	1.524	1.73	2816	22.0*	1.58	3096	24.2
60	0.0	0.0	0.0	1.524	2.52	1939	15.2	2.18	2239	17.5
75	0.0	0.0	0.0	1.524	2.89	1692	13.2	2.51	1949	15.2

* Design Condition

SPAN= 200.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	Kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	2.03	3750	29.3	1.97	3871	30.3
27	0.0	0.0	0.0	1.524	2.71	2816	22.0*	2.44	3119	24.4
60	0.0	0.0	0.0	1.524	3.65	2092	16.4	3.20	2382	18.6
75	0.0	0.0	0.0	1.524	4.07	1875	14.7	3.58	2129	16.6

* Design Condition

SPAN= 240.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	Kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	3.07	3581	28.0	2.91	3776	29.5
27	0.0	0.0	0.0	1.524	3.90	2816	22.0*	3.53	3116	24.4
60	0.0	0.0	0.0	1.524	4.97	2213	17.3	4.42	2485	19.4
75	0.0	0.0	0.0	1.524	5.44	2023	15.8	4.85	2265	17.7

* Design Condition

SPAN= 280.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	Kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	4.35	3437	26.9	4.08	3666	28.7
27	0.0	0.0	0.0	1.524	5.31	2816	22.0*	4.83	3098	24.2
60	0.0	0.0	0.0	1.524	6.48	2310	18.1	5.85	2561	20.0
75	0.0	0.0	0.0	1.524	7.00	2142	16.7	6.32	2369	18.5

* Design Condition

SPAN= 320.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	Kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	5.88	3322	26.0	5.49	3557	27.8
27	0.0	0.0	0.0	1.524	6.94	2816	22.0*	6.36	3074	24.0
60	0.0	0.0	0.0	1.524	8.20	2387	18.7	7.48	2616	20.4
75	0.0	0.0	0.0	1.524	8.75	2239	17.5	7.99	2449	19.1

* Design Condition

SPAN= 360.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	Kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	7.66	3231	25.3	7.16	3456	27.0
27	0.0	0.0	0.0	1.524	8.79	2816	22.0*	8.12	3048	23.8
60	0.0	0.0	0.0	1.524	10.12	2449	19.1	9.33	2656	20.8
75	0.0	0.0	0.0	1.524	10.70	2319	18.1	9.87	2511	19.6

* Design Condition

SPAN= 400.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	Kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	9.67	3160	24.7	9.08	3367	26.3
27	0.0	0.0	0.0	1.524	10.87	2816	22.0*	10.12	3023	23.6
60	0.0	0.0	0.0	1.524	12.25	2500	19.5	11.39	2687	21.0
75	0.0	0.0	0.0	1.524	12.85	2385	18.6	11.96	2560	20.0

