

การวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kv โดยใช้คอมพิวเตอร์

COMPUTER AIDED ANALYSIS FOR 500 kv  
EHV. TRANSMISSION SYSTEM

ชำนิ โจประดิษฐ์ธรรม  
CHAMNI JAIPRADIDTHAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาความเสถียรของระบบส่งกำลังไฟฟ้า

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-689-4

การวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV โดยใช้คอมพิวเตอร์

COMPUTER AIDED ANALYSIS FOR 500 kV  
EHV. TRANSMISSION SYSTEM



ชำนี ใจประดิษฐ์ธรรม

CHAMNI JAIPRADIDTHAM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-622-689-4

เลขที่ 35725  
เดือน, ปี 19 ต.ย. 2543

**COMPUTER AIDED ANALYSIS FOR 500 kV  
EHV. TRANSMISSION SYSTEM**

**CHAMNI JAIPRADIDTHAM**

**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**

**2000**

**ISBN 974-622-689-4**

**COPYRIGHT 2000**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**บัณฑิตวิทยาลัย**  
**สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**  
**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**

-----

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV. โดยใช้คอมพิวเตอร์  
COMPUTER AIDED ANALYSIS FOR 500 kV. EHV. TRANSMISSION  
SYSTEM

ชื่อนักศึกษา              นายชำนาญ ใจประดิษฐ์ธรรม

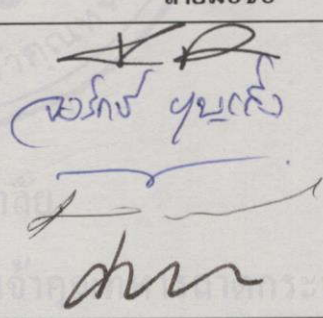
รหัสประจำตัว              40061086

ปริญญา                      วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา                   วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์      รศ.ศุภี                      บรรจงจิตร

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม      รศ.มณฑล                      ลีลาจินดาไกรฤกษ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชัยวุฒิ      ฉัตรอุทัย	
ผศ.จงรักษ์      บุญเส็ง	
ผศ.นิทัศน์      กฤษณจินดา	
รศ.มณฑล      ลีลาจินดาไกรฤกษ์	
รศ.ศุภี      บรรจงจิตร	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 10 มีนาคม 2543 เวลา 11.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ. ห้องสอบวิทยานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตึก 12 ชั้น ชั้น 4 ห้อง (E12-402)

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.มนัส ถังวรศิลป์)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2543

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV โดยใช้คอมพิวเตอร์
นักศึกษา	นายชานี ใจประดิษฐ์ธรรม
รหัสประจำตัว	40061086
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ศุภี บรรจงจิตร
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ. มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอเกี่ยวกับการวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV โดยใช้คอมพิวเตอร์ โดยจะพิจารณาจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสวงจรเดี่ยวและวงจรถู ซึ่งจะสามารถส่งพลังงานไฟฟ้าได้เป็นจำนวนมากจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ 3 (MM3) จ. ลำปาง ไปยังสถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก (TTK) จ. นครสวรรค์ เป็นระยะทางประมาณ 335 km โดยทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ขึ้นเพื่อช่วยในการวิเคราะห์จะเริ่มจากการวิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าของสายส่งแรงสูงที่ใช้ตัวนำล่อฟ้า จะทำให้เกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าบนสายส่ง จำนวนอิมพีแดนซ์เสิร์จของเสาโครงเหล็ก ระยะโหมติของฟ้าผ่า ( $r_s$ ) การเกิดชัตต์ลัมเปลวของตัวนำล่อฟ้าในสายส่ง การหาค่ามุมของ Shield ประสิทธิภาพและการคำนวณหาอัตรา Shielding Failure เป็นต้น วิเคราะห์ถึงการเกิดโคโรนาบนสายส่งแรงสูง เป็นการเกิดปรากฏการณ์โคโรนาที่ส่งผลกระทบต่อในระบบสายส่งและระบบที่อยู่ใกล้กัน คือจะทำให้เกิดเสียงรบกวนพอได้ยิน (Audible Noise; AN) น้อยกว่า 55 dB สัญญาณรบกวนวิทยุ (Radio Interference; RI) ในช่วง 40-55 dB เทียบกับ  $1 \mu V / m$  ที่สภาพอากาศแปรปรวน เมื่อตัวนำเปียกชื้นหรือมีฝนตกชุก

วิเคราะห์ระบบกราวด์ของสายส่งแรงสูง พิจารณาจากคุณสมบัติโครงสร้างของชั้นดินก่อนทำการเลือกปัก Ground Rod ในระยะความลึกที่เหมาะสม กำหนดหา Ground rod Resistance ความชื้นของดิน ระยะห่างและจำนวนของแท่ง Ground Rod เพื่อลดค่าความต้านทานของดินให้ต่ำลงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน 10 โอห์ม นอกจากนี้แล้วยังวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในระบบสายส่งแรงสูง จะพิจารณาการเปลี่ยนแปลงและลดทอนระดับความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของสายส่ง โดยการออกแบบเสาไฟฟ้าแรงสูงมีความสูงเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลจากการจัดเรียงลำดับเฟส ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะช่วยให้เกิดความสะดวก ถูกต้อง แม่นยำ โดยอ้างอิงจากข้อมูลของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ (EGAT) สามารถนำผลในการวิเคราะห์มาช่วยในการออกแบบสายส่งแรงสูง 500 kV เพื่อคำนึงถึงความปลอดภัยในการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีความเหมาะสม มีประสิทธิภาพและมีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลังมากยิ่งขึ้น

<b>Thesis Title</b>	Computer Aided Analysis for 500 kV EHV Transmission System
<b>Student</b>	Mr. Chamni Jaipradidtham
<b>Student ID.</b>	40061086
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2000
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Sulee Bunjongjit
<b>Thesis Co -advisor</b>	Assoc. Prof. Monthon Leelajindakrairisk

### ABSTRACT

This thesis concerns with an analysis of 500 kV EHV transmission lines system by computer. The 3-phase transmission system consists of single circuit and double circuit . It is able to transmit the power from the Mae Moh 3 (MM3) power plant in Lampang province to substation plant at Tha Tako(TTK) in Nakornsawan province about 335 kilometers far. It starts with developing software for analyzing lightning protection system of high transmission lines that is used air terminal. It may have lightning overvoltage on the transmission lines , it concerns about the surge impedance calculation of tower , the striking distance ( $r_s$ ), the shielding failure of air terminal , the effective shielding angle and the shielding failure rate. The program will analysis the corona effects on extra high voltage transmission lines (EHVTL) which affects to the transmission lines and closed system . The audible noise(AN) is less than 55 dB which indicates that radio interference (RI) occurs in the range of 40- 55 dB, above  $1 \mu V / m$  , in foul weather , when the conductor is wet or hard rainy.

The analysis grounding system of EHVTL is considered from the quality of soil structure before choosing ground rod place with suitable depth. The calculation of ground rod resistance , the moisture of soil , distance and a number of ground rod for reduction ground resistance to standard level at 10 ohms. will be done. The analysis of the electric and magnetic field from the transmission lines is considered from variation and reduction of the electric and magnetic field by increasing tower height , due to the phase changing arrangement. This developing software will help to analysis rapidly and accuracy for 500 kV transmission lines design by using the EGAT reference with safety and power system stability.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากท่านรองศาสตราจารย์ศุติ บรรจงจิตรและท่านรองศาสตราจารย์มณฑล ติลาจินดาไกรฤกษ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้ที่เปี่ยมล้นด้วยความเมตตา ความเอื้อเฟื้อสละเวลาอันมีค่า ให้ความช่วยเหลือแนะนำอย่างค้ำจุน จนทำให้ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน จึงนับเป็นพระคุณอันยิ่งใหญ่ที่จักจดจำไปตลอดชีวิตของผู้วิจัย และใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สำราญ สังข์สะอาด ผู้อำนวยการศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ ความรู้ที่มีประโยชน์อย่างมากเกี่ยวกับวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุณาให้คำปรึกษา ข้อมูลวิชาการ ให้ความอนุเคราะห์ จนผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตา ความมีน้ำใจของท่าน

ขอขอบพระคุณ คุณกิตติ เพชรสันทัต , คุณสรวิษย์ หิมะมาน , คุณพิทักษ์ ปิ่นอนงค์ , คุณวีระชัย ยอดเพชรและคุณเมธาพันธ์ ชาลิกุล กองวิศวกรรมสายส่ง ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(EGAT) จ. นนทบุรี ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลเอกสารการทำวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำแนะนำที่ดี

ขอกราบเท้า คุณพ่อสุวัฒน์ ใจประดิษฐ์ธรรมและคุณแม่ยุพาพรรณ ใจประดิษฐ์ธรรม ผู้เป็นพรหมของลูกที่ให้กำเนิดชีวิต ตลอดชีวิตที่ผ่านมาท่านสร้างคุณงามความดี อบรม สั่งสอน ให้ความรัก ให้กำลังใจในการต่อสู้กับชีวิต

ขอกราบนมัสการ หลวงพ่อวัดปากน้ำภาษีเจริญหรือพระมงคลเทพมุนี (สด จนฺทสโร) และขอขอบคุณ คุณวราภรณ์ ชัยสายัณห์ ผู้ให้แนวทางในการฝึกสมาธิ การประพฤติปฏิบัติธรรม สร้างบุญสร้างบารมี เพื่อให้จิตใจสงบและสบาย ทำให้มีปัญญาในการคิดงานวิจัยออกมาได้จนสำเร็จสมบูรณ์

ชานี ใจประดิษฐ์ธรรม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป .....	VIII
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีระบบสายส่งแรงสูง 500 kV.....</b>	<b>4</b>
2.1 การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าในระบบสายส่งแรงสูง 500 kV. ....	4
2.2 ข้อดีและข้อเสียของการส่งจ่ายระบบสายส่งแรงสูง 500 kV. ....	4
2.3 โครงข่ายการส่งจ่ายพลังงานระบบแรงดัน 500 kV. ....	6
2.4 สถานีไฟฟ้าย่อย 500 kV. ....	6
2.5 สถานีไฟฟ้าย่อยแม่เกาะ.....	9
2.6 สถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก.....	12
<b>บทที่ 3 การวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV .....</b>	<b>15</b>
3.1 การป้องกันฟ้าผ่าในระบบส่งจ่ายแรงสูง.....	15
3.1.1 ระดับ Keraunic และแผนที่ Isokeraunic.....	15
3.1.2 Interception ของ Flashes ที่เกิดจากสายส่งแรงสูง.....	16
3.1.3 Lightning Flashes to Shield Wires และ Towers.....	17
3.1.4 ความน่าจะเป็นของการ Distribution ของ Stroke Amplitudes.....	17
3.1.5 การหารัศมีประสิทธิผลของ Shield Wires และ Phase Conductor เมื่อคิดผล Corona.....	18

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.6 การคำนวณค่า Surge Impedances.....	20
3.1.7 การหา Coupling Factor สำหรับสายเฟส.....	22
3.1.8 การ Shielding Failure ของสายส่ง.....	22
3.1.9 การหา Effective Shielding.....	24
3.1.10 การคำนวณอัตรา Shielding Failure.....	25
3.2 การวิเคราะห์โคโรนาบนสายส่งแรงสูง 500 kV. ....	26
3.2.1 ปรัชญาการณ์ของโคโรนา.....	27
3.2.2 การเกิดโคโรนาดีสชาร์จ (Corona Discharge).....	27
3.2.3 การคำนวณหาแรงดันวิกฤตบนสายตัวนำ.....	28
3.2.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดโคโรนาในสภาพอากาศปกติ.....	31
3.2.5 แรงดันพื้นผิวเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำสูงสุดสำหรับเฟสจุดศูนย์กลาง และเฟสภายนอก.....	33
3.2.6 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดโคโรนาในสภาพอากาศแปรปรวนและกระแสไฟฟ้า สูญเสียที่เกิดจากโคโรนา.....	34
3.2.7 การเกิดเสียงรบกวนพอดิยีน (Audible Noise).....	35
3.2.8 การเกิดสัญญาณรบกวนวิทยุ (Radio Interference).....	36
3.2.9 การเกิดสัญญาณรบกวนโทรทัศน์ (Television Interference) .....	37
3.3 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งแรงสูง 500 kV. ....	39
3.3.1 สนามไฟฟ้า.....	39
3.3.2 สนามแม่เหล็ก.....	43
3.3.3 การลดทอนระดับความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก.....	45
3.4 การวิเคราะห์ระบบกราวด์ของสายส่งแรงสูง 500 kV. ....	46
3.4.1 ฟ้าผ่าในระบบสายส่ง.....	46
3.4.2 การตรวจสอบและปรับปรุงระบบ Grounding ของสายส่งแรงสูง.....	48
3.4.3 กำหนด Location ที่จะดำเนินการวัดค่า Ground Resistance.....	48
3.4.4 การเลือกพื้นที่ในการตอกแท่ง Ground Rod.....	48
3.4.5 ข้อควรปฏิบัติในการตอกแท่ง Ground Rod.....	49
3.4.6 ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity).....	49

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.7 คำนวณหา Ground Rod Resistance.....	50
3.4.8 การหาจำนวน Ground Rod.....	50
3.4.9 การหาระยะห่างระหว่าง Ground Rod.....	50
3.4.10 คำนวณหา Counterpoise Resistance.....	50
3.4.11 คำนวณหาความชื้นของดิน (Moisture of Soil ).....	51
3.4.12 หาแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว (Step and Touch Voltage).....	51
3.4.13 วิธี Driven Ground Rod.....	51
3.4.14 การทำระบบ Grounding เพื่อลดค่าความต้านทานของดินของสายส่งแรงสูง.....	54
<b>บทที่ 4 ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมและวิธีการวิเคราะห์.....</b>	<b>57</b>
4.1 ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรม Visual Basic 6.0.....	57
4.2 วิธีการใช้งานซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV. ....	59
4.3 โพลาร์ชาร์ตของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV. ....	61
<b>บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV .....</b>	<b>66</b>
5.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV วงจรคู่ (Double circuit).....	66
5.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว (Single circuit).....	84
<b>บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>104</b>
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	104
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	106
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>107</b>
<b>ภาคผนวก.....</b>	<b>109</b>
ภาคผนวก ก. แบบโครงสร้างลักษณะของเสาโครงเหล็กแต่ละชนิด.....	109
ภาคผนวก ข. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	117
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>128</b>

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่มีการใช้หน่วยผลิตไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า.....	12
2.2 แสดงแผนการขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าของแรงดัน 500 kV.....	13
3.1 แสดงระดับ Isokeraunic ตามแนวสายส่งระบบ 500 kV ของประเทศไทย.....	16
3.2 แสดงความต้านทานจำเพาะของดินและน้ำ.....	49
5.1 ผลการวิเคราะห์ชัตดาวน์ลวดในระบบป้องกันฟ้าผ่า เปรียบเทียบกับผลของโปรแกรม สำหรับสายส่งแรงสูงชนิด DL 3° Suspension.....	71
5.2 ผลการวิเคราะห์การเกิดโคโรนา เปรียบเทียบกับผลของโปรแกรมสำหรับ สายส่งแรงสูงชนิด DL 3° Suspension.....	75
5.3 ผลลดทอนระดับความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าแรงสูง DL 3° Suspension... ..	80
5.4 ผลการลดทอนระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างแนวจุด P ใดๆ เมื่อเพิ่มความสูงของ เสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด DL 3° Suspension.....	80
5.5 ผลการลดทอนระดับความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด DL 3° Suspension.....	80
5.6 ผลการวิเคราะห์ชัตดาวน์ลวดในระบบป้องกันฟ้าผ่า เปรียบเทียบกับผลของโปรแกรม สำหรับสายส่งแรงสูงชนิด SL 0° Suspension.....	89
5.7 ผลการวิเคราะห์การเกิดโคโรนา เปรียบเทียบกับผลของโปรแกรมสำหรับ สายส่งแรงสูงชนิด SL 0° Suspension.....	94
5.8 ผลการลดทอนระดับความเข้มสนามไฟฟ้า เมื่อเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด SL 0° Suspension.....	99
5.9 ผลการลดทอนระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างแนวจุด P ใดๆ เมื่อเพิ่มความสูงของ เสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด SL 0° Suspension.....	99
5.10 ผลการลดทอนระดับความเข้มสนามแม่เหล็กและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด SL 0° Suspension.....	99

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	7
2.3	8
2.4	11
3.1	15
3.2	16
3.3	18
3.4	19
3.5	20
3.6	22
3.7	23
3.8	24
3.9	28
3.10	33
3.11	37
3.12	38
3.13	38
3.14	41
3.15	41
3.16	42
3.17	44
3.18	46
3.19	46
3.20	48
3.21	52
3.22	52
3.23	55

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.24 การปักแท่ง Ground Rod 6 แท่ง ในแนวทแยงของขาเสาโครงเหล็ก 500 kV.....	55
3.25 การปักแท่ง Ground Rod 8 แท่ง ในแนวทแยงของขาเสาโครงเหล็ก 500 kV.....	55
3.26 การปักแท่ง Ground Rod 10 แท่ง ของขาเสาโครงเหล็ก 500 kV.....	56
3.27 การปักแท่ง Ground Rod 12 แท่ง ของขาเสาโครงเหล็ก 500 kV.....	56
4.1 แสดงหน้าจอ Dialog Box .....	57
4.2 แสดงส่วนประกอบต่างๆ บนหน้าจอการออกแบบ.....	58
4.3 แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ของโปรแกรม Visual Basic.....	58
4.4 แสดงหน้าจอกลุ่มโปรแกรม PATS.....	59
4.5 แสดงหน้าจอก่อนเข้าสู่โปรแกรม.....	60
4.6 โพล์ชาร์ตของซอฟต์แวร์วิเคราะห์การเกิด Shielding Failures ในระบบป้องกันฟ้าผ่าของ สายส่งแรงสูง 500 kV.....	61
4.7 โพล์ชาร์ตของซอฟต์แวร์วิเคราะห์การเกิด Corona Loss และสัญญาณรบกวน $AN, RI$ บนสายส่งแรงสูง 500 kV.....	62
4.8 โพล์ชาร์ตของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ Electric and Magnetic Fields ของสายส่งแรงสูง 500 kV.....	63
4.9 โพล์ชาร์ตของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ Grounding System ของสายส่งแรงสูง 500 kV.....	64
4.10 โพล์ชาร์ตแสดงการทำงานทั้งหมดของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV.....	65
5.1 หน้าจอของสายส่งวงจรคู่ DL 3°Suspension ขณะฟ้าผ่าเสาโครงเหล็กก่อนเข้าสู่การวิเคราะห์.....	67
5.2 หน้าจอการเกิด Shielding Failures ในระบบป้องกันฟ้าผ่าของเสาชนิด DL 3°Suspension.....	68
5.3 หน้าจอการคำนวณ Coordinate ของสาย Shield และมุม Shield ของเสา ชนิด DL 3°Suspension .....	69
5.4 หน้าจอการคำนวณระยะโคมตีฟ้าผ่า กระแสฟ้าผ่าสูงสุด และอัตราการเกิด Shield ของเสา ชนิด DL 3°Suspension.....	70
5.5 หน้าจอการคำนวณหา Corona Loss ในสภาพอากาศปกติของเสา ชนิด DL 3°Suspension .....	71
5.6 หน้าจอการคำนวณหาแรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสา ชนิด DL 3°Suspension.....	72
5.7 หน้าจอการคำนวณ Corona Loss และ Current Loss ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสา ชนิด DL 3°Suspension.....	73
5.8 หน้าจอการคำนวณหา Audible Noise ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสาชนิด DL 3°Suspension .....	74

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.9 หน้าจอการคำนวณหา Radio Interference ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสาชนิด DL 3°Suspension .....	75
5.10 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fields และMagnetic Flux Density ของเฟส A ที่ความสูงเสา 49.6 เมตร ของเสาชนิด DL 3°Suspension.....	76
5.11 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fields และMagnetic Flux Density ของเฟส B ที่ความสูงเสา 38.6 เมตร ของเสาชนิด DL 3°Suspension.....	76
5.12 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fields และMagnetic Flux Density ของเฟส C ที่ความสูงเสา 27.6 เมตร ของเสาชนิด DL 3°Suspension.....	77
5.13 หน้าจอการคำนวณ Electric Fields ของเฟส A ที่ความสูงเสา 49.6 เมตร ของเสาชนิด DL 3° Suspension.....	78
5.14 หน้าจอการคำนวณ Electric Fields ของเฟส B ที่ความสูงเสา 38.6 เมตร ของเสาชนิด DL 3° Suspension.....	78
5.15 หน้าจอการคำนวณ Electric Fields ของเฟส C ที่ความสูงเสา 27.6 เมตร ของเสาชนิด DL 3° Suspension.....	79
5.16 หน้าจอการคำนวณ Grounding Resistance Ground rod Resistance แรงดันช่วงก้ำวและ แรงดันสัมผัส เมื่อปัก Rod 4 แท่ง ของดินร่วนปนทรายของเสาชนิด DL 3° Suspension.....	81
5.17 หน้าจอการคำนวณ Grounding Resistance Ground rod Resistance แรงดันช่วงก้ำวและ แรงดันสัมผัส เมื่อปัก Rod 5 แท่ง ของดินร่วนปนทรายของเสาชนิด DL 3° Suspension .....	82
5.18 แสดงกราฟแท่งของค่าความต้านทานของดินลดลง เมื่อเพิ่มจำนวนแท่ง Ground Rod ของดินเหนียว.....	83
5.19 แสดงกราฟแท่งของค่าความต้านทานของดินลดลง เมื่อเพิ่มจำนวนแท่ง Ground Rod ของดินร่วนปนทราย.....	83
5.20 หน้าจอของสายส่งวงจรเดี่ยว SL 0° Suspension ขณะเกิดฟ้าผ่าเสาโครงเหล็กก่อนเข้าสู่ การวิเคราะห์.....	84
5.21 หน้าจอการเกิด Shielding Failures ในระบบป้องกันฟ้าผ่าของเสาชนิด SL 0° Suspension.....	86
5.22 หน้าจอการคำนวณCooridinateของสาย Shield และมุม Shield ของเสา ชนิด SL 0° Suspension .....	87
5.23 หน้าจอการคำนวณระยะ โจมตีฟ้าผ่า กระแสฟ้าผ่าสูงสุด และอัตราการเกิด Shield ของเสา ชนิด SL 0° Suspension.....	88

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.24 หน้าจอการคำนวณหา Corona Loss ในสภาพอากาศปกติของเสา ชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension .....	89
5.25 หน้าจอการคำนวณหาแรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสา ชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension.....	90
5.26 หน้าจอการคำนวณ Corona Loss และ Current Loss ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสา ชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension.....	91
5.27 หน้าจอการคำนวณหา Audible Noise ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสาชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension.....	92
5.28 หน้าจอการคำนวณหา Radio Interference ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสาชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension .....	93
5.29 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fields และ Magnetic Flux Density ของเฟส A ที่ระยะจุด P 48 เมตร , ความสูงเสา 31.62 เมตรของเสาชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension.....	95
5.30 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fields และ Magnetic Flux Density ของเฟส B ที่ระยะจุด P 35 เมตร , ความสูงเสา 31.62 เมตร ของเสาชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension .....	95
5.31 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fields และ Magnetic Flux Density ของเฟส C ที่ระยะจุด P 22 เมตร , ความสูงเสา 31.62 เมตร ของเสาชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension .....	96
5.32 หน้าจอการคำนวณ Electric Fields ของเฟส A ที่ระยะจุด P 48 เมตร, ความสูงเสา 31.62 เมตร ของเสาชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension.....	97
5.33 หน้าจอการคำนวณ Electric Fields ของเฟส B ที่ระยะจุด P 35 เมตร, ความสูงเสา 31.62 เมตร ของเสาชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension.....	97
5.34 หน้าจอการคำนวณ Electric Fields ของเฟส C ที่ระยะจุด P 22 เมตร, ความสูงเสา 31.62 เมตร ของเสาชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension.....	98
5.35 หน้าจอการคำนวณ Grounding Resistance Ground rod Resistance แรงดันช่วงก้ำวและ แรงดันสัมผัสเมื่อปัก Rod 4 แท่ง ของทรายขึ้น สำหรับเสาชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension .....	100
5.36 หน้าจอการคำนวณ Grounding Resistance Ground rod Resistance แรงดันช่วงก้ำวและ แรงดันสัมผัสเมื่อปัก Rod 5 แท่ง ของทรายขึ้น สำหรับเสาชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension .....	101
5.37 หน้าจอการคำนวณ Grounding Resistance Ground rod Resistance แรงดันช่วงก้ำวและ แรงดันสัมผัสเมื่อปัก Rod 6 แท่ง ของทรายขึ้น สำหรับเสาชนิด $SL\ 0^\circ$ Suspension .....	102
5.38 แสดงกราฟแท่งของค่าความต้านทานของดินลดลง เมื่อเพิ่มจำนวนแท่ง Ground Rod ของทรายขึ้น.....	103

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไฟฟ้าเป็นสาธารณูปโภคพื้นฐานสร้างความสะดวกสบายให้แก่ประชาชน ในการดำรงชีวิตปกติ การพักผ่อน การแสวงหาความรู้ ความบันเทิงเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตอุตสาหกรรม พาณิชยกรรม การพัฒนาไฟฟ้ามีวัตถุประสงค์เพื่อให้ประชาชนจะได้รับประโยชน์จากการใช้พลังงานไฟฟ้าอย่างทั่วถึง ในขณะที่ธุรกิจอุตสาหกรรมต่าง ๆ ต้องการกระแสไฟฟ้าที่มีคุณภาพ มีความมั่นคง และพอเพียงต่อความต้องการ จากประมาณการความต้องการใช้ไฟฟ้าของประเทศโดยคณะทำงานพยากรณ์ความต้องการใช้ไฟฟ้าจะมีอัตราเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศโดยในช่วงปี 2537-2549 ความต้องการพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจะเพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ยปีละ 1,218,580 กิโลวัตต์และ 8,147 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง ในขณะที่การพัฒนาไฟฟ้าในภาคเหนือเจริญก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ความต้องการใช้ไฟฟ้าก็เพิ่มสูงขึ้นเป็นเงาตามตัว การไฟฟ้าฝ่ายผลิต ฯ (EGAT) ได้เร่งจัดหาแหล่งผลิตและขยายระบบส่งไฟฟ้าให้ทันต่อความต้องการอย่างต่อเนื่อง จึงมีการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระบบสายส่งแรงสูง 500 kV เพื่อลดการสูญเสียในสายส่งให้เหลือน้อยที่สุดเพิ่มความมั่นคงของระบบให้ดีขึ้น ลดต้นทุนในการก่อสร้างและสามารถส่งกระแสไฟฟ้าได้จำนวนมาก ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงพัฒนาซอฟต์แวร์ขึ้นเพื่อช่วยวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงและลดการสูญเสียดังกล่าว

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อศึกษาถึงผลกระทบทั้งในระบบสายส่งแรงสูงและระบบที่อยู่ใกล้กันคือ การทำให้เกิดเสียงรบกวนพอดิอิน ( $AN$ ) และสัญญาณรบกวนทางวิทยุ ( $RI$ ) ในสภาพอากาศปกติและสภาพอากาศแปรปรวนเช่น ฝนตกหนักในอัตราฝนตก 12.7 mm/hr. อากาศหนาวจัดที่มีอุณหภูมิในช่วง  $4^{\circ}C - 20^{\circ}C$  ที่เกิดจากโคโรนาให้น้อยที่สุดของแนวเขตเดินสายไฟฟ้า (right of way ; R-O-W) ได้

1.2.2 เพื่อศึกษาและทำความเข้าใจคุณสมบัติการวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV เช่น วิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าของสายส่ง วิเคราะห์ระบบ Grounding ของสายส่ง วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่ง และวิเคราะห์ปรากฏการณ์เกิดโคโรนาบนสายส่งแรงสูงได้

1.2.3 สร้างซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานจริงในภาคสนามสามารถใช้ทำการวิจัย ศึกษา ค้นคว้าและออกแบบระบบสายส่งแรงสูง 500 kV เพื่อประโยชน์ในด้านความปลอดภัยสูงสุด และช่วยทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นไปอย่างเหมาะสม มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นและทำให้มีเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง

1.2.4 นำข้อมูลมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) ตามโครงการศึกษาร่วมกับบริษัทที่ปรึกษา LEMCO Engineers (International) , Inc., แห่งสหรัฐอเมริกาและบริษัท General Electric แห่งสหรัฐอเมริกาเป็นผู้คิดค้นใช้โปรแกรม ชื่อว่า “METIFOR” ทำการวิเคราะห์โดยการเปลี่ยนข้อมูล parameter ต่าง ๆ เช่น Grounding Resistance Shielding Angle และรูปร่างของเสาโครงเหล็ก ซึ่งเป็นที่ยอมรับทั่วไปมาเป็นหลักในการวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV กรณีศึกษา MAE MOH - THA TAKO

1.2.5 เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาซอฟต์แวร์ สำหรับการนำไปใช้ปฏิบัติงานจริงในลักษณะงานระบบไฟฟ้ากำลังตามสถานีไฟฟ้าย่อยและโรงไฟฟ้าแรงสูง

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิจัยและพัฒนาซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ระบบสายส่ง 500 kV กรณีศึกษาแม่เมาะ 3 (MM3) ถึงท่าตะโก (TTK) โดยเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Visual Basic Version 6 ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ และมีการติดต่อกับผู้ใช้ในรูปกราฟฟิก (Graphical User Interface ; GUI) จึงทำให้สามารถใช้งานได้ง่ายและมีประสิทธิภาพ โดยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถทำการคำนวณและวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV ดังนี้

1.3.1 วิเคราะห์ระบบป้องกันฟ้าผ่าของสายส่งแรงสูง ในขณะที่ฟ้าผ่าลงสู่สายดินหรือที่ยอดเสา และฟ้าผ่าลงบนสายเฟสจึงทำให้เกิดชัตดาวน์

1.3.2 วิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์โคโรนาของสายส่ง ตั้งแต่แรงดันวิกฤตที่ทำให้อากาศแตกตัวจนถึงแรงดันวิกฤตที่สามารถมองเห็นแสงเรืองๆ สีม่วงได้ แรงดันพื้นผิวเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ กำลังไฟฟ้าสูญเสียของสายส่งในสภาพอากาศปกติ และสภาพอากาศแปรปรวน

1.3.3 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งแรงสูง ที่มีผลการจัดเรียงลำดับของเฟสและลดทอนระดับความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในบริเวณใกล้แนวสายส่งด้วยการออกแบบให้เสาส่งไฟฟ้าแรงสูงมีความสูงเพิ่มขึ้น

1.3.4 วิเคราะห์ระบบ Grounding ของสายส่งแรงสูง โดยการปักแท่ง Ground Rod ในชั้นดินที่มีความชื้นในดิน ความลึก จำนวนแท่ง Ground Rod ระยะห่างของแท่ง Ground Rod ความต้านทานจำเพาะของดินจะมีผลกระทบเพื่อลดค่า Grounding Resistance ให้ต่ำลงตามมาตรฐาน 10 โอห์ม

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1.4.1 วางแผนการดำเนินงาน

1.4.2 ศึกษาและค้นคว้าข้อมูล เก็บรวบรวมข้อมูลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ฯ (EGAT)

1.4.3 ศึกษาการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษา Visual Basic Version 6

1.4.4 เขียน Flowchart เพื่อเตรียมเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามทฤษฎีที่ทำการศึกษา

1.4.5 เขียน Program ตาม Flowchart ที่เตรียมไว้

1.4.6 ทดสอบโปรแกรม เปรียบเทียบผลการทำงานของโปรแกรมและทำการแก้ไขโปรแกรม

1.4.7 สรุปผลและประเมินผล

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เพื่อจะได้ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV ที่มีความเหมาะสมกับสภาพภูมิประเทศ และมีความถูกต้องตามข้อมูลมาตรฐานการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ฯ (EGAT)

1.5.2 สามารถนำระบบข้อมูลและพารามิเตอร์ของระบบสายส่ง 500 kV นำไปใช้ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับค่าแรงดันสูงสุด เช่น แรงดันเกินฟ้าผ่า(Lightning Overvoltage) แรงดันเกินสวิตชิง(Switching Overvoltage) และแรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) ในลักษณะเป็นออสซิลเลชั่นที่ความถี่พลังงานหรือ เป็นฮาร์มอนิกส์ ระหว่างเฟสกับดิน หรือระหว่างเฟสกับเฟส และไม่มีภาระหน่วงหรือหน่วงน้อย

1.5.3 พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งเป็นเครื่องมือในการช่วยออกแบบระบบสายส่งแรงสูง 500 kV ให้ผู้ออกแบบทำงานได้สะดวก รวดเร็วมากยิ่งขึ้น ประหยัดเวลาในการวิเคราะห์หรือช่วยออกแบบเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สมองของบุคลากรในการออกแบบระบบสายส่งแรงสูง

1.5.4 ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์สามารถนำไปวิเคราะห์ และออกแบบระบบสายส่งแรงสูง 500 kV ตามข้อมูลมาตรฐานการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ฯ(EGAT) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประหยัดต้นทุนในการก่อสร้างสายส่งกำลังไฟฟ้าแรงสูง

1.5.5 เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบระบบป้องกันแรงดันเกินได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม จะช่วยลดระดับฉนวนไฟฟ้าที่เกินความจำเป็น อันทำให้ได้ระบบไฟฟ้าแรงสูงที่คุ้มต่อการลงทุนได้เป็นอย่างดี

## บทที่ 2

# ทฤษฎีระบบสายส่งแรงสูง 500 kV

### 2.1 การส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระบบสายส่งแรงสูง 500 kV


เนื่องจากความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าของประชาชนและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ นั้นนับวันจะเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุด (peak hours) ซึ่งต้องการพลังงานไฟฟ้าอย่างมาก ดังนั้นทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จึงจำเป็นต้องหาแนวทางที่สามารถส่งพลังงานไฟฟ้าให้ทันกับความต้องการเหล่านั้น ซึ่งประกอบกับระบบสายส่งไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ต้องส่งพลังงานไฟฟ้าในระยะไกล ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียในสายส่งให้เหลือน้อยที่สุด และเพิ่มความเชื่อถือรวมทั้งสมรรถนะในระบบส่งพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูง ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ จึงได้ศึกษาและวางแผนร่วมกับบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาโดยมีความเห็นตรงกันว่า เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงและลดการสูญเสียดังกล่าว ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ จึงได้เปลี่ยนระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าระยะไกลจากระบบแรงดัน 230 kV ให้เป็นระบบ 500 kV ซึ่งระบบที่ทำการส่งครั้งแรกคือจากสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ จ. ลำปาง มาสู่สถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก จ. นครสวรรค์ เป็นระยะทางประมาณ 335 km หลังจากนั้นก็จะวางสายส่งมายังสถานีไฟฟ้าอโยธยาบริเวณระยะทางจากจังหวัดลำปางมาถึงกรุงเทพฯ โดยประมาณ 540 km สำหรับการส่งพลังงานด้วยระบบแรงดัน 500 kV เพื่อเข้าสู่สถานีไฟฟ้าย่อยต่างๆ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ แล้วก็จะเชื่อมต่อกับระบบแรงดันไฟฟ้าเดิมคือแรงดัน 230 kV ต่อไป

### 2.2 ข้อดีและข้อเสียของการส่งจ่ายระบบแรงสูง 500 kV

ซึ่งจากการที่ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ จะส่งพลังงานไฟฟ้าด้วยระดับแรงดัน 500 kV ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ได้ทำการศึกษาและพบว่าข้อดีดังนี้ [18]

- การส่งด้วยระบบแรงดัน 500 kV จะสามารถส่งพลังงานได้เป็น 4 เท่าของการส่งด้วยระดับแรงดัน 230 kV นั่นคือสายส่ง 500 kV 1 เส้นจะเท่ากับสายส่ง 230 kV ถึง 4 เส้น ทำให้การส่งด้วยระดับแรงดัน 500 kV มีการสร้างวงจรการส่งน้อยลง
  - การส่งด้วยระบบแรงดัน 500 kV มีการสูญเสียพลังงานในการส่งน้อยลงถึง 3 เท่า และสามารถส่งกระแสไฟฟ้าได้จำนวนมากๆ
  - การส่งด้วยระบบแรงดัน 500 kV ทำให้มีความมั่นคงของระบบส่งจ่ายไฟฟ้าดีขึ้นเชื่อถือได้ ทำให้สามารถลดจำนวนครั้งไฟดับได้ต่ำกว่าเป้าหมายถึงร้อยละ 52
  - การส่งด้วยระบบแรงดัน 500 kV ทำให้ลดต้นทุนในการลงทุนได้มากขึ้น
- จะเห็นได้ว่าการส่งพลังงานด้วยระบบแรงดัน 500 kV นั้นมีข้อดีหลายประการ แต่ก็ยังมีข้อเสียเช่นกันดังนี้

- จากการที่มีระบบแรงดันสูงขึ้นทำให้มีอันตรายมากขึ้น ดังนั้นผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์ในระบบแรงดัน 500 kV จะต้องมีความระมัดระวังเป็นอย่างมาก

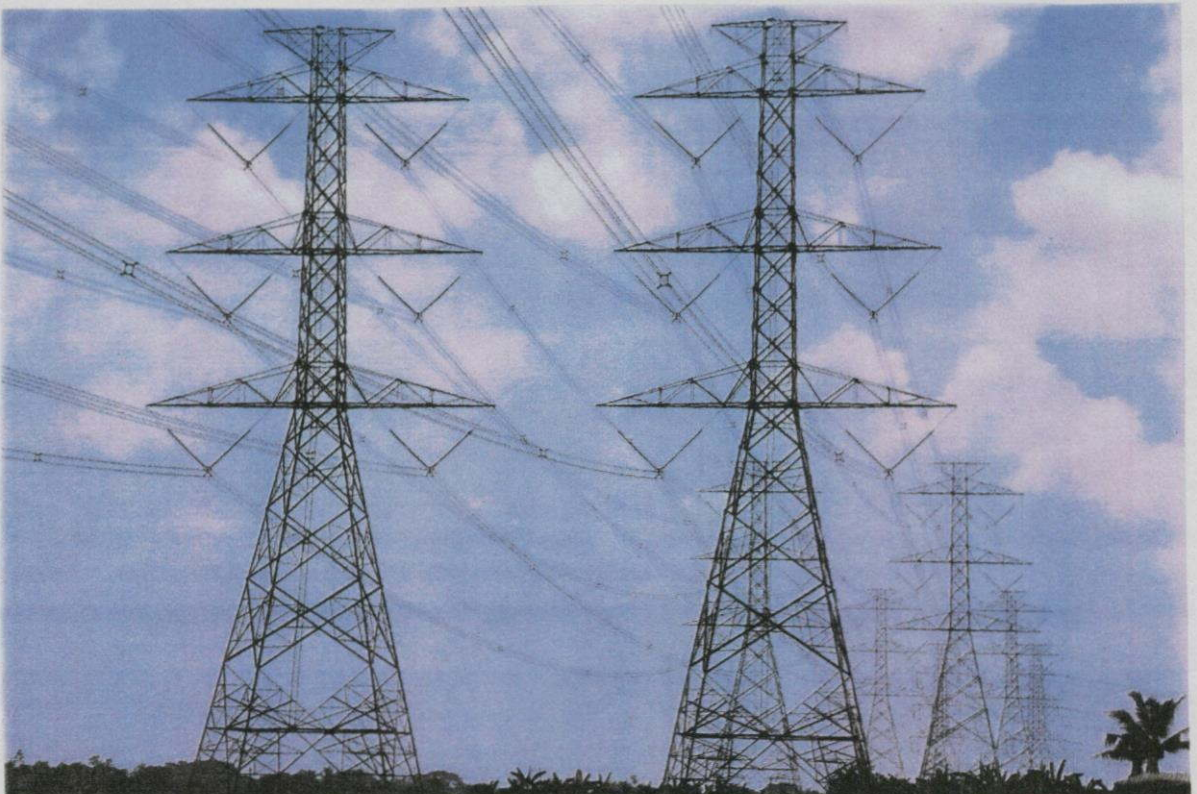
 - จากการที่มีระดับแรงดันสูงขึ้นทำให้การฉนวนมีมากขึ้น ซึ่งจะเป็นการทำให้สิ้นเปลืองงบประมาณการลงทุนทางด้านการฉนวนเพิ่มขึ้น

- การลงทุนทางด้านอุปกรณ์ป้องกันต้องเพิ่มขึ้น เช่น อุปกรณ์รีเลย์จะมีราคาแพงขึ้น

- การดูแลบำรุงรักษาต้องเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าระบบ 500 kV นี้จะต้องมีความมั่นคงในการทำงานมาก จะเกิดความผิดพลาดในการทำงานไม่ได้

ในการส่งพลังงานไฟฟ้าจำนวนมากจากโรงไฟฟ้าพลังไอน้ำแม่เมาะมายังกรุงเทพฯ ซึ่งมีระยะทางประมาณ 540 km โดยใช้ระบบแรงดัน 230 kV และเพื่อให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นสามารถส่งพลังงานได้มากขึ้น จำเป็นต้องนำระบบสายส่งขนาดแรงดัน 500 kV มาใช้ โดยแบ่งการก่อสร้างออกเป็น 5 ระยะดังนี้

2.2.1 ระยะที่หนึ่ง จะก่อสร้างสายส่ง 500 kV กรณีศึกษาแม่เมาะ -ท่าตะโก เสาโครงเหล็กแบบ Single circuit ระยะทางประมาณ 326 km ขนาดสาย 4\*795 MCM. ACSR/Phase โดยในระยะแรกจะจ่ายไฟด้วยระบบ 230 kV ก่อน แล้วจึงได้ก่อสร้างสายส่ง 230 kV วงจรคู่ 2 ชุดจากสถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก จะเชื่อมโยงกับสายส่งวงจรคู่ 230 kV จากนครสวรรค์- อ่างทอง สำหรับลูกถ้วยที่ใช้เป็นยี่ห้อ NGK จากประเทศญี่ปุ่น ระยะ right of way ข้างละ 35 m และระยะ ruling span 490 m



รูปที่ 2.1 แสดงการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของสายส่งแรงสูง 500 kV วงจรคู่ (Double circuit)

2.2.2 ระยะที่สอง จะก่อสร้างสายส่ง 500 kV กรณีศึกษาท่าตะโก-หนองจอก เสาโครงเหล็กแบบ Single circuit ระยะทางประมาณ 210 km สำหรับโรงไฟฟ้าแม่เมาะเครื่องที่ 9 และสายส่ง 500 kV 75 Mvar. line shunt reactors ทั้งสองด้าน พร้อมทั้ง Reactive Power Compensation ดังนี้

- สย. ท่าตะโก - 22 kV Thyristor Control Reactor (TCR) ขนาด 150 Mvar. และ Fixed Capacitor Bank (FCB) ขนาด 2\*40 Mvar.

- สย. หนองจอก - 230 kV Shunt Capacitor Bank ขนาด 2\*60 Mvar.

2.2.3 ระยะที่สาม จะก่อสร้างสายส่ง 500 kV กรณีศึกษาแม่เมาะ-ท่าตะโก ซึ่งจะเหมือนกับระยะที่หนึ่งแต่จะเป็นแบบ Double circuit จะสามารถส่งพลังงานไฟฟ้าได้จำนวนมากกว่า และใช้ถูกด้วยชั๊ต NHK จากประเทศญี่ปุ่น

2.2.4 ระยะที่สี่ จะก่อสร้างสายส่ง 500 kV กรณีศึกษาท่าตะโก - หนองจอก ซึ่งก็จะเหมือนกับระยะที่สองเช่นกันแต่จะเป็น Double circuit สำหรับระบบนี้จะใช้ถูกด้วยชั๊ต SEDIVER จากประเทศฝรั่งเศส

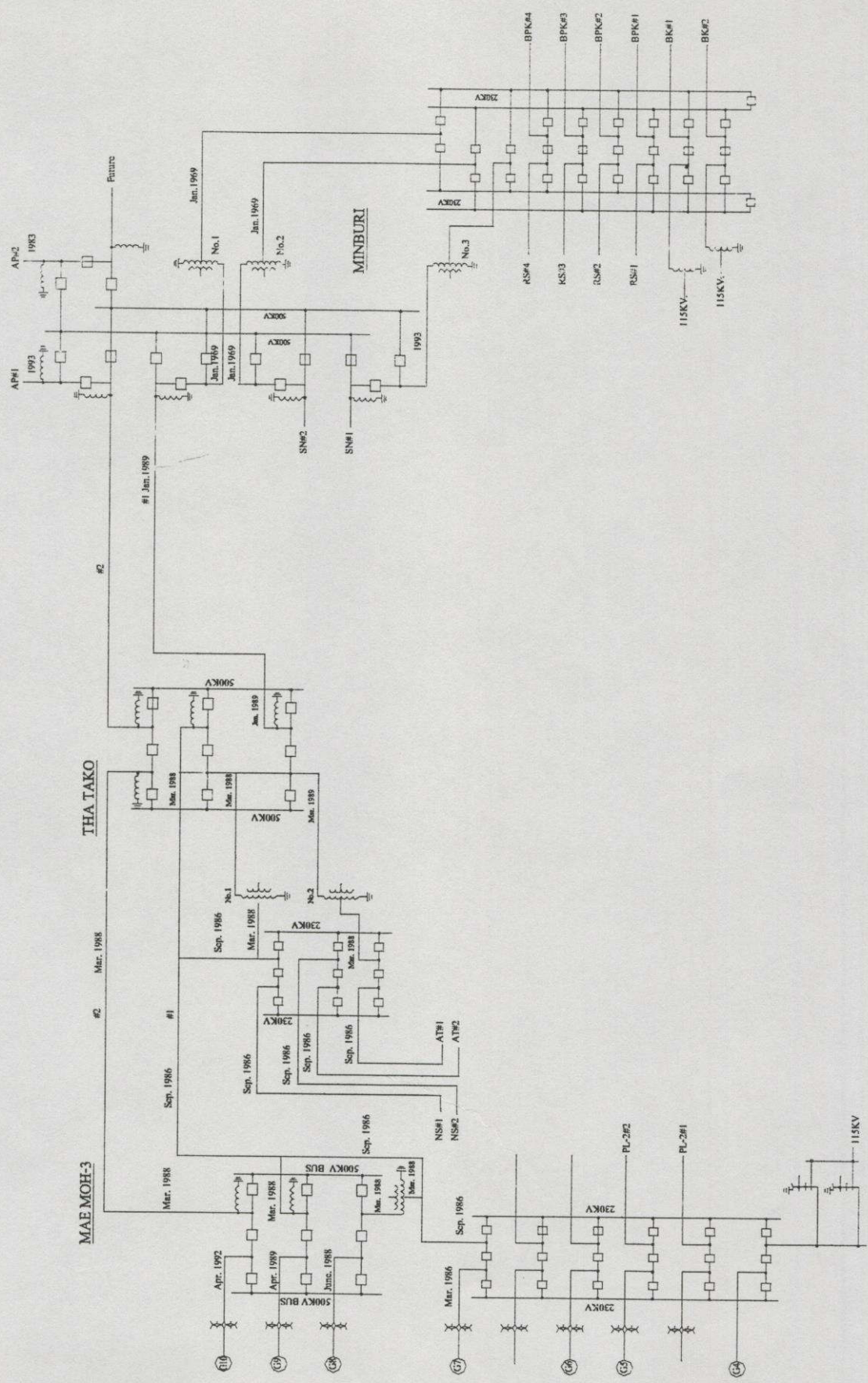
2.2.5 ระยะที่ห้า จะก่อสร้างสายส่ง 500 kV กรณีศึกษาไทรน้อย-หนองจอก จะเป็นแบบ Double circuit ซึ่งใช้ถูกด้วยชั๊ต NHK จากประเทศญี่ปุ่น

## 2.3 โครงข่ายการส่งจ่ายพลังงานระบบแรงดัน 500 kV

สำหรับโครงข่ายการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าระบบแรงดัน 500 kV นี้จะคล้ายกับระบบ 230 kV เดิม โดยจะแสดงระบบโครงข่ายดังรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าโครงสร้างของระบบประกอบด้วยสถานีไฟฟ้าย่อยหลัก 3 สถานี คือ สถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ 3 (MM3) จังหวัดลำปาง สถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก (TTK) จังหวัดนครสวรรค์ และสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก (NCO) หรือสถานีไฟฟ้าย่อยมินบุรี ซึ่งทั้ง 3 สถานีดังกล่าวนี้ระบบโครงข่ายของแต่ละสถานีอาจมีทั้งระบบแรงดัน 500 kV, 230 kV และ 115 kV รวมกันอยู่ทั้ง 3 ระบบเลยก็ได้

## 2.4 สถานีไฟฟ้าย่อย 500 kV

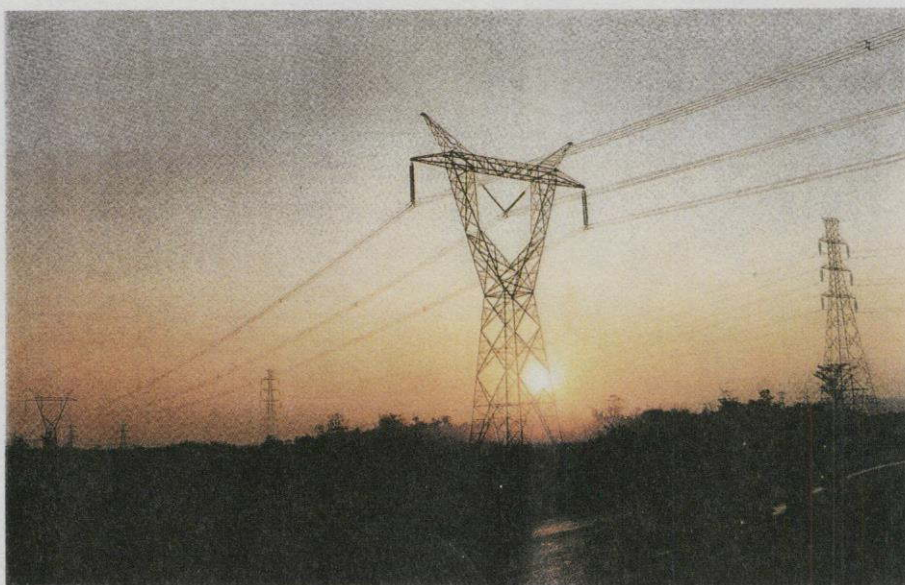
สถานีไฟฟ้าย่อย (Substation) คือ สถานีกลางซึ่งรับส่งพลังงานไฟฟ้าจากสายส่งเพื่อจ่ายผ่านสู่ระบบจำหน่าย จะประกอบด้วย การเปลี่ยนแรงดัน การตัดตอน การควบคุม และการป้องกันระบบ เป็นต้น ในสถานีไฟฟ้าย่อยจะเป็นที่รวมของอุปกรณ์สำหรับสวิตชิง และอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนหรือเรกกูเลตแรงดันทางไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง อาจจะมีสถานีไฟฟ้าย่อยขนาดเล็กหรือขนาดใหญ่หรืออาจจะเป็นแบบ tailor made หรือ factory fabricated หรืออาจจะเป็นแบบควบคุมโดยอัตโนมัติหน้าที่ของสถานีไฟฟ้าย่อยโดยทั่วๆ ไปจะมีดังนี้



รูปที่ 2.2 แสดงโครงข่ายการส่งกำลังไฟฟ้าแรงดัน 500 kV ของสถานีไฟฟ้าอ้อยแม่เกาะ สถานีไฟฟ้าอ้อยท่าตะโก และสถานีไฟฟ้าอ้อยมินบุรี

1. เป็นจุดเปลี่ยนระดับแรงดันไฟฟ้า
2. เป็นจุดปรับระดับแรงดันในระบบให้คงที่
3. เป็นจุดเชื่อมระหว่างระบบสายส่งกับระบบจำหน่ายพลังงานไฟฟ้าในการตัดคอนออกจากระบบและนำเข้าสู่ระบบ
4. เป็นจุดวัดปริมาณทางไฟฟ้า
5. เป็นจุดติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า อุปกรณ์ตัดตอน (Switching) และ Surge Protection
6. เป็นจุดที่รับพลังงานจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะเรียกว่า Switch yard

สถานีไฟฟ้าย่อยของระบบแรงดัน 500kV จะมีลักษณะโดยทั่วไปที่เหมือนกับสถานีไฟฟ้าย่อยของระบบแรงดัน 230 kV และก็จะทำหน้าที่และจุดประสงค์ในการใช้งานที่เหมือนกัน สิ่งที่แตกต่างกันคือสถานีไฟฟ้าย่อย 500 kV อาจจะมีส่วนที่เป็นระบบแรงดัน 230 kV และ 115 kV รวมอยู่ในระบบเดียวกัน และสถานีไฟฟ้าย่อย 500 kV จะมีระดับแรงดันที่สูงกว่า ดังนั้นอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้งานภายในสถานีนี้จะต้องมีขนาดใหญ่กว่า และการฉนวนของอุปกรณ์จะต้องดีกว่าสถานีไฟฟ้าย่อย 230 kV เนื่องจากว่าระบบแรงดัน 500 kV จะเป็นระดับแรงดันที่สูงพิเศษ (Extra high voltage) ในปัจจุบันการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ(EGAT) มีการใช้งานสถานีไฟฟ้าย่อยระบบแรงดัน 500 kV มีอยู่ด้วยกันหลายแห่ง แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกกล่าวถึงสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะและสถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก



รูปที่ 2.3 แสดงการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าระหว่างแม่เมาะ – ท่าตะโก ของเสาโครงเหล็ก 500 kV วงจรเดี่ยว (Single circuit)

## 2.5 สถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ (MAE MOH)

สถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะนี้จัดเป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ใช้ถ่านลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิง ด้วยการแปรสภาพพลังงานสะสมของถ่านลิกไนต์ให้เป็นพลังงานความร้อนโดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง แต่เดิมมีเฉพาะระบบแรงดัน 230 kV ซึ่งภายหลังการวางแผนเปลี่ยนระบบแรงดันเป็น 500 kV ได้มีการสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยใหม่ที่ใกล้กับสถานีไฟฟ้าย่อยเดิม และได้พัฒนาจนเหมืองแม่เมาะกลายเป็นเหมืองลิกไนต์ที่ใหญ่ที่สุดในภาคพื้นเอเชียอาคเนย์ โรงไฟฟ้าแม่เมาะปัจจุบันมีจำนวน 13 เครื่องเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าที่สำคัญยิ่ง โดยเฉพาะในภาคเหนือซึ่งมีการขยายตัวทางเศรษฐกิจค่อนข้างสูง และมีความต้องการใช้ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น

### 2.5.1 หลักการทำงานของสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ

การทำงานของโรงไฟฟ้าแม่เมาะจะเป็นเช่นเดียวกับโรงไฟฟ้าพลังความร้อนทั่วไป โดยใช้ถ่านลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ ถ่านลิกไนต์ที่ขุดได้จากเหมืองจะถูกส่งไปบดในเครื่องย่อยถ่านชุดแรก โดยควบคุมให้ถ่านที่ผ่านการบดแล้วขนาดไม่โตกว่า 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร จากนั้นถ่านจะถูกถ่าเลียยโดยสายพานจากเครื่องบดชุดแรกมากองไว้ แล้วจึงถูกส่งขึ้นไปยังโรงย่อยถ่าน จากนั้นจะผ่านไปยังเครื่องย่อยถ่านชุดที่สอง และส่งไปเก็บในขังถ่าน(Coal bunker)ในตัวโรงไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้งานต่อไป อุปกรณ์ของโรงไฟฟ้าจะประกอบด้วย [13]

- เครื่องอุ่นอากาศ (Air Heater) เป็นอุปกรณ์เพิ่มอุณหภูมิแก่อากาศก่อนที่จะเข้าไปช่วยในการเผาไหม้เชื้อเพลิง เครื่องอุ่นอากาศนี้ทำงานโดยรับความร้อนจากก๊าซร้อนที่ออกจากหม้อน้ำ และถ่ายความร้อนดังกล่าวให้กับอากาศ

- แผงท่อรับความร้อน (Economizer) คือแผงท่อน้ำซึ่งทำให้น้ำที่เข้าไปในหม้อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้นอีกขั้นหนึ่ง แผงนี้จะติดตั้งอยู่บริเวณช่วงสุดท้ายก่อนที่ก๊าซร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้จะออกจากตัวหม้อน้ำ เพื่อรับความร้อนจากก๊าซร้อนและถ่ายเทให้แก่น้ำที่เข้าหม้อน้ำ

- เครื่องแยกไอน้ำ (Boiler Drum) ลักษณะเป็นเหล็กหนารูปแคปซูลที่สามารถทนความดันและอุณหภูมิสูง ภายในเครื่องแยกไอน้ำมีอุปกรณ์ Cyclone Separator และ Steam Scrubber ทำหน้าที่แยกไอน้ำออกจากน้ำโดยอาศัยหลักของแรงหนีศูนย์กลาง และการเปลี่ยนทิศทางการไหล

- หม้อน้ำ (Boiler) คือตัวเตาซึ่งมีท่อเหล็กทนต่อความดันและอุณหภูมิสูงประกอบกันเป็นผนัง 4 ด้านของเตา ภายในท่อจะมีน้ำไหลวนอยู่ และส่วนบนของตัวเตามีแผงท่อไอน้ำแขวนลอยเป็นท่อรับไอน้ำที่ออกจากเครื่องแยกไอน้ำ (Boiler Steam Drum)มารับความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงอีกครั้ง เพื่อเพิ่มอุณหภูมิแก่ไอน้ำให้สูงขึ้น และส่งไอน้ำอุณหภูมิสูงนี้ออกจากหม้อน้ำไปยังท่อนำไอน้ำเพื่อไปหมุนเครื่องกังหันไอน้ำ

- เครื่องกังหันไอน้ำ (Steam Turbine) ไอน้ำอุณหภูมิและความดันสูงจากท่อนำไอน้ำจะไหลผ่านวาล์วของระบบควบคุม (Governing Control System) ซึ่งจะควบคุมการไหลของไอน้ำให้อยู่ใน

ภาวะที่ต้องการเข้าสู่เครื่องกังหันไอน้ำ จะประกอบด้วยตัวถัง มีเพลahamanและใบพัดติดตั้งอยู่ภายใน เมื่อไอน้ำไหลเข้าไปในตัวกังหัน ความดันของไอน้ำจะลดลงและเกิดการขยายตัวทำให้ปริมาตรของไอน้ำเพิ่มขึ้น มีผลให้ความเร็วในการไหลของไอน้ำสูงขึ้น เมื่อไอน้ำความเร็วสูงนี้ไปปะทะกับใบพัดจำนวนหลายชุดที่ติดอยู่กับเพลาก็จะผลักดันให้เพลางองกังหันหมุนก่อกำเนิดพลังงานกล

- เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) จะติดตั้งจะอยู่ในแนวระดับเดียวกับเครื่องกังหันไอน้ำ โดยเพลางองเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะต่อโดยตรงเข้ากับเพลางองเครื่องกังหันไอน้ำ เมื่อเพลากรื่องกังหันไอน้ำหมุนก็จะทำให้เพลากรื่องกำเนิดไฟฟ้าหมุนไปด้วย และจะเกิดสนามแม่เหล็กที่เพลahamanไปตัดกับตัวนำอีกชุดหนึ่ง ซึ่งพันอยู่กับแกนเหล็กที่ติดอยู่รอบตัวถังของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำและเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำที่ติดอยู่กับตัวเครื่องกำเนิดไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะส่งเข้าไปยังหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงเพื่อจ่ายให้กับสายส่งแรงสูงต่อไป

### 2.5.2 ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

แม่เมาะมีลานไคไฟฟ้าหรือสถานีไฟฟ้าแรงสูง 3 แห่ง เพื่อส่งไฟฟ้าไปยังจังหวัดต่างๆ โดยใช้แรงดันหลายระดับ คือ 115 kV , 230 kV และ 500 kV ด้วยสายส่งไฟฟ้าหลายสายเริ่มจากลานไคไฟฟ้าแม่เมาะดังนี้

-เชื่อมโยงสายส่งหลายจังหวัดภาคเหนือตอนบนและตอนล่าง ได้แก่ เชียงราย เชียงใหม่, พะเยา ลำปาง ลำพูน แพร่ อุตรดิตถ์ และพิษณุโลก

-เชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้าของภาคกลางตอนบนผ่านการส่งกำลังไฟฟ้าขนาด 230 kV แม่เมาะ3 -พิษณุโลก2 - นครสวรรค์- อ่างทอง 2

-เชื่อมโยงกับเขตนครหลวงด้วยการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 500 kV กรณีศึกษาจากแม่เมาะ3 -ท่าตะโก (นครสวรรค์) - หนองจอก(กทม.)

-เชื่อมโยงกับระบบไฟฟ้าภาคตะวันออกเฉียงเหนือด้วยการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าขนาด 230 kV ผ่านสายส่งไฟฟ้าพิษณุโลก2 -ห่มสัก(เพชรบูรณ์) - ขอนแก่น 2 และยังมีสายส่งไฟฟ้าขนาด 230 kV จากสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก ไปยังชัยภูมิ 3 และขอนแก่น 3 อีกด้วย

### 2.5.3 แหล่งน้ำสำหรับโรงไฟฟ้า

โรงไฟฟ้าแม่เมาะนี้จัดเป็นโรงไฟฟ้าพลังความร้อนที่ใช้ระบบระบายความร้อนแบบหอระบายความร้อน ซึ่งต้องใช้น้ำประมาณ 3.5 เท่าของปริมาณถ่านลิกไนต์โดยน้ำหนัก ในปี พ.ศ. 2502- 2503 มีการสร้างอ่างเก็บน้ำแม่เมาะ สำหรับโรงจักรแม่เมาะขนาดความจุ 0.34 ล้านลูกบาศก์เมตร เมื่อโรงไฟฟ้านี้หยุดเดินเครื่องแล้วอ่างเก็บน้ำแม่เมาะก็กลายเป็นแหล่งเก็บน้ำในหน้าแล้งสำหรับราษฎร

ต่อมาได้มีการสร้างหน่วยผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น กฟผ.จึงสร้างแหล่งเก็บน้ำและระบบส่งน้ำอีกหลายแห่ง ดังนี้

- อ่างเก็บน้ำห้วยหลวง ขนาดความจุ 13 ล้านลูกบาศก์เมตร มีที่เก็บน้ำสำหรับโรงไฟฟ้าเครื่องที่ 1 -3

- อ่างเก็บน้ำเขื่อนแม่จาง ขนาดความจุ 108.5 ล้านลูกบาศก์เมตร มีที่เก็บน้ำสำหรับโรงไฟฟ้า เครื่องที่ 4-7

- อ่างเก็บน้ำห้วยคิงตอนล่าง ขนาดความจุ 1.43 ล้านลูกบาศก์เมตร มีที่เก็บน้ำสำหรับการอุปโภคบริโภคของผู้ปฏิบัติงานที่พักอยู่บริเวณแคมป์ห้วยคิง

- อ่างเก็บน้ำห้วยคิงตอนบน ขนาดความจุ 0.34 ล้านลูกบาศก์เมตร มีที่เก็บน้ำสำหรับการอุปโภคบริโภคของราษฎรในพื้นที่จัดสรรบ้านท่าปะดุน - นาแหมที่ กฟผ. จัดสร้างให้ใหม่



รูปที่ 2.4 แสดงสถานีไฟฟ้าอ้อยแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

เมื่อ กฟผ. ก่อสร้างโรงไฟฟ้าเครื่องที่ 8-11 อ่างเก็บน้ำทั้งหมดที่อยู่ไม่เพียงพอกับความต้องการใช้น้ำ ประกอบกับการยกเลิกอ่างเก็บน้ำห้วยหลวงเพื่อขยายเหมืองแม่เมาะ กฟผ. จึงดำเนินการก่อสร้างแหล่งน้ำและระบบส่งน้ำอีก สำหรับโรงไฟฟ้าเครื่องที่ 12-13 ในระยะแรกใช้น้ำจากอ่างเก็บน้ำแม่ขามและแม่จาง ต่อมาจึงได้ใช้ระบบจัดส่งน้ำซึ่งก่อสร้างโดยเริ่มมาตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2538 กำหนดเสร็จภายในปี พ.ศ. 2541 โดยจะสูบน้ำจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนกัวลมของกรมชลประทานผ่านท่อส่งน้ำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.35 m ที่ฝังตามแนวถนนเข้าเขื่อนกัวลม

ปัจจุบันโรงไฟฟ้ามีหน่วยผลิตไฟฟ้า 13 เครื่อง รวมกำลังผลิต 2,625,000 กิโลวัตต์ โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงโรงไฟฟ้าแม่เมาะที่มีการใช้หน่วยผลิตไฟฟ้า กำลังผลิต และพลังงานไฟฟ้า

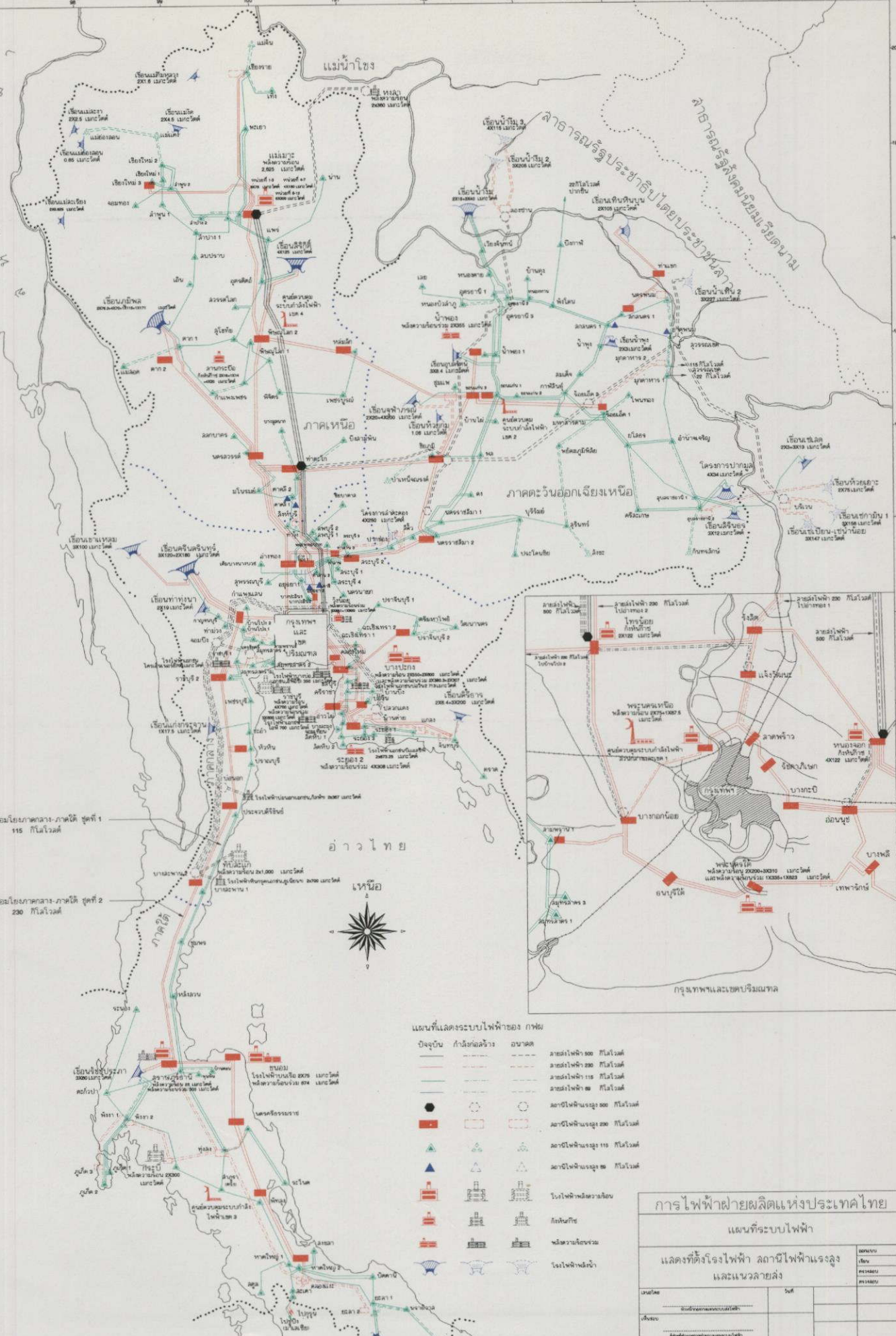
เครื่องที่	กำลังผลิต (เมกะวัตต์)	พลังงานไฟฟ้าปีละ (ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมง)	ใช้ถ่านลิกไนต์ประมาณ ปีละ(ล้านตัน)	เริ่มใช้งาน พ.ศ.
1	75			2521
2	75	รวม 1480	รวม 1.5	2521
3	75			2524
4	150		1.0	2527
5	150	เครื่องละ	1.0	2527
6	150	984	1.0	2528
7	150		1.0	2528
8	300		2.0	2532
9	300	เครื่องละ	2.0	2533
10	300	1,970	2.0	2534
11	300		2.0	2534
12	300	เครื่องละ	2.0	2538
13	300	1,970	2.0	2538

## 2.6 สถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก(THA TAKO)

สถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก จังหวัดนครสวรรค์นี้ แบ่งพื้นที่การใช้งานออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนพื้นที่ 100 ไร่สำหรับระบบแรงดัน 500 kV จะเป็นสถานีที่เชื่อมโยงระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะกับสถานีไฟฟ้าย่อยมินบุรีมี 2 สาย ซึ่งจะต่อกับสถานีที่ 3 ของแม่เมาะและจากสถานีท่าตะโกก็จะมีสายส่งเข้ามาที่สถานีไฟฟ้าย่อยมินบุรีรวม 2 สาย ส่วนพื้นที่ 26 ไร่ สำหรับระบบแรงดัน 230 kV เป็นสถานีที่ส่งกำลังไฟฟ้าให้แก่บริเวณภาคเหนือตอนล่างที่สถานีไฟฟ้าย่อยนครสวรรค์ 2 สาย และภาคกลางตอนบนที่สถานีไฟฟ้าย่อยอ่างทองอีก 2 สาย และสำรองพื้นที่ไว้อีก 3 ไร่สำหรับแรงดัน 115 kV สถานีไฟฟ้าย่อยนี้เป็นสถานีไฟฟ้าย่อยที่ใหญ่ และเป็นสถานีกลางที่เชื่อมต่อของโครงข่ายระบบไฟฟ้า 500 kV ระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะกับสถานีไฟฟ้าย่อยมินบุรี กล่าวคือในส่วนของระบบแรงดันไฟฟ้า 500 kV ที่ต่อกับสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะนั้นจะแบ่งเป็น 2 สาย ซึ่งจะต่อกับสถานีที่ 3 ของแม่เมาะและจากสถานีท่าตะโกก็จะมีสายส่งเข้ามาที่สถานีไฟฟ้าย่อยมินบุรีรวม 2 สายด้วยกัน นอกจากนี้ในระบบแรงดันไฟฟ้า 230 kV จะแบ่งออกเป็น 4 สาย คือ สองสายแรกนั้นจะเข้าสู่สถานีไฟฟ้าย่อยนครสวรรค์ และสองสายหลังจะเข้าสู่สถานีไฟฟ้าย่อยอ่างทอง

ตารางที่ 2.2 แสดงแผนการขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้าของแรงดัน 500 kV

ชื่อสายส่ง สถานีไฟฟ้า และสถานีไฟฟ้าย่อยแรงสูง	ความยาว (กม.)	จำนวน (วงจร)	แรงดัน (เควี)	ขนาดสาย (MCM)	กำหนดแล้วเสร็จ (ปีงบประมาณ)
1. โครงการระบบส่งไฟฟ้า -โครงการ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนระหว่าง ก่อสร้าง (300 MW)					
1.1 โครงการแม่เมาะเครื่องที่13 ไทรน้อย – หองจอก	120	2	500	4*795	ก.ช. 2539
1.2โครงการแม่เมาะเครื่องที่12 ท่าตะโก – หองจอก	217	1	500	4*795	ร.ก. 2539
2. แผนการปรับปรุงความเชื่อถือของระบบส่งกำลัง ไฟฟ้า					
ท่าตะโก –หองจอกวงจรที่ 3	217	1	500	4*795	ร.ก. 2539
3. โครงการแผนการขยายระบบส่งกำลังไฟฟ้า					
3.1 โครงการโรงไฟฟ้าร่วมราษฎร์ ชุดที่1-3 โรงไฟฟ้าราษฎร์ – จอมบึง	22	2	500	4*795	2542
จอมบึง – ไทรน้อย	105	2	500	4*795	2542
3.2 โครงการโรงไฟฟ้าราษฎร์เครื่องที่ 1-2 จอมบึง-ไทรน้อย-วังน้อย	198	2	500	4*795	2542
3.3 โครงการโรงไฟฟ้าราษฎร์เครื่องที่ 3-4 ขยายลานไถไฟฟ้าราษฎร์	-	-	500	-	2546
-โครงการ โรงไฟฟ้าพลังความร้อนในอนาคต เครื่องที่ 1-2					
ทับสะแก – บางสะพาน	12	2	500	4*795	2549
3.4 โครงการในการปรับปรุงระบบส่งในเขต กรุงเทพฯ และปริมณฑล					
ไทรน้อย – บางกอกน้อย	29.5	2	500	4*795	2543
หองจอก – อ่อนนุช	18.4	2	500	4*795	2543
ไทรน้อย – รังสิต	24.7	2	500	4*795	2543
รังสิต – แจ้งวัฒนะ	8.0	2	500	4*795	2543
ตัดสายส่ง 230 kVจากบางพลี-พระนครได้ ลงที่เทพารักษ์	-	-	500	-	2541
3.5 โครงการระบบสายส่งที่รับไฟฟ้าจากโรง ไฟฟ้าเอกชน					
บางสะพาน-จอมบึงวงจร1,2	280	2	500	4*795	2543
บางสะพาน-จอมบึงวงจร3,4	280	2	500	4*795	2545
ปลวกแดง-จุดแยกหองจอก วงจรที่ 1,2	155	2	500	4*795	2543
ปลวกแดง-จุดแยกหองจอก วงจรที่ 3,4	170	2	500	4*795	2545



แผนที่แสดงระบบไฟฟ้าของ กฟผ

ปัจจุบัน	กำลังก่อสร้าง	อนาคต	
			สายส่งไฟฟ้า 500 กิโลโวลต์
			สายส่งไฟฟ้า 230 กิโลโวลต์
			สายส่งไฟฟ้า 115 กิโลโวลต์
			สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 600 กิโลโวลต์
			สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 กิโลโวลต์
			สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 115 กิโลโวลต์
			สายส่งไฟฟ้าแรงสูง 600 กิโลโวลต์
			โรงไฟฟ้าพลังความร้อน
			กังหันก๊าซ
			พลังน้ำถาวร
			โรงไฟฟ้าพลังน้ำ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

แผนที่ระบบไฟฟ้า

แสดงที่ตั้งโรงไฟฟ้า สถานีไฟฟ้าแรงสูง และแนวสายส่ง

เขต/จังหวัด	พื้นที่	จำนวน
ภาคเหนือ	จังหวัดเชียงใหม่ เชียงใหม่	1
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	จังหวัดขอนแก่น นครราชสีมา	2
ภาคกลาง	จังหวัดนครราชสีมา นครสวรรค์	2
ภาคตะวันออก	จังหวัดชลบุรี ระยอง	2
ภาคใต้	จังหวัดภูเก็ต สุราษฎร์ธานี	2

## 2.6.1 หลักการทำงานของสถานีไฟฟ้าแรงสูงท่าตะโก

- จาก Line 1 เข้าสวิตช์ไบนีต(Disconnecting Switch) หมายเลข 90321A เข้าสวิตช์ไบนีตหมายเลข 90321(High Speed) ไฟเข้า Bay 3 ผ่านสวิตช์ไบนีต 90333 ไปยัง Circuit Breaker 90332 เข้าสวิตช์ไบนีต 90335 ไปยัง Bus No.2 จากสวิตช์ไบนีต 90323 เข้า Circuit Breaker 90322 เข้าสวิตช์ไบนีต 90324 Circuit Breaker 90314 และ Circuit Breaker 90312 และสวิตช์ไบนีต 90315 (High Speed) ไปยัง Bus No.1 Bay 3 จะจ่ายเข้าที่หม้อแปลง KT1A ผ่านสวิตช์ไบนีต 90311 (High Speed) เข้าที่ Switchyard ระดับแรงดัน 230 kV

- ไฟจาก Bus No.1 และ Bus No.2 เข้าที่ Bay 2 ผ่านสวิตช์ไบนีต 90325 ผ่าน Circuit Breaker 90232 และผ่าน Circuit Breaker 90233 Circuit Breaker 90223 เข้า Circuit Breaker 90222 จะผ่าน Circuit Breaker 90224, Circuit Breaker 90214, Circuit Breaker 90212, Circuit Breaker 90215 ใน Bay 2 จ่ายไฟให้หนองจอก Line1 โดยผ่านสวิตช์ไบนีต 90221 (High Speed) ต่ออยู่กับ SR3A, 3R3B(Shunt Reactor) จาก Bay 2 จ่ายให้ KT2A โดยผ่านสวิตช์ไบนีต 90211 (High Speed)

- Bay 1 ผ่าน Circuit Breaker 90132, Circuit Breaker 90112, สวิตช์ไบนีต 90114, สวิตช์ไบนีต 90115 จ่ายไฟเข้าหม้อแปลง KT3A โดยผ่านสวิตช์ไบนีต 90111(High Speed)

- ไฟจากแม่เมาะ Line 2 เข้า Bay 4 โดยผ่านสวิตช์ไบนีต 90412 (Circuit Breaker) ผ่าน Circuit Breaker 90432, Circuit Breaker 90412 ผ่านสวิตช์ไบนีต 90415, 90414 90433, 90435 คู่ Bus No.1 และ Bus No. 2

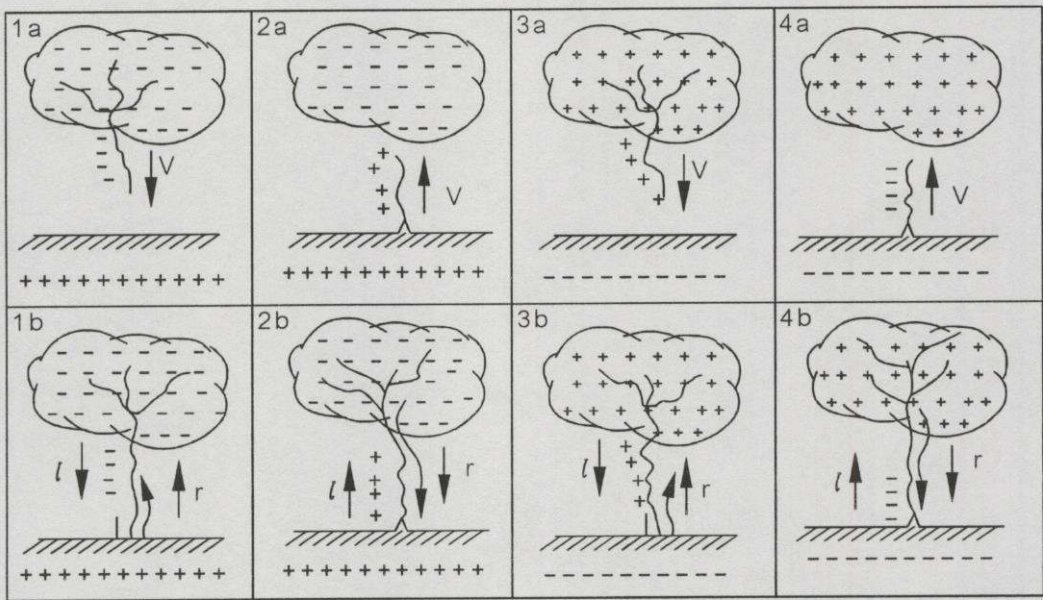
- Bay 5 รับไฟจากแม่เมาะจาก Line 3 จ่ายให้ Bus No.1 และ Bus No.2 โดยผ่านสวิตช์ไบนีต 90411 (High Speed) ผ่าน Circuit Breaker 90512, Circuit Breaker 90522, Circuit Breaker 90532 ผ่านสวิตช์ไบนีต 90515, 90524, 90532, 90533, 90535 Bay 4 กับ Bay 5 ต่ออยู่กับ Grounding Reactor ระบบ Grounding Reactor จะเป็นตัว Balance Phase ว่าในแต่ละ Phase โหลดหรือแรงดันต้อง Balance กัน เพื่อผลทาง Relay คือป้องกัน Relay ทำงานผิดพลาดอาจ Trip โดยไม่มี Fault สาเหตุที่มีการขนาน Line 2 กับ Line 3 เพื่อให้ระบบมีความมั่นคงยิ่งขึ้นสามารถใช้เป็น Back Up ซึ่งกันและกัน โดยมี Circuit Breaker เป็นตัว 7022N เป็นตัว By Pass ให้กันและกัน