* Design Condition

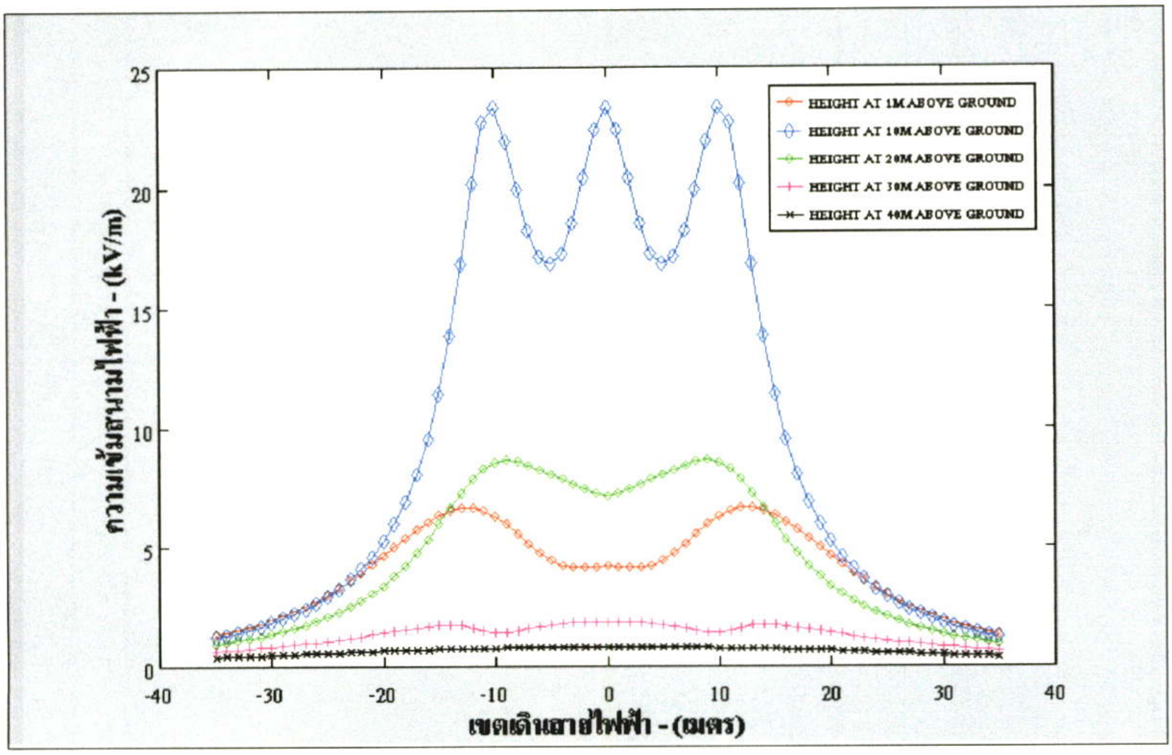
SPAN= 420.0 Mtrs Special Loading

Creep is a Factor

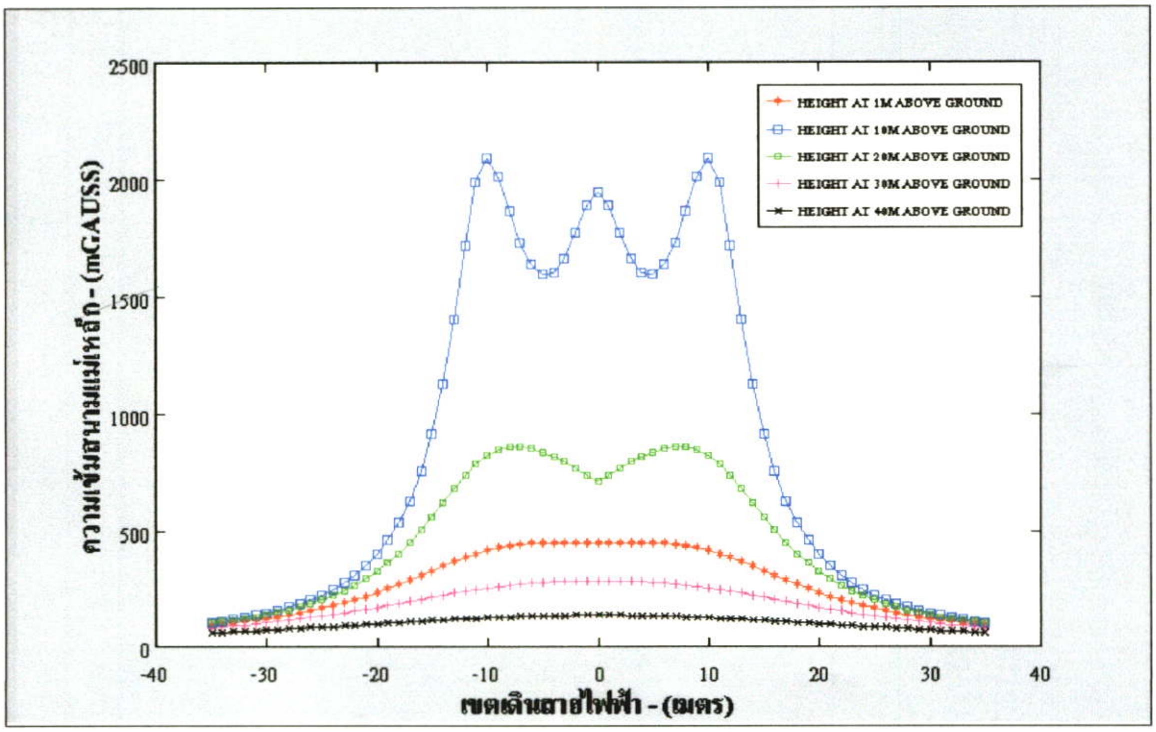
Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
°C	Mm	Kg/m²	Kg/m	Kg/m	m	Kg	%	m	kg	%
0	0.0	0.0	0.0	1.524	10.77	3131	24.5	10.13	3327	26.0
27	0.0	0.0	0.0	1.524	11.98	2816	22.0*	11.20	3011	23.5
60	0.0	0.0	0.0	1.524	13.39	25.22	19.7	12.51	2699	21.1
75	0.0	0.0	0.0	1.524	14.01	2413	18.9	13.09	2580	20.2