### บทที่ 3

## การวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV

### 3.1 การป้องกันฟ้าผ่าในระบบส่งจ่ายแรงสูง

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะคือ ฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆและฟ้าผ่าลงสู่พื้นโลก หรือขึ้นจากพื้นโลก ฟ้าผ่าเป็นการถ่ายเทประจุระหว่างก้อนเมฆหรือจากก้อนเมฆกับพื้นดินทั้งในและนอกระบบสายส่ง ฟ้าผ่าเริ่มเกิดขึ้นได้จากการแตกตัวของประจุในอากาศในกลุ่มเมฆที่มีประจุแอมแปงอยู่ โดยบริเวณที่อยู่ต่ำมีละอองน้ำที่รับประจุลบได้มากกว่า และบริเวณเบื้องสูงมีละอองเกลือค้ำน้ำแข็งที่รับประจุบวกได้มากกว่าดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งในสภาวะพายุฝนฟ้าคะนองเนื่องจากมีสภาพอากาศแปรปรวน ประจุเหล่านี้เกิดการถ่ายเทเพื่อลดความเครียดของสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดฟ้าแลบและฟ้าผ่าลงสู่พื้นโลกได้ ฟ้าผ่าเกิดขึ้นในบริเวณที่สนามไฟฟ้าสูง โดยอากาศเกิดการแตกตัวให้ประจุและเกิดช่องฟ้าผ่าที่มีสภาพเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าได้ชั่วขณะที่เกิดฟ้าผ่า [16]



1 a ฟ้าผ่าลงลึบคืบหน้า

2 a ฟ้าผ่าบวกขึ้นลึบหน้า

3 a ฟ้าผ่าบวกลงลึบหน้า

4 a ฟ้าผ่าลบขึ้นลึบหน้า

1 b ฟ้าผ่าลงลึบย้อนกลับ

2 b ฟ้าผ่าบวกขึ้นลึบย้อนกลับ

3 b ฟ้าผ่าบวกลงลึบย้อนกลับ

4 b ฟ้าผ่าลบขึ้นลึบย้อนกลับ

รูปที่ 3.1 การแผ่ตัวของประจุไฟฟ้าในเมฆ

#### 3.1.1 ระดับ Keraunic และแผนที่ Isokeraunic [4]

Keraunic Levels คือ ระดับค่าเฉลี่ยของจำนวนวันต่อปีที่เกิดฟ้าผ่าจนได้ยินเสียงในรูปที่ 3.2 แสดงเส้น Keraunic Levelsของประเทศต่างๆ ทั่วโลก แต่ละเส้นเป็นค่าคงที่ของค่า Keraunic Levels ซึ่งเรียกว่าเส้น Isokeraunic จำนวน Flash ที่ผ่าลงสู่พื้นโลกจะหาได้จากสมการที่ (3.1)

$$N = 0.12T \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

$N$  คือ จำนวนของ Flashes ที่ผ่าลงสู่พื้นโลกต่อตารางกิโลเมตรต่อปี  
 $T$  คือ ระดับ Keraunic ในพื้นที่นั้นๆ

ตารางที่ 3.1 ระดับ Isokeraunic ตามแนวสายส่งระบบ 500 kV ของประเทศไทย

พื้นที่	จำนวนวันที่มีพายุต่อปี
ดอนเมือง	113.4
ลพบุรี	76.9
นครสวรรค์	70.5
พิษณุโลก	94.4
อุตรดิตถ์	64.9
กำแพง	82.2

**3.1.2 Interception ของ Flashes ที่เกิดจากสายส่งแรงสูง**

จะกล่าวได้ว่า สายส่งเหนือพื้นดินจะปรากฏ Electrical Shadow บนพื้นดินใต้สายส่ง ถ้าเกิด Flash ในบริเวณนี้จะเกิดการ Strike ลงบนสายส่งแทน ในรูปที่ 3.2 แสดงการประมาณอย่างง่ายของความกว้างของ Electrical Shadow,  $W$  สำหรับสายส่งที่มีสาย Shield wires 2 เส้น สำหรับระบบที่มีสาย Shield เส้นเดียวระยะ  $d$  เป็นศูนย์ ความสูง  $h$  จากรูปคือค่าความสูงเฉลี่ยของสาย Shield wires ซึ่งจะเท่ากับสมการที่ (3.2)

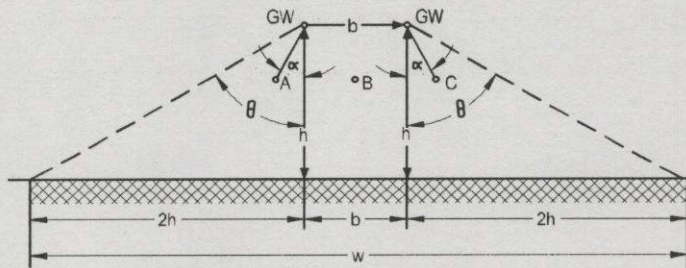
$$h = h_g - \frac{2}{3}(h_g - h_{gw}) \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

$h_g$  คือ ความสูง tower ถึงสาย Shield wires

$h_{gw}$  คือ ความสูง tower จากพื้นดิน ถึงระยะของสายส่ง(Mid Span) ในเฟสใดๆ

ดังนั้นความกว้างของ Shadow width จะเท่ากับ

$$W = b + 4h^{1.09} \quad \dots\dots\dots(3.3)$$



- $\theta$  = shadow angle (assumed  $63\frac{1}{2}$  degrees)
- $\alpha$  = shield angle between shield wire and phase conductor
- $W$  = shadow width on earth's surface
- GW = shield wire location
- A B C = phase wires

รูปที่ 3.2 แสดงความกว้างของแนวเขตดินสายไฟระยะชิด เมื่อเกิดฟ้าผ่าบนเสาโครงเหล็ก

ความสัมพันธ์ของจำนวนของ Flash บนสายส่งเท่ากับ

$$N_L = 0.012T(b + 4h^{1.09}) \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

$N_L$  คือ จำนวนของ Flash บนสายส่งต่อความยาว 100 km / year

$T$  คือ รัศมี Keraunic จำนวนวันที่ฟ้าผ่าต่อปี

### 3.1.3 Lightning Flashes to Shield Wires และ Towers

พื้นฐานจากสมมุติฐานว่า Lightning Flash ฟ้าผ่าลงเฉพาะยอดเสาโครงเหล็ก จากสมการที่ (3.4) ทำการพิสูจน์มาจากการน่าจะเป็นที่ถ้าฟ้าผ่าจะผ่าลงตรงส่วนใดๆ ตลอดความยาวของสายส่ง เสาโครงเหล็กมีโอกาสมากที่สุดที่จะโดนฟ้าผ่าเพราะสูงกว่า ถ้าฟ้าผ่าลง Shield wire จะมี Stroke current ส่วนน้อยเท่านั้นที่ผ่าน Tower top และ Mid Span ดังนั้นระยะห่างระหว่างเสาและช่องว่างระหว่างสายเฟสควรมีระยะห่างเพียงพอ จะสามารถทำให้ลดขนาดของ Stroke current ที่จะผ่านสู่เสาใกล้เคียงได้ ดังนั้น Flash Frequency to Tower จะเท่ากับสมการที่ (3.5)

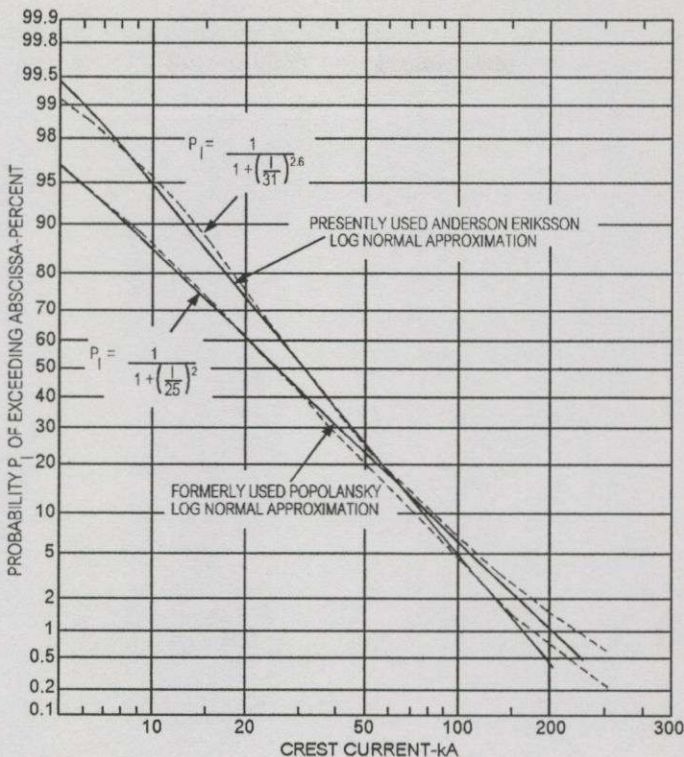
$$N_T = 0.6(N_L - N_S) \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

$N_S$  คือ จำนวนครั้งของ Flash ที่เกิด Shielding Failure ต่อความยาวสาย 100 km / year

### 3.1.4 ความน่าจะเป็นของการ Distribution ของ Stroke Amplitudes

เมื่อพิจารณาขนาดของ Stroke Current ใน Lightning Flash ในเทอมความน่าจะเป็น พบว่า Multiple Stroke Flash : ประมาณ 55% ของ Flash แต่ละครั้งมีมากกว่า 1 Stroke และ 90% ของ Flash แต่ละครั้งมีน้อยกว่า 9 Strokes ค่าเฉลี่ยของจำนวน Stroke ใน Flash แต่ละครั้งประมาณ 3 Strokes

จากรูปที่ 3.3 กราฟนี้มีค่ากลางของกระแส  $I = 31$  kA ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน  $\log$  ของกระแส = 0.3 โดยอาศัยข้อมูลที่ฟ้าผ่า Structure ที่สูงน้อยกว่า 60 เมตร



รูปที่ 3.3 การแจกแจงความถี่ที่เพิ่มขึ้นของขนาดกระแส peak ใน flashes ด้านลบต่ำลง

สำหรับการคำนวณ Lightning Flash Over นั้น สามารถประมาณ Log Normal Curve ซึ่งให้ผลได้อย่างแม่นยำในช่วงกระแส 5 kA - 200 kA ตามสมการข้างล่างนี้

The Popolansky Curve

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{25}\right)^2} \dots\dots\dots(3.6)$$

The Anderson -Eriksson Curve

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^2} \dots\dots\dots (3.7)$$

$P_1$  คือ ความน่าจะเป็นที่ Peak current ใน Flash ใดๆ จะเกินกระแส (kA)

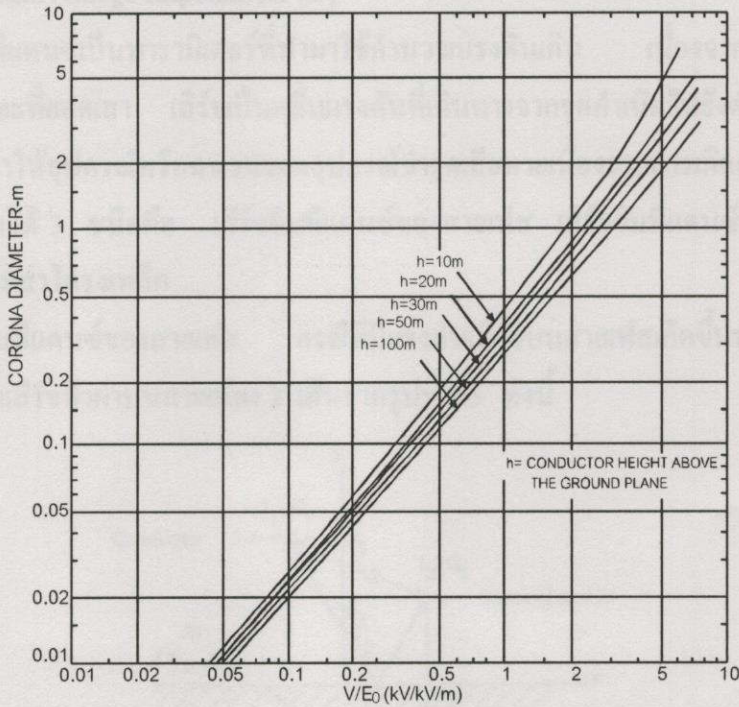
3.1.5 การหารัศมีประสิทธิผลของ Shield Wire และ Phase Conductor เมื่อคิดรวมผลของ Corona

ผลกระทบของลักษณะ Corona ที่อยู่รอบๆ ขณะที่ high voltage ในกรณีของ Shield wire โคโรนาที่เกิดขึ้นอาจแผ่กระจายออกไปจนมีเส้นผ่านศูนย์กลางหลายเมตร ซึ่งทำให้เกิด voltage induced บนสายเฟส สำหรับสายเฟสจะมี Corona ปกคลุมสายเมื่อโดยฟ้าผ่าลงบนสายเนื่องจาก Shielding failure ผลของค่า electrical coupling ของสายเฟสเมื่อเกิด Corona จะมากหรือน้อย จะขึ้นอยู่กับค่า log ของรัศมีของ Corona ที่ปกคลุมสายโดยประมาณอย่างหยาบๆ ซึ่งอาศัย Gauss's law จะได้สมการดังนี้

$$R \ln \frac{2h}{R} = \frac{V}{E_0} \dots\dots\dots(3.8)$$

โดย

- $R$  คือ รัศมีของ Corona envelope (m)
- $h$  คือ ความสูงของสายเฟสจากพื้นดิน (m)
- $V$  คือ สักคาไฟฟ้าที่ใช้กับสายเฟส (kV)
- $E_0$  คือ ค่า Limiting corona gradient (kV/m)



รูปที่ 3.4 กราฟของเส้นผ่านศูนย์กลางของ corona sheath ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $V / E_0$  และ  $h$

ในทางปฏิบัติค่าวิกฤตของ  $E_0 = 20 \text{ kV/cm}$  สำหรับเสา และ  $E_0 = 12 \text{ kV/cm}$  สำหรับสาย  
 ตั้วนำ Corona envelope จะมีผลต่อค่า capacitance ของเสาแต่จะมีผลน้อยมากต่อ inductance รัศมี  
 ประสิทธิภาพของตั้วนำเดี่ยวในกรณีที่มี Corona และไม่มี Corona จะหา Surge impedance ที่เกิดขึ้นเอง  
 ใน Corona ได้ดังนี้

$$Z_{nn} = 60 \sqrt{\ln \frac{2h}{r} * \ln \frac{2h}{R}} \dots\dots\dots(3.9)$$

- $Z_{nn}$  คือ ค่า Surge impedance ที่เกิดขึ้นเองของตั้วนำ n ( $\Omega$ )
- $h$  คือ ความสูงของตั้วนำเหนือระดับพื้นดิน (m)
- $r$  คือ รัศมีของตั้วนำ (m)
- $R$  คือ รัศมีของ Corona ที่แผ่กระจายรอบตั้วนำ (m.)

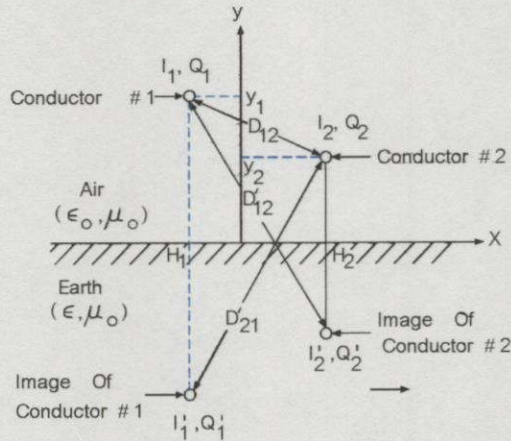
ในกรณี Corona ของ Shield wire สักคาไฟฟ้าที่ใช้ในสมการที่ (3.8) นี้ จะต้องใช้ voltage ของ tower top โดยค่า voltage นี้จะมากกว่าค่า critical flashover voltage ของ insulator เพราะค่า critical flashover voltage ถูกทำให้ลดลงด้วย coefficient of coupling แต่ถ้า stroke ผ่าน phase conductor โดยตรงจะไม่พิจารณาถึง coefficient of coupling

ในการหา self-surge impedance ของ Shield wire ที่คิดรวมผลของ Corona จะใช้ค่าแรงดัน 1.8 เท่าของ flashover voltage ของ tower ที่ประมาณ  $2 \mu s$  ถ้าฟ้าผ่าลงบนสายเฟสโดยตรงใช้ flashover voltage ของ insulator ประมาณ  $6 \mu s$

3.1.6 การคำนวณค่า Surge Impedances [3 ]

เสิร์จอิมพีแดนซ์เป็นพารามิเตอร์ที่นำมาใช้คำนวณแรงดันเกิน เนื่องจากเสิร์จที่เกิดขึ้นบนสายเฟส, สายดินและที่ขอดเสา เสิร์จเป็นคลื่นแรงดันที่เดินทางจากจุดกำเนิดไปยังตำแหน่งต่างๆ ในระบบไฟฟ้า อาจทำให้อุปกรณ์หรือฉนวนของอุปกรณ์ชำรุดเสียหายเนื่องจากการเกิดเบรกดาวน์ เสิร์จอิมพีแดนซ์แบ่งออกได้ 3 ชนิดคือ เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเฟส เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน และเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาโครงเหล็ก

- เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเฟส กรณีที่มีแรงดันเสิร์จบนสายเฟสเกิดขึ้นบนสายเฟส 2 เฟส เช่น การเกิดแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าบนสายเพียง 2 เส้นจากรูปที่ 3.5 ดังนี้



รูปที่ 3.5 แสดงการหาเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเฟส 2 เส้น

$$Z_S = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} * \ln \frac{2H}{r} \dots\dots\dots(3.10)$$

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \dots\dots\dots(3.11)$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \dots\dots\dots(3.12)$$

เสิร์จอิมพีแดนซ์ต่างๆ มีสูตรดังนี้

$$Z_{11} = 138.06 \log_{10} \frac{2H_1}{r_1} \dots\dots\dots(3.13)$$

$$Z_{22} = 138.06 \log_{10} \frac{2H_1}{r_1} \dots\dots\dots(3.14)$$

$$Z_{21} = Z_{12} = 138.06 \log_{10} \frac{D_{12}}{d_{12}} \dots\dots\dots(3.15)$$

ในกรณีนี้ทั้ง 2 สายมีแรงดันเสิร์จเท่ากัน คือ  $(V_1 + V_2)$  หาด้วย 2 ดังนั้นจากสมการที่ (3.13) และ(3.14) จึงหาค่าเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสาย 2 เส้นที่ต่อขนานกันได้ดังนี้

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{1}{4}(Z_{11} + 2Z_{12} + Z_{22})I = Z_S I \dots\dots\dots(3.16)$$

$$Z_S = 138.06 \log_{10} \left[ \frac{4H_1 H_2}{r_1 r_2} \left( \frac{D_{12}}{d_{12}} \right)^2 \right]^{1/4} \dots\dots\dots(3.17)$$

ในกรณีที่แรงดันเสิร์จเกิดขึ้นบนสายเฟส 3 เฟส เช่น การเกิดฟ้าผ่าบนสาย 3 เส้น การหาเสิร์จอิมพีแดนซ์สามารถใช้หลักการคำนวณเช่นเดียวกับสมการที่ (3.18)

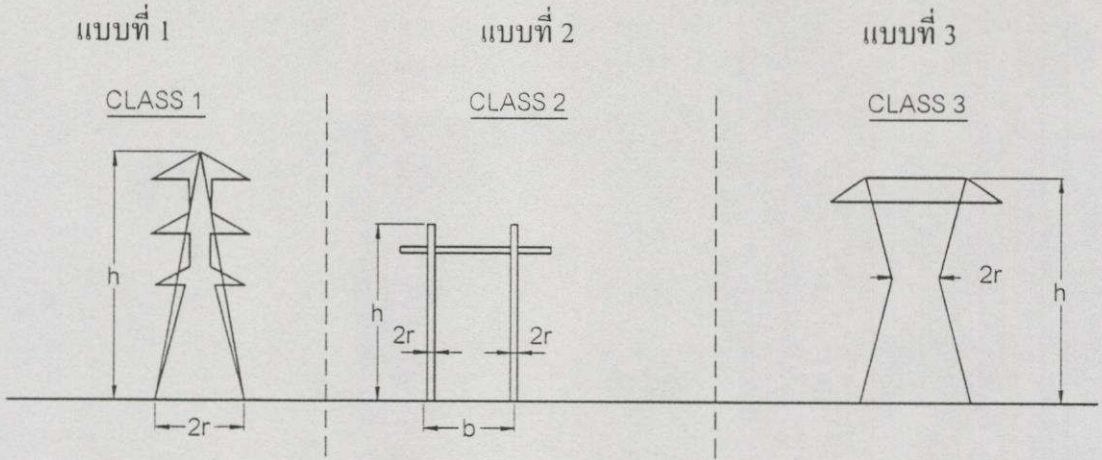
$$Z_S = 138.06 \log_{10} \left[ 2^3 \frac{H_1 H_2 H_3}{r_1 r_2 r_3} * \left( \frac{D_{12} D_{13} D_{23}}{d_{12} d_{13} d_{23}} \right)^2 \right]^{1/9} \dots\dots\dots(3.18)$$

- เสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายดิน เป็นการคำนวณเสิร์จอิมพีแดนซ์สามารถหาได้โดยอาศัยหลักการเช่นเดียวกับเสิร์จอิมพีแดนซ์ของสายเฟส แต่เนื่องจากสายดินของระบบสายส่งจะมีจำนวน 1 เส้น หรือ 2 เส้นเท่านั้น

กรณีสายดิน 1 เส้น  $Z_S = 138.06 \log_{10} \frac{2H_g}{r_g} \dots\dots\dots(3.19)$

กรณีสายดิน 2 เส้นขนานกัน  $Z_S = 138.06 \log_{10} \left[ \frac{\sqrt{2H_g D_{g1g2}}}{r_g d_{g1g2}} \right] \dots\dots\dots(3.20)$

- เสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสา คือ อัตราส่วนระหว่าง voltage ที่ถูกสร้างขึ้นคร่อม insulator string ที่บริเวณยอดเสา (กรณีที่ไม่มี shield wire) ต่อ lightning current ที่ผ่านเสา ในปี ค.ศ. 1968 Sargent และ Darveniza ได้ทำการคำนวณหา tower surge impedance โดยเปลี่ยนตามรูปร่างเสาซึ่งแสดงรูปที่ 3.6



$$Z_T = 30 \ln \left[ 2 \left( 1 + \frac{h^2}{r^2} \right) \right]$$

$$Z_T = \frac{Z_1 + Z_2}{2}$$

$$Z_1 = 60 \ln \left( \frac{h}{r} \right) + 90 \frac{r}{h} - 60$$

$$Z_2 = 60 \ln \left( \frac{h}{b} \right) + 90 \frac{b}{h} - 60$$

$$Z_T = 60 \left[ \ln \left( \sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 1 \right]$$

รูปที่ 3.6 แสดงการหาเสิร์จอิมพีแดนซ์ของเสาแต่ละแบบ

3.1.7 การหา Coupling Factor สำหรับสายเฟส

ส่วนของ stroke current ที่ไม่ได้สัมผัสกับ shield wire โดยตรงจะเหนี่ยวนำ จะเกิด voltage ซึ่งเรียกว่า “Coupling voltage” ในสาย phase conductor แต่ละเส้น อัตราส่วนระหว่างค่า induced voltage ทั้งหมดบนสาย phase conductor เส้นที่ n ต่อค่า tower top voltage จะเรียกว่า Coefficient of coupling,  $K_n$  สำหรับสาย shield wire 2 เส้น อยู่ในระดับความสูงที่เท่ากันหาได้จากสมการที่ (3.21)

$$K_n = \frac{(Z_{n1} + Z_{n2})}{Z_{11} + Z_{12}} \dots\dots\dots(3.21)$$

โดย

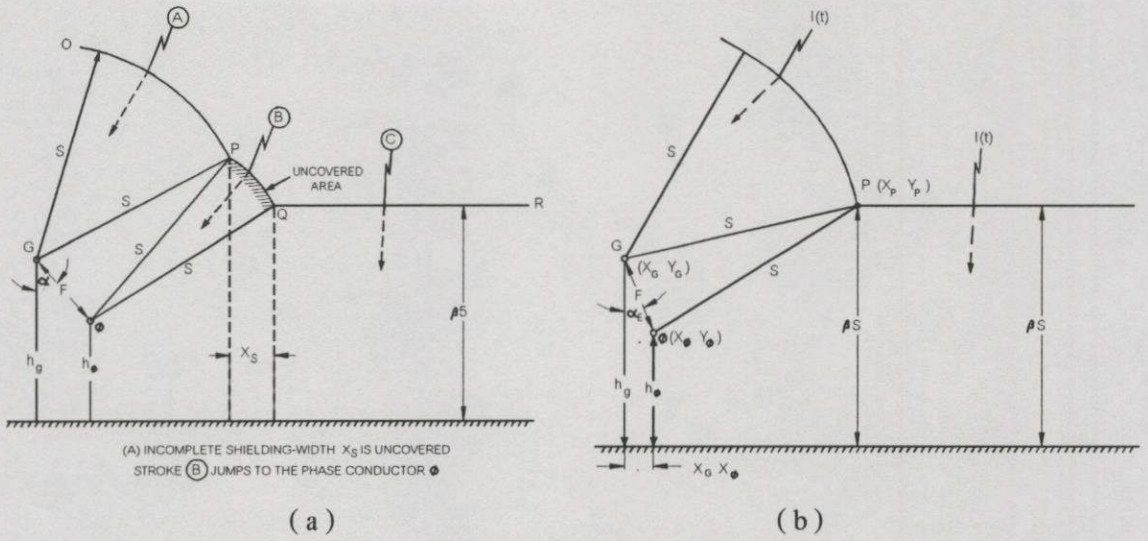
$Z_{mn}$  คือ ค่า mutual impedance ระหว่าง conductor m กับ conductor n

$Z_{11} = Z_{22} = Z_{mm}$  คือ ค่า Surge Impedances ของ shield wire แต่ละเส้น

3.1.8 การ Shielding Failure ของสายส่ง

การป้องกันมิให้ฟ้าผ่าลงสู่สายเฟสโดยใช้สายดินที่พาดอยู่เหนือสายเฟส เป็นตัวนำการไหลของประจุจากฟ้าผ่าลงสู่ดิน ช่วยให้อันตรายเป็นอันตรายต่อระบบเพราะมีขนาดต่ำ การเกิด Shielding Failure ต้องพิจารณาระยะ  $X_S$  และมุมซิดด์ ( $\theta_S$ ) ซึ่งเป็นมุมระหว่างตำแหน่งสายเฟสกระทำ

แนวโค้งที่ลากจากตำแหน่งสายดิน ในทางปฏิบัติมุม  $\theta_s$  ควรมีค่าน้อยซึ่งนี้ต้องพิจารณาถึงความสูงของเสาและขนาดของกระแสฟ้าผ่า



รูปที่ 3.7 แสดง electrogeometric model ของสายส่ง (a) การเกิดชัตต์ล้มเหลว, (b) การเกิดชัตต์ไม่ล้มเหลว

จากรูปที่ 3.7 ถ้าฟ้าผ่าเข้ามาสู่ส่วนโค้ง AB ฟ้าผ่าจะกระโดดข้ามระยะโคมดีฟ้าผ่านี้ (striking distance:  $r_s, S$ ) ไปยังสายดิน และทำให้เกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ยอดเสา โดยมีบางค่าที่อาจทำให้เกิดแรงดันคร่อมถูกด้วยเกินกว่าค่า  $V_{CFO}$  จึงทำให้เกิดการแลบข้ามกลับ แต่ถ้าฟ้าผ่าเข้ามาสู่ส่วนโค้ง BC จะกระโดดข้ามไปยังสายเฟสซึ่งเป็นการเกิดชัตต์ล้มเหลวตามรูปที่ 3.7 (a) ส่วนโค้ง BC นี้จะเรียกว่า “exposed arc” ส่วนโค้งนี้จะเคลงถึระยะ  $r_s$  หรือกระแสฟ้าผ่าสูงขึ้น ระยะ  $X_S$  แปรตามค่ากระแสฟ้าผ่า ดังนั้นถ้ากระแสฟ้าพ่ายิ่งสูง exposed arc และระยะ  $X_S$  ยิ่งสั้นลงหรือหมดไป ถ้ากระแสฟ้าผ่าค่าหนึ่งที่ exposed arc จะหมดไป เป็นกระแสฟ้าผ่าที่ไม่ทำให้เกิดการแลบข้ามถูกด้วยได้ ระบบชัตต์นี้จึงมีประสิทธิภาพ (effective shielding)

$$S = r_s = 10I^{0.65} \dots\dots\dots(3.22)$$

$$I = 0.029S^{1.54} \dots\dots\dots(3.23)$$

โดย

$S$  คือ ระยะstrike distance (m)

$I$  คือ ค่าstroke current (kA)

ถ้าเลื่อนสาย shield ให้อยู่ใกล้กับสายตัวนำเฟสจะทำให้ส่วนโค้ง BC หายไปตามรูปที่ 3.7 (b) ซึ่งจะทำให้ stroke ไม่สามารถสัมผัสกับสายเฟสตัวนำ จะเรียกว่าการหามุม shield ประสิทธิภาพ ( $\alpha_E$ ) ถ้ารู้ระยะ  $S$  และ  $\beta_S > Y_\phi$  จะหาความกว้างของ  $X_S$  ได้จากสมการที่ (3.24) ดังนี้

$$X_S = S[\cos\theta + \sin(\alpha_S - \omega)] \dots\dots\dots(3.24)$$

เมื่อ

$$\theta = \arcsin \frac{\beta S - Y_\phi}{S}$$

$$\omega = \arccos \frac{F}{2S}$$

$$\alpha_S = \arctan \left( \frac{X_\phi - X_G}{-Y_G - Y_\phi} \right)$$

ถ้าระยะ  $\beta_S < Y_\phi$  จะทำให้  $\cos\theta = 1$  และ

$$X_S = S[1 + \sin(\alpha_S - \omega)] \dots\dots\dots(3.25)$$

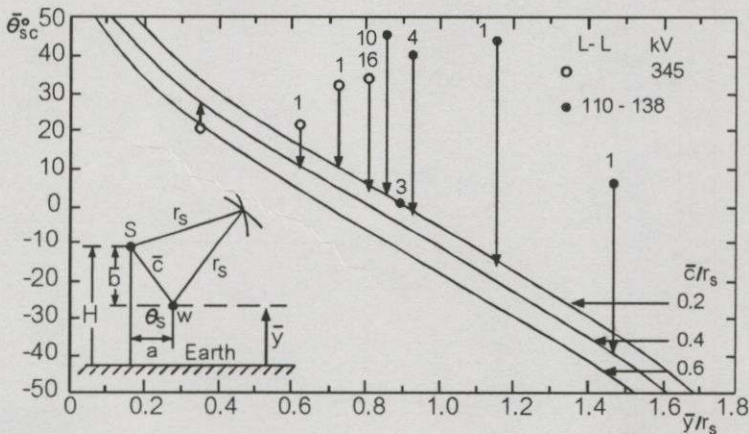
**3.1.9 การหา Effective Shielding**

ในการหามุม shield ประสิทธิภาพดังรูปที่ 3.7 (b) นั้น จะให้สายเฟสตัวนำอยู่กับที่และเลื่อนสาย shield ในแนวระดับจนระยะ  $X_S$  ลดลงเหลือศูนย์ สำหรับการเกิด shielding ที่ดีนั้นถ้าสมมติให้สายเฟสตัวนำมี coordinate  $X = 0$  จะหา  $X_G$  ที่ coordinate  $X$  ของสาย shield ได้จากสมการที่(3.26)

$$X_G = \sqrt{S^2 - (\beta S - Y_\phi)^2} - \sqrt{S^2 - (\beta S - Y_G)^2} \dots\dots\dots(3.26)$$

$$\alpha_E = \arctan \left( \frac{X_G}{Y_\phi - Y_G} \right) \dots\dots\dots(3.27)$$

ถ้า shield angles เป็นบวกระยะ  $X_G$  จะเป็นลบ จากรูปที่ 3.8 แสดงมุมซัดที่มีประสิทธิภาพจะสัมพันธ์กับระยะต่างๆ [7] ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการหา SFO ได้



รูปที่ 3.8 มุมซัดที่มีประสิทธิภาพ (effective shielding)

### 3.1 10 การคำนวณอัตรา Shielding Failure

ในการหาอัตราของ Shielding Failure เริ่มแรกจะทำการคำนวณขนาดของ stroke current,  $I_{min}$  ที่สัมผัสสายเฟสทำให้เกิดการ flashover บน insulator

$$I_{min} = \frac{2V_c}{Z_\phi} \quad \dots\dots\dots(3.28)$$

เมื่อ  $I_{min}$  คือ ขนาดต่ำสุดของ stroke current ที่ทำให้เกิด shielding failure (kA )

$V_c$  คือ ค่าวิกฤต flashover voltage ของ insulator (kV)

$Z_\phi$  คือ surge impedance ของสายเฟสดำนำ (Ω)

นำค่า  $I_{min}$  ที่ได้แทนในสมการที่ (3.22) และทำการหา minimum strike distance,  $S_{min}$  จากสายตัวนำเฟส ใช้ค่า  $S_{min}$  ไปคำนวณหาค่า unshielded width,  $X_S$  จากสมการที่ (3.24) หรือ(3.25) จะเห็นได้ว่าถ้าระยะ  $S$  เพิ่มขึ้น ส่วนโค้งของ BC จะลดลงจนเป็นศูนย์ จะได้ระยะ  $S_{max}$  แล้วนำไปหา  $I_{max}$  ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิด shielding failure นำค่า  $S_{max}$  ไปแทนในสมการที่(3.26) หาระยะใดก็ตาม จากรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าความยาวของเส้น AB ใกล้เคียงหรือเท่ากับระยะ  $S_{max}$  ดังนั้น

$$S_{max} = Y_o \left( \frac{-B_S - \sqrt{B_S^2 + A_S C_S}}{A_S} \right) = Y_o \bar{S} \quad \dots\dots\dots(3.29)$$

เมื่อ

$$Y_o = \frac{Y_G Y_\phi}{2}$$

$$A_S = m^2 - m^2 \beta - \beta^2$$

$$B_S = \beta(m^2 + 1)$$

$$C_S = (m^2 + 1)$$

โดย  $m$  คือ slope ของเส้น AB

$$m = \frac{X_\phi - X_G}{Y_G - Y_\phi}$$

หรืออาจจะหาได้จากสมการที่ (3. 30) ดังนี้

$$S_{max} = \frac{h_g + h_{gw}}{2(1 - \sin \theta_S)} \quad \dots\dots\dots(3.30)$$

คำนวณหาจำนวนของ shielding failure

$$N_{SF} = 0.012T \frac{X_S}{2} (P_{\min} - P_{\max}) \quad \dots\dots\dots(3.31)$$

เมื่อ  $N_{SF}$  คือ จำนวนของ shielding failure per 100 km per year

$T$  คือ ระดับ Keraunic จำนวนวันฟ้าผ่าต่อปี

$X_S$  คือ ระยะความกว้าง Uncovered

$P_{\min}$  คือ ค่าความน่าจะเป็นที่เกิดกระแสฟ้าผ่า  $I_{\min}$

$P_{\max}$  คือ ค่าความน่าจะเป็นที่เกิดกระแสฟ้าผ่า  $I_{\max}$

การหาอัตราการเกิด Shielding flashover (SFO) ของ Burgsdorf-Kostenko ความน่าจะเป็นที่จะเกิดชัตต์ล้มเหลว ( $P_\theta$ ) ซึ่งหมายถึงจำนวนฟ้าผ่าลงสู่สายเฟสคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของจำนวนฟ้าผ่าลงระบบสายเฟส จะขึ้นอยู่กับมุมชัตต์ ( $\theta_s$ ) และความสูงของสายชัตต์ที่ตำแหน่งเสาตั้งนี้

$$\log_{10} P_\theta = \frac{\theta_s \sqrt{h_g}}{90} - 2 \quad \dots\dots\dots(3.32)$$

จำนวนครั้งของการเกิด shielding failure จึงเท่ากับผลคูณของ  $P_\theta$  กับ  $N_1$  Burgsdorf ได้กำหนดความสัมพันธ์ของความน่าจะเป็น  $P_\theta$  (%) ที่กระแสฟ้าผ่า ( $I$ ) ขนาดเท่ากับหรือสูงกว่าค่าวิกฤติที่ทำให้แรงดันคร่อมลูกถ้วย จะมีค่าเท่ากับ critical flashover voltage ( $V_c$ ) หากจากสมการที่ (3.28) และ  $P_1$  จะหาได้จากสมการดังนี้

$$\log_{10} P_1 = 2 - \frac{I}{60} \quad \dots\dots\dots(3.33)$$

เมื่อทราบค่าจำนวนครั้งที่จะเกิด shielding failure ต่อระยะ 100 กิโลเมตรต่อปี และโอกาสที่จะเกิดกระแสเท่ากับหรือสูงกว่าค่าวิกฤติ ( $P_1/100$ ) สามารถนำไปคำนวณหาอัตราการเกิดการแลบข้ามเนื่องจากการ shielding failure ได้ดังนี้

$$SFO = N_{SF} P_1 P_\theta 10^{-4} \quad \dots\dots\dots(3.34)$$

### 3.2 การวิเคราะห์โคโรนาบนสายส่งแรงสูง 500 kV

ในระบบการฉนวนไฟฟ้าแรงสูง ไม่ว่าจะเป็นสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงก็ตาม ถ้าหากความเครียดสนามไฟฟ้าที่จุดใดเกิดมีค่าสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติ หรือค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength) ของฉนวนก็จะทำให้เกิดเบรกดาวนเป็นเพียงบางส่วนจะเกิดที่แนวฉนวนเปลี่ยนสภาพไปเป็นสภาพนำไฟฟ้าที่มีความต้านทานระหว่างอิเล็กโตรดต่ำหรือไม่หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ พลังงานที่ทำให้เกิดดีสชาร์จนั้นมากพอหรือไม่ [1,14] ถ้าเกิดเบรกดาวนที่สมบูรณ์ไม่ได้ก็จะกลายเป็นดีสชาร์จพัลส์สั้นๆหรือที่เรียกว่า “ดีสชาร์จบางส่วน” (Partial Discharge)

สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นตัวนำกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าไปยังสถานีลดแรงดันไฟฟ้า เพื่อส่งต่อไปยังชุมชนต่างๆที่มีการใช้ไฟฟ้าทั่วประเทศ เหตุที่ต้องส่งกำลังไฟฟ้าด้วยขนาดแรงดันสูงก็เพื่อที่จะสามารถพลังงานไปได้ในระยะไกล โดยให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจึงได้นำระบบการส่งจ่ายแรงสูง 500 kV ซึ่งบริเวณรอบสายส่งแรงสูงนี้จะเกิดดีสชาร์จบางส่วนที่เรียกว่า “ โครนาดีสชาร์จ ”