* Design Condition

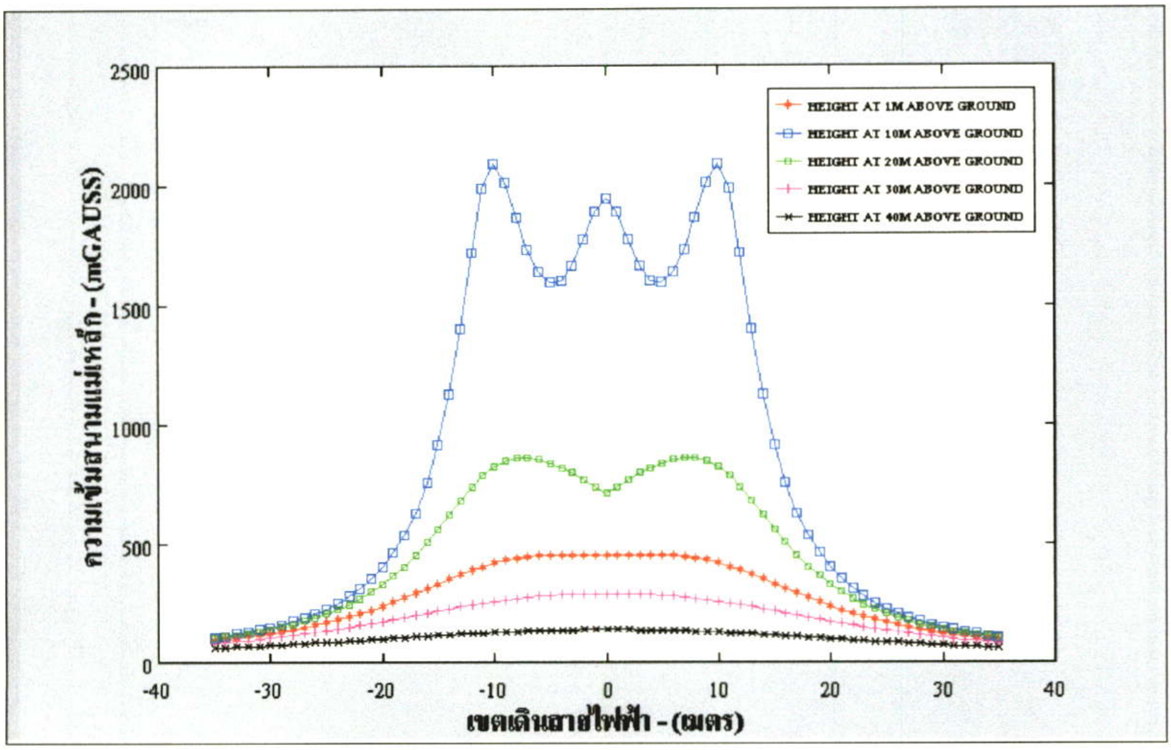
ภาคผนวก ง
ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
เหนือพื้นดินเมื่อพิจารณาที่ระดับความสูงต่าง ๆ



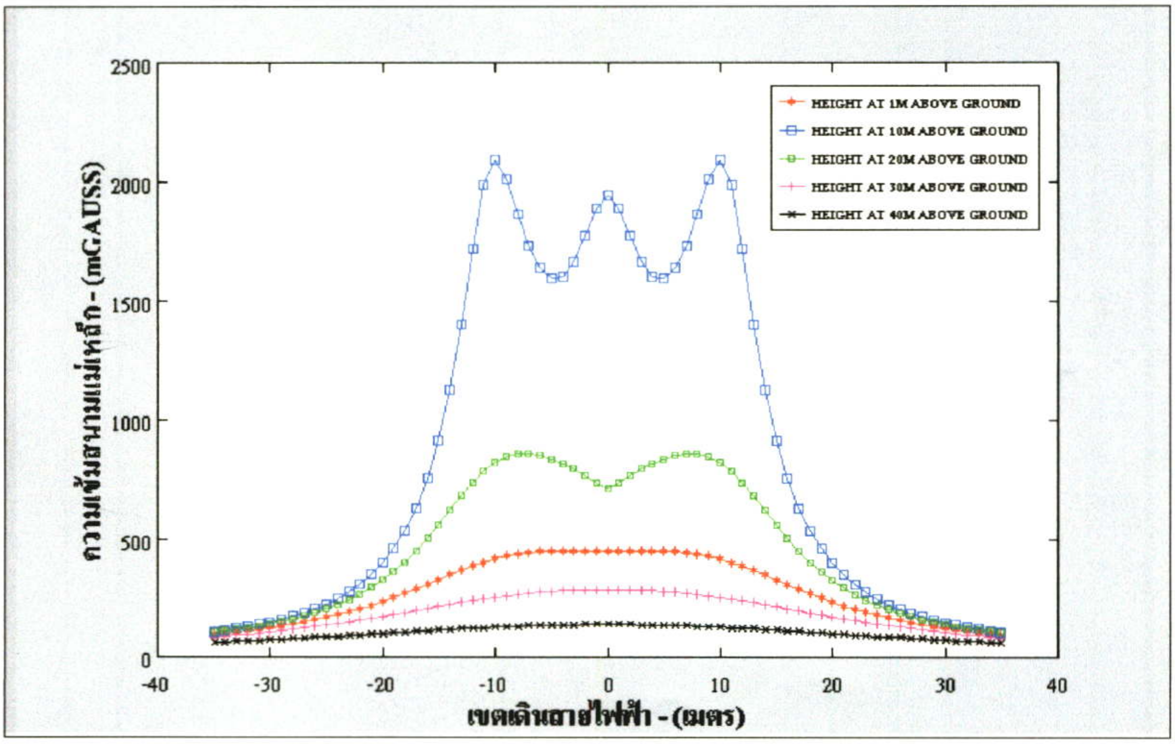
รูปที่ ง-1 การกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าเหนือพื้นดินเมื่อพิจารณาที่ความสูงระดับต่าง ๆ ของสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว



รูปที่ ง-2 การกระจายของความเข้มสนามแม่เหล็กเหนือพื้นดินเมื่อพิจารณาที่ความสูงระดับต่าง ๆ ของสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยว



รูปที่ ง-3 การกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าเหนือพื้นดินเมื่อพิจารณาที่ความสูงระดับต่าง ๆ ของสายส่ง 500 kV วงจรคู่



รูปที่ ง-4 การกระจายของความเข้มสนามแม่เหล็กเหนือพื้นดินเมื่อพิจารณาที่ความสูงระดับต่าง ๆ ของสายส่ง 500 kV วงจรคู่

ภาคผนวก จ
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

การประชุมวิชาการ
ทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23

23rd Electrical Engineering Conference
(EECON-23)

ไปเมนูหลัก

วันที่ 23 - 24 พฤศจิกายน 2543
โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่

ดำเนินการจัดประชุมโดย
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

30th Anniversary
Faculty of Engineering, Chiang Mai University

การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 กิโลโวลท์

The Analysis of Electromagnetic Fields and Effect Which Generated from 500 kV Line

พิทักษ์ ปิ่นอนงค์ ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพ ฯ 10520 โทร 3269902 E- mail:tsept@egat.or.th

บทคัดย่อ

ปัญหาผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะเกิดขึ้นในรูปของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องมาจากผลของสนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในการวิเคราะห์ได้อาศัยโปรแกรมที่สร้างขึ้นสำหรับคำนวณค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าของกระแสไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำขึ้นกับบ้านพักอาศัยใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งผลจากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าขนาดของบ้านพักอาศัยและสนามไฟฟ้ามีผลโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ : ผลกระทบจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า, กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

Abstract

Electromagnetic field effects from transmission line has interfere to objects in proximity transmission line, this paper presents to electric induction caused by a source of electric filed on an object. MATLAB programming is used to analysis the electric and magnetic fileds, and the electric field result shall be used to analysis the induced current on an object. Finally, size of the object and electric field density has effect directly for induced current value.

Keywords : electromagnetic field effects, induced current

1. คำนำ

การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะทำให้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นแหล่งกำเนิดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายอยู่โดยรอบและส่งผลกระทบต่อสิ่งต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง เช่น บ้านพักอาศัย โรงงานอุตสาหกรรม และอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างเป็นโลหะ โดยทั่วไปแล้วการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงผู้ออกแบบหรือหน่วยงานที่รับผิดชอบจะต้องออกแบบไม่ให้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีอัตราการกำเนิดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกินกว่าที่กำหนดซึ่งในทางปฏิบัติการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้กำหนดให้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV มีอัตราการกำเนิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด 2 kV/m และสนามแม่เหล็ก 200 mGauss ที่ขอบระยะปลอดภัยการเดินสาย สำหรับผลกระทบที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่อยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะเกิดขึ้นในรูปของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นกับโลหะต่าง ๆ ที่อยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในการวิเคราะห์ได้คำนวณหาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบนพื้นดินภายในระยะปลอดภัยการเดินสายเพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปวิเคราะห์หาผลกระทบที่เกิดขึ้นในรูปของแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

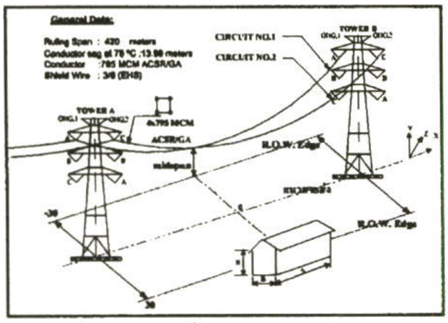
2. สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าไปตามสายส่งไฟฟ้าแรงสูงโดยทั่วๆ ไปเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กำเนิดขึ้นจากการส่งจ่ายย่านความถี่ที่ต่ำมาก ๆ (Extremely Low Frequency : ELF) และมีช่วงความยาวคลื่นที่ยาวมากในอากาศโดยรอบดังนั้นจึงสามารถพิจารณาค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแยกออกจากกันได้โดยไม่เกี่ยวเนื่องกัน สนามไฟฟ้าเกิดจากประจุไฟฟ้าเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\bar{E}$ และถูกวัดออกมาในหน่วยของแรงดันต่อระยะทาง(kV/m)โดยที่ขนาดของสนามไฟฟ้าเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดใด ๆ ในสนามไฟฟ้า ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าของสายส่งและแปรผกผันกับระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้า สำหรับสนามแม่เหล็กเกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำเป็นผลทำให้เกิดความหนาแน่นของฟลั๊กซ์แม่เหล็กขึ้นเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ $\bar{B}$ และถูกวัดออกมาในหน่วยของเวเบอร์ต่อตารางเมตร (wb/sq.m) หรือ เทสลา (Tesla) โดยทั่วไปแล้วสนามแม่เหล็กจะพิจารณาในหน่วยของเกาส์(Gauss) ขนาดของสนามแม่เหล็กเกิดจากแรงในการเคลื่อนประจุหรือค่าของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากสนามเปลี่ยนแปลงค่าตามเวลาซึ่งจะมีค่าแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าของสายส่งและแปรผกผันกับระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้า

3. การคำนวณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

3.1. สนามไฟฟ้า

รูปที่ 1 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 500 kV ชนิดวงจรคู่ที่ประกอบด้วยสายตัวนำไฟฟ้าแบบควบจำนวน 6 เฟสและ



รูปที่ 1 ลักษณะโดยทั่วไปของสายส่งไฟฟ้า 500 kV

สายป้องกันฟ้าผ่า 2 เส้น ในการคำนวณได้พิจารณาให้สายตัวนำไฟฟ้าและสายป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเสมือนกับวางอยู่เหนือพื้นดินโดยปราศจากเสาโครงเหล็กและผลจากความต้านทานของดิน[1] ซึ่งเมื่อพิจารณาจากภาคตัดขวางแล้วจำนวณของสายตัวนำไฟฟ้าเหล่านี้จะประกอบด้วยสายตัวนำในส่วนที่อยู่เหนือพื้นดินและส่วนที่เป็น Projected Area สำหรับการคำนวณจะประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้

หาประจุไฟฟ้า (Q)

จำนวนประจุไฟฟ้า, Q บนสายตัวนำที่เกิดจากแรงดันไฟฟ้า, V และสัมประสิทธิ์ของ Maxwell potential coefficient, P จะหาได้จาก[1]

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

พิจารณาในส่วนของ real และ imaginary part จะได้ ดังนี้

$$[Qr]=[P]^{-1}[Vr] \quad , \quad [Qi]=[P]^{-1}[Vi] \tag{2}$$

หาสนามไฟฟ้า ($\bar{E}$)

ค่าของสนามไฟฟ้า, $\bar{E}$ ของสายตัวนำไฟฟ้าใดๆ ที่เกิดจากประจุไฟฟ้า, Q ณ.จุดใด ๆ (x_N, y_N) บนพื้นดินภายใต้ตัวกลางอากาศที่มีค่า Dielectric constant , ε เท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m คือ [1]

$$\bar{E}_{x,n} = \frac{(q_{rn}+jq_{in})(x_N-x_n)}{2\pi\varepsilon\left[(x_n-x_N)^2+(y_n-y_N)^2\right]} - \frac{(q_{rn}+jq_{in})(x_N-x_n)}{2\pi\varepsilon\left[(x_n-x_N)^2+(y_n+y_N)^2\right]} \tag{3}$$

$$\bar{E}_{y,n} = \frac{(q_{rn}+jq_{in})(y_N-y_n)}{2\pi\varepsilon\left[(x_n-x_N)^2+(y_n-y_N)^2\right]} - \frac{(q_{rn}+jq_{in})(y_N-y_n)}{2\pi\varepsilon\left[(x_n-x_N)^2+(y_n+y_N)^2\right]} \tag{4}$$

เมื่อ n = จำนวนสายตัวนำไฟฟ้า ; n = 1,2,3,…8

และผลรวมของสนามไฟฟ้า, $\bar{E}$ ตามแนวแกน x และ y คือ

$$\bar{E}_x = \bar{E}_{x,1} + \bar{E}_{x,2} + \bar{E}_{x,3} + \dots \bar{E}_{x,8} \tag{5}$$

$$\bar{E}_y = \bar{E}_{y,1} + \bar{E}_{y,2} + \bar{E}_{y,3} + \dots \bar{E}_{y,8} \tag{6}$$

และจากขั้นตอนการคำนวณดังกล่าวสามารถนำมาสร้างเป็นโปรแกรม EMF-E.M เพื่อใช้คำนวณ และวิเคราะห์หาค่าของสนามไฟฟ้า ณ. จุดใด ๆ บนพื้นดินได้ด้วยการใช้ MATLAB Programming ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานตามรูปที่ 2

รูปที่ 2 ขั้นตอนแสดงการทำงานของโปรแกรม EMF-E.M

3.2. สนามแม่เหล็ก

ในการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กได้พิจารณาจากความเข้มสนามแม่เหล็ก, $\bar{H}$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าของกระแส, I และระยะห่างระหว่างสายตัวนำไฟฟ้าไปยังจุดที่พิจารณา, R ดังนี้[1]

$$\bar{H} = \frac{I}{2\pi R} \tag{7}$$

และค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายตัวนำจำนวนหลายเส้นที่วางขนานกัน ณ. จุดใด ๆ (x_N, y_N) สามารถหาได้ดังนี้[1]

$$\bar{H}_X = H_{x,r} + jH_{x,i} \tag{8}$$

$$= \sum_{j=1}^{n} \frac{I_{rj}}{2\pi} \frac{y_j - y_N}{R_{jN}^2} + j\sum_{j=1}^{n} \frac{I_{ij}}{2\pi} \frac{y_j - y_N}{R_{jN}^2}$$

$$\bar{H}_Y = H_{y,r} + jH_{y,i} \tag{9}$$

$$= \sum_{j=1}^{n} \frac{I_{rj}}{2\pi} \frac{x_j - x_N}{R_{jN}^2} + j\sum_{j=1}^{n} \frac{I_{ij}}{2\pi} \frac{x_j - x_N}{R_{jN}^2}$$

$$R_{jN} = \sqrt{(x_N - x_j)^2 + (y_N - y_j)^2} \tag{10}$$

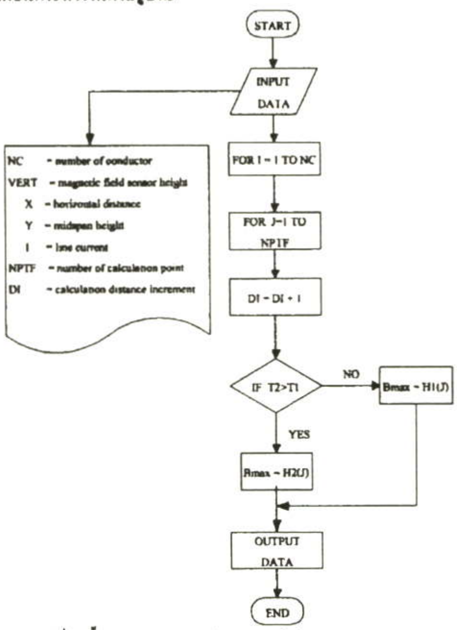
เมื่อ n = จำนวนสายตัวนำไฟฟ้า ; n = 1,2,3,…8

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามแม่เหล็ก, $\bar{H}$ และความหนาแน่นฟลั๊กซ์แม่เหล็ก, $\bar{B}$ ภายใต้ตัวกลางอากาศที่มีค่า Permeability, μ_o เท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m คือ

$$\bar{B} = \mu_o \bar{H} \tag{11}$$

ในทำนองเดียวกันสามารถนำขั้นตอนการคำนวณดังกล่าวมาสร้างเป็นโปรแกรมเพื่อใช้คำนวณ และวิเคราะห์หาค่าของสนามแม่

เหล็ก ณ. จุดใด ๆ บนพื้นดินได้ด้วยการใช้ MATLAB Programming ซึ่งมีขั้นตอนการทำงานตามรูปที่3



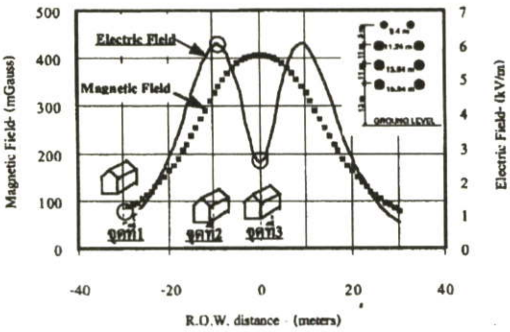
รูปที่ 3 ขั้นตอนแสดงการทำงานของโปรแกรม EMF-M.M

4. ผลการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ในการวิเคราะห์ได้พิจารณาที่กึ่งกลางระหว่างเสาโครงเหล็กที่เรียกว่า Midspan ดังแสดงในรูปที่ 1 ณ.ตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่สายตัวนำไฟฟ้ามีระยะห่างจากพื้นดินน้อยที่สุดทำให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบริเวณนี้มีค่ามาก และวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินในระยะปลอดภัยการเดินสายไฟฟ้า (R.O.W. Width) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 60 เมตรสำหรับสายส่ง 500 kVวงจรคู่ ผลจากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรม EMF-E.M และสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรมEMF-M.M ของสายส่ง 500 kVวงจรคู่ ภายใต้การจ่ายโหลดสูงสุด 3.5 kA ต่อเฟสและสมดุลย์จะได้ค่าของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีการจัดเรียงลำดับเฟสตามรูปที่ 1 (มีการกระจายของสนามไฟฟ้าภายใน R.O.W. น้อยกว่าการจัดเรียงลำดับเฟสในรูปแบบอื่น[2]) ซึ่งเป็นค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ความสูง 1 เมตรจากระดับพื้นดินดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะมีค่ามากสุดเท่ากับ 6.016kV/m ที่ 9 เมตรจากแนวสายส่ง สำหรับค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่จะมีค่ามากสุดเท่ากับ 407.1 mGauss ที่แนวสายส่ง สำหรับที่ขอบของระยะปลอดภัยการเดินสาย (30 เมตรจากแนวสายส่ง) จะมีค่าสนามไฟฟ้า 0.758 kV/m และสนามแม่เหล็ก 80.130 mGauss ตามลำดับ