### 3.2.1 ปรากฏการณ์ของโครนา

ตามปกติสายส่งไฟฟ้าจะวางขนานกันและมีระยะห่างกันมาก เมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสายขณะที่ป้อนไฟฟ้ากระแสสลับที่แรงดันพอเหมาะ จะไม่มีสิ่งผิดปกติปรากฏบนสายไฟฟ้า แต่ถ้าเพิ่มแรงดันระหว่างสายให้สูงขึ้นทีละน้อยๆ ในที่สุดจะพบว่ามีความเสียงดังออกมาจากสาย เป็นเสียงที่ดังพอได้ยินซึ่งเกิดจากการแตกตัวของอากาศรอบๆ สาย การแตกตัวของอากาศทำให้เกิดไอออนและกรดไนตริก ถ้าการแตกตัวของอากาศมากขึ้นจะเห็นเป็นแสงสีม่วงเกิดขึ้นรอบๆ สายเป็นจุด จะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกไปรบกวนคลื่นวิทยุด้วย ถ้าเพิ่มแรงดันขึ้นอีกแสงเรืองบนสายก็จะสว่างมากขึ้น จนกระทั่งสว่างจ้าในที่สุด และถ้าเพิ่มแรงดันขึ้นอีกเรื่อยๆ โครนาจะเกิดมากขึ้น จนกระทั่งในที่สุดจะเกิดสปาร์ก (spark) หรือเกิดการวาบไฟตามผิว (flashover) บนพวงลูกถ้วยระหว่างคู่สาย

### 3.2.2 การเกิดโครนาดีสชาร์จ (Corona Discharge)

โครนาดีสชาร์จ เกิดขึ้นใกล้ผิวตัวนำของสายส่งเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าของผิวตัวนำเกินค่าเบรกดาวน์ (Breakdown Strength) ของอากาศ หรือเป็นดีสชาร์จบางส่วนที่เกิดขึ้นในอากาศหรือก๊าซที่ยอดแหลมหรือขอบคมของอิเล็กโทรด ที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณอื่น ซึ่งอาจเป็นจุดหรือบริเวณที่ความเครียดสนามไฟฟ้าเพิ่มสูงกว่าค่าความเครียดสนามไฟฟ้าวิกฤติก่อนบริเวณอื่นๆ ของระบบการฉนวน เช่น สายส่งแรงสูงแบบขึงในอากาศที่มีตัวนำไม่เรียบและมีขอบคมเป็นต้น การเกิดโครนาในระบบสายส่งแรงสูงทำให้เกิดผลเสียหลายด้าน ทั้งในระบบสายส่งและระบบที่อยู่ใกล้กัน ประกอบกับภูมิอากาศในเมืองไทยเป็นแบบร้อนชื้น และมีฝนตกชุกเกือบตลอดปี จะทำให้เกิดผลกระทบ 4 อย่างคือ [16]

- ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Corona Loss)

- ทำให้เกิดรบกวนคลื่นสื่อสาร เช่น คลื่นรบกวนวิทยุ (Radio Interference) และคลื่นรบกวน

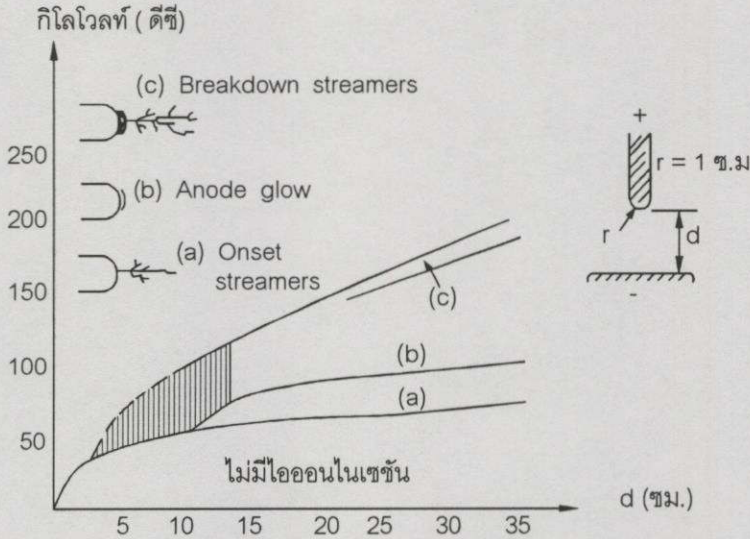
โทรทัศน์ (Television Interference)

- เกิดก๊าซโอโซน ( $O_3$ )

- เกิดเสียงรบกวนพอได้ยิน (Audible Noise)

โครนาจากแอโนด (Anode Corona) ลักษณะการเกิดโครนาจากแอโนดกระทำได้ โดยใช้คู่อิเล็กโทรดที่มีแอโนดเป็นอิเล็กโทรดแท่งและมีจุดปลายแหลม ส่วนแคโทดนั้นจะเป็นระนาบเรียบ ในลักษณะเช่นนี้จะได้ความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงที่ปลายแอโนด แรงดันต่างชนิดนี้มีผลต่อโครนาต่างกัน ปรากฏการณ์โครนาที่เกิดจากแรงดันอิมพัลส์ จะไม่มีผลต่อการเกิดประจุอิสระในก๊าซระหว่าง

อิเล็กโตรด เนื่องจากเวลาเกิดโคโรนาจะสั้นมาก และมีลักษณะเป็นสตรีมเมอร์ ดังรูปที่ 3.9 ซึ่งจะเกิดสตรีมเมอร์บน anode glow เรียกว่า “Breakdown Streamer” ซึ่งให้ประกายจ้าและได้ยินเสียงซ่าๆ สตรีมเมอร์ยาวมากขึ้น และมีโอกาสที่นำไปสู่การเกิดประกายข้ามอัตรการเกิดสตรีมเมอร์ชนิดนี้อยู่ในช่วงประมาณ  $10^3 - 10^4$  ครั้งต่อวินาที



รูปที่ 3.9 โชนที่เกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ของโคโรนาจากแอโนดในช่องว่างอากาศ

ปริมาณความสูญเสียจากโคโรนาและสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่เกิดบนสายส่งจะมากหรือน้อยตามปริมาณของโคโรนา ในการออกแบบสายส่งจำเป็นจะต้องคำนึงสิ่งเหล่านี้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรมีตัวแปรที่สำคัญ คือค่าสนามไฟฟ้าที่ผิวตัวนำจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ดังนี้

- จำนวนตัวนำประกอบต่อเฟส
- เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำประกอบ
- ระยะห่างระหว่างเฟส
- ความสูงจากพื้นดิน
- เส้นผ่าศูนย์กลางของบันเดิ้ล

3.2.3 การคำนวณหาแรงดันวิกฤตบนสายตัวนำ

ภายใต้สภาพบรรยากาศมาตรฐาน 76 เซนติเมตร -ปรอท (cm.-Hg) ,25 องศาเซลเซียส (°C) จะต้องให้ความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_0$ ) ถึง 30 kV/cm จึงทำให้อากาศเกิดการแตกตัว แต่เนื่องจากไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้กับสายส่งเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ ดังนั้นหาค่าประสิทธิผล (rms) ดังนี้

$$E_0 = \frac{30}{\sqrt{2}} = 21.1 \text{ kV/cm} \dots\dots\dots(3.35)$$

แต่ที่ความกดดันบรรยากาศและอุณหภูมิอื่นๆ ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าของการแตกตัวจะเปลี่ยนแปลงตามค่าตัวประกอบความกดดันบรรยากาศกำลัง 2/3 สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$E_0 = 21.1\delta^{2/3} \dots\dots\dots(3.36)$$

แรงดันวิกฤตมีความสัมพันธ์กับสภาพดินฟ้าอากาศ จึงต้องนำองค์ประกอบดังกล่าวมาศึกษาสภาพของอากาศแปรปรวนด้วย สามารถเขียนความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้ [14]

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{(273 + 25)}{(273 + t)} * \frac{b}{76} \\ &= \frac{3.92b}{(273 + t)} \dots\dots\dots(3.37) \end{aligned}$$

- เมื่อ  $\delta$  คือ ตัวประกอบความหนาแน่นของอากาศ (relative air density)
- $b$  คือ ความกดดันของอากาศ (barometric pressure) หน่วย cm.-Hg
- $t$  คือ อุณหภูมิของอากาศ (ambient temperature) หน่วย °C

การคำนวณหาแรงดันบนสายตัวนำรูปทรงกระบอกผิวเรียบที่วางสายห่างกัน  $d$  เมตรและรัศมีของสาย  $r$  เมตร

ถ้าให้ประจุบนสายแต่ละเส้นเป็น  $+q$  และ  $-q$  ตามลำดับ ประจุทั้งสองจะส่งสนามไฟฟ้ากระทำต่อกัน ผลรวมของสนามไฟฟ้าเท่ากับประจุบนตัวนำตามหลักการของไมเคิล ฟาราเดย์

$$\psi = q$$

ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าที่ระยะทาง  $X$  คือ  $D_X$  ซึ่งหาได้จากผลรวมของสนามไฟฟ้า  $\psi$  ต่อพื้นที่ผิว  $S$

$$D_X = \frac{\psi}{S} = \frac{q}{2\pi X}$$

ความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระยะทาง  $X$  คือ  $E_X$  หากจากความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าที่ระยะทาง  $X$  ต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของอากาศ  $\epsilon$  สามารถหาได้จาก

$$E_X = \frac{D_X}{\epsilon} = \frac{q}{2\pi \epsilon X} \quad \text{V/m}$$

แรงดันบนสายตัวนำ  $V$  หากจากการอินทิเกรตความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระยะทางตั้งแต่  $X = r$  ถึง  $X = d$  ดังนี้

$$\begin{aligned}
 V &= \int_r^d E_x dx = \frac{q}{2\pi \epsilon} \int_r^d \frac{1}{X} dx \\
 &= \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{d}{r} \\
 &= \left( \frac{q}{2\pi \epsilon r} \right) r * \ln \frac{d}{r} \\
 &= Er \ln \frac{d}{r} \qquad V \dots\dots\dots(3.38)
 \end{aligned}$$

เมื่อ  $E$  คือความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวสาย หาได้โดยแทนค่า  $X = r$  ลงในสมการของ  $E_x$  จะได้ดังนี้

$$E = \frac{V}{r \ln \frac{d}{r}} \qquad V/m$$

ถ้าใช้สมการที่(3.38)หาแรงดันวิกฤตที่ทำให้แตกตัว  $V_0$  จะกลายเป็นสมการที่(3.39)

$$\begin{aligned}
 V_0 &= E_0 r \ln \frac{d}{r} \\
 &= 21.1\delta r \ln \frac{d}{r} \qquad \dots\dots\dots(3.39)
 \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน หาแรงดันวิกฤตที่มองเห็นได้  $V_V$  ได้ดังนี้

$$V_V = E_V r \ln \frac{d}{r} \qquad \dots\dots\dots(3.40)$$

จากการศึกษาของพีค (F.W. Peek) ได้สรุปความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวที่มองเห็น  $E_V$  กับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ผิวทำให้แตกตัว  $E_0$  มีความสัมพันธ์กับขนาดของตัวนำดังนี้

$$E_V = E_0 \delta \left( 1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}} \right) \qquad \dots\dots\dots(3.41)$$

จากสมการที่ (3.40) จะได้ว่า  $V_V = E_0 \delta \left( 1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}} \right) r \ln \frac{d}{r}$

ดังนั้น 
$$V_V = 21.1\delta \left( 1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}} \right) r \ln \frac{d}{r} \qquad \dots\dots\dots(3.42)$$

แต่สมการที่ (3.39) และ(3.42) จะใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด ต้องคำนึงถึงตัวประกอบความไม่สม่ำเสมอของสาย ตัวประกอบสภาพอากาศและตัวประกอบความขรุขระของสาย ถ้าระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า 1 เฟส ดังนั้น [10]

$$V_0 = 21.1\delta m_0 m_1 r \ln \frac{d}{r} \quad \text{kV} \quad \dots\dots\dots(3.43)$$

$$V_V = 21.1\delta m_V r \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}}\right) \ln \frac{d}{r} \quad \text{kV} \quad \dots\dots\dots(3.44)$$

ถ้าระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส สามารถหาจากสมการดังนี้

$$V_0 = 21.1\delta m_0 m_1 r \ln \frac{D_{eq}}{r} \quad \text{kV} \quad \dots\dots\dots(3.45)$$

$$V_V = 21.1\delta m_V r \left(1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}}\right) \ln \frac{D_{eq}}{r} \quad \text{kV} \quad \dots\dots\dots(3.46)$$

เมื่อ  $m_0$  คือ ตัวประกอบความไม่สม่ำเสมอของสาย ( $0 < m_0 \leq 1$ )

= 1.0 สำหรับสายตัวนำตันผิวเรียบ

= 0.93 - 0.98 สำหรับ  $V_0$  เกิดจากสายตัวนำตันผิวหยาบ 1 เส้น

= 0.87 - 0.90 สำหรับ  $V_0$  เกิดจากสายตัวนำตีเกลียวมากกว่า 7 เส้น

= 0.80 - 0.87 สำหรับ  $V_0$  เกิดจากสายตัวนำตีเกลียวน้อยกว่า  $\leq 7$  เส้น

$m_1$  คือ ตัวประกอบสภาพอากาศ

= 1.0 สำหรับสภาพอากาศปกติ

= 0.8 สำหรับฝนตก

$m_V$  คือ ตัวประกอบความขรุขระของผิวตัวนำสายส่ง ( $0 < m_V \leq 1$ )

= 1.0 สำหรับสายตัวนำผิวเรียบ 1 เส้น

= 0.93 - 0.98 สำหรับมองเห็นโคโรนาในระยะใกล้บนตัวนำทรงกระบอก

= 0.80 - 0.85 สำหรับมองเห็นโคโรนาแบบทั่วไปบนตัวนำตีเกลียว

= 0.70 - 0.75 สำหรับมองเห็นโคโรนาในระยะใกล้บนสายตีเกลียว

$D_{eq}$  คือ ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างตัวนำทางเรขาคณิต 3 เฟส

$d$  คือ ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างตัวนำทางเรขาคณิต 1 เฟส

### 3.2.4 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดโคโรนาในสภาพอากาศปกติ(Corona Loss in Fair Weather)

จากการศึกษาของ F.W. Peek และ Peterson จะได้สมการหาค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียเนื่องจากโคโรนาต่อเฟสในสภาพอากาศปกติดังนี้ [10,14]

(a) Peek's formula :

$$P_C \alpha (V - V_0)^2$$

$$P_C = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{d}} (V - V_0)^2 * 10^{-5} \quad \text{kw / km} \quad \dots\dots\dots(3.47)$$

$$P_C = \frac{390}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{d}} (V - V_0)^2 * 10^{-5} \quad \text{kw / mile} \quad \dots\dots\dots(3.48)$$

(b) Peterson's formula :

$$P_C \propto V^2 F (V / V_0)$$

$$P_C = \frac{1.11066 * 10^{-4}}{\left[ \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) \right]^2} f V^2 F \quad \text{kw / km} \quad \dots\dots\dots(3.49)$$

$$P_C = \frac{1.7874 * 10^{-4}}{\left[ \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) \right]^2} f V^2 F \quad \text{kw / mile} \quad \dots\dots\dots(3.50)$$

หรือ

$$P_C = 20.931 f F \left[ \frac{V}{\log\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \right]^2 * 10^{-6} \quad \text{kw / km} \quad \dots\dots\dots(3.51)$$

$$P_C = 33.7 f F \left[ \frac{V}{\log\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \right]^2 * 10^{-6} \quad \text{kw / mile} \quad \dots\dots\dots(3.52)$$

โดย

$P_C$  คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากโคโรนา (kw)

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้าในระบบสายส่ง = 288.68 kV/ ph.

$f$  คือ ความถี่ในระบบสายส่ง = 50 Hz

$F$  คือ ฟังก์ชันของ  $V / V_0$  หรือโคโรนาฟังก์ชัน

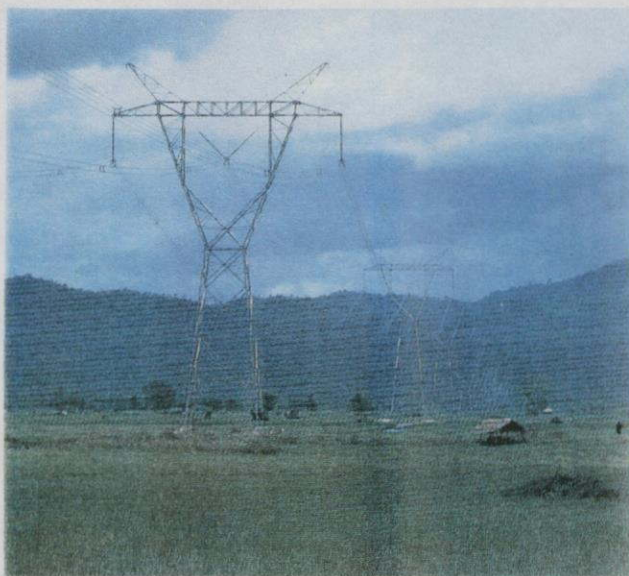
$r$  คือ Conductor radius = 1.386 cm

### 3.2.5 แรงดันพื้นผิวเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำสูงสุดสำหรับเฟสจุดศูนย์กลางและเฟสภายนอก

(Maximum conductor surface voltage gradients for the centre and outer phase :  $E_{mc}, E_{mo}$ )

ขนาดของศักดาไฟฟ้าโคโรนาจะขึ้นอยู่กับการจัดวางรูปของตัวนำ(Conductor Configuration) พิจารณาลวดตัวนำวางขนานกันในอากาศ เกรเดียนท์ที่ผิวของลวดตัวนำทำให้เกิดโคโรนาแบบมองเห็นได้ จะขึ้นอยู่กับหลายองค์ประกอบ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้นทำให้เกิดโคโรนาได้ที่ศักดาไฟฟ้าต่ำ การลดความกดดันอากาศทำให้ความหนาแน่นของอากาศลดลง และเกรเดียนท์ที่ทำให้เกิดโคโรนานั้นลดลง ความเรียบของผิวตัวนำมีผลต่อศักดาไฟฟ้าโคโรนาเช่นกัน เมื่อผิวของลวดตัวนำหยาบมีปลายแหลมหรือฝุ่นผงเกาะมากจะทำให้เกิดโคโรนาที่ศักดาไฟฟ้าต่ำ

ดังนั้นศักดาไฟฟ้าโคโรนาก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าสูงสุดบนผิวของตัวนำเท่ากับสนามไฟฟ้าวิกฤต ความสัมพันธ์ระหว่างศักดาไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ผิวของสายตัวนำสำหรับการจัดรูปของตัวนำแบบต่าง ๆ กันดังรูปที่ 3.10



รูปที่3.10 เสาโครงเหล็กสายส่ง 500 kV วงจรเดี่ยวที่มีการจัดวางตัวนำลักษณะBundle 4 เส้น ต่อ Phase

$$E_{mc} = \frac{\left(1 + \frac{4\sqrt{2}r}{S}\right)V}{4r \ln \frac{D}{\sqrt[4]{\sqrt{2}rS^3}}} \quad \text{kV / cm} \quad \dots\dots\dots(3.53)$$

$$V_C = \frac{4E_C r}{1 + \frac{4\sqrt{2}r}{S}} * \ln \frac{D}{\sqrt[4]{\sqrt{2}rS^3}} \quad \text{kV} \quad \dots\dots\dots(3.54)$$

$$E_{mo} = \sqrt{3} \left\{ \left( \frac{4\sqrt{2}}{S} + \frac{2}{d} \right) \left( \frac{V}{\ln \frac{4h}{d} + 2 \ln \frac{2h}{S} + \ln \frac{2h}{\sqrt{2S}}} \right) \right\} \quad \text{kV/cm} \quad \dots\dots\dots(3.55)$$

โดย  $S$  คือ ระยะห่างค้ำนำ 2 เส้นในกลุ่ม Bundle เดียวกัน = 45.7 cm

$h$  คือ ความสูงของเสาโครงเหล็กของสายส่งแรงสูง 500 kV วงจรเดียว = 41 cm

$d$  คือ Subconductor diameter = 2.773 cm

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้าในระบบสายส่ง = 288.68 kV/phase

$V_C$  คือ สักดาไฟฟ้าโคโรนา (kV)

หาค่าประจุเฉลี่ย (Average Charge) บนค้ำนำของเฟสบันเดิล จากสมการดังนี้

$$Q = \frac{CV}{N} \quad \text{kC (rms) /m} \quad \dots\dots\dots(3.56)$$

โดย  $C$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ของสายส่งแรงสูง 500 kV วงจรเดียว =  $1.87 \cdot 10^{-11}$  F/m

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้าในระบบสายส่ง = 288.68 kV/phase

$N$  คือ จำนวนค้ำนำใน Bundle ของแต่ละเฟส = 4

หาค่าเกรเดียนท์เฉลี่ยบนค้ำนำ (Average Conductor Gradient) จากสมการที่(3.57) ดังนี้

$$E_{AV} = \frac{Q}{2\pi \epsilon_0 r} \quad \text{kV(rms) / cm} \quad \dots\dots\dots(3.57)$$

โดย  $Q$  คือ ค่าประจุเฉลี่ย (Average Charge) บนค้ำนำของเฟสบันเดิล

$\epsilon_0$  คือ ค่า Permittivity ของอากาศ =  $8.854 \cdot 10^{-12}$  F/m

$r$  คือ Conductor radius = 1.386 cm

คำนวณหาเกรเดียนท์สูงสุดรอบ ๆ ค้ำนำ (Maximum value of conductor gradient) ดังนี้

$$E_{\max} = E_{AV} [1 + (d/D)(N - 1)] \quad \text{kV(rms) / cm} \quad \dots\dots\dots(3.58)$$

โดย  $d$  คือ Subconductor diameter = 2.773 cm

$D$  คือ Bundle diameter (m)

### 3.2.6 กำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดโคโรนาในสภาพอากาศแปรปรวนและกระแสไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากโคโรนา (Corona Loss in Foul Weather and Current Loss)

การสูญเสียโคโรนาในสภาพอากาศที่มีฝนตกชุก มีการศึกษาในโครงการทดสอบสายส่งแรงสูง (EHV) ค่าเฉลี่ยของการสูญเสียที่ได้จากการสังเกต ในขณะที่มีฝนตกชุกของสายส่ง 3 เฟส ผลการ

ทดสอบจากโครงการ EHV ได้นำสมการมาพัฒนาหาการสูญเสีย Corona [4] ในขณะที่ฝนตกชุกจะอยู่ระหว่าง 400 kV-700 kV จากสมการที่ (3.59)และ(3.60)

$$\sum P = P_{FW} + \left[ \frac{V}{\sqrt{3}} Jr^2 \ln(1 + kR) \right] \sum_1^n (E^5) \quad \text{kW /mile .....(3.59)}$$

หรือ

$$P_{C,RW} = P_{FW} + 0.3606KV_L r^2 \ln(1 + 10\rho) \sum_{i=1}^{3N} E_i^5 \quad \text{kW /km .....(3.60)}$$

$$i_C = \frac{P_C \sqrt{3}}{V_L} \quad \text{A/ km .....(3.61)}$$

- โดย  $\sum P = P_{C,RW}$  คือ การสูญเสียโคโรนาทั้งหมด 3 เฟสเนื่องจากฝนตกชุก
- $J = K$  คือ ค่าคงที่สูญเสียของสายส่ง 500 kV  
 =  $5.35 * 10^{-10}$  for rain  
 =  $1.27 * 10^{-9}$  for snow
- $\rho = R$  คือ Heavy rain rate = 12.7 mm/ hr.  
 Light snow rate = 0.127 mm/ hr.
- $P_{FW}$  คือ การสูญเสียโคโรนาทั้งหมดเนื่องจากสภาพอากาศปกติ
- $V_L$  คือ Conductor voltage(Line) = 500 kV
- $r$  คือ Conductor radius = 1.386 cm
- $E_i$  คือ Surface voltage gradient (kV / cm)
- $i_C$  คือ กระแสไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจาก โคโรนา (A/ km)
- $n = N$  คือ จำนวนตัวนำใน Bundle ของแต่ละเฟส = 4

การสูญเสียโคโรนาในสภาพอากาศที่มีหมอก หิมะเบาบางและอากาศหนาวจัด ในสภาพอากาศที่เป็นหมอกการสูญเสียโคโรนาจะน้อยกว่าสภาพอากาศที่มีฝนตกชุก อัตราส่วนระหว่างการสูญเสียในขณะที่มีฝนกับการสูญเสียในขณะที่มีหมอก จะมีแนวโน้มลดลงที่เกรเดียนท์สูงขึ้น การสูญเสียโคโรนาในสภาพอากาศที่หนาวจัดจะมีมากกว่าในสภาวะที่มีฝนตก โคโรนาทำให้เกิดพัลส์ของแรงดันและกระแสบนสายส่งพัลส์ จะทำให้เกิดความถี่รบกวนในย่านความถี่วิทยุ ย่านที่เห็นผลรบกวนชัดเจนจะอยู่ในย่านของ AM (535-1605 kHz) และในย่านความถี่ของ TV (54-88 MHz)

### 3.2.7 การเกิดเสียงรบกวนพอได้ยิน (Audible Noise) [5, 7]

พิจารณาถึงการเกิด Coronaซึ่งจะทำให้เกิดเสียงรบกวน Audible Noise (AN) ได้กำหนดที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าคือ AN น้อยกว่า 55 dB ที่ Level AN ของแต่ละเฟสที่มีการวัดที่จุด M จากสมการดังนี้

Noise measure :  $L_{50}$  rain

$$N < 3 : AN(i) = 120 \log E_{am}(i) + 55 \log d - 11.4 \log D(i) - 115.4 \quad \dots\dots\dots(3.62)$$

$$N \geq 3 : AN(i) = 120 \log E_{am}(i) + 55 \log d - 11.4 \log D(i) + 26.4 \log N - 128.4 \quad \dots\dots\dots(3.63)$$

$$AN_T = 10 \log \sum_{i=1}^3 10^{0.1AN(i)} \quad \dots\dots\dots(3.64)$$

โดย

$E_{am}(i)$  คือ แรงดันเกรเดียนท์พื้นผิวเฉลี่ยสูงสุดในเฟส  $i$  (kV/cm)

$D(i)$  คือ ระยะห่างสายอากาศจากเฟส  $i$  ถึงตำแหน่งที่ตั้งเครื่องตรวจระดับสัญญาณ (m)

$AN_T$  คือ ระดับเสียงรบกวนทั้งหมด 3 เฟส (dB)

### 3.2.8 การเกิดสัญญาณรบกวนวิทยุ (Radio Interference : RI) [19]

การวัดสนามคลื่นรบกวนวิทยุครั้งนี้จะทำการวัดสายส่งแรงสูง 500 kV ในช่วงตั้งแต่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ. ลำปาง ถึงสถานีไฟฟ้าย่อยหนองจอก กทม. การวัดจะแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแม่เมาะ-ท่าตะโก และช่วงท่าตะโก - รังสิต - หนองจอก การวัดนั้นจะทำการสำรวจสถานที่ต่างๆ ที่สายส่งพาดผ่านกับถนน จากแผนที่ที่ตั้งของจุดวัดช่วงแม่เมาะ-ท่าตะโก ช่วงที่ 1 แบ่งจุดวัดออกเป็น 16 จุดผ่าน 6 จังหวัดตั้งแต่ภาคเหนือถึงภาคกลาง และช่วงที่ 2 จะวัด 8 จุดที่ จ.นครสวรรค์ หนองจอก กทม. ผลจากการวัดแต่ละจุดในส่วนการวิเคราะห์ผลการวัดจะแสดงรายละเอียดดังนี้

- ย่านความถี่ของสัญญาณรบกวนวิทยุ (Frequency Spectrum) ระดับของสัญญาณรบกวนที่จะทำการวัดนั้น จะแปรเปลี่ยนไปตามสภาวะอากาศและระดับแรงดันของสายส่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามโหลดตลอดเวลา ตลอดจนสัญญาณรบกวนจากบริเวณรอบข้าง หากจากสมการดังนี้ [7]

$$RI_i = 3.5E_m + 6d - 33 * \log\left(\frac{D_i}{20}\right) - 30 \quad \dots\dots\dots(3.65)$$

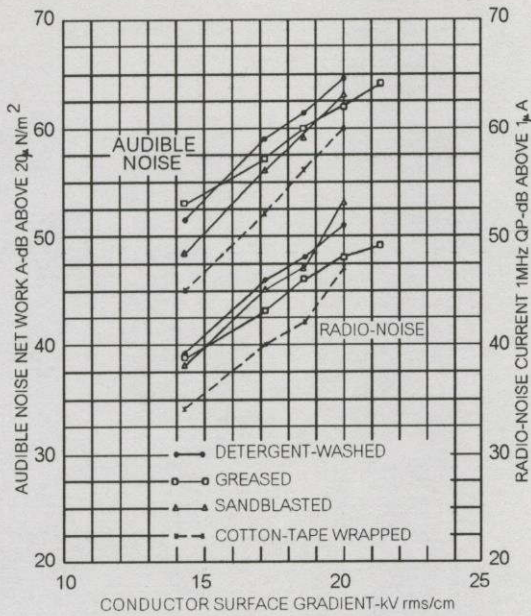
$$RI_1 = (\text{ค่าเฉลี่ยสูงสุดทั้ง 2 ค่าของระดับ } RI + 1.5) \quad \dots\dots\dots(3.66)$$

$$RI_2 = RI_1 - 6 \text{ dB} \quad \dots\dots\dots(3.67)$$

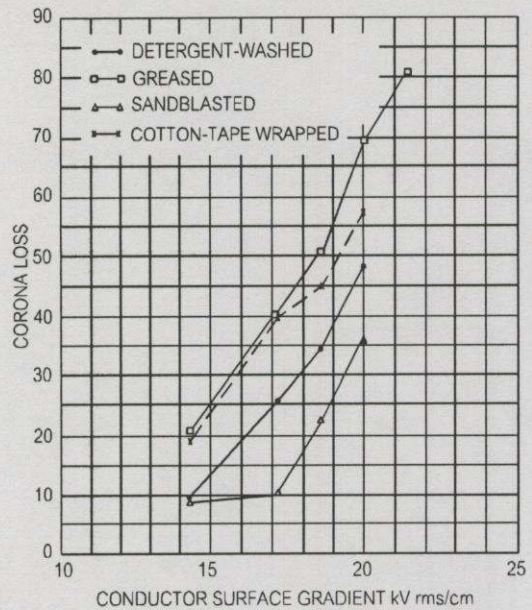
โดย  $RI_i$  คือ แนวระดับของเสียงรบกวนทางวิทยุในเฟส  $i$  (dB)

$RI_1$  คือ แนวระดับของเสียงรบกวนทางวิทยุในเฟสที่ 1 (dB)

$RI_2$  คือ แนวระดับของเสียงรบกวนทางวิทยุในเฟสที่ 2 (dB)



(a)



(b)

รูปที่ 3.11 การเกิดแรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ (a) ขณะเกิด Radio Interference และ Audible Noise  
(b) ขณะเกิด Corona Loss

- การแพร่กระจายของสนามคลื่นรบกวนวิทยุรอบ ๆ สายส่ง [19] ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ สนามกึ่ง - สถิต (Quasi - Static Field) ซึ่งถูกเหนี่ยวนำโดยแรงดันความถี่ RI บนสายส่งตัวนำที่ระยะใกล้ตัวนำสายส่งมากๆ และสนามแผ่กระจาย (Radiated Field) จากโคโรนาพัลส์ แสดงจากรูปที่ 3.12 สัญญาณพัลส์เข้ามายังเครื่องวัดโดยผ่าน RF อินพุท สัญญาณพัลส์ (1) แต่ละพัลส์อาจถูกพิจารณาเป็นตัวกำเนิดของสเปกตรัม วงจรขยายสัญญาณ RF จะขยายสัญญาณสัมพันธ์กับสัดส่วนความแคบของสเปกตรัมที่เข้ามา ซึ่งถูกกำหนดโดยแบนด์วิดท์ของวงจรขยาย เอาท์พุทของวงจรขยายจะเป็นสัญญาณพัลส์ที่ถูกมอดูเลต (2) กับความถี่ออสซิลเลเตอร์ วงจรผสมสัญญาณ (Mixer) นั้นความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่ถูกออสซิลเลตจะถูกแปลงเป็นความถี่กลาง (IF) สัญญาณพัลส์เมื่อผ่านวงจรขยาย IF เอาท์พุทที่ได้มีความกว้าง และสัญญาณพัลส์ถูกกำหนดโดยแบนด์วิดท์ที่แคบที่สุดของวงจร

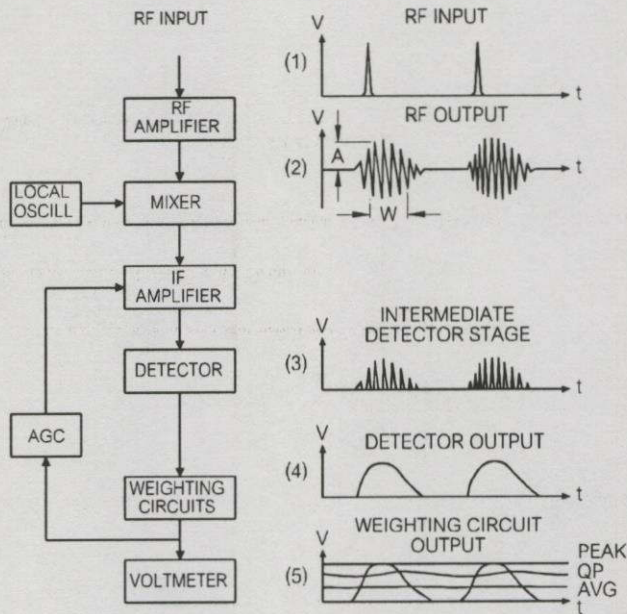
ผลของสภาพอากาศและภูมิประเทศต่อการเกิดสัญญาณรบกวนวิทยุ เช่น สภาพอากาศปกติ, สภาพอากาศชื้น, ฝนตกชุก, อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันรวมถึงความเร็วลม

### 3.2.9 การเกิดสัญญาณรบกวนโทรทัศน์ (Television Interference : TVI)

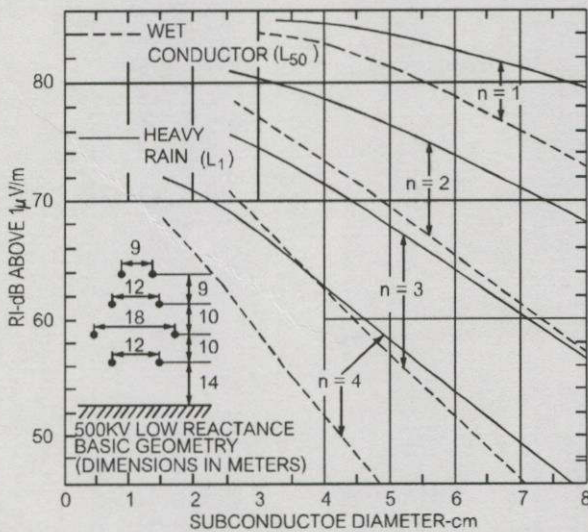
การกำหนดย่านความถี่จากการคำนวณสำหรับสายส่งแรงสูงระดับ EHV - UHV [4] ซึ่งเทียบกับสัญญาณรบกวนวิทยุที่ความถี่ 1 MHz เป็นหลัก สำหรับในย่านความถี่ TVI ในการคำนวณจะนำค่าของ RI ที่ความถี่ 1 MHz การวิจัยพบว่าในสภาวะอากาศปกติค่าสัญญาณรบกวนโทรทัศน์ (TVI) จะอยู่ในช่วง 14 - 30 dB เทียบกับ  $1 \mu\text{V}/\text{m}$  หาได้จากสมการที่ (3.68) ดังนี้

$$TVI = RI - 20 \log_{10} \left[ f \sqrt{\frac{1 + (R/H)^2}{1 + (15/H)^2}} \right] + 3.2 \dots\dots\dots(3.68)$$

โดย  $RI$  คือ สัญญาณรบกวนวิทยุที่ความถี่ 1 MHz ที่ระยะ 15 เมตรจากเฟสนอกสุด  
 $f$  คือ ความถี่ย่านของ  $TVI$  (MHz)  
 $R$  คือ ระยะห่างจากเฟสนอกสุดของสายตัวนำ (m)  
 $H$  คือ ความสูงของสายตัวนำ (m)



รูปที่ 3.12 ขบวนการของสัญญาณในเครื่องวัดสัญญาณรบกวนวิทยุ



รูปที่ 3.13 แสดงระดับ RI ของสายส่ง 500 kV วงจรคู่ที่มีความต้านทานต่ำในระยะด้านข้าง 15 m

### 3.3 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งแรงสูง 500 kV

#### 3.3.1 สนามไฟฟ้า [4,15]

การคำนวณค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งแรงสูง ได้พิจารณาถึงองค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลกับการคำนวณไว้ดังนี้ จะไม่มีประจุไฟฟ้าใด ๆ ในบริเวณนั้น ค่าความต้านทานของดินจะต้องมีค่าน้อย เพื่อลดระยะเวลาในการกระจายประจุไฟฟ้าลงสู่พื้นดิน และค่า Dielectric Constant ;  $\epsilon$  ของสูญญากาศ ที่มีค่าเท่ากับ  $8.854 \times 10^{12}$  F/m สำหรับประเทศไทยโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ใช้หลักเกณฑ์การออกแบบสายส่งแรงสูง 500 kV ไว้ดังนี้

เขตเดินสายส่ง	- สนามไฟฟ้า	$\leq 15$ kV/ m
ริมเขตเดินสายส่ง	- สนามไฟฟ้า	$\leq 2$ kV/ m
	- สนามแม่เหล็ก	$\leq 150$ mG

เนื่องจากการส่งจ่ายด้วยสายตัวนำ Bundle ดังนั้นเส้นผ่าศูนย์กลางสมมูลย์ของสายตัวนำ Bundle ( $d_{eq}$ )

$$d_{eq} = D * n \sqrt{\frac{nd}{D}} \dots\dots\dots(3.69)$$

- โดย  $D$  คือ ระยะห่างของสายตัวนำ Bundle(m)
- $n$  คือ จำนวนตัวนำใน Bundle ของแต่ละเฟส
- $d$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำใน Bundle(m)

จำนวนประจุไฟฟ้า ( $Q$ )ที่เกิดขึ้นบนสายส่งไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับระดับแรงดันและค่า Maxwell potential coefficients (P) ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} Q_A \\ Q_B \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{AA} & P_{AB} & \cdot & \cdot & P_{AN} \\ P_{BA} & P_{BB} & \cdot & \cdot & P_{BN} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{MA} & P_{MB} & \cdot & \cdot & P_{MN} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ \cdot \\ \cdot \\ V_M \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.70)$$

$$P_{AA} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{4y_A}{d_A}\right) \quad \text{m/ F} \quad \dots\dots\dots(3.71)$$

$$P_{AB} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left[ \frac{(X_A - X_B)^2 + (y_A + y_B)^2}{(X_A - X_B)^2 + (y_A - y_B)^2} \right]^{1/2} \quad \text{m/ F} \quad \dots\dots\dots(3.72)$$

โดย

$y_A, y_B$  คือ ความสูงของสายตัวนำ Bundle เฟส A, B (m)

$X_A, X_B$  คือ ระยะห่างสายตัวนำ Bundle เฟส A, B (m)

$d_A$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางสมมุทธ์ของสายตัวนำ Bundle เฟส A (m)

ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายตัวนำ Bundle เฟส A ณ จุด  $P(x_i, y_i)$  ใดๆ บนพื้นดินจะสามารถหาได้ดังนี้ ( $y_i \approx 0$  บนพื้นดิน)

$$\vec{E}_A = \vec{E}_{X,A} \vec{U}_X + \vec{E}_{Y,A} \vec{U}_Y \quad \dots\dots\dots(3.73)$$

เมื่อ  $\vec{U}_X, \vec{U}_Y$  คือ พื้นที่ Vector และ  $\vec{E}_{X,A}, \vec{E}_{Y,A}$  คือ ความยาวของแกนแนวนอน ดังนี้

$$\vec{E}_{X,A} = \frac{(q_{rA} + jq_{iA})(X_N - X_A)}{2\pi\epsilon[(X_A - X_N)^2 + (y_A - y_N)^2]} - \frac{(q_{rA} + jq_{iA})(X_N - X_A)}{2\pi\epsilon[(X_A - X_N)^2 + (y_A + y_N)^2]} \quad \dots\dots(3.74)$$

และ

$$\vec{E}_{Y,A} = \frac{(q_{rA} + jq_{iA})(y_N - y_A)}{2\pi\epsilon[(X_A - X_N)^2 + (y_A - y_N)^2]} - \frac{(q_{rA} + jq_{iA})(y_N - y_A)}{2\pi\epsilon[(X_A - X_N)^2 + (y_A + y_N)^2]} \quad \dots\dots(3.75)$$

ส่วนประกอบที่เป็นแนวตั้งและแนวนอน  $\vec{E}_X$  และ  $\vec{E}_Y$  ของสนามไฟฟ้าเป็นการคำนวณตลอดตัวนำ (A, B, ...)

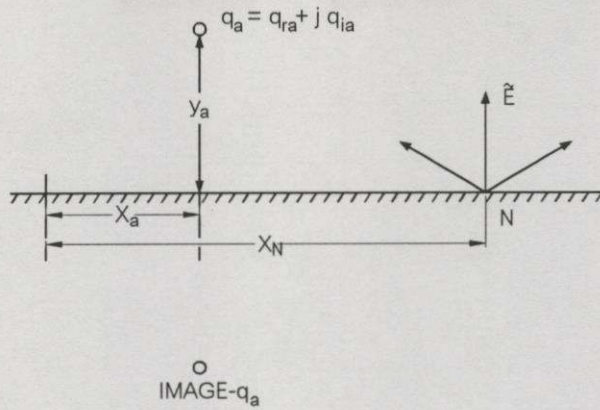
$$\vec{E}_X = \vec{E}_{X,A} + \vec{E}_{X,B} + \dots \quad \dots\dots\dots(3.76)$$

และ

$$\vec{E}_Y = \vec{E}_{Y,A} + \vec{E}_{Y,B} + \dots \quad \dots\dots\dots(3.77)$$

$$\vec{E}_A = \frac{q_{rA} + jq_{iA}}{2\pi\epsilon} * \frac{2y_A}{(X_A - X_N)^2 + y_A^2} \quad \dots\dots\dots(3.78)$$

$$\therefore \vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C + \dots \quad \dots\dots\dots(3.79)$$



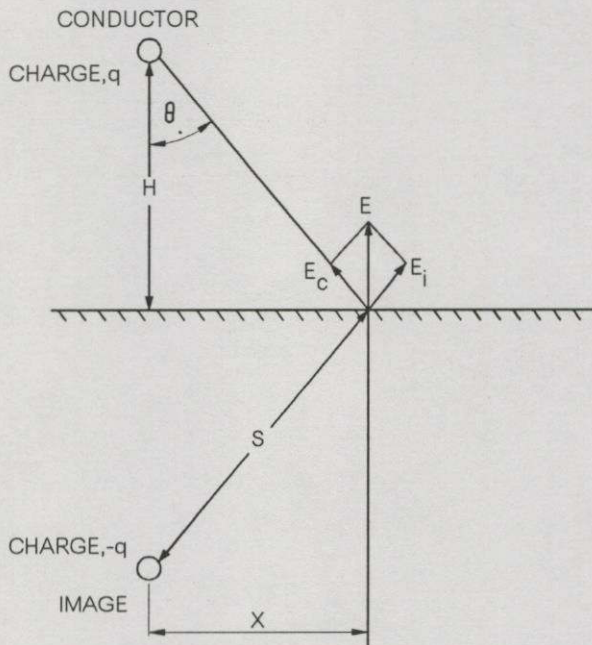
รูปที่ 3.14 แสดงระยะห่างของสนามไฟฟ้าในระดับผิวดินของการเปลี่ยนตัวนำ

ค่าความเข้มสนามที่จุดใกล้พื้นดินเป็นฟังก์ชันของแรงดัน  $RI$  รูปทรงของสายส่งและระยะห่างจากสายส่งพิจารณาจากรูปที่ 3.15 ความเข้มสนาม  $E$  จะหาได้จากสมการดังนี้

$$E = E_c \cos\theta + E_i \cos\theta \quad \dots\dots\dots(3.80)$$

ขนาดของ  $E_c$  และ  $E_i$  เท่ากันและสัมพันธ์กับประจุบนตัวนำ  $q$  ดังสมการที่ (3.81)

$$E_c = E_i = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 S} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 \sqrt{H^2 + X^2}} \quad \dots\dots\dots(3.81)$$



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะการเกิดสนามไฟฟ้าที่มีประจุเท่ากับผิวดิน

แต่

$$q = CV \quad ; \quad \cos\theta = \frac{H}{\sqrt{H^2 + X^2}}$$

ดังนั้น

$$E = 2 * \frac{CV}{2\pi\epsilon_0 \sqrt{H^2 + X^2}} * \frac{H}{\sqrt{H^2 + X^2}} \quad \dots\dots\dots(3.82)$$

แทนค่า V

$$E = \frac{HC\sqrt{LC}}{4\pi^2\epsilon_0^2(H^2 + X^2)\sqrt{\alpha}}\Gamma \dots\dots\dots(3.83)$$

สำหรับตัวนำเดี่ยวรัศมี r

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln(2H/r) \quad (H/m) \quad ; \quad C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(2H/r)} \quad (F/m) \quad \dots\dots\dots(3.84)$$

$$E = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0\alpha}} * \frac{H}{(H^2 + X^2)\ln(2H/r)}\Gamma \dots\dots\dots(3.85)$$

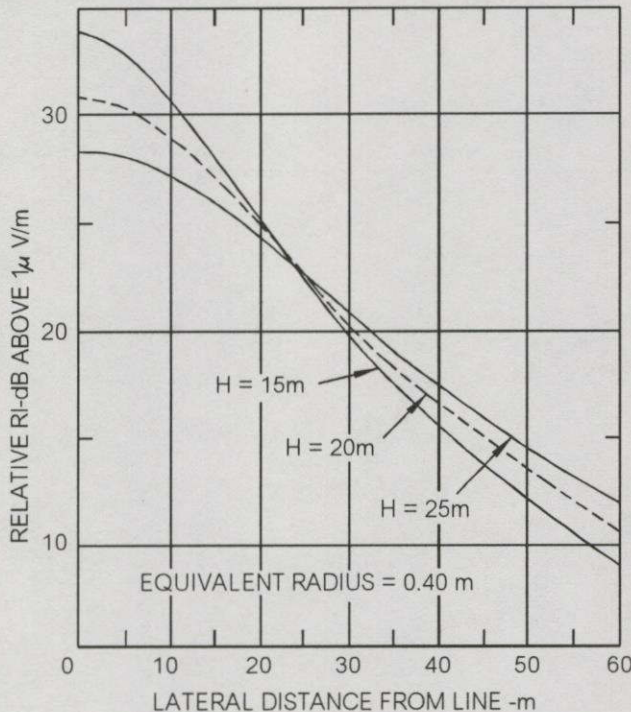
โดย

$\Gamma$  คือ ค่า RI generation function ( $A/m^{1/2}$ )

$L$  คือ ค่าคาปาซิแตนซ์ต่อหน่วยความยาวของตัวนำกับพื้นดิน (F/m)

$\epsilon_0$  คือ ค่า Permittivity ของอากาศ

จะเห็นว่าความเข้มสนาม RI ที่ระยะห่างจากสายส่งขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ เช่น  $\alpha$ , I และ H ตัวอย่างความเข้มสนามเหนือพื้นดินที่ระยะห่างจากสายส่ง ของสายซึ่งยาวอนันต์แสดงดังรูปที่ 3.16 โดยที่ฟังก์ชันกำเนิดกระแส RI เท่ากับ 1 (0 dB above  $1 \mu A / m^{1/2}$ ) และ  $\alpha = 3.1 \text{ dB/km}$  (5dB/mile) ในทางปฏิบัติความยาวของสายส่งจะถือว่าเป็นอนันต์ เมื่อสายส่งเส้นนั้นมีความยาวมากกว่า 8 km ขึ้นไป



รูปที่ 3.16 ความเข้มสนาม RI ที่เกิดจากฟังก์ชันกำเนิด RI = 1

### 3.3.2 สนามแม่เหล็ก

การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งแรงสูงหลายเฟส (A, B, ...) จะวางขนานกัน โดยอาศัย Biot - Savart Low กล่าวคือความเข้มของสนามแม่เหล็กย่อย (Magnetic Field Intensity; dH) ซึ่งเกิดจากส่วนย่อยของกระแส ( $I dl$ ) หรือส่วนย่อยของแหล่งกำเนิดจะแปรผันตรงกับผลคูณของ  $I dl$  กับ  $\sin \alpha$  และแปรผกผันกับ  $r_{i,j}$  เพื่อหาความเข้มสนามแม่เหล็ก (H) ณ จุด  $P(x_i, y_i)$  ใด ๆ บนพื้นดินได้ สามารถเขียนเป็นสมการที่ (3.86) และ (3.87) ได้ดังนี้

$$H_{j,i} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \quad \dots\dots\dots(3.86)$$

หรือ

$$\vec{H}_{j,i} = \frac{\vec{I}_i * \vec{r}_{j,i}}{2\pi r_{i,j}^2} = \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\phi}_{i,j} \quad \dots\dots\dots(3.87)$$

เมื่อ  $\vec{\phi}_{i,j}$  เป็น Unit Vector ในทิศทางความกว้างของ Vector Current และ Vector Segment ;  $r_{i,j}$  หาจากสมการดังนี้

$$\vec{\phi}_{i,j} = -\frac{y_i - y_j}{r_{i,j}} \vec{U}_X + \frac{x_i - x_j}{r_{i,j}} \vec{U}_Y \quad \dots\dots\dots(3.88)$$

เมื่อ  $\vec{U}_X$  และ  $\vec{U}_Y$  เป็น Unit Vector ในทิศทางแนวนอนและแนวตั้งฉากกับแกน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เฟส A จากสมการที่ (3.89) ดังนี้

$$\vec{H}_A = \frac{I_A r_A}{2\pi r_A^2} = \frac{I_A}{2\pi r_A} \vec{\phi}_A \quad \text{A/m} \quad \dots\dots\dots(3.89)$$

โดย

$H_A$  คือ ความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายตัวนำ Bundle เฟส A (A/m)

$I_A$  คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายตัวนำ Bundle เฟส A (A)

$r_A$  คือ ระยะทางจากสายตัวนำ Bundle เฟส A ไปยังจุด  $P(x_i, y_i)$

$\vec{\phi}_A$  คือ Unit Vector ในทิศทางระยะทาง  $r_A$

ผลรวมความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายตัวนำ Bundle เฟส A, B, ... และเมื่อ  $i$  แทนสายตัวนำ Bundle เฟส A, B, ... จะหาจากสมการดังนี้

$$\vec{H}_J = \sum_i \frac{I_i}{2\pi r_{i,j}} \vec{\phi}_{i,j} \quad \dots\dots\dots(3.90)$$

ดังนี้

คำนวณหาความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก ( $\vec{B}$ )ที่อยู่ในรูปสนามแม่เหล็ก ได้จากสมการ

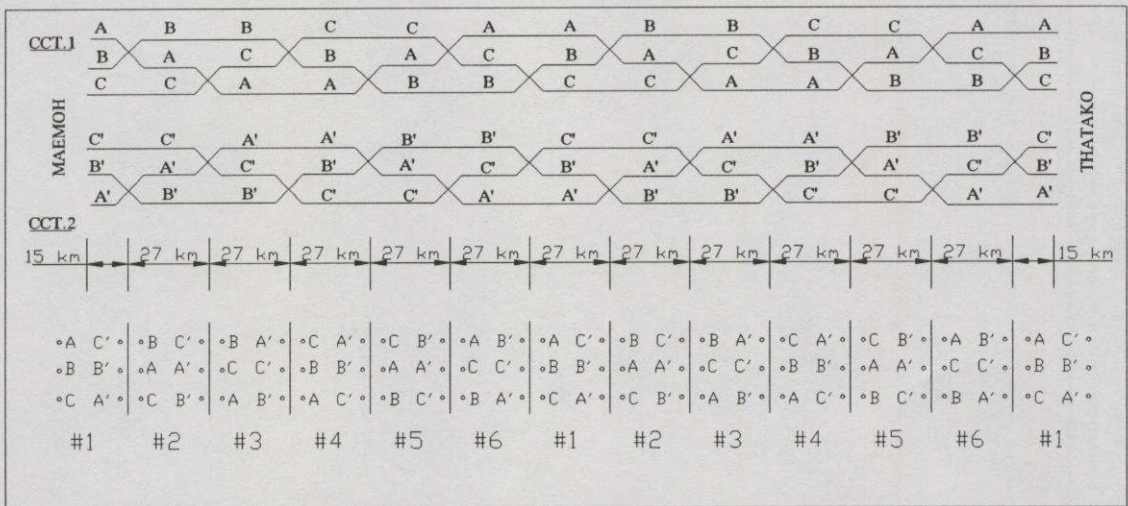
$$\vec{B} = \mu \vec{H} \dots\dots\dots(3.91)$$

โดย

$\vec{B}$  คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (mG)

$\mu$  คือ ค่า Permeability ของอากาศ =  $4\pi * 10^{-7}$  H/m

ในทางปฏิบัติแล้วการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กจะไม่นำค่า Earth Return Current มาพิจารณา เนื่องจากการตั้งสมมุติฐานที่ว่าสายส่งแรงสูงจ่ายโหลด ด้วยกระแสสมดุล (Balance Current) ทำให้ค่า Earth Return Current เท่ากับศูนย์



รูปที่ 3. 17 รูปแบบการทำ Transposed และการจัดเรียงลำดับเฟสของสายส่ง 500 kV

การพิจารณาสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก [15] ทำการเลือกสายส่งแรงสูงวงจรคู่ระดับแรงดัน 500 kV กรณีศึกษาจากแม่เมาะ-ท่าตะโก (MAE MOH - THA TAKO) เป็นระยะทางประมาณ 335 กิโลเมตร ที่มีการสลับสายส่ง 2 ครั้งจากรูปที่ 3.17 ได้แสดงให้เห็นถึงการทำให้ Transposed ให้กับสายส่งจำนวน 2 ครั้ง ซึ่งในแต่ละครั้งจะแบ่งออกเป็น 6 ช่วงย่อย ๆ ทำให้เกิดความแตกต่างของการจัดเรียงลำดับเฟสมีจำนวน 6 รูปแบบ ลักษณะของสายส่งโดยทั่วไปจะเป็นสายส่งวงจรคู่จำนวน 6 เฟส ในแต่ละเฟสจะประกอบด้วยสายตัวนำ Bundle จำนวน 4 เส้น ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างของเสาโครงเหล็กชนิด DL วงจรคู่ จากภาคผนวก ก. จะเห็นว่ามียูอยู่หลายตัวแปรที่ส่งผลให้ระดับความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไป เมื่อมีการจัดเรียงลำดับเฟสของวงจรไฟฟ้าที่แตกต่างกันไป 6 รูปแบบแล้ว จะส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นในระยะปลอดภัยของการเดินสายไฟ (right of way : R-O-W) ที่มีระยะความกว้าง 60 เมตร ทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟไหลผ่านสายตัวนำแต่ละเฟสหักล้างกัน

### 3.3.3 การลดทอนระดับความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ความเข้มของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งแรงสูง นอกจากนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้า ระดับแรงดันไฟฟ้าและผลการจัดเรียงลำดับของเฟสแล้ว ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงดังนี้

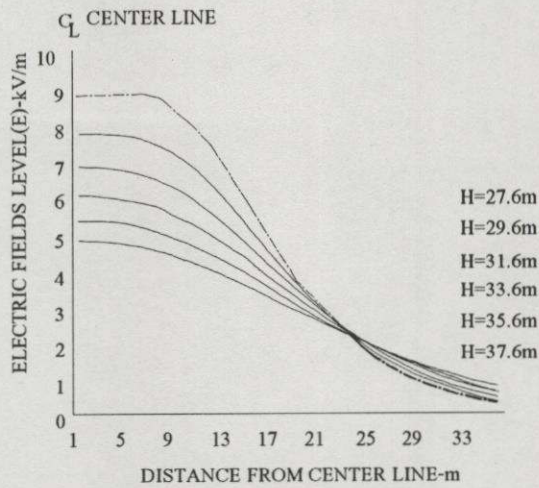
- Tower Height คือ ใช้เสาโครงเหล็กที่สูงกว่าเพื่อยกสายตัวนำทั้ง 3 เฟสให้สูงจากพื้นดินมากยิ่งขึ้น เพราะความเข้มของสนามแม่เหล็กจะลดลงตามระยะทาง

- Line Configuration คือ การจัดวางแนวสายส่งให้มีระยะทางสั้นที่สุด ความยาวของสายตัวนำที่ใช้จ่ายกระแสไฟฟ้าก็จะสั้นที่สุดด้วย เพื่อจำกัดบริเวณที่สนามแม่เหล็กแพร่กระจายให้อยู่ในวงแคบ และจัดสายตัวนำสามเฟสของสายส่งให้อยู่ในรูปสามเหลี่ยมหรือเดลต้า (Delta) จะมีความเข้มสนามแม่เหล็กประมาณ 50 % ของสนามแม่เหล็กจากสายส่งแบบแบนราบ เนื่องจากกระแสเหนี่ยวนำที่ไหลในสายชีลด์ (Shielded Wire) จะเกิดสนามแม่เหล็กหักล้างกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ ทำให้ผลลัพธ์ของความเข้มสนามแม่เหล็กลดลง

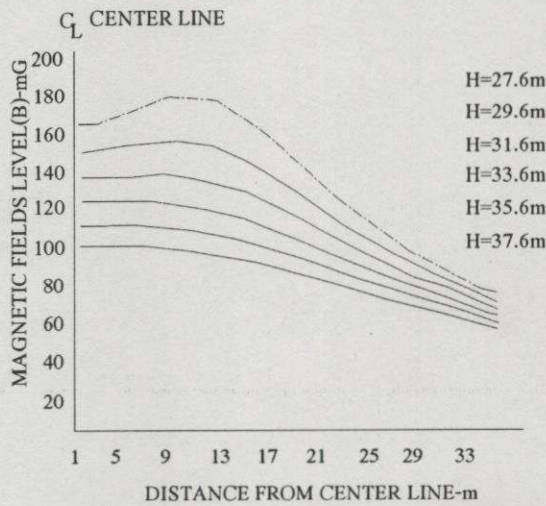
- Split - Phase คือ การแยกเฟสของสายตัวนำ โดยแบ่งแยกกระแสไฟฟ้าของแต่ละเฟส(เฟส A และเฟส B)ให้ไหลผ่าน 2 สายตัวนำหรือมากกว่านั้น ซึ่งจัดวางระยะห่างเท่ากันเมื่อเทียบกับเฟส C ที่อยู่ตรงกลางสนามแม่เหล็กจากแต่ละสายตัวนำจะหักล้างซึ่งกันและกัน จะมีผลให้สนามแม่เหล็กรวมลดลง 80 %

- Cancellation Loop คือ เป็นการลดระดับความเข้มสนามแม่เหล็กตรงบริเวณบางช่วงเสาส่งจะนิยมใช้วงหักล้าง โดยการขึงสายตัวนำล้อมรอบเสาส่งที่ต้องการลด สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายตัวนำที่จ่ายกระแสไฟฟ้า จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลในสายตัวนำของวงหักล้าง แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้เกิดการหักล้างกันของสนามแม่เหล็กทั้งสอง ดังนั้นผลรวมของสนามแม่เหล็กลดลง

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาแนวทางที่สามารถลดระดับความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก โดยยกระดับความสูงของเสาส่งแรงสูง(Tower Height) ให้มีความสูงเพิ่มขึ้น จากการวิเคราะห์ได้นำรูปแบบการจัดเรียงลำดับเฟสของสายในรูปแบบที่ 2 และ 5 (พิจารณาจากรูปที่ 3.17) ซึ่งเป็นรูปแบบที่มีระดับความเข้มมากที่สุดของสนามไฟฟ้า 8.76 kV/ m (4 เมตร จากแนวสายส่ง) และสนามแม่เหล็ก 173.98 mG (10 เมตร จากแนวสายส่ง) มาศึกษาเพื่อลดระดับความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก และจากรูปที่ 3.18 และรูปที่ 3.19 จะเห็นว่าระดับความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นให้กับเสาโครงเหล็ก จากการศึกษาสามารถนำผลการวิเคราะห์นี้ไปพิจารณาออกแบบสายส่งแรงสูงร่วมกับข้อกำหนดของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ได้



รูปที่ 3.18 การลดลงของระดับความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อเพิ่มความสูงเสาโครงเหล็ก



รูปที่ 3.19 การลดลงของระดับความเข้มสนามแม่เหล็กเมื่อเพิ่มความสูงโครงเหล็ก

### 3.4 การวิเคราะห์ระบบกราวด์ของสายส่งแรงสูง 500 kV

#### 3.4.1 ฟาผ่าในระบบสายส่ง [4]

การวิเคราะห์แรงดันเกินฟาผ่าจำเป็นต้องกำหนดองค์ประกอบพื้นฐาน และค่าพารามิเตอร์ของสายส่งด้วย องค์ประกอบพื้นฐานของระบบซึ่งมีสายดิน สายเฟส ลูกถ้วยแขวน เสาโครงเหล็กและรากสายดิน ( $R_f$ ) สำหรับค่าความต้านทานของดินสามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$R \text{ (1 แห่ง)} = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{d} - 1 \right) \dots\dots\dots(3.92)$$

$$R (2 \text{ แท่ง}) = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{d} - 1 \right) * 0.5 \quad \dots\dots\dots(3.93)$$

$$R (3 \text{ แท่ง}) = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{d} - 1 \right) * 0.33 \quad \dots\dots\dots(3.94)$$

$$R (4 \text{ แท่ง}) = \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{d} - 1 \right) * 0.25 \quad \dots\dots\dots(3.95)$$

โดย

$R$  คือ ค่า Grounding Resistance ( $\Omega$ )

$d$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง Ground Rod = 0.016 m

$L$  คือ ระยะความลึกของแท่ง Ground Rod ที่ปักลงดิน = 3 m

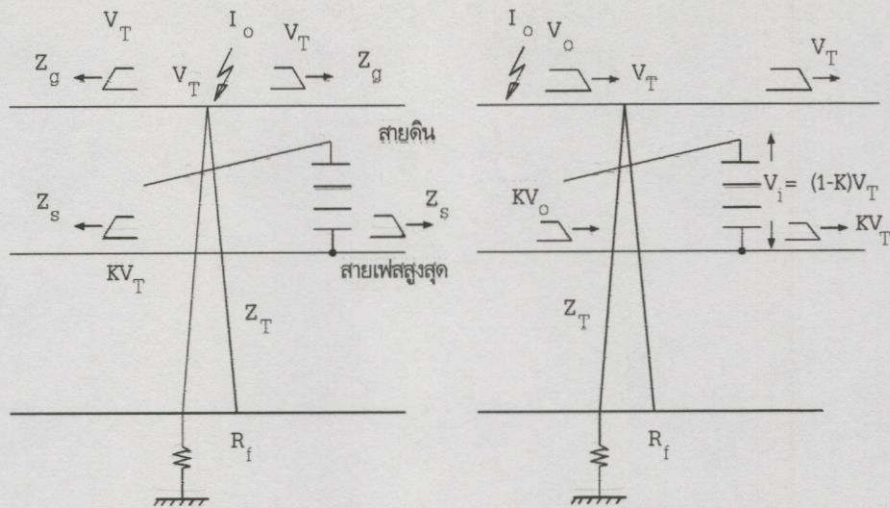
$\rho$  คือ ค่า Soil Resistivity ของชั้นดินในพื้นที่นั้น ๆ ( $\Omega$ -m)

การใช้แท่ง Ground Rod จำนวนหลาย ๆ แท่งปักต่อขนานกัน จะทำให้ค่าความต้านทานแผ่กระจายดินต่ำลงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน 10 โอห์มของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต ฯ (EGAT)ที่มีการปฏิบัติงานจริงในภาคสนาม การเพิ่มจำนวนแท่ง Ground Rod จะเป็นสัดส่วนของค่าความต้านทานของดินดังนี้

$$\text{สัดส่วนค่า Grounding Resistance} = R(1 \text{ แท่ง}) / R(\text{จำนวนแท่ง}) \quad \dots\dots\dots(3.96)$$

ฟ้าผ่าทำให้เกิดกระแสที่มีความหนาแน่นสูงไหลผ่านรากสายดินลงสู่ดิน และทำให้ดินในบริเวณโดยรอบเกิดการแตกตัวของไอออน ในลักษณะเช่นเดียวกับการเกิดโคโรนารอบ ๆ สาย จึงมีผลให้ค่า Grounding Resistance( $R$ ) ต่อกระแสฮัมพัลส์ หรือกระแสฟ้าผ่าลดต่ำกว่าค่า  $R$  ที่ความถี่ 50 Hz

ฟ้าผ่าลงสู่ยอดเสาหรือสายดิน ดังในรูปที่ 3.20 ทำให้เกิดแรงดันเกินที่ยอดเสาหรือขั้วของลูกถ้วยด้านที่ต่อกับเสา และทำให้เสิร์จเดินทางไปตามสายต่อลงดินและไปตามสายดิน 2 ด้าน ไปยังเสาต้นถัด ๆ ไป จึงทำให้เกิดแรงดันเกินที่ยอดเสาถัดไปด้วย แต่แรงดันเกินที่เสาต้นถัด ๆ ไปมีค่าต่ำกว่าเสาต้นแรกที่ถูกฟ้าผ่า เพราะว่ในระหว่างการเดินทางของเสิร์จจากตำแหน่งฟ้าผ่า จะเกิดการแยกไปยังแขนงอื่น ๆ ทำให้เกิดการแบ่งกระแสย่อยลงไป และการต่อลงดินไปยังรากสายดินที่โคนเสาแต่ละต้นทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับ (Reflected wave)เดินทางสวนกับคลื่นหรือเสิร์จที่มากระทบ



รูปที่ 3.20 ไฟผ่าลงสู่สายดินหรือที่ขอดเสา

### 3.4.2 การตรวจสอบและปรับปรุงระบบ GROUNDING ของสายส่งแรงสูง

ปัญหาอย่างหนึ่งของสายส่งแรงสูงคือการเกิด Flashover ของลูกถ้วย และการ Trip out ของสายส่งอันเนื่องมาจากไฟผ่าบ่อยครั้ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อ Reliability ของระบบสายส่ง กองบำรุงรักษาสายส่ง ฝ่ายปฏิบัติการภาคใต้ ได้พิจารณาเห็นว่าปัญหาดังกล่าวสามารถลดได้ด้วยการปรับปรุงระบบ Grounding ของสายส่งแรงสูงให้ดีขึ้น (มีค่า Ground Resistance ต่ำลงที่มีความชื้นสูง) เพราะถ้าระบบ Grounding จะดีถึงแม้จะเกิดไฟผ่า กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากไฟผ่าจะไหลผ่านลง Ground ได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่เกิด Flashover ผ่านลูกถ้วย จึงกำหนดแผนงานการตรวจสอบและการปรับปรุงระบบ Grounding ของสายส่งแรงสูง วิทยานิพนธ์นี้เลือกการปรับปรุงได้พิจารณาใช้วิธี Deep Driven Rod ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการไม่สูงมากนัก

### 3.4.3 กำหนด Location ที่จะดำเนินการวัดค่า Ground Resistance [17]

- จะดำเนินการวัดเสาโครงเหล็กที่เคยเกิด Flashover ทุกเสา
- ดำเนินการวัดครบชนิดของ Soil Type
- ดำเนินการวัดตลอดความยาวต่อเนื่องระยะที่เหมาะสม
- ดำเนินการวัดทุก 3 เดือน

### 3.4.4 การเลือกพื้นที่ในการตอกแท่ง Ground Rod

- กรณีที่เป็นพื้นที่ราบ ควรเลือกพื้นที่ที่มีความชื้นสูงและไม่มีอุปสรรคในการทำงาน
- กรณีที่เป็นพื้นที่ลาดชัน เช่น พื้นที่ภูเขา ควรเลือกจุดตอกในพื้นที่ระดับต่ำ เพราะมีความชื้นมากกว่าทำให้การกระจายกระแสไฟฟ้าเนื่องจากไฟผ่าได้ดีกว่า

### 3.4.5 ข้อควรปฏิบัติในการตอกแท่ง Ground Rod

- จุดที่ตอก Ground Rod ควรห่างจากขาเสาประมาณ 10- 15 เมตร โดยฝัง Ground Rod ลึกลงไปประมาณ 10 เมตร

- สาย Counter Poise และจุดที่เชื่อมสาย Counter Poise กับแท่ง Ground Rod ต้องอยู่ผิวดินประมาณ 50 เซนติเมตร สาย Counter Poise ที่เชื่อมระหว่างขาเสากับแท่ง Ground Rod ควรทำมุม 45 องศา กับแนวสายส่ง และควรมีจุดหักงอน้อยที่สุด

- กรณีที่ไม่สามารถปักแท่ง Ground Rod ได้ ควรใช้การฝังสาย Counter Poise โดยฝังลึกลงไปประมาณ 50 เซนติเมตร จากผิวดินและไม่ควรเกิน 60 เมตร ให้ต่อที่ขาตรงข้ามกัน 2 ขาจากแนวสายส่ง

### 3.4.6 ความต้านทานจำเพาะของดิน (Soil Resistivity )

Soil Resistivity จะมีค่าต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างของชั้นดินในพื้นที่นั้น ๆ ถ้าลักษณะชั้นดินมีความแตกต่างกันน้อยหรือคล้ายกัน ค่า Soil Resistivity บริเวณนั้นก็จะมีค่าใกล้เคียงกันที่ความลึกต่าง ๆ กัน แต่ถ้าลักษณะชั้นดินมีความแตกต่างกันมาก ค่า Soil Resistivity บริเวณนั้นก็จะมีค่าแตกต่างกันมากที่ความลึกต่าง ๆ กัน ค่า Soil Resistivity จะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่าง ๆ เช่น ชนิดของดิน ความชื้น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของสารละลายเกลือในดิน ขนาดของเม็ดดินและความแน่นของดิน เป็นต้น ตารางที่ 3.2 ความต้านทานจำเพาะของดินและน้ำ

ชนิดของดิน	ความต้านทานจำเพาะ( $\Omega$ -m)
ดินร่วนเปียก	10. . . 30
ดินเหนียว	50
ดินร่วนชื้น	100
ดินปนทราย	150
ทรายชื้น	200
ทรายแห้ง	1000
ดินกรวดชื้น	500
ดินกรวดแห้ง	1000
หิน (rock)	3000 – 10000
ซีเมนต์บริสุทธิ์	50
ซีเมนต์ 1 ทราย 3	150
ซีเมนต์ 1 กรวด 5	400
น้ำทะเล	0.15
น้ำประปา	20
น้ำกลั่น	300

### 3.4.7 คำนวณหา Ground Rod Resistance [17]

เมื่อตอก Ground Rod ลงในดินที่ได้ทำการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน สามารถทำการคำนวณค่าความต้านทานของ Rod โดยใช้สูตรดังนี้

$$R_g = \frac{\rho}{2\pi L} \left( 2.3 \log 100 \frac{L}{d} + 1.1 \right) \quad \Omega \quad \dots\dots\dots(3.97)$$

### 3.4.8 การหาจำนวน Ground Rod

$$\text{Number of Rod} = \frac{R_g}{R} \quad \text{แท่ง} \quad \dots\dots\dots(3.98)$$

### 3.4.9 การหาระยะห่างระหว่าง Ground Rod

Ground Rod ที่ตอกลงในดินควรมีระยะห่างระหว่างกันไม่น้อยกว่าความยาวของ Ground Rod ที่ตอกลงดินของทุก ๆ 100 โอห์ม/ เมตร ซึ่งสามารถหาจากสมการดังนี้

$$M = \left( \frac{\rho}{100} \right) L \quad \text{m} \quad \dots\dots\dots(3.99)$$

### 3.4.10 คำนวณหา Counterpoise Resistance

ความต้านทานของ Counterpoise Wire สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$R_C = \frac{\rho}{2\pi l} \left( 2.3 \log \frac{l^2}{Sd_c} + 6.3 \right) \quad \Omega \quad \dots\dots\dots(3.100)$$

โดย

$R_C$  คือ ความต้านทานของ Counterpoise Wire ( $\Omega$ )

$l$  คือ ความยาว Counterpoise Wire ขนาด No.2 AWG. = 60 m

$S$  คือ ความลึกของการฝัง Counterpoise Wire = 0.5 m

$d_c$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของ Counterpoise Wire = 0.00654 m

ปัจจุบัน EGAT ใช้ Counterpoise Wire อยู่ 2 ขนาด คือ No. 2 AWG และ No. 4 AWG ซึ่งมี Diameter 6.544 mm และ 5.189 mm ตามลำดับ และฝังลงในดินลึก 0.5 mm

### 3.4.11 กำหนดหาความชื้นของดิน (Moisture of Soil)

คือปริมาณน้ำในมวลดิน (Cohesive Soil) เนื่องจากเม็ดดินของดินจะยึดติดกันโดยอาศัยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน ซึ่งแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินจะเปลี่ยนแปลงไปตามน้ำในมวลดิน ถ้าในมวลดินเม็ดละเอียดคมีน้ำอยู่เป็นจำนวนมากพอ มวลดินจะอยู่ในสภาพของเหลว และถ้าปริมาณน้ำในมวลดินลดลงมวลดินจะเปลี่ยนสภาพจากของเหลวไปเป็นกึ่งของแข็งและของแข็ง

$$\% \text{ Moisture of Soil} = \frac{W_w}{W_s} * 100\% \quad \dots\dots\dots(3.101)$$

โดย

$W_w$  คือ น้ำหนักในดิน = น้ำหนักของดินเปียก - น้ำหนักของมวลดินแห้ง

$W_s$  คือ น้ำหนักของมวลดินแห้ง

### 3.4.12 หาแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว (Step and Touch Voltage)

การพิจารณาขนาดกระแสที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์ โดยไม่ทำให้เป็นอันตรายถึงชีวิตและหาศักดาไฟฟ้าระหว่างช่วงก้าว และศักดาไฟฟ้าสัมผัสสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์จากสมการดังนี้

สำหรับน้ำหนัก 50 ก.ก.

$$E_{step50} = (1000 + 6\rho) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \dots\dots\dots(3.102)$$

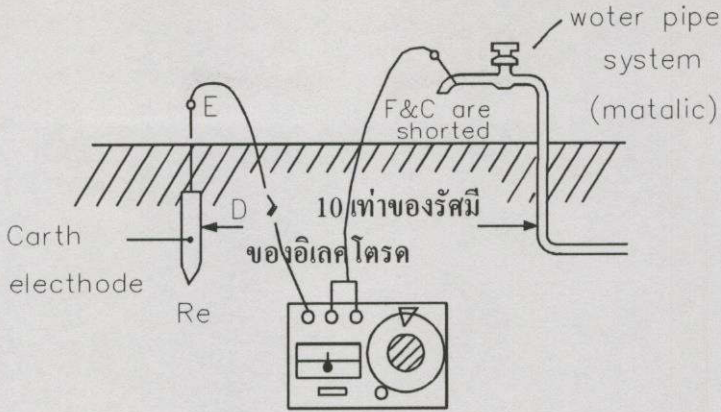
$$E_{touch50} = (1000 + 1.5\rho) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \dots\dots\dots(3.103)$$

โดย  $t_s$  คือ ช่วงเวลาที่คนได้รับกระแสไฟฟ้าผ่านร่างกาย = 0.5 sec

$\rho$  คือ ค่า Soil Resistivity ของชั้นดินในพื้นที่นั้น ๆ ( $\Omega$ -m)

### 3.4.13 วิธี Driven Ground Rod

วิธีนี้เหมาะสำหรับกรณีที่มีบริเวณที่ต้องการวัด Ground Resistance มีลักษณะคับแคบ ซึ่งไม่เหมาะสมกับการวัดแบบอื่นๆ เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว แต่ไม่สามารถวัดได้ในกรณีที่ดินมีค่าความต้านทานสูงมาก ๆ ดังนี้ [2]



รูปที่ 3.21 การวัด Ground Resistance ด้วยวิธี Driven Ground Rod

ในกรณีของดินชั้นเดียว

$$\rho_D = \frac{2\pi L R_D}{8L \ln \frac{d}{d} - 1} \dots\dots\dots(3.104)$$

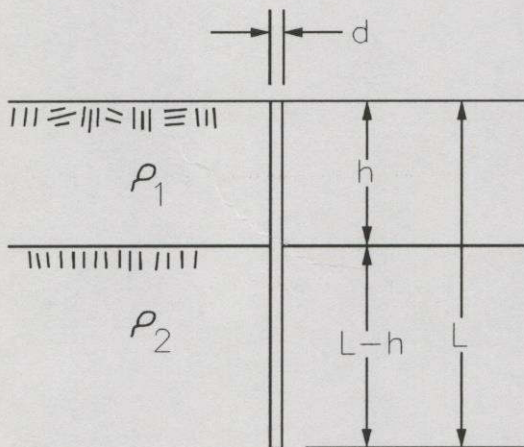
โดย

$\rho_D$  คือ ความต้านทานจำเพาะของดินที่ความลึก  $L$  ( $\Omega$ -m)

$L$  คือ ความยาวของ Driven Ground Rod ที่สัมผัสกับพื้นดิน (m)

$R_D$  คือ ความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องวัด ( $\Omega$ )

ในกรณีของดิน 2 ชั้น พิจารณาในรูปที่ 3.22 เมื่อจ่ายกระแสเข้าไปในแท่ง Ground Rod ความหนาแน่นของกระแสจะเป็นฟังก์ชันกับความต้านทานจำเพาะของดิน  $\rho_1, \rho_2$  โดยที่  $i_1$  จะเป็นความหนาแน่นของกระแสในส่วนของแท่ง Ground Rod ที่ถูกฝัง  $a$  ในดินชั้นบนลึก  $h$  จะได้ว่า



รูปที่ 3.22 การปักแท่ง Ground Rod ในดิน 2 ชั้น

$$I = i_1 h + i_2 (L - h) \quad \dots\dots\dots(3.105)$$

โดย

$I$  คือ กระแสรวมทั้งหมดในแท่ง Ground Rod (A)

$i_1$  คือ ความหนาแน่นของกระแสในแท่ง Ground Rod ของดินชั้นบน (A/m)

$h$  คือ ความลึกของดินชั้นบน (m)

$i_2$  คือ ความหนาแน่นของกระแสในแท่ง Ground Rod ของดินชั้นล่าง (A/m)

$L - h$  คือ ความยาวของแท่ง Ground Rod ที่ฝังลงในดินของดินชั้นล่าง  $\rho_2$  (A/m)

การหาความหนาแน่นของกระแส  $i_1$  ของแท่ง Ground Rod ของดินชั้นบน  $\rho_1$  เมื่อปักแท่ง  
ตัวนำ Ground Rod ยาว  $L$  ลงในดินชั้นเดียว จะหาได้จากสมการดังนี้

$$\rho_1 = \frac{2\pi L R_1}{\ln \frac{8L}{d} - 1} \quad \dots\dots\dots(3.106)$$

$$R_1 = \frac{\rho_1}{2\pi L} * \ln \frac{8L}{d} - 1 \quad \dots\dots\dots(3.107)$$

ให้  $V_R$  เป็นความต่างศักย์ที่ป้อนเข้าแท่ง Ground Rod จะได้

$$I_1 = \frac{V_R}{R_1} \quad \dots\dots\dots(3.108)$$

แทนสมการที่(3.107)ลงในสมการที่ (3.108) จะได้

$$I_1 = \frac{V_R 2\pi L}{\rho_1 \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} - 1 \right) \right]} \quad \dots\dots\dots(3.109)$$