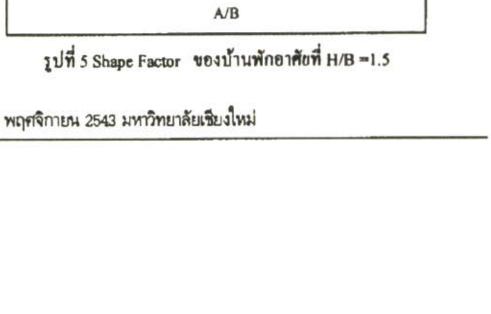
5. ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แพร่กระจาย



รูปที่ 4 ค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม EMF-E.M และEMF-M.M ภายใน R.O.W. Width

ออกมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะประกอบด้วยผลกระทบจาก Corona, Audible noise, Radio noise, Television interference และผลที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก[4] ซึ่งผลกระทบที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะขึ้นอยู่กับทิศทางการวางวัตถุกับแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยที่สนามไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับวัตถุที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ในทำนองเดียวกันสนามแม่เหล็กจะเหนี่ยวนำกับวัตถุที่มีความยาวและวางขนานกับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เช่น ท่อก๊าซ ท่อน้ำ เป็นต้น ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำกับวัตถุนั้น ๆ สำหรับการศึกษาผลกระทบดังกล่าวได้ศึกษาผลของการเหนี่ยวนำที่มีต่อบ้านพักอาศัยที่อยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง โดยพิจารณาผลของการเหนี่ยวนำที่มีต่อบ้านพักอาศัยที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ดังนี้ 1) บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำไฟฟ้า, 2)บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นตัวนำไฟฟ้าและตัวบ้านเป็นฉนวน, 3)บ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำไฟฟ้า เพื่อศึกษาผลของการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกับบ้านพักอาศัยในเงื่อนไขต่าง ๆ รูปที่ 5 เป็น Shape Factor ของบ้านพักอาศัยที่มีความสูง, H ความกว้าง, B และความยาว, A โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของ H/B และ A/B จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นที่โดยประมาณของบ้านพักอาศัย, S ในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นค่า



รูปที่ 5 Shape Factor ของบ้านพักอาศัยที่ H/B =1.5

A14

Shape Factor, S/(AB) ของบ้านพักอาศัยที่มีความสูง,H ความกว้าง, B และความยาว, A ที่เกิดจากสมการในตารางที่ 1 โดยพิจารณาที่อัตราส่วนระหว่าง H/B มีค่าเท่ากับ 1.5 ซึ่งค่า Shape Factor นี้จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงไปของพื้นที่ของบ้านพักอาศัยตามความสัมพันธ์ของอัตราส่วนระหว่าง A/B

ตารางที่ 1 Equivalent Area ของบ้านพักอาศัย

ชนิดของเงื่อนไข	*Equivalent Area[1]
1.บ้านพักอาศัยมีหลังคาเป็นตัวนำไฟฟ้าและตัวบ้านเป็นฉนวน	S_1= AB[1+(4.7+0.64/(A/B))H/B]
2.บ้านพักอาศัยมีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำไฟฟ้า	S_2= AB[1+(1.92+4.6/(A/B))H/B]
3.บ้านพักอาศัยมีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำไฟฟ้า	S_3= AB[1+(3.94+5/(A/B))H/B]

หมายเหตุ : *Equivalent Area(S) เป็นพื้นที่สะสมประจุไฟฟ้าที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ $I = ES/(3\times10^{5})$ mA [1] ; E = สนามไฟฟ้า (V/m)