และค่าความหนาแน่นของกระแสในแท่ง Ground Rod จะได้

$$i_1 = \frac{I_1}{L} = \frac{V_R 2\pi}{\rho_1 \left[ \ln \left( \frac{8L}{d} - 1 \right) \right]} \quad (\text{A/m}) \quad \dots\dots\dots(3.110)$$

หาความหนาแน่นของกระแส  $i_2$  ของแท่ง Ground Rod ในส่วนของดินชั้นล่าง จะหาได้  
ในทำนองเดียวกันดังนี้

$$i_2 = \frac{V_R 2\pi}{\rho_2 \left[ \ln\left(\frac{8L}{d} - 1\right) \right]} \quad (\text{A/m}) \quad \dots\dots\dots(3.111)$$

แทนสมการที่(3.110)และ(3.111) ลงในสมการที่(3.105) จะได้

$$I = \frac{V_R 2\pi}{\rho_1 \left[ \ln\left(\frac{8L}{d} - 1\right) \right]} * h + \frac{V_R 2\pi}{\rho_2 \left[ \ln\left(\frac{8L}{d} - 1\right) \right]} * (L - h) \quad \dots\dots\dots(3.112)$$

$$I = \frac{V_R 2\pi}{\ln\left(\frac{8L}{d} - 1\right)} * \left( \frac{h}{\rho_1} + \frac{L - h}{\rho_2} \right) \quad \dots\dots\dots(3.113)$$

ถ้าป้อน  $V_R$  เข้าที่แท่ง Ground Rod ค่าความต้านทานของแท่ง Ground Rod จะเท่ากับ

$$R_D = \frac{V_R}{I} = \frac{\ln\left(\frac{8L}{d} - 1\right)}{2\pi} * \left[ \frac{1}{\frac{h}{\rho_1} + \frac{L - h}{\rho_2}} \right] \quad \dots\dots\dots(3.114)$$

แทนค่า  $R_D$  จากสมการที่ (3.114)ลงในสมการที่(3.104) จะได้

$$\rho_D = \frac{L\rho_1\rho_2}{\rho_2 h + \rho_1(L - h)} \quad (\Omega\text{-m}) \quad \dots\dots\dots(3.115)$$

จากสมการที่ (3.115) จะพบว่า

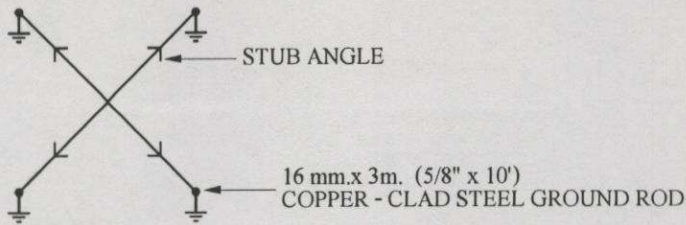
ถ้าดินชั้นบนมีความลึก  $h = 0$  ค่า  $\rho_D = \rho_2$

ถ้าดินชั้นบนมีความลึก  $h > L$  ค่า  $\rho_D = \rho_1$

### 3.4.14 การทำระบบ GROUNDING เพื่อลดค่าความต้านทานของดินของสายส่งแรงสูง

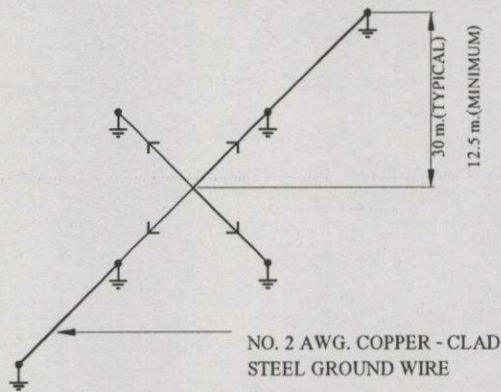
การที่จะกำจัดกระแสฟ้าผ่าที่ไหลมาตามเสาอย่างรวดเร็ว จะทำให้ ค่า Ground Resistance ของเสาส่งมีค่าต่ำมากๆ ไม่เกิน 10 โอห์ม ตามมาตรฐานของ EGAT ในระบบสายส่ง 500 kV จะมีขั้นตอนการทำระบบ GROUNDING ของเสาส่งแรงสูงดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ปักแท่ง Ground Rod แบบ Copper - Clad Steel ขนาด 16 mm x 3 m ที่ทุกขาของเสาดังรูป 3.23 ทำการวัด Ground Resistance ของเสาส่ง ถ้ามากกว่า 10 โอห์มให้ดำเนินขั้นตอนที่ 2



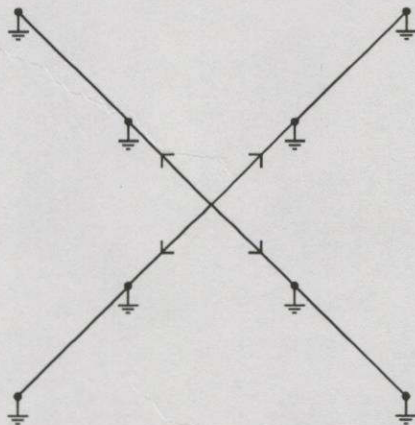
รูปที่ 3.23 การปักแท่ง Ground Rod 4 แท่งของขาเสาโครงเหล็ก 500 kV

ขั้นตอนที่ 2 ต่อสาย AWG COPPER-CLAD STEEL GROUND WIRE ในแนวทแยงจากแท่ง Ground Rod ในขั้นตอนที่ 1 เป็นระยะทางประมาณ 15 m โดยฝังสาย AWG ลึกลงจากพื้นดิน 50 cm แล้วปัก Ground Rod แบบ Copper - Clad Steel ขนาด 16mm x 3m ที่ปลายทั้ง 2 ข้างดังรูปที่ 3.24 แล้วทำการวัด Ground Resistance อีกครั้ง ถ้ายังมีค่ามากกว่า 10 โอห์ม ให้ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 3 ต่อไป



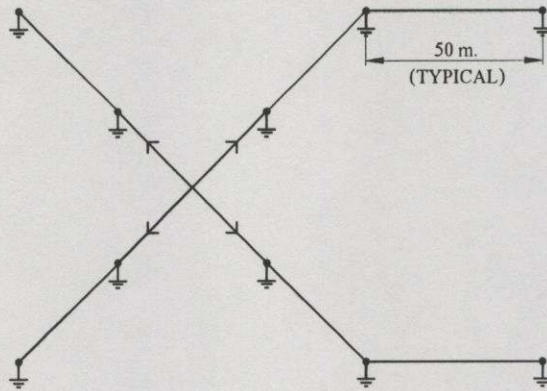
รูปที่ 3.24 การปักแท่ง Ground Rod 6 แท่งในแนวทแยงของขาเสาโครงเหล็ก 500 kV

ขั้นตอนที่ 3 ต่อสาย AWG COPPER-CLAD STEEL GROUND WIRE จากแท่ง Ground Rod ทั้ง 2 ข้างที่เหลืออยู่เป็นระยะทางประมาณ 15 m แล้วปัก Ground Rod ที่ปลายสายทั้ง 2 ข้างดังรูปที่ 3.25 แล้ววัด Ground Resistance อีกครั้ง ถ้ายังมีค่ามากกว่า 10 โอห์ม ให้ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 4



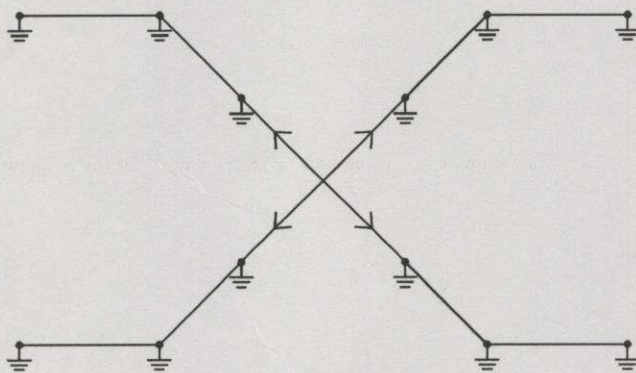
รูปที่ 3.25 การปักแท่ง Ground Rod 8 แท่งในแนวทแยงของขาเสาโครงเหล็ก 500 kV

ขั้นตอนที่ 4 ต่อสาย AWG COPPER-CLAD STEEL GROUND WIRE จากแท่ง Ground Rod ในขั้นตอนที่ 3 ฝังสาย AWG ลึกจากพื้นดิน 50 cm ลากสาย AWG ขนานกับสายส่งเป็นระยะทาง 50 m ดังรูปที่ 3.26 แล้วทำการวัด Ground Resistance ถ้ายังมีค่ามากกว่า 10 โอห์มให้ดำเนินการต่อไป



รูปที่ 3.26 การปักแท่ง Ground Rod 10 แท่งของเสาโครงเหล็ก 500 kV

ขั้นตอนที่ 5 ต่อสาย AWG COPPER-CLAD STEEL GROUND WIRE จากแท่ง Ground Rod ทั้ง 2 ข้างที่เหลือ ฝังสาย AWG ลึกจากพื้นดิน 50 cm ลากสาย AWG ขนานกับสายส่งเป็นระยะทาง 50 m ดังรูปที่ 3.27 แล้วทำการวัด Ground Resistance ถ้ายังมีค่ามากกว่า 10 โอห์มให้ต่อสาย AWG ที่ปลายทั้ง 4 จากเดิมให้ยาวขึ้นเรื่อย ๆ จนกว่าวัด Ground Resistance ได้ 10 โอห์มจึงจะใช้ได้ ตามมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ที่ได้ทำการปฏิบัติงานในภาคสนาม



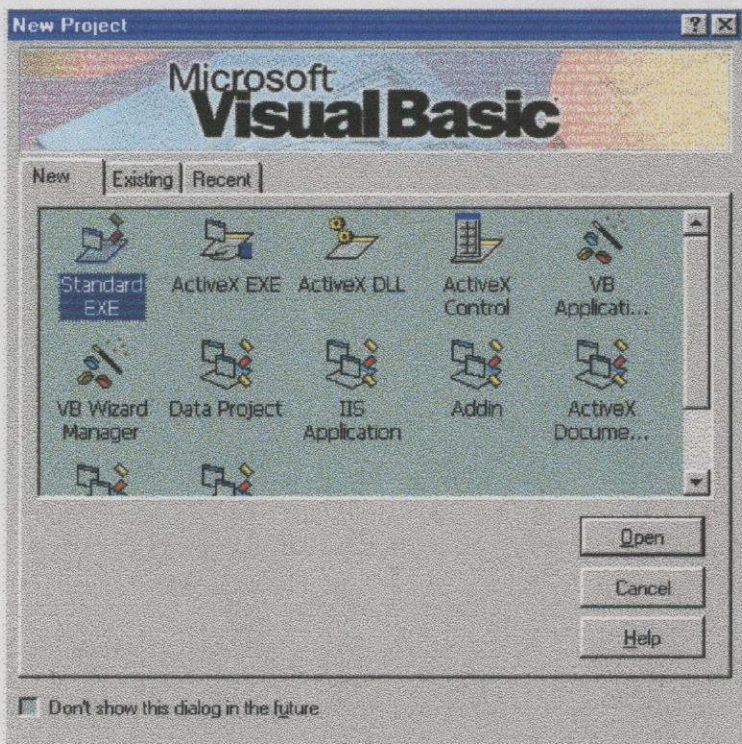
รูปที่ 3.27 การปักแท่ง Ground Rod 12 แท่งของเสาโครงเหล็ก 500 kV

## ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมและวิธีการวิเคราะห์

### 4.1 ขั้นตอนการออกแบบโปรแกรม Visual Basic 6.0

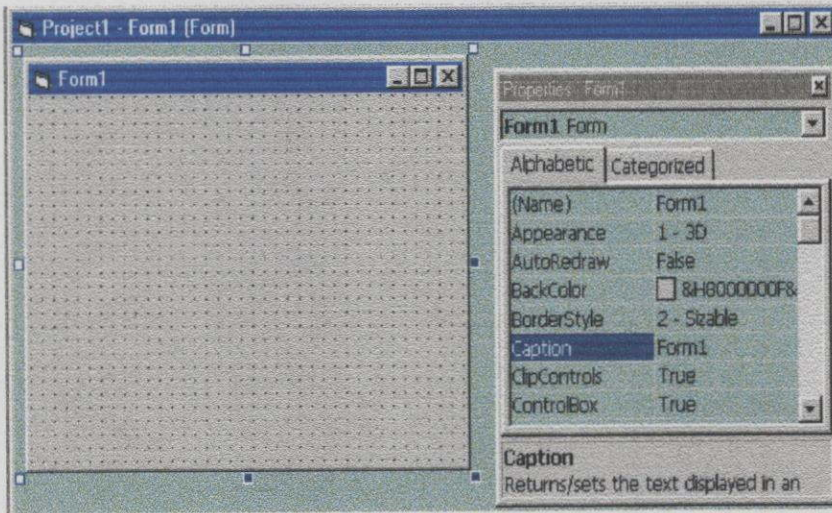
โปรแกรม Visual Basic 6.0 เป็นการออกแบบการเขียนโปรแกรมที่ Run บน Window ซึ่งการออกแบบนั้นจะใช้การกำหนดตำแหน่งของ Object ลงบนหน้าจอ เพื่อติดต่อกับผู้ใช้โดยตรง Object เหล่านี้จะเปลี่ยนไปตามเหตุการณ์ (Event) ต่าง ๆ เช่น การคลิกเมาส์ หรือรับข้อมูลจากคีย์บอร์ด ดังนั้นโปรแกรม Visual Basic 6.0 จึงสามารถใช้ในการออกแบบเขียนโปรแกรม เพื่อความสะดวกสบายต่อผู้ใช้โปรแกรม

4.1.1 เมื่อเริ่มเปิด Program Visual Basic 6.0 แล้วก็จะแสดง Dialog Box ที่ใช้สำหรับพัฒนาหรือเรียกใช้ Project ต่าง ๆ ที่จะทำการออกแบบโปรแกรม



รูปที่ 4.1 แสดงหน้าจอ Dialog Box

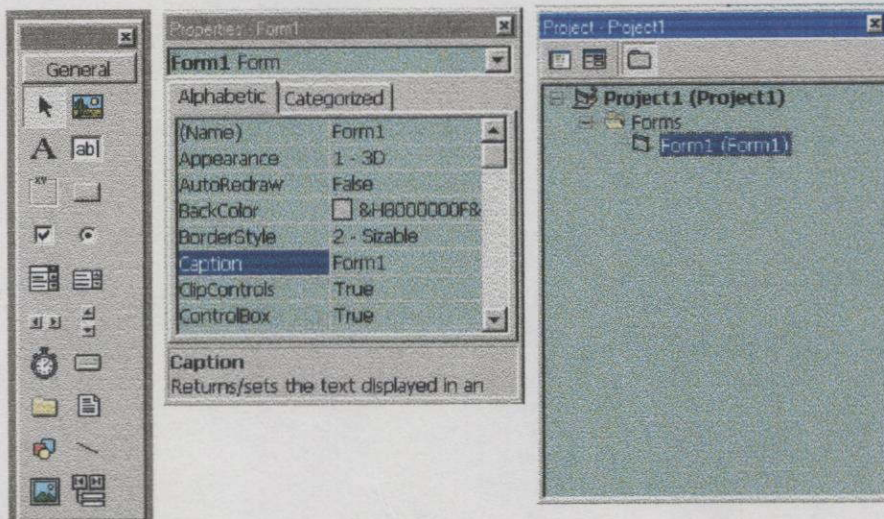
4.1.2 เลือกรูปแบบ Project การใช้งาน และ Click ที่ปุ่ม Open ก็จะได้แสดงหน้าจอ เพื่อเข้าสู่หน้าจอของการออกแบบโปรแกรม Visual Basic 6.0 ในส่วนของ “ Standard EXE ”



รูปที่ 4.2 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ บนหน้าจอการออกแบบ

4.1.3 ส่วนประกอบและอุปกรณ์ต่าง ๆ ของการออกแบบโปรแกรม ดังนี้

- Toolbox ประกอบด้วย Icon ต่างๆ โดยจะใช้กำหนดการ Control ลงบน Form
- Project Explorer Window สำหรับเรียก Form และ Module ของ Project ต่างๆ ขึ้นมาแก้ไข
- Property Window กำหนดคุณสมบัติให้กับ Form และ Object ต่างๆ ที่อยู่บน Form
- Form Layout Window สำหรับเลือกตำแหน่งของ Form



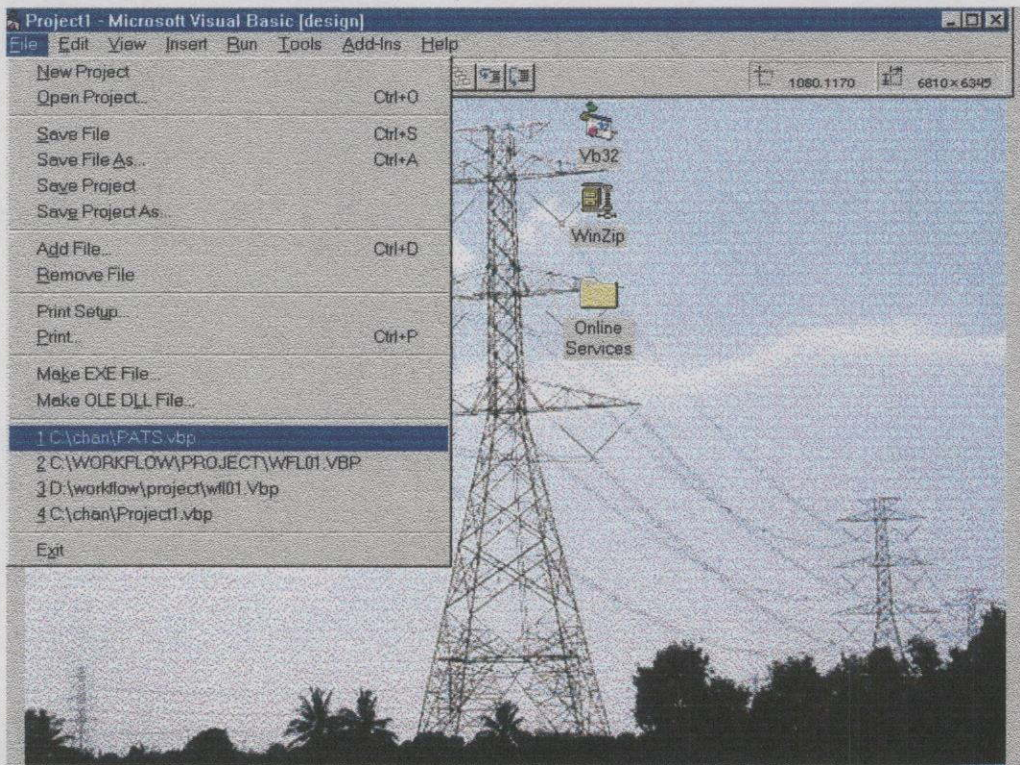
รูปที่ 4.3 แสดงอุปกรณ์ต่างๆ ของโปรแกรม Visual Basic

## 4.2 วิธีการใช้งานซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500kV ในกรณีศึกษาแม่เมาะ3 (MM3) จ.ลำปาง – ท่าตะโก (TTK) จ.นครสวรรค์ สำหรับสายส่งแรงดันเดี่ยวและวงจรคู่ โดยจะใช้โปรแกรม Visual Basic 6.0 เป็นเครื่องมือในการสร้างและตั้งชื่อของซอฟต์แวร์นี้ว่า “โปรแกรมวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV ” (Program Analysis for 500 kV EHV Transmission System) โดยเรียกย่อๆ ว่า “PATS” ข้อกำหนดของการใช้งาน PATS นั้นมีดังนี้

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ต้องมีซีพียู Pentium ขึ้นไป
2. หน่วยความจำหลัก 4 MB ขึ้นไป
3. จอภาพแบบ Super VGA ขึ้นไป
4. เมาส์ (Mouse)
5. ติดตั้ง Microsoft Windows 95 ขึ้นไป
6. ผู้ใช้ต้องมีพื้นฐานการใช้งานซอฟต์แวร์ที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows

การเริ่มการทำงานของ PATS นั้น สามารถทำได้โดยการใช้เมาส์ดับเบิลคลิก (คลิกสองครั้งติดต่อกัน) ที่ไอคอนชื่อ “ PATS ” ที่อยู่บนเมนูหลักของระบบปฏิบัติการวินโดวส์ ดังรูปที่ 4.4 เมื่อ PATS เริ่มทำงานจะปรากฏภาพบนหน้าจอรูปที่ 4.5 ซึ่งจะแสดงเมนูหลักของ PATS ผู้ใช้สามารถที่จะเริ่มการใช้งานโดยการคลิกที่คำสั่งในเมนูหลักตามต้องการ ส่วนการจบการทำงานนั้นสามารถทำได้โดยการเลือกที่คำสั่ง “ จบการทำงาน ” บนเมนูหลักของ PATS

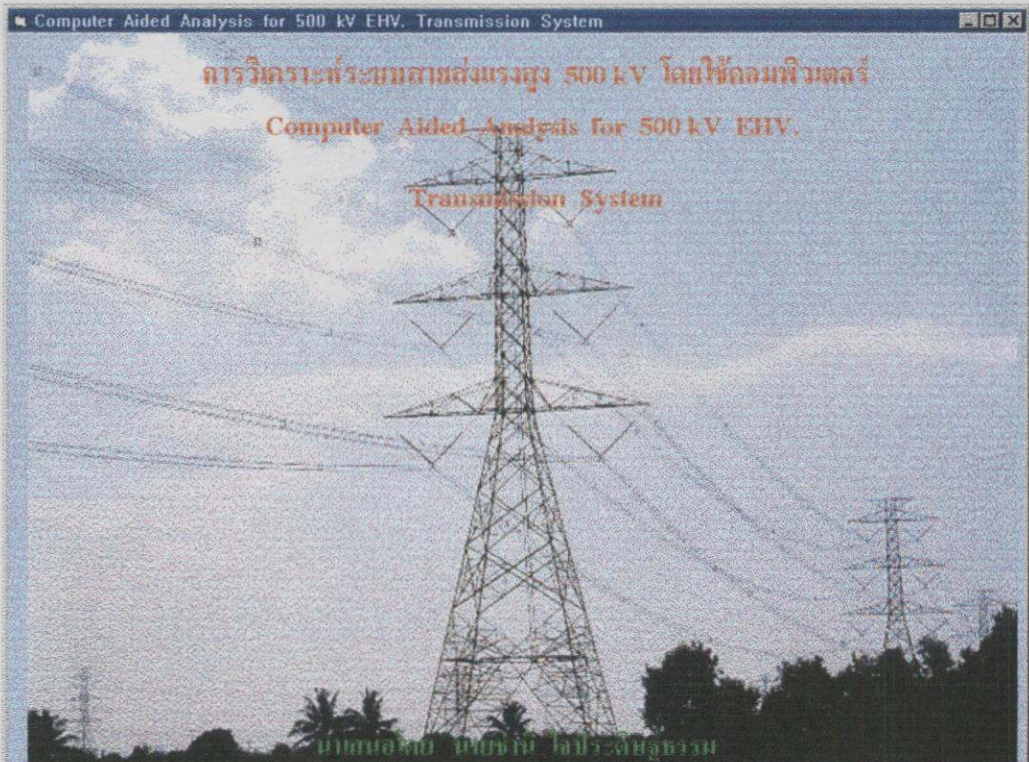


รูปที่ 4.4 แสดงหน้าจอกลุ่มโปรแกรม PATS

การเข้าสู่โปรแกรมการคำนวณของเมนูหลัก จะประกอบด้วย ไตเติลบาร์ : แสดงระดับแรงดัน (Line Voltage) การเลือกชนิดวงจร (Transmission Line circuit type) ชนิดเสาโครงเหล็ก(Tower type)และลักษณะเสาโครงเหล็ก(Tower style) ผู้ใช้จะทำการเลือกเมนูย่อยดังนี้

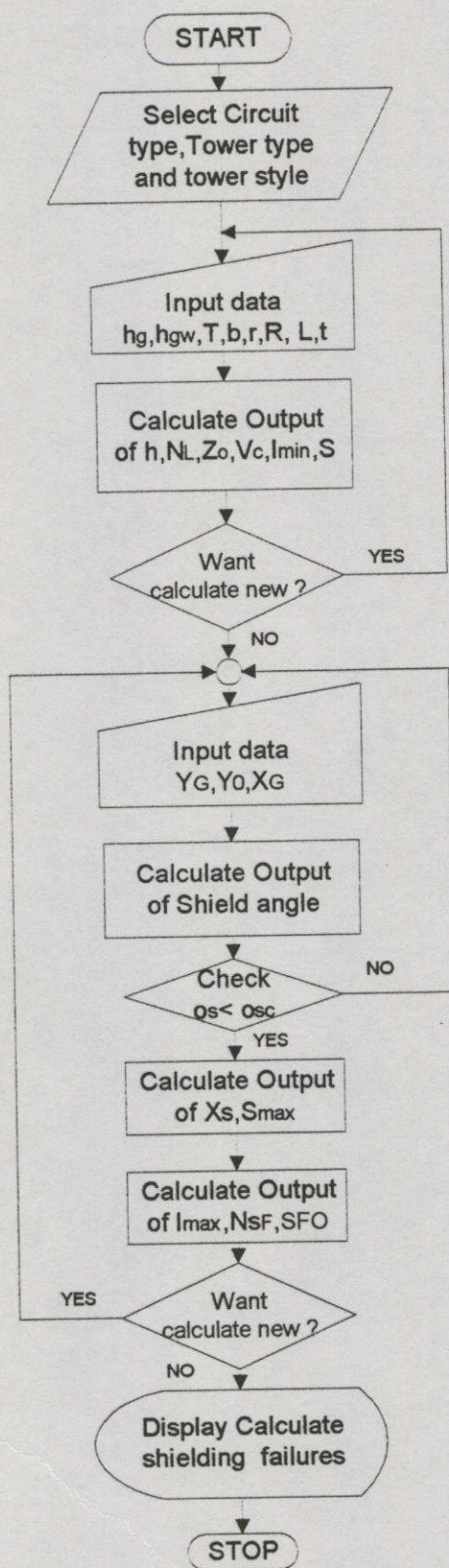
- ชนิดของวงจร : ประกอบด้วย Single circuit หรือ Double circuit
- ชนิดเสาโครงเหล็ก : ประกอบด้วย Suspension หรือ Tension
- ลักษณะเสาโครงเหล็ก : ประกอบด้วย  $SL0^{\circ}$ ,  $DL3^{\circ}$ ,  $DM3^{\circ}$ ,  $DT20$ ,  $DT60$  และ  $DTR$

เมื่อผู้ใช้ทำการเลือกเมนูย่อยแล้วป้อนข้อมูล หน้าจอของเมนูหลักจะแสดงรูป Graphics ชนิดของเสาโครงเหล็ก(Tower)ตามลักษณะที่เลือกไว้ และแสดงรูป Graphics เป็นปรากฏการณ์ฟ้าผ่าลงบนสายล่อฟ้า Graphics ที่เป็นเส้นปะจะแทนการไหลกระแสฟ้าผ่า ทำให้เกิด Surgeบนสายเฟสและเกิดการแลบข้ามลูกถ้วยไปยังเสาและดินที่มีความต้านทานของดิน  $R_f$  ผู้ใช้ทำการเลือกวิเคราะห์ PATS โดยการคลิกเมาส์ของเสาโครงเหล็กในส่วนของสาย Shieldหรือสายล่อฟ้า หน้าจอซอฟต์แวร์จะเข้าสู่การวิเคราะห์การเกิด Shielding Failuresในระบบป้องกันฟ้าผ่า ถ้าคลิกเมาส์ในส่วนสายPhase หน้าจอซอฟต์แวร์จะเข้าสู่เมนูการวิเคราะห์การเกิด Corona Loss ,สัญญาณรบกวน Audible Noise และ Radio Interference ถ้าคลิกเมาส์ในส่วนที่จุด Pใดๆบนพื้นดินในระยะแนวเขตเดินสายส่ง หน้าจอซอฟต์แวร์จะเข้าสู่เมนูการวิเคราะห์ Electric and Magnetic Fields และถ้าคลิกเมาส์ในส่วนรากสายดิน  $R_f$  หน้าจอซอฟต์แวร์จะเข้าสู่เมนูการวิเคราะห์ระบบ Grounding System ของสายส่งแรงสูง 500 kV

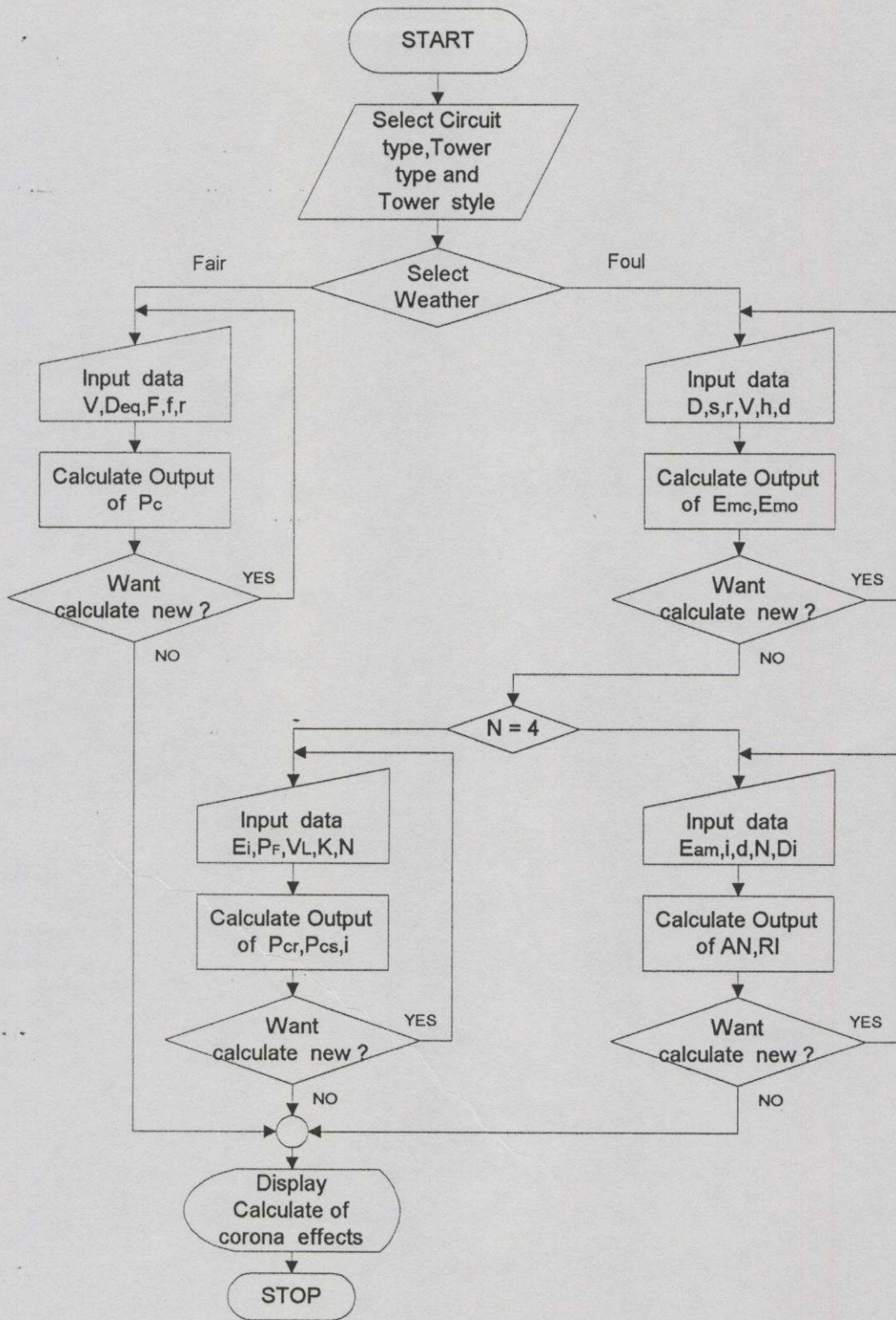


รูปที่ 4.5 แสดงหน้าจอก่อนการเข้าสู่โปรแกรม

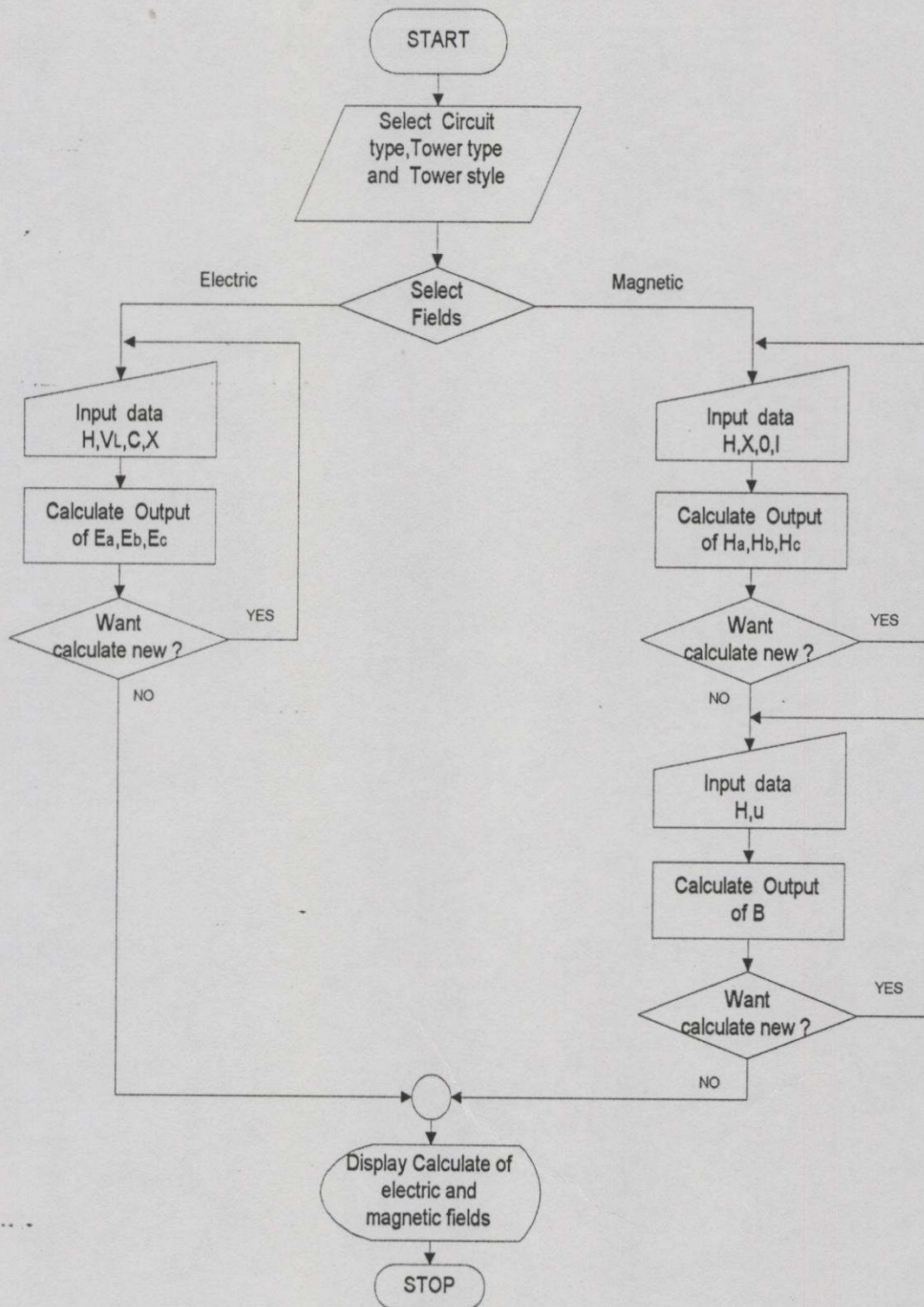
### 4.3 โพลัวชาร์ตของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV



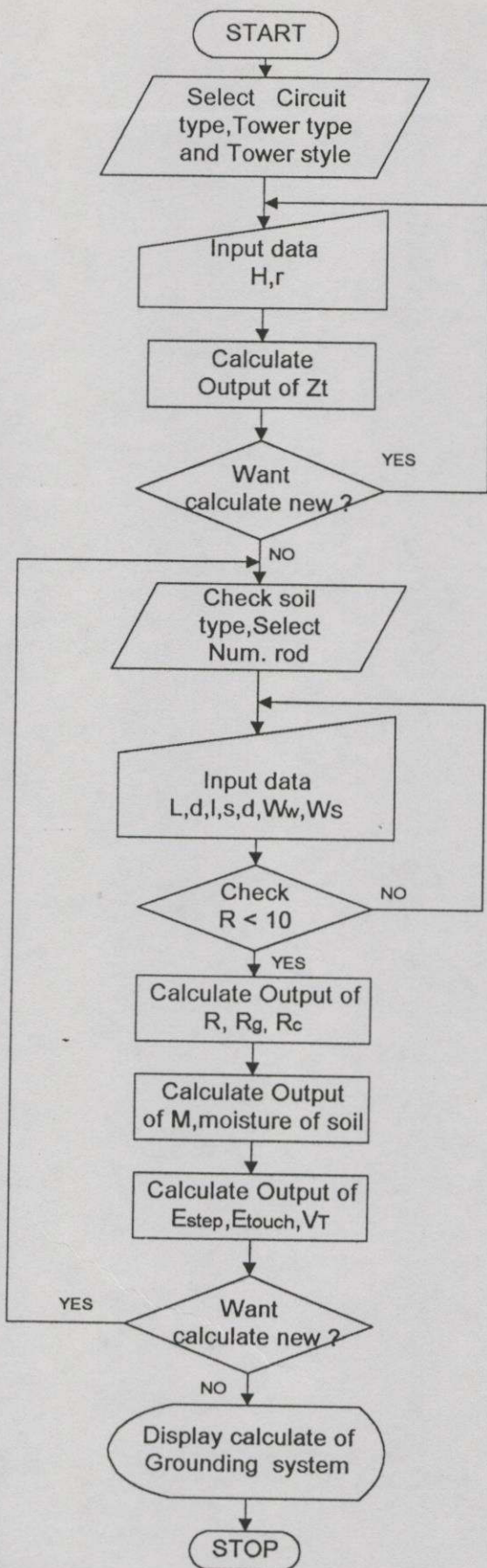
รูปที่ 4.6 โพลัวชาร์ตของซอฟต์แวร์วิเคราะห์การเกิด Shielding Failures ในระบบป้องกันฟ้าผ่าของสายส่งแรงสูง 500 kV



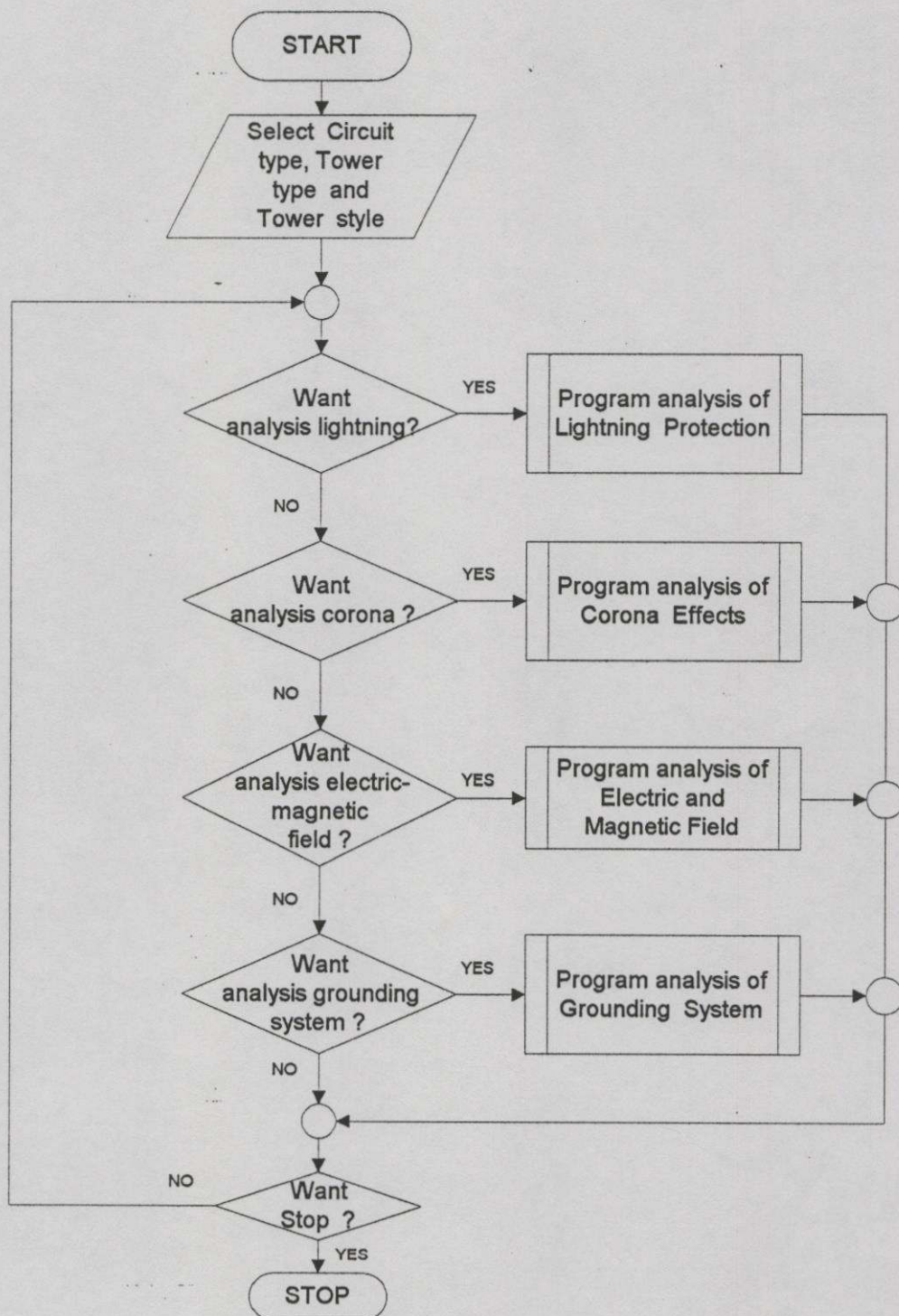
รูปที่ 4.7 โพล์ชาร์ตของซอฟต์แวร์วิเคราะห์การเกิด Corona Loss และสัญญาณรบกวน  $AN, RI$  บนสายส่งแรงสูง 500 kV



รูปที่ 4.8 โฟลว์ชาร์ตของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ Electric and Magnetic Fields ของสายส่งแรงสูง 500 kV



รูปที่ 4.9 โฟลว์ชาร์ตของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ระบบ Grounding System ของสายส่งแรงสูง 500 kV



รูปที่ 4.10 โฟลว์ชาร์ตแสดงการทำงานทั้งหมดของซอฟต์แวร์วิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV

## บทที่ 5

### ผลการวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV

ในบทนี้จะกล่าวถึงตัวอย่างการนำซอฟต์แวร์ไปวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV เช่น การวิเคราะห์การเกิด Shielding Failures ในระบบป้องกันฟ้าผ่า การวิเคราะห์การเกิด Corona Loss และ สัญญาณรบกวน AN, RI การวิเคราะห์ Electric and Magnetic Fields ของสายส่งแรงสูง 500 kV และการวิเคราะห์ระบบ Grounding System ของสายส่งแรงสูง 500 kV ในการวิเคราะห์นี้จะพิจารณา สายส่งกำลังไฟฟ้า 3 เฟส กรณีศึกษา MAE MOH -THA TAKO เป็นระยะทาง 335 km กำลังส่งจ่าย 1800 MW วงจรเดี่ยวและวงจรคู่ เลือกชนิดของเสา(Tower) เช่น Suspension, Tension และ Transpose เพื่อนำผลการวิเคราะห์ช่วยในการออกแบบสายส่งแรงสูง 500 kV

ในการวิเคราะห์ PATS นั้นได้ทำการแบ่งการทำงานของซอฟต์แวร์เป็น 4 ส่วน ดังนี้

- วิเคราะห์การเกิด Shielding Failures ในระบบป้องกันฟ้าผ่าของสายส่งแรงสูง 500 kV
- วิเคราะห์การเกิด Corona Loss และสัญญาณรบกวน AN, RI บนสายส่งแรงสูง 500 kV
- วิเคราะห์ Electric and Magnetic Fields ของสายส่งแรงสูง 500 kV
- วิเคราะห์ระบบ Grounding System ของสายส่งแรงสูง 500 kV

#### 5.1 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV วงจรคู่ (Double circuit)

เสาโครงเหล็กชนิด DL3° Suspension

สายส่งกำลังไฟฟ้า 500 kV 3 เฟส กำลังส่งจ่าย 1800 MW วงจรคู่(Double circuit) เลือกขนาดสายส่งเป็น 795 MCM. ACSR ชนิดจำนวนเส้น 54 AL/ 7 St. "Condor" จัดวางตัวนำเป็น 4 Bundle ต่อเฟส ความถี่  $50\text{ Hz}$  เลือกสาย Shield : 3/8 นิ้ว , 7 Strand, EHS GALV. STL. รัศมีของ Corona ที่แผ่กระจายรอบตัวนำ 0.045 m รัศมีของตัวนำ 0.01386 m ข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์มีดังนี้

$h_g$  คือ ความสูง tower ถึงสาย Shield wires = 60.5 m

$h_{gw}$  คือ ความสูง tower จากพื้นดิน ที่ระยะของสายส่งในเฟส C = 29 m

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวนำต่อเฟส =  $25.277 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$

$V_c$  คือ Insulator critical flashover voltage = 1539 kV

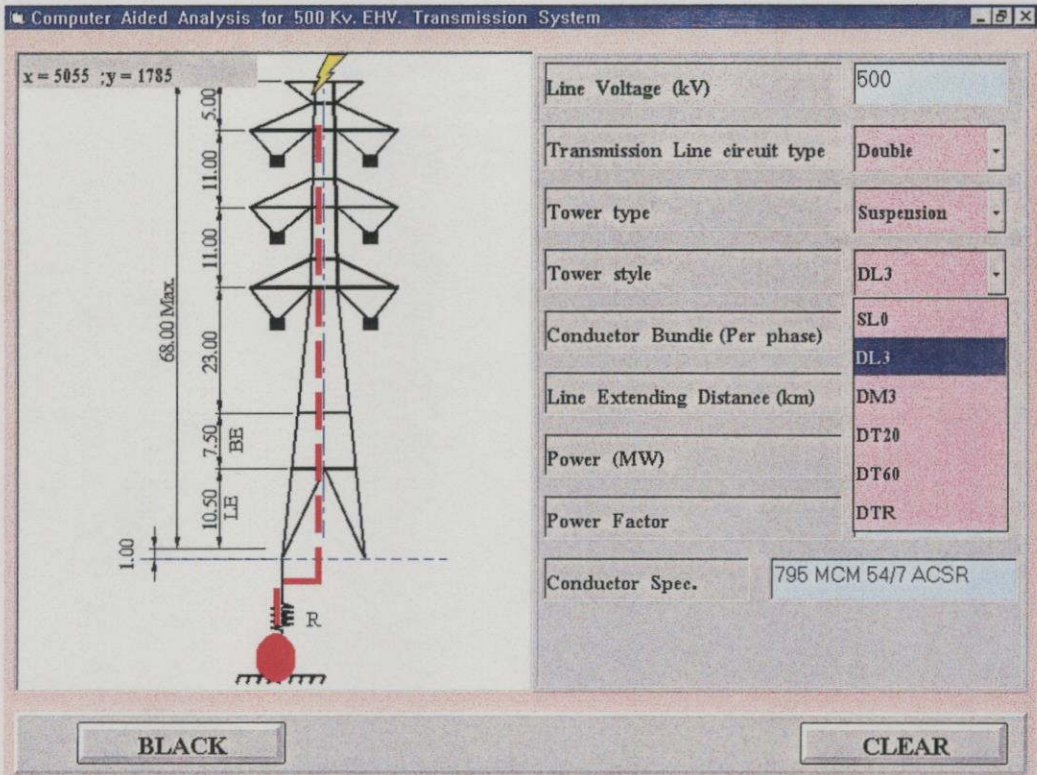
b คือ ความกดดันบรรยากาศ = 74 cm.-Hg

t คือ อุณหภูมิของอากาศ =  $35^\circ \text{ C}$

$m_1$  คือ ตัวประกอบสภาพอากาศ

= 1.0 สำหรับสภาพอากาศปกติ

= 0.8 สำหรับฝนตก



รูปที่ 5.1 หน้าจอของสายส่งวงจรคู่  $DL3^{\circ}$  Suspension ขณะฟ้าผ่าเสาโครงเหล็กก่อนเข้าสู่การวิเคราะห์

### ประกอบด้วย

- ใต้เคิลบาร์ : การวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องการเลือก :

1. ชนิดของวงจร เช่น Single circuit และ Double circuit
2. ชนิดเสาโครงเหล็ก เช่น Suspension และ Tension
3. ลักษณะเสาโครงเหล็ก เช่น SLO DL3 DM3 DT20 DT60 และ DTR

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. จำนวนตัวนำ 4 Bundle ต่อเฟส
2. ระยะทางของสายส่งระหว่างแม่เกาะ (MM) – ท่าตะโก (TTK)
3. กำลังส่งจ่าย 1800 MW
4. ขนาดสายส่ง 795 MCM 54/7 ACSR “Condor”

- ผู้ใช้ตัดสินใจวิเคราะห์

1. ถ้านำมาส์คลิกสาย Shield ของเสาโครงเหล็ก เพื่อวิเคราะห์ขีดลัดล้มเหลวในระบบป้องกันฟ้าผ่า
2. ถ้านำมาส์คลิกสาย Phase ของเสาโครงเหล็ก เพื่อวิเคราะห์การเกิด Corona Loss และสัญญาณรบกวน  $AN, RI$

3. ถ้านำเมาส์คลิกจุด P ใดๆ บนพื้นดิน เพื่อวิเคราะห์ Electric and Magnetic Fields ของสายส่งแรงสูง 500 kV.

4. ถ้านำเมาส์คลิกกรากสายดิน  $R_f$  เพื่อวิเคราะห์ระบบกราวด์

- ปุ่ม Black :

เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear :

เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

Computer Aided Analysis for 500 KV EHV Transmission System

### Analysis of Shielding Failure in lightning Protection System

1.Number of flashes		4.Self surge impedance	
Thunder day (T)	82.2 day	Mean shield wire height (h)	39.50 m
Number of	17.262 ครั้ง	Radius of conductor (r)	0.01386 m
2.Mean shield wire height		Radius of corona conductor	0.045 m
Height of shield wires (hg)	60.5 m	Self-Surge impedance (Z)	482.269761239178 ohm
Height of conductor to ground (h)	29 m	5.Insulator critical flashover voltage	
Mean shield wire height (h)	39.50 m	Insulator length (L)	2.63 m
3.Number of flashes to the line		Time to break down (t)	6 us
Thunder day (T)	82.2 day	Ins. flashover voltage (Vc)	1539.08040606181 kV
Distances of shield wire (b)	9.4 m	6.Minimum strock currents	
Mean shield wire height (h)	39.50 m	Ins. flashover voltage (Vc)	1539 kV
Number of flashes to lie line	226.2443 ครั้ง	Self-surge impedance (Z)	482.26 ohm
		Min. stroke currents (Imin)	6.38244930120682 kA
		7.Minimum strike distance	
		Min. stroke currents (Imin)	6.382 kA
		Min. strike distance	33.35968336873 m

BACK CLEAR PRINT Next >

รูปที่ 5.2 หน้าจอการเกิด Shielding Failures ในระบบป้องกันฟ้าผ่าของเสา ชนิด DL3° Suspension

ประกอบด้วย

- ใต้เคิลบาร์ :

การวิเคราะห์ชัตต์ลัมเหลวในระบบป้องกันฟ้าผ่า

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. ความสูงของเสาโครงเหล็กถึงสายชัตต์
2. ความสูงของเสาโครงเหล็กถึงสายเฟส
3. วันที่ได้ยินเสียงฟ้าร้อง (Thunder day)
4. รัศมีของสายเฟส
5. ระยะห่างของสายชัตต์
6. รัศมีของสายเฟสขณะเกิดโคโรนา

7. ความยาวของลูกถ้วยบน Crossarm
8. เวลาเกิด Breakdown

- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน
2. จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่สายส่ง
3. ความสูงของเสาโครงเหล็กถึงสายชิลด์เฉลี่ย
4. เสรีจิมพีแดนซ์ของเสาโครงเหล็ก
5. แรงดัน Flashover บนลูกถ้วย
6. กระแสฟ้าผ่าต่ำสุดเกิดขึ้นบนเสาโครงเหล็ก
7. ระยะโคมตีฟ้าผ่า

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ
- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์
- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอตีถัดไปของโปรแกรมคำนวณ
- ปุ่ม Print : เมื่อผู้ใช้ต้องการ Print ข้อมูลหน้าจอโปรแกรมที่คำนวณเก็บไว้

Computer Aided Analysis for 500KV. EHV. Transmission System

### Analysis of shielding Failure in Lightning

#### Protection system

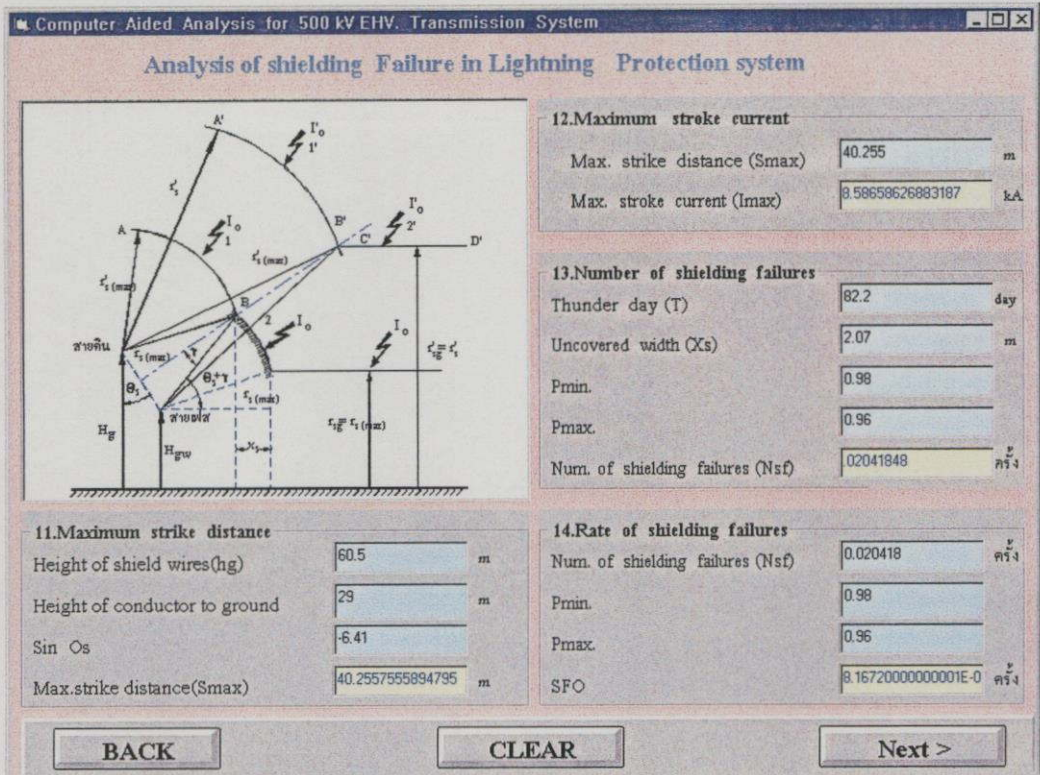
8.Coordinate of the shield wire	
Factor for lines (B)	0.8
Mean shield wire height (h)	39.50 m
Min. strike distance (S)	33.35 m
Mean height to down crossam (YQ)	21 m
Coordinate of the shield wire (Xg)	2.0752472990552 m

9.Effective shield wire	
Coordinate of the shield wire(Xg)	2.075 m
Mean shield wire heihfht(YG)	39.50 m
Mean height to down crossam(YQ)	21 m
Real shield angle(Osc)	14 degree
Effective shield angle (Os)	6.39996000065187 degree

10.The uncovered width (Xs)	
Min strike distance (S)	33.35 m
Alfa S	5.25 degree
w	61.34 degree
Xs	2.07820837513174 m

BACK CLEAR Next >

รูปที่ 5.3 หน้าจอการคำนวณ Coordinate ของสาย Shield และมุม Shield ของเสา ชนิด DL3<sup>o</sup> Suspension



รูปที่ 5.4 หน้าจอการคำนวณระยะโคมตีฟ้าผ่า กระแสสูงสุด และอัตราการเกิด Shield ของเสาชนิด DL3° Suspension

ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ : การวิเคราะห์ชิลด์ลัมเหลวในระบบป้องกันฟ้าผ่า

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. ความสูงของเสาโครงเหล็กถึงสายชิลด์
2. ความสูงของเสาโครงเหล็กถึงสายเฟส
3. วันที่ได้ขึ้นเสียงฟ้าร้อง (Thunder day)
4. ค่าความกว้าง Uncovered (Xs)

- ประมวลผลลัพธ์ :

1. ระยะ โคมตีฟ้าผ่าสูงสุด
2. กระแสฟ้าผ่าสูงสุด
3. จำนวนครั้งที่เกิดชิลด์ลัมเหลว
4. อัตราการเกิดชิลด์ลัมเหลว

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของ โปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

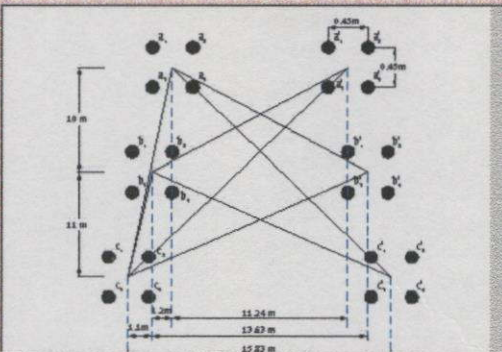
- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของ โปรแกรมคำนวณ

ตารางที่ 5.1 ผลการวิเคราะห์ชัตต์ล้มเหลวในระบบป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับผลของโปรแกรม ของ  
เสาแรงสูงชนิด  $DL3^{\circ}$  Suspension

ผลที่ได้จาก	ผลการวิเคราะห์	ผลของโปรแกรม
Mean shield wire height ( $h$ : m.)	39.50	39.50
Num.of flashes to the line ( $N_L$ : ครั้ง/100 km.)	226.24	226.24
Surge impedance of conductor ( $Z_{\phi}$ : $\Omega$ )	482.26	482.269
Min. stroke currents ( $I_{min}$ : kA)	6.38	6.38
Min. strike distance ( $r_s$ : m.)	33.35	33.35
Coordinate of the shield wire ( $X_G$ : m)	2.08	2.08
Effective shield angle ( $\theta_s$ : องศา)	-6.41	-6.41
Uncovered width ( $X_s$ : m)	2.18	2.07
Max. strike distance ( $S_{max}$ : m)	40.25	40.25
Max. stroke currents ( $I_{max}$ : kA)	8.58	8.58
Num.of shielding failures ( $N_{sf}$ : ครั้ง/100 km)	0.022	0.02
Rate of shielding failures (SFO: ครั้ง/100 km)	0.088	0.08

ANALYSIS OF CORONA EFFECTS

### CORONA LOSS IN FAIR WEATHER



1. Barometric pressure (cm-Hg)	74
2. Ambient temperature(C)	35
3. Irregularly factor (m.)	0.87
4. Irregularly factor for visible(mv)	0.82
5. Radius of conductor (cm)	1.386
6. Deq (cm)	1890.34
7. ml	1
8. Corona factor determined (F)	3.835
9. Operating voltage (Vp)	288.68
10. Frequency (f : Hz)	60

Relative air density	942082467532	
Disruptive critical	173.011972553	kV/ph
Visual critical voltage	205.880797094	kV/ph
Corona loss	34.0647574614	kw/km

BACK Ok CLEAR Next >>

รูปที่ 5.5 หน้าจอการคำนวณหา Corona Loss ในสภาพอากาศปกติของเสา ชนิด  $DL3^{\circ}$  Suspension

### ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ : การวิเคราะห์โคโรนาในสภาพอากาศปกติ

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. ความกดดันบรรยากาศ
2. อุณหภูมิบริเวณรอบสายส่ง
3. ค่า Irregularly Factor
4. ค่า Irregularly Factor for Visible
5. ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างตัวนำทั้ง 3 เฟส

- ประมวลผลลัพธ์ :

1. แรงดันวิกฤตที่เกิดการแตกตัวของอากาศ
2. แรงดันวิกฤตที่มองเห็นได้
3. กำลังไฟฟ้าสูญเสียของโคโรนา

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

ANALYSIS OF CORONA EFFECTS

SURFACE VOLTAGE GRADIENT ( $E_m$ )

1. Radius of conductor (cm)	1.386
2. Spacing of conductor (S;cm)	45.7
3. Operating voltage ( $V_p$ )	288.68
4. Spacing between phase (D;cm)	1100
5. Diameter of conductor (d;cm)	2.773
6. tower heights to conductor (h;cm)	3700
$E_{mc}$	21.740805983803 kV/cm
$E_{mo}$	17.7202226433372 kV/cm

BACK CLEAR PRINT Next >

รูปที่ 5.6 หน้าจอการคำนวณหาแรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสา ชนิด

DL3° Suspension

ANALYSIS OF CORONA EFFECTS

CORONA LOSS IN FOUL WEATHER

1. Total fair weather Loss(P.F.W);kw/km	5
2. Conductor voltage (VL;V)	500
3. Radius of conductor (cm)	1.386
4. K	5.35
5. Surface voltage gradient (Emc)	21.74
6. Number of conductor in bundle (N)	4
7. Rain rate (p;mm/hour)	12.7

Corona loss for rain (Pc,rw)	57.3936211133719	kw/km		
Corona loss for snow (Pc,sw)	26.013678452551	kw/km		
Corona loss current (Ic) (Ic;rw)	198817335597436	A/km (Ic;sw)	9.01140255431561E-02	A/km

BACK CLEAR PRINT Next >

รูปที่ 5.7 หน้าจอการคำนวณหา Corona Loss และ Current Loss ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสาชนิด DL3° Suspension

### ประกอบด้วย

- ไตเดิลบาร์ : การวิเคราะห์โคโรนาในสภาพอากาศแปรปรวน

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. แรงดันไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ
2. รัศมีของตัวนำ
3. แรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ
4. จำนวนตัวนำที่จัดวางลักษณะ Bundle ต่อเฟส

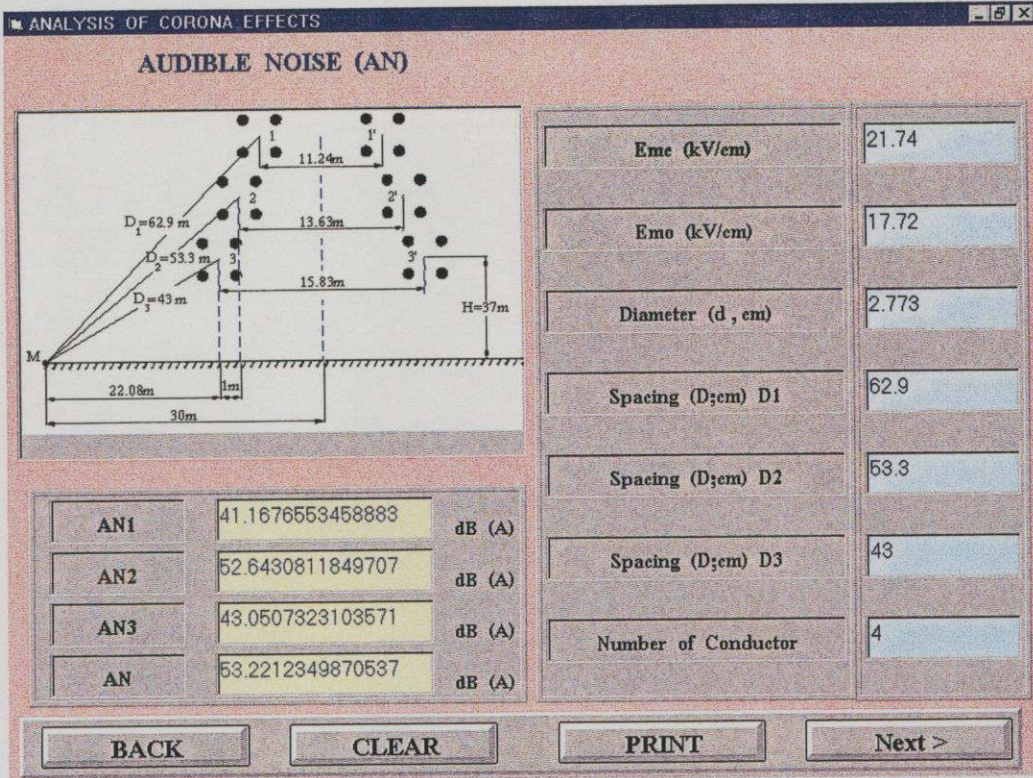
- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. กำลังไฟฟ้าสูญเสียโคโรนาขณะฝนตก
2. กำลังไฟฟ้าสูญเสียโคโรนาขณะอากาศหนาวจัด
3. กระแสไฟฟ้าสูญเสียโคโรนาขณะฝนตก
4. กระแสไฟฟ้าสูญเสียโคโรนาขณะอากาศหนาวจัด

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้งานต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ



รูปที่ 5.8 หน้าจอการคำนวณหา Audible Noise ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสา ชนิด DL3°

Suspension

ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ : การคำนวณหา Audible Noise ในสภาพอากาศแปรปรวน

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. แรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ สำหรับเฟสจุดศูนย์กลาง
2. แรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ สำหรับเฟสภายนอก
3. เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ
4. ระยะห่างเฟสของตัวนำถึงจุด M เช่น ระยะห่าง D1 D2 และ D3
5. จำนวนตัวนำที่จัดวางลักษณะ Bundle ต่อเฟส

- ประมวลผลผลลัพธ์ :

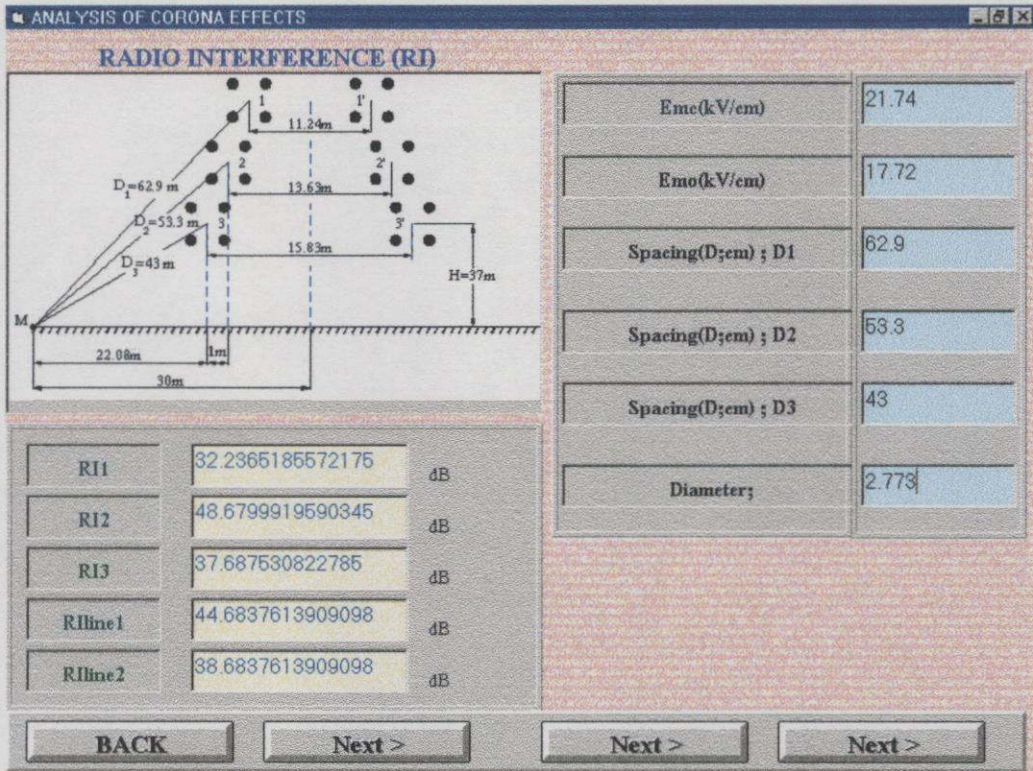
1. ทา Audible Noise เฟสที่ 1
2. ทา Audible Noise เฟสที่ 2
3. ทา Audible Noise เฟสที่ 3

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

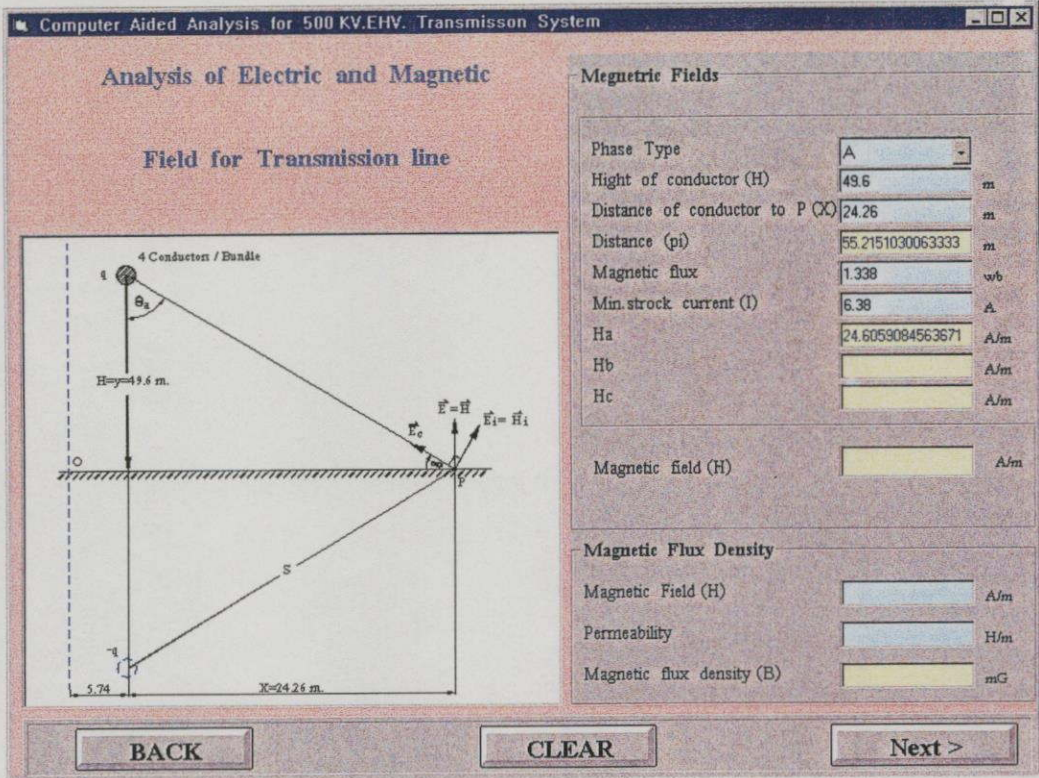
- ปุ่ม Print : เมื่อผู้ใช้ต้องการ Print ข้อมูลหน้าจอโปรแกรมที่คำนวณเก็บไว้



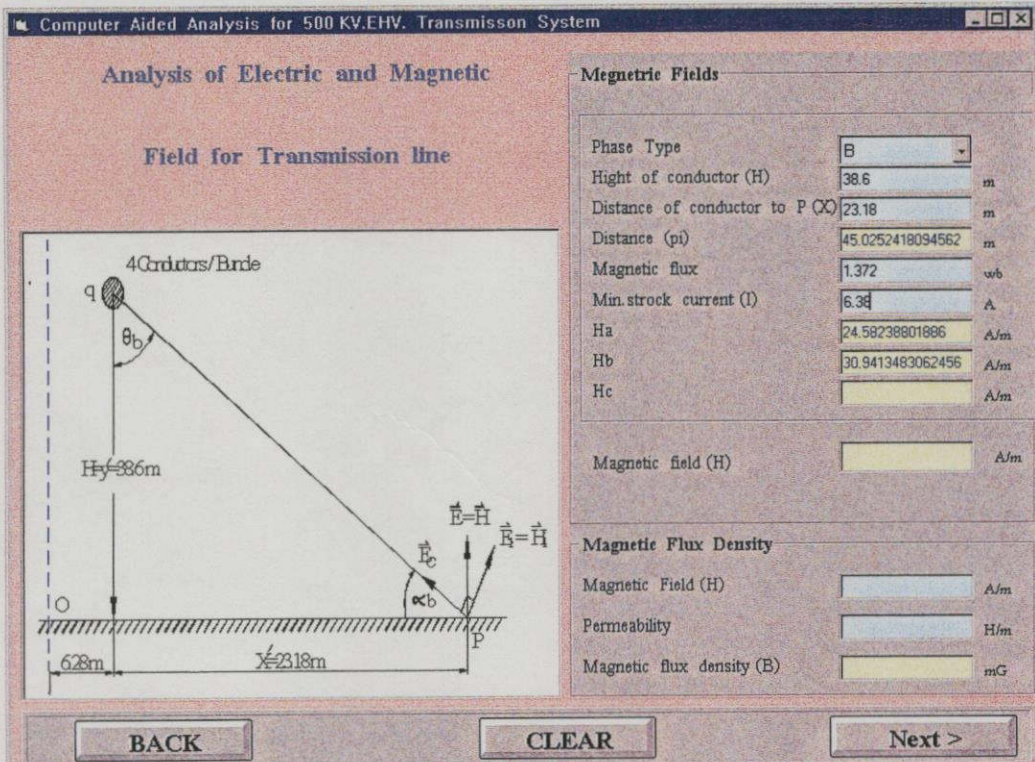
รูปที่ 5.9 หน้าจอการคำนวณหา Radio Interference ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสา ชนิด  $DL3^{\circ}$  Suspension

ตารางที่ 5.2 ผลการวิเคราะห์การเกิดโคโรนาเปรียบเทียบกับผลของโปรแกรม สำหรับสายส่งแรงสูง ชนิด  $DL3^{\circ}$  Suspension

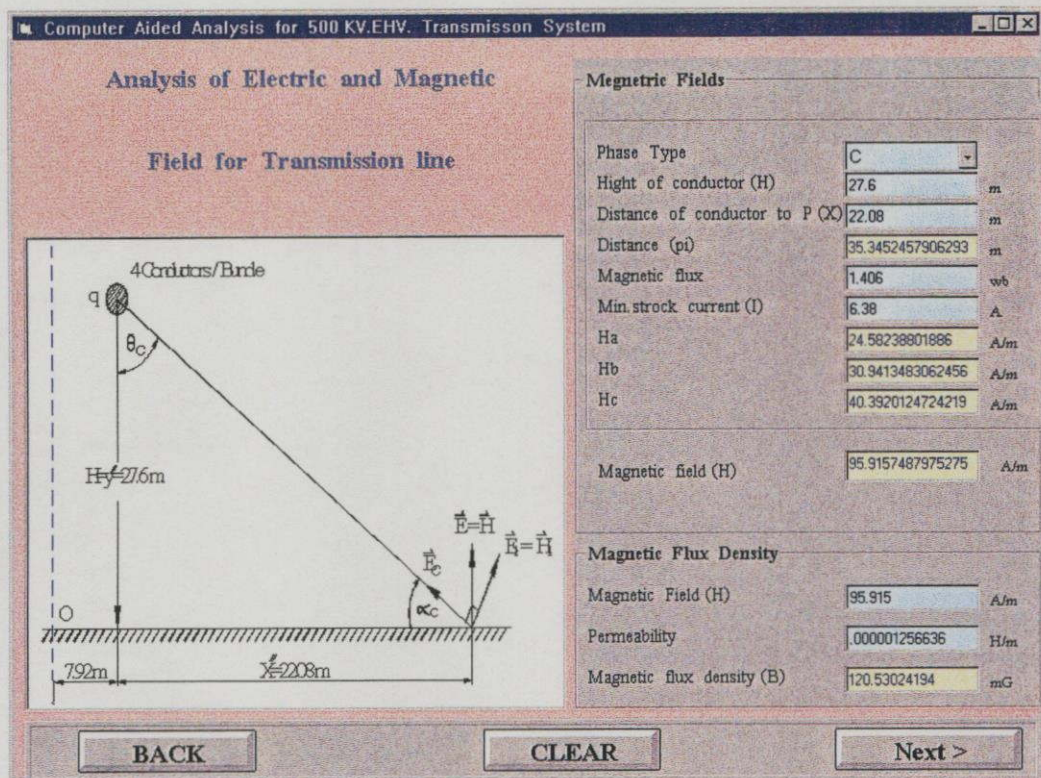
ผลที่ได้จาก	ผลการวิเคราะห์	ผลของโปรแกรม
<b>- FAIR WEATHER</b>		
Corona loss ( $P_c$ : kw/km)	34.04	34.06
<b>- FOUL WEATHER</b>		
Corona loss in rain ( $\bar{P}_{cr}$ : kw/km)	57.38	57.39
Current loss in rain ( $I_{cr}$ : A/km)	0.198	0.198
Corona loss in frost ( $P_{cs}$ : kw/km)	26.01	26.01
Current loss in frost ( $I_{cs}$ : A/km)	0.09	0.09
Audible Noise (AN: dB/ $1 \mu V$ /m)	53.48	53.22
Radio Noise 1(RI: dB/ $1 \mu V$ /m)	44.92	44.68
Radio Noise 2(RI: dB/ $1 \mu V$ /m)	38.61	38.68



รูปที่ 5.10 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fields และ Magnetic Flux Density ของเฟส A ที่ความสูงเสา 49.6 เมตร ของเสา ชนิด DL3° Suspension



รูปที่ 5.11 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fields และ Magnetic Flux Density ของเฟส B ที่ความสูงเสา 38.6 เมตร ของเสา ชนิด DL3° Suspension



รูปที่ 5.12 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fields และ Magnetic Flux Density ของเฟส C ที่ความสูงเสา 27.6 เมตร ของเสา ชนิด  $DL3^\circ$  Suspension

ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ : การคำนวณหา Magnetic Fields และ Magnetic Flux Density ของเฟส C
- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. ความสูงของเสาโครงเหล็กชนิด  $DL3^\circ$  Suspension
2. ระยะห่างของตัวนำที่จุด P บนพื้นดินใดๆ
3. ฟลักสนามแม่เหล็ก
4. กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเสาโครงเหล็ก

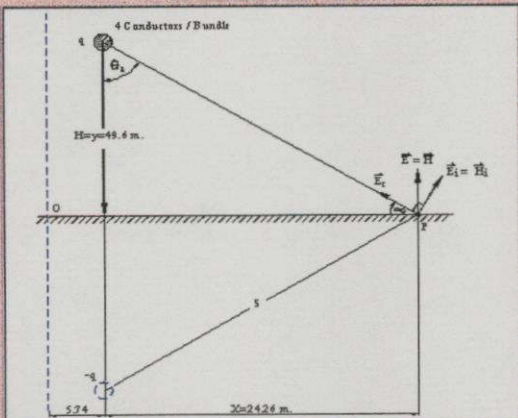
- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. สนามแม่เหล็ก (Magnetic Fields)
2. ความหนาแน่นของฟลักสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ
- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์
- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

Computer Aided Analysis for 500KV.EHV Transmission System

### Analysis of Electric and Magnetic fields for Transmission line



4 Conductors / Bundle

Height = 49.6 m.

5.24

24.26 m

Electric Fields

A

Distances of conductor to P (X) 24.26 m

Capacitance (C) 25.277 F/m

Line voltage (Vl) 500 kV

Dielectric constant (B0) 8.854 F/m

Hight of conductor (H) 49.6 m

Phase A > Ea 7.39217793922291 kV/m

Phase B > Eb

Phase C > Ec

Electric Field (E)

Space between phase (D) m

Distance between the outer phase m

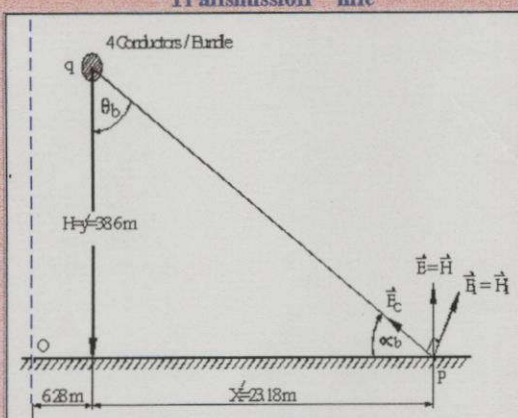
R - O - W m

BACK CLEAR Next >

รูปที่ 5.13 หน้าจอการคำนวณ Electric Field ของเฟส A ที่ความสูงเสา 49.6 เมตร ของเสาชนิด DL3° Suspension

Computer Aided Analysis for 500KV.EHV Transmission System

### Analysis of Electric and Magnetic fields for Transmission line



4 Conductors / Bundle

Height = 38.6 m.

6.8 m

23.18 m

Electric Fields

B

Distances of conductor to P (X) 23.18 m

Capacitance (C) 25.277 F/m

Line voltage (Vl) 500 kV

Dielectric constant (B0) 8.854 F/m

Hight of conductor (H) 38.6 m

Phase A > Ea 7.39217793922291 kV/m

Phase B > Eb 8.65130665168233 kV/m

Phase C > Ec

Electric Field (E)

Space between phase (D) m

Distance between the outer phase m

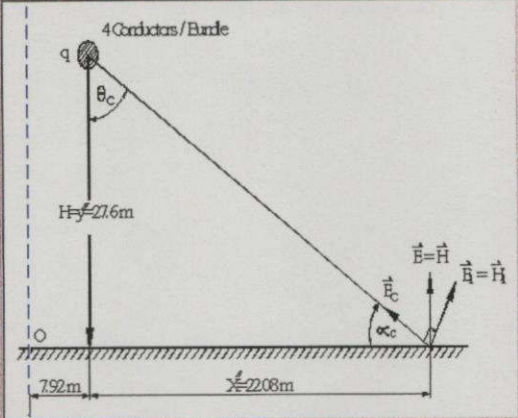
R - O - W m

BACK CLEAR Next >

รูปที่ 5.14 หน้าจอการคำนวณ Electric Field ของเฟส B ที่ความสูงเสา 38.6 เมตร ของเสาชนิด DL3° Suspension

Computer Aided Analysis for 500KV.EHV Transmission System

### Analysis of Electric and Magnetic fields for Transmission line



4 Conductors/Bundle

$H_c = 27.6\text{m}$

$7.92\text{m}$        $22.08\text{m}$

Electric Fields

Distances of conductor to POC: 22.08 m

Capacitance (C): 25.277 F/m

Line voltage (V): 500 kV

Dielectric constant (E0): 8.854 F/m

Hight of conductor (H): 27.6 m

Space between phase (D): 7.92 m

Distance between the outer phase: 22.08 m

R - O - W: 60 m

Phase A > Ea: 7.39217793922291 kV/m

Phase B > Eb: 8.65130665168233 kV/m

Phase C > Ec: 10.0381476448657 kV/m

Electric Field (E): 26.0816322357709 kV/m

BACK      CLEAR      Next >

รูปที่ 5.15 หน้าจอการคำนวณ Electric Field ของเฟส C ที่ความสูงเสา 27.6 เมตร ของเสาชนิด DL3° Suspension

ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ : การคำนวณหา Electric Field ของเฟส C

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. ความสูงของเสาโครงเหล็กชนิด DL3° Suspension
2. ระยะห่างของตัวนำที่จุด P บนพื้นดินใดๆ
3. ค่าตัวเก็บประจุของตัวนำ
4. ค่า Dielectric Constant
5. ระยะห่างระหว่างเฟสของตัวนำ

- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. สนามไฟฟ้า (Electric Field)
2. ระยะแนวเขตเดินสายไฟฟ้า(R-O-W)

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

ตารางที่ 5.3 ผลการลดทอนระดับความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด  
DL3° Suspension

ความสูงของเสาจาก พื้นดินถึงตัวนำ (m)	$\bar{E}_a$ (kV/m)	$\bar{E}_b$ (kV/m)	$\bar{E}_c$ (kV/m)	$\bar{E}$ (kV/m)
27.6	7.393	8.653	10.04	26.086
29.6	7.213	8.441	9.864	25.931
31.6	7.037	8.231	9.663	24.931
33.6	6.886	8.002	9.446	24.334
35.6	6.701	7.818	9.213	23.737
37.6	6.541	7.618	8.987	23.146

ตารางที่ 5.4 ผลการลดทอนของระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างแนวจุด P ใดๆ เมื่อเพิ่มความสูง  
ของเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด DL3° Suspension

ความสูงของเสาจาก พื้นดินถึงตัวนำ (m)	$\bar{E}$			
	P = 20 m	P = 25 m	P = 30 m	P = 35 m.
27.6	41.22	35.86	31.18	25.33
29.6	41.01	35.41	30.73	23.17
31.6	40.78	34.93	30.26	21.22
33.6	40.30	34.20	29.62	19.00
35.6	38.65	33.10	28.22	16.20

ตารางที่ 5.5 ผลการลดทอนของระดับความเข้มสนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก  
เมื่อเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด DL3° Suspension

ความสูงของเสาจาก พื้นดินถึงตัวนำ (m)	$\bar{H}_a$ (A/m)	$\bar{H}_b$ (A/m)	$\bar{H}_c$ (A/m)	$\bar{H}$ (A/m)	$\bar{B}$ (mG)
27.6	23.119	29.089	37.959	90.167	113.353
29.6	22.268	27.855	36.175	86.297	108.488
31.6	21.468	26.696	34.480	82.643	103.894
33.6	20.718	25.608	32.879	79.201	99.567
35.6	20.003	24.589	31.374	75.966	95.50
37.6	19.332	23.633	29.962	72.927	91.68

Computer Aided Analysis for 500 KV. EHV. Transmission System

### Calculation for Grounding System

**Input Data**

Soil Type	ดินร่วนปนทราย	
Number of Ground rod	4	แท่ง
Length of Ground rod (L)	3	m
Diameter of Ground rod (d)	0.016	m
Soil Resistivity ( $\rho$ )	150	ohm/m
Length of No.2 AWG (l)	60	m
Depth of Counterpoise (S)	0.5	m
Diameter of Counterpoise (de)	0.00654	m
Time of current flow (ts)	0.5	sec
Ww	703.5	kg
Ws	601.1	kg

**Tower surge impedance**

Height of tower (H)	60.5	m
Basic of tower (r)	16.1	m
Tower surge impedance (Zt)	102.276534143174	ohm

**Tower Lightning voltage**

soil type	ดินร่วนปนทราย	
Lightning stroke current (Imin)	6.38	kA
Grounding Resistance (R)	11.18	ohm
Tower surge impedance (Zt)	102.276	ohm
Tower lightning voltage (Vt)	723.84928	volt

Grounding Resistance (R)	11.1807898359795	ohm
Ground rod Resistance (Rg)	86.9615618663368	ohm
Ground rod Spacing (M)	4.5	m
Counterpoise Resistance (Re)	8.03575415659193	ohm
Moisture of soil	117.035435035768	%
Estep 50kg	311.69266914703	volt
Etouch 50kg	200.959747213217	volt

BACK CLEAR PRINT Next >

รูปที่ 5.16 หน้าจอการคำนวณ Grounding Resistance, Ground rod Resistance , แรงดันช่วงก้าว, และแรงดันสัมผัสเมื่อปัก Rod 4 แท่ง ของดินร่วนปนทราย ของเสา DL3° Suspension

#### ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ :

การคำนวณหา Grounding System ของสายส่งแรงสูง

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก :

1. ชนิดของดิน เช่น ดินร่วนปนทราย ดินเหนียว ดินร่วนซุย ทรายซุย
2. จำนวนแท่ง Ground rod

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. ความสูงของเสาโครงเหล็กชนิด DL3° Suspension
2. ความต้านทานจำเพาะของดิน
3. ความยาวของสาย Counterpoise ขนาด No. 2 AWG.
4. ความลึกของการปักแท่ง Ground rod
5. เวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย
6. กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเสาโครงเหล็ก
7. น้ำหนักในดิน
8. น้ำหนักดินแห้ง

## 9. เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของสาย Counterpoise

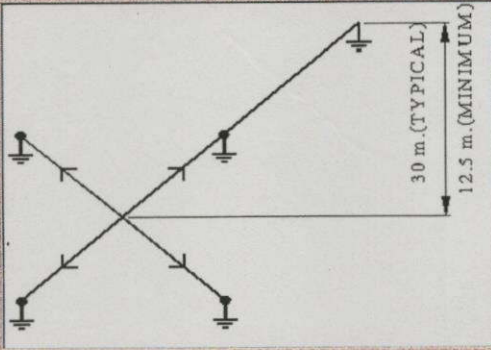
- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. เสรีจิมพีแคนซ์ของเสา
2. ความต้านทานของดิน
3. ความต้านทานของ Ground rod
4. ระยะห่างของ Ground rod
5. ความต้านทานของสาย Counterpoise
6. ความชื้นของดิน (%)
7. แรงดันช่วงก้ำว
8. แรงดันสัมผัส
9. กระแสไฟฟ้าผ่านบนเสาโครงเหล็ก

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ
- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์
- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

Computer Aided Analysis for 500 KV. EHV. Transmission System

### Calculation for Grounding System



Grounding Resistance (R)	8.94463186878357	ohm
Ground rod Resistance (Rg)	86.9615618663368	ohm
Ground rod Spacing (M)	4.5	m
Counterpoise Resistance (Rc)	8.035754156659193	ohm
Moisture of soil	117.035435035768	%
Estep 50kg	311.69266914703	volt
Etouch 50kg	200.959747213217	volt

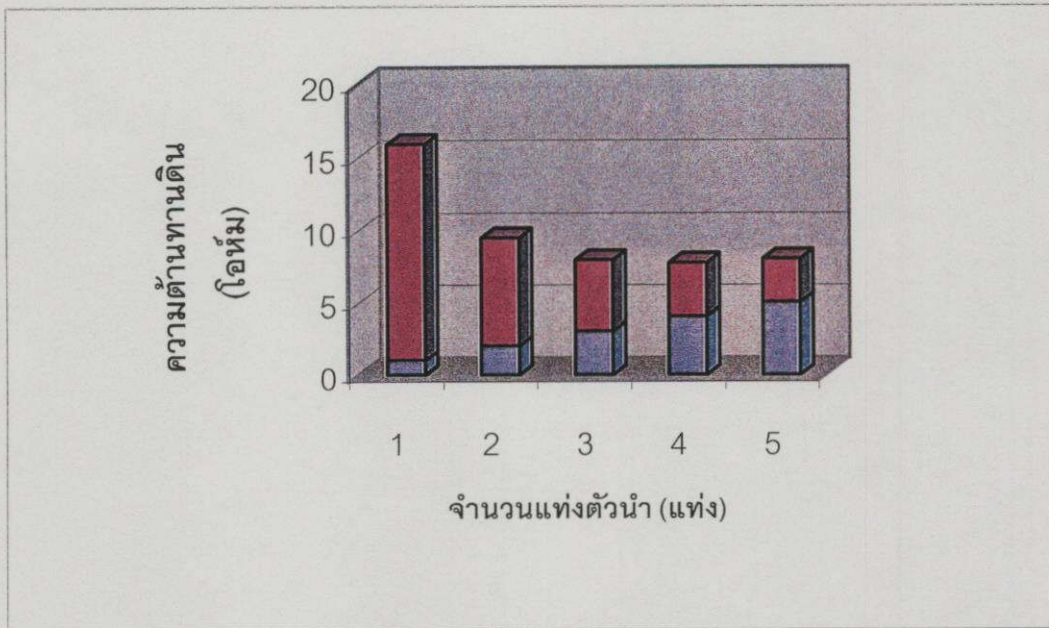
Input Data	
Soil Type	ดินร่วนปนทราย
Number of Ground rod	5
Lenght of Gorund rod (L)	3 m
Diameter of Ground rod (d)	0.016 m
Soil Resistivity (ρ)	150 ohm/m
Lenght of No.2 AWG (l)	60 m
Depth of Counterpoise (S)	0.5 m
Diameter of Counterpoise (de)	0.00854 m
Time of current flow (ts)	0.5 sec
Ww	703.5 kg
Ws	601.1 kg

Tower surge impedance	
Height of tower (H)	60.5 m
Basic of tower (r)	16.1 m
Tower surge impedance (Zt)	102.276534143174 ohm

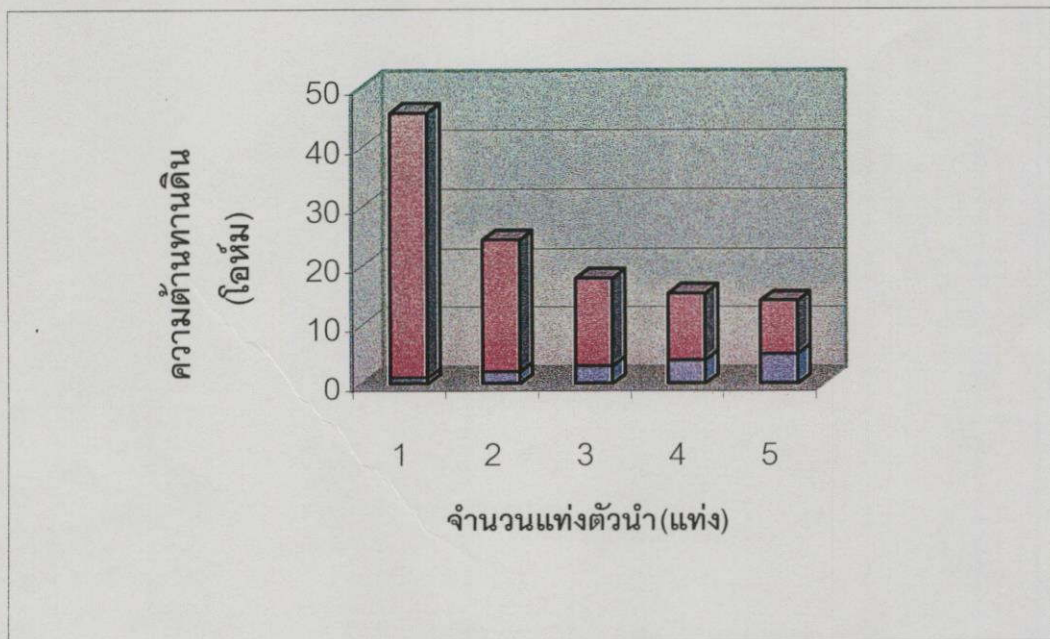
Tower Lightning voltage	
soil type	ดินร่วนปนทราย
Linghtrning stroke current (Imin)	6.38 kA
Grounding Resistance (R)	8.94 ohm
Tower surge impedance (Zt)	102.276 ohm
Tower lightning voltage (Vt)	709.55808 volt

BACK CLEAR PRINT Next >

รูปที่ 5.17 หน้าจอการคำนวณ Grounding Resistance, Ground rod Resistance , แรงดันช่วงก้ำว, และแรงดันสัมผัสเมื่อปักRod 5 แท่ง ของดินร่วนปนทราย ของเสา DL3° Suspension



รูปที่ 5.18 แสดงกราฟแท่งของค่าความต้านทานของดินลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนแท่ง Ground rod ของดินเหนียว



รูปที่ 5.19 แสดงกราฟแท่งของค่าความต้านทานของดินลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนแท่ง Ground rod ของดินร่วนปนทราย

## 5.2 ตัวอย่างการวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV วงจรเดี่ยว (Single circuit)

### เสาโครงเหล็กชนิด SL 0° Suspension

สายส่งกำลังไฟฟ้า 500 kV 3 เฟส กำลังส่งจ่าย 1800 MW วงจรเดี่ยว (Single circuit) เลือกขนาดสายส่งเป็น 795 MCM. ACSR ชนิดจำนวนเส้น 54 Al/7 St. "Condor" ซึ่งจะจัดวางตัวนำเป็น 4 Bundle ต่อเฟส ความถี่ 50 Hz เลือกสาย Shield : 3/8 นิ้ว, 7 Strand, EHS GALV. STL. รัศมีของ Corona ที่แผ่กระจายรอบตัวนำ 0.045 m รัศมีของตัวนำ 0.01386 m ข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์ห้มีดังนี้

$h_g$  คือ ความสูง tower ถึงสาย Shield wires = 41 m

$h_{gw}$  คือ ความสูง tower จากพื้นดิน ที่ระยะของสายส่งในเฟส C = 36.5 m

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวนำต่อเฟส =  $13.34 \times 10^{-12}$  F/m

$V_c$  คือ Insulator critical flashover voltage = 1539 kV

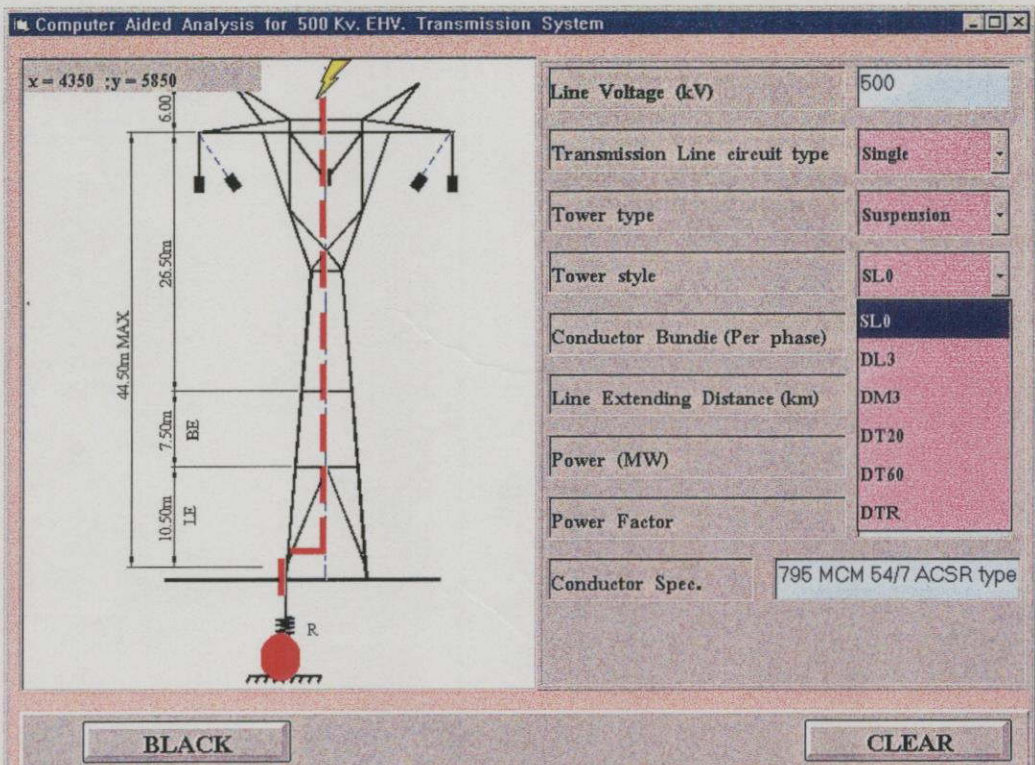
b คือ ความกดดันบรรยากาศ = 74 cm.-Hg

t คือ อุณหภูมิของอากาศ = 35 °C

$m_1$  คือ ตัวประกอบสภาพอากาศ

= 1.0 สำหรับสภาพอากาศปกติ

= 0.8 สำหรับฝนตก



รูปที่ 5.20 หน้าจอของสายส่งวงจเดี่ยว SL 0° Suspension ขณะเกิดฟ้าผ่าเสาโครงเหล็กก่อนเข้าสู่การวิเคราะห์

## ประกอบด้วย

- โวลเตจ : การวิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องการเลือก :

1. ชนิดของวงจร เช่น Single circuit และ Double circuit
2. ชนิดเสาโครงเหล็ก เช่น Suspension และ Tension
3. ลักษณะเสาโครงเหล็ก เช่น SLO DL3 DM3 DT20 DT60 และ DTR

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. จำนวนตัวนำ 4 Bundle ต่อเฟส
2. ระยะทางของสายส่งระหว่างแม่เกาะ (MM) – ท่าตะโก (TTK)
3. กำลังส่งจ่าย 1800 MW
4. ขนาดสายส่ง 795 MCM 54/7 ACSR “Condor”

- ผู้ใช้ตัดสินใจวิเคราะห์

1. ถ้านำเม้าส์คลิกสาย Shield ของเสาโครงเหล็ก เพื่อวิเคราะห์ชิลด์ล้มเหลวในระบบป้องกันฟ้าผ่า
2. ถ้านำเม้าส์คลิกสาย Phase ของเสาโครงเหล็ก เพื่อวิเคราะห์การเกิด Corona Loss และสัญญาณรบกวน  $AN, RI$
3. ถ้านำเม้าส์คลิกจุด P ใดๆ บนพื้นดิน เพื่อวิเคราะห์ Electric and Magnetic Fields ของสายส่งแรงสูง 500 kV.
4. ถ้านำเม้าส์คลิกสายดิน  $R_f$  เพื่อวิเคราะห์ระบบกราวด์

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เม้าส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เม้าส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

Computer Aided Analysis for 500 KV, EHV Transmission System

### Analysis of Shielding Failure in lightning Protection System

1.Number of flashes	
Thunder day (T)	82.2 day
Number of	17.262 ครั้ง
2.Mean shield wire height	
Height of shield wires (hg)	41 m
Height of conductor to ground (h)	36.5 m
Mean shield wire height (h)	38.00 m
3.Number of flashes to the line	
Thunder day (T)	82.2 day
Distances of shield wire (b)	27.715 m
Mean shield wire height (h)	38 m
Number of flashes to line	235.3447 ครั้ง
4.Self surge impedance	
Mean shield wire hight (h)	38 m
Radius of conductor (r)	0.01386 m
Radius of corona conductor	0.045 m
Self-Surge impedance (Z)	479.940635726076 ohm
5.Insulator critical flashover voltage	
Insulator length (L)	2.63 m
Time to break down (t)	6 us
Ins. flashover voltage (Vc)	1539.08040606181 kV
6.Minimum strock currents	
Ins. flashover voltage (Vc)	1539.08 kV
Self-surge impedance (Z)	479.94 ohm
Min. stroke currents (Imin)	6.41363503771305 kA
7.Minimum strike distance	
Min. stroke currents (Imin)	6.4136 kA
Min. strike distance	33.4669562429321 m

รูปที่ 5.21 หน้าจอการเกิด Shielding Failures ในระบบป้องกันฟ้าผ่าของเสา ชนิด  $SL\ 0^\circ$  Suspension

#### ประกอบด้วย

- ใต้เตลิตบาร์ : การวิเคราะห์ชัตต์ลัมเหลวในระบบป้องกันฟ้าผ่า

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. ความสูงของเสาโครงเหล็กถึงสายชิลด์
2. ความสูงของเสาโครงเหล็กถึงสายเฟส
3. วันที่ได้ยินเสียงฟ้าร้อง (Thunder day)
4. รัศมีของสายเฟส
5. ระยะห่างของสายชิลด์
6. รัศมีของสายเฟสขณะเกิดโคโรนา
7. ความยาวของลูกถ้วยบน Crossarm
8. เวลาเกิด Breakdown

- ประมวลผลลัพธ์ :

1. จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน
2. จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่สายส่ง
3. ความสูงของเสาโครงเหล็กถึงสายชิลด์เฉลี่ย
4. เสรีจิมพีแดนซ์ของเสาโครงเหล็ก

5. แรงดัน Flashover บนลูกถ้วย
6. กระแสฟ้าผ่าต่ำสุดเกิดขึ้นบนเสาโครงเหล็ก
7. ระยะ โจมตีฟ้าผ่า

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ
- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์
- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

Computer Aided Analysis for 500KV. EHV. Transmission System

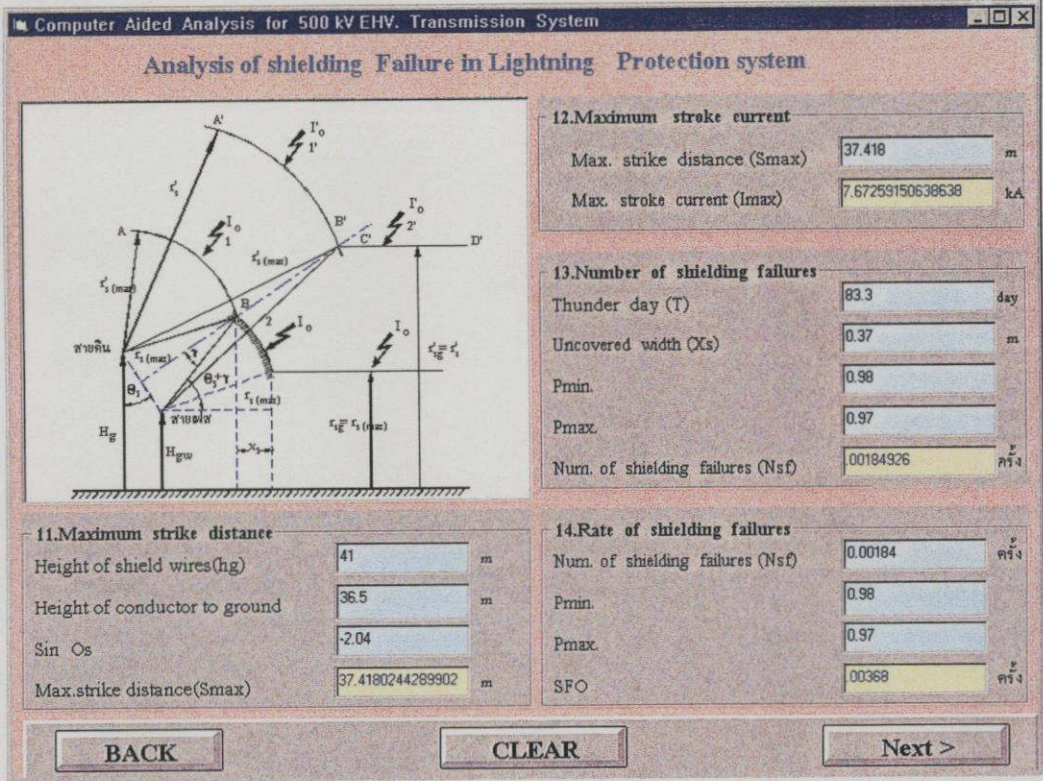
### Analysis of shielding Failure in Lightning

#### Protection system

<b>8.Coordinate of the shield wire</b>	
Factor for lines (B)	0.8
Mean shield wire height (h)	38 m
Min. strike distance (S)	33.45 m
Mean height to down crossarm (YQ)	17.80 m
Coordinate of the shield wire (Xg)	722643846039681 m
<b>9.Effective shield wire</b>	
Coordinate of the shield wire(Xg)	0.7226 m
Mean shield wire height(h)	38 m
Mean height to down crossarm(YQ)	17.80 m
Real shield angle(Osc)	5 degree
Effective shield angle (Os)	-2.04878734225814 degree
<b>10.The uncovered width (Xs)</b>	
Min strike distance (S)	33.45 m
Alfa S	-0.87 degree
w	81.54 degree
Xs	.375926078238677 m

BACK CLEAR Next >

รูปที่ 5.22 หน้าจอการคำนวณ Coordinate ของสาย Shield และมุม Shield ของเสา ชนิด  $SL 0^\circ$  Suspension



รูปที่ 5.23 หน้าจอการคำนวณระยะโคมตีฟ้าผ่า กระแสสูงสุด และอัตราการเกิด Shield ของเสาชนิด SL 0° Suspension

**ประกอบด้วย**

- ใต้เคเบิลบาร์ : การวิเคราะห์ชิลด์ล้มเหลวในระบบป้องกันฟ้าผ่า

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. ความสูงของเสาโครงเหล็กถึงสายชิลด์
2. ความสูงของเสาโครงเหล็กถึงสายเฟส
3. วันที่ได้ยินเสียงฟ้าร้อง (Thunder day)
4. ค่าความกว้าง Uncovered (Xs)

- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. ระยะโคมตีฟ้าผ่าสูงสุด
2. กระแสฟ้าผ่าสูงสุด
3. จำนวนครั้งที่เกิดชิลด์ล้มเหลว
4. อัตราการเกิดชิลด์ล้มเหลว

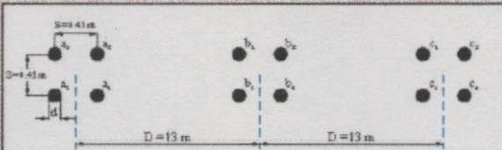
- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ
- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์
- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

ตารางที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์ชนิดคัลล์มเหลวในระบบป้องกันฟ้าผ่าเปรียบเทียบกับผลของโปรแกรม สำหรับเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด  $SL\ 0^\circ$  Suspension

ผลที่ได้จาก	ผลการวิเคราะห์	ผลของโปรแกรม
Mean shield wire height ( $h$ : m.)	38	38
Num.of flashes to the line ( $N_L$ : ครั้ง/100 km.)	235.34	235.344
Surge impedance of conductor ( $Z_\phi$ : $\Omega$ )	479.94	479.94
Min. stroke currents ( $I_{min}$ : kA)	6.41	6.413
Min. strike distance ( $r_s$ : m.)	33.45	33.466
Coordinate of the shield wire ( $X_G$ : m)	0.72	0.722
Effective shield angle ( $\theta_s$ : องศา)	-2.04	-2.048
Uncovered width ( $X_s$ : m)	0.31	0.31
Max. strike distance ( $S_{max}$ : m)	37.41	37.418
Max. stroke currents ( $I_{max}$ : kA)	7.67	7.672
Num.of shielding failures ( $N_{sf}$ : ครั้ง/100 km)	0.00103	0.00184
Rate of shielding failures (SFO : ครั้ง/100 km)	0.00264	0.00368

ANALYSIS OF CORONA EFFECTS

### CORONA LOSS IN FAIR WEATHER



1. Barometric pressure (cm-Hg)	74
2. Ambient temperature(C)	35
3. Irregularity factor (m.)	0.87
4. Irregularity factor for visible(mv)	0.82
5. Radius of conductor (cm)	1.386
6. Deq (cm)	1611.965
7. m1	1
8. Corona factor determined (F)	3.835
9. Operating voltage (Vp)	288.68
10. Frequency (f : Hz)	50

Relative air density	942082467532
Disruptive critical	169.193609652 kV/ph
Visual critical voltage	201.337021387 kV/ph
Corona loss	35.6196546587 kw/km

BACK CLEAR Next >>

รูปที่ 5.24 หน้าจอการคำนวณหา Corona Loss ในสภาพอากาศปกติของเสาชนิด  $SL\ 0^\circ$  Suspension

### ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ : การวิเคราะห์โคโรนาในสภาพอากาศปกติ

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. ความกดดันบรรยากาศ
2. อุณหภูมิบริเวณรอบสายส่ง
3. ค่า Irregularily Factor
4. ค่า Irregularily Factor for Visible
5. ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างตัวนำทั้ง 3 เฟส

- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. แรงดันวิกฤตที่เกิดการแตกตัวของอากาศ
2. แรงดันวิกฤตที่มองเห็นได้
3. กำลังไฟฟ้าสูญเสียของโคโรนา

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของ โปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของ โปรแกรมคำนวณ

ANALYSIS OF CORONA EFFECTS		
SURFACE VOLTAGE GRADIENT (Em)		
1. Radius of conductor (cm)	1.386	
2. Spacing of conductor (S;Cm)	45.7	
3. Operating voltage (VI)	288.68	
4. Spacing between phase (D;Cm)	1300	
5. Diameter of conductor (d;Cm)	2.773	
6. Tower heights to conductor (h;Cm)	3132	
Emc	20.8625400479389	kV/cm
Emo	18.2299077270792	kV/cm

BACK CLEAR Next >

รูปที่ 5.25 หน้าจอการคำนวณหาแรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสา ชนิด

SL 0° Suspension

ANALYSIS OF CORONA EFFECTS

CORONA LOSS IN FOUL WEATHER

1.Total fair-weather Loss (P.F.W;Kw/Km)	5
2. Conductor voltage (VI;V)	500
3.Radius of conductor (Cm)	1.386
4. K	5.35
5. Surface voltage gradient (EMC)	20.862
6. Number of conductor in bundle (N)	4
7.Rain rate (p;mm/hour)	12.7

Corona loss for rain (Pc,rw)	47.634426138837	kw/km
Corona loss for snow(Pc,sw)	22.099526676195	kw/km
Corona loss current (Ic)	(Ic;rw) 1.6501049252370	(Ic;sw) 0.7655500605278 A/km

BACK CLEAR Next >

รูปที่ 5.26 หน้าจอการคำนวณหา Corona Loss และ Current Loss ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสาชนิด SL 0° Suspension

ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ : การวิเคราะห์โคโรนาในสภาพอากาศแปรปรวน

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. แรงดันไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ
2. รัศมีของตัวนำ
3. แรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ
4. จำนวนตัวนำที่จัดวางลักษณะ Bundle ต่อเฟส

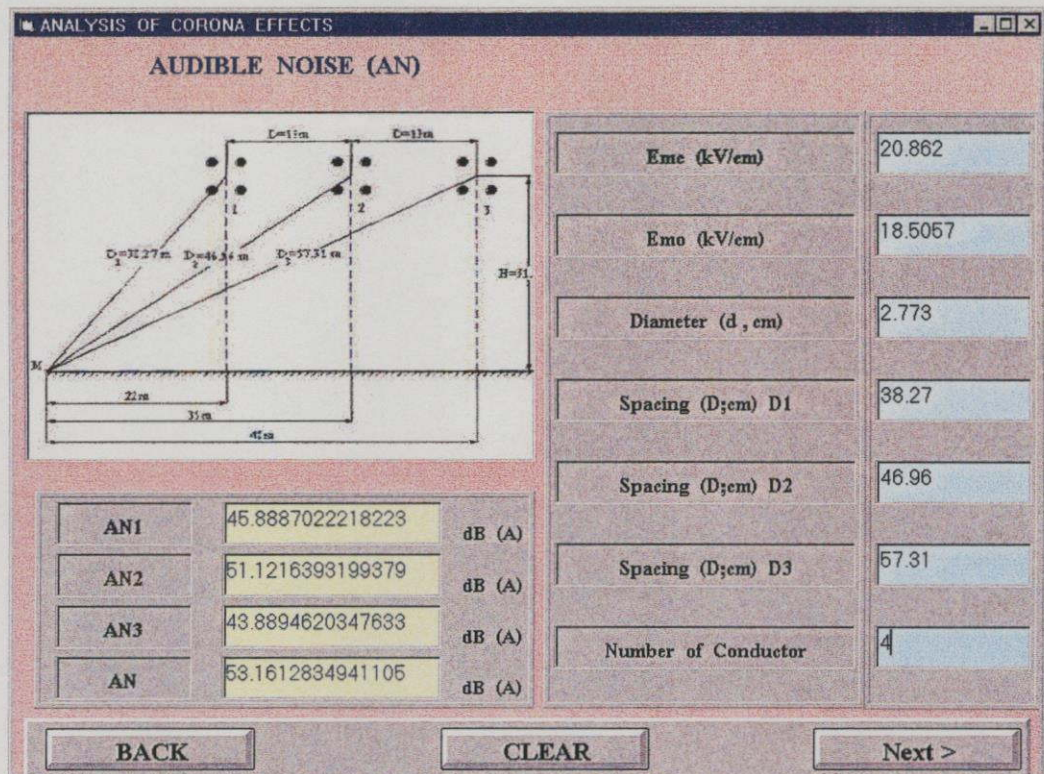
- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. กำลังไฟฟ้าสูญเสียโคโรนาขณะฝนตก
2. กำลังไฟฟ้าสูญเสียโคโรนาขณะอากาศหนาวจัด
3. กระแสไฟฟ้าสูญเสียโคโรนาขณะฝนตก
4. กระแสไฟฟ้าสูญเสียโคโรนาขณะอากาศหนาวจัด

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

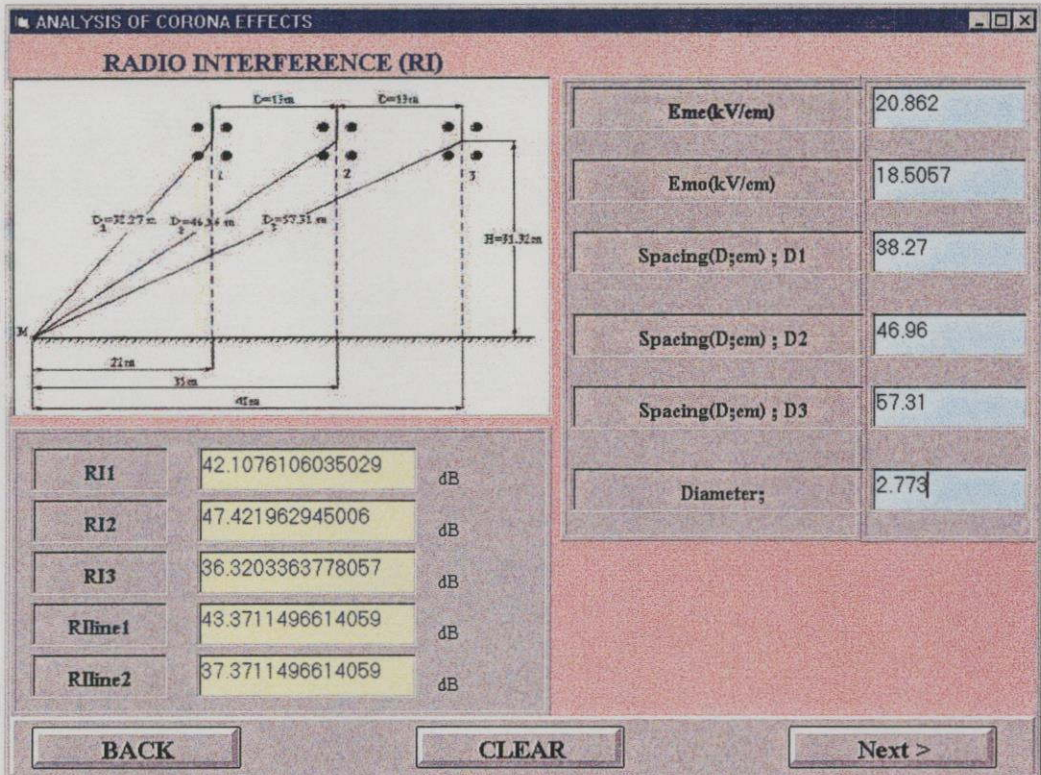
- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ



รูปที่ 5.27 หน้าจอการคำนวณหา Audible Noise ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสา ชนิด  $SL 0^\circ$  Suspension

#### ประกอบด้วย

- ไตเติลบาร์ : การคำนวณหา Audible Noise ในสภาพอากาศแปรปรวน
- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :
  1. แรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ สำหรับเฟสจุดศูนย์กลาง
  2. แรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ สำหรับเฟสภายนอก
  3. เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ
  4. ระยะห่างเฟสของตัวนำถึงจุด M เช่นระยะห่าง D1 D2 และ D3
  5. จำนวนตัวนำที่จัดวางลักษณะ Bundle ต่อเฟส
- ประมวลผลผลลัพธ์ :
  1. หา Audible Noise เฟสที่ 1
  2. หา Audible Noise เฟสที่ 2
  3. หา Audible Noise เฟสที่ 3
- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ
- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์
- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ



รูปที่ 5.28 หน้าจอการคำนวณหา Radio Interference ในสภาพอากาศแปรปรวนของเสา ชนิด  $SL 0^\circ$  Suspension

#### ประกอบด้วย

- ไตเคิลบาร์ : การคำนวณหา Radio Interference ในสภาพอากาศแปรปรวน

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. แรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ สำหรับเฟสจุดศูนย์กลาง
2. แรงดันเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ สำหรับเฟสภายนอก
3. เส้นผ่าศูนย์กลางของตัวนำ
4. ระยะห่างเฟสของตัวนำถึงจุด M เช่น ระยะห่าง D1 D2 และ D3

- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. หา Radio Interference เฟสที่ 1
2. หา Radio Interference เฟสที่ 2
3. หา Radio Interference เฟสที่ 3