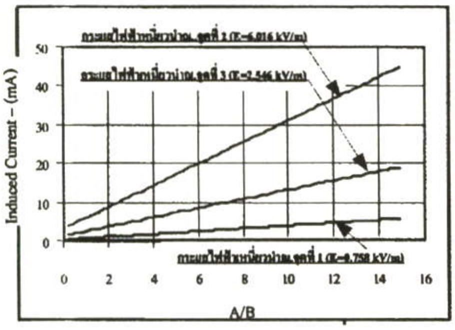
6. วิเคราะห์ผลการศึกษา

ตารางที่ 2 เป็นผลการศึกษากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกับบ้านพักอาศัย(พิจารณาที่อัตราส่วน A/B เท่ากับ2.0)ที่บริเวณต่าง ๆ ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงตามการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าในรูปที่ 4 ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงไปของสนามไฟฟ้าจะเห็นว่าเมื่อบ้านพักอาศัยอยู่บริเวณจุดที่ 2 (เป็นตำแหน่งที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้ามากที่สุด 6.016 kV/m) จะทำให้บ้านพักอาศัยมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นมากที่สุด 8.657 mA โดยจะเกิดกับบ้านพักอาศัยที่มีทั้งหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำไฟฟ้า (สำหรับค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สามารถจะส่งผลกระทบต่อคนที่มาสัมผัสกับส่วนที่เป็นโลหะของบ้านพักอาศัยจะมีค่าเท่ากับ 5 mA[3]) ส่วนบริเวณที่บ้านพักอาศัยมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นน้อยที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 0.750 mA บริเวณจุดที่ 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีค่าสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นน้อยที่สุด (0.758 kV/m) โดยจะเกิดกับบ้านพักอาศัยที่มีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำไฟฟ้า

ตารางที่ 2 ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยที่ A/B = 2.0

ชนิดของเงื่อนไข	กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (mA)		
	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3
1.บ้านพักอาศัยมีหลังคาเป็นตัวนำไฟฟ้าและตัวบ้านเป็นฉนวน	I_1=0.8728	I_1=6.927	I_1=2.931
2.บ้านพักอาศัยมีหลังคาเป็นฉนวนและตัวบ้านเป็นตัวนำไฟฟ้า	I_2=0.7500	I_2=5.953	I_2=2.519
3.บ้านพักอาศัยมีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำไฟฟ้า	I_3=1.0909	I_3=8.657	I_3=3.663

หมายเหตุ : สำหรับค่าของสนามไฟฟ้าที่นำมาวิเคราะห์กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจะพิจารณาที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นดิน



รูปที่ 6 ค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวที่เกิดกับบ้านพักอาศัย ณ. จุดต่าง ๆ เมื่อบ้านพักอาศัยมีขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปตาม A/B

ในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงค่ากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำของบ้านพักอาศัยที่มีหลังคาและตัวบ้านเป็นตัวนำไฟฟ้าที่จุดต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงขนาดของบ้านพักอาศัยตามอัตราส่วนระหว่าง A/B ซึ่งจากการวิเคราะห์ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดที่เพิ่มขึ้นของบ้านพักอาศัยและสนามไฟฟ้าจะมีผลโดยตรงกับ ปริมาณของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น

7. สรุป

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กบนพื้นดินที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะเกิดขึ้นมากสุดบริเวณตำแหน่งใกล้สายตัวนำไฟฟ้าและจะมีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างออกไป สำหรับผลกระทบที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่อยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะอยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เป็นผลมาจากสนามไฟฟ้า โดยที่ค่าของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าและขนาดของวัตถุที่อยู่ใกล้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้จะนำไปสู่การมองเห็นภาพของผลกระทบที่เกิดจากสนามไฟฟ้าได้ชัดเจนยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นผลย้อนกลับมาให้ผู้ออกแบบพิจารณาออกแบบให้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีผลกระทบเกิดขึ้นน้อยที่สุด เพื่อความปลอดภัยกับบ้านพักอาศัยที่อยู่ใกล้แนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารอ้างอิง

[1]. Transmission Line Reference Book 345 and Above /Second Edition , Electric Power Research Institue , Palo Alto , California, 1982 , pp.329-417.

[2]. พิทักษ์ ปิ่นอนงค์, ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล "การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งระยะไกล",การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 21 , 12-13 พฤศจิกายน 2541 ,หน้า 336-339.

[3]. The Institue of Electrical and Electronic Engineers, Inc "National Electrical Safety Code", 1993 Edition , page76.

[4]. Eva A. Sebo , Stephen A. Sebo , Fellow , IEEE "Public Reaction to Power Frequency Electric and Magnetic Field (EMF) Effects" IEEE Spectrum , April 1996, pp.103-109.

ประวัติผู้เขียน

นายพิทักษ์ ปิ่นอนงค์ เกิดเมื่อวันที่ 23 กันยายน 2511 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรอุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์ จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2535 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง และประกาศนียบัตรวิชาชีพสาขาไฟฟ้ากำลัง จากเทคโนโลยีช่างอุตสาหกรรมกรุงเทพ

ปี พ.ศ. 2535 เข้าทำงานที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีประสบการณ์ทางด้านการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นเวลา 9 ปีและมีผลงานวิจัยเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ปัจจุบันดำรงตำแหน่งวิศวกรระดับ 7 สังกัดแผนกออกแบบอุปกรณ์สายส่ง กองวิศวกรรมสายส่ง ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย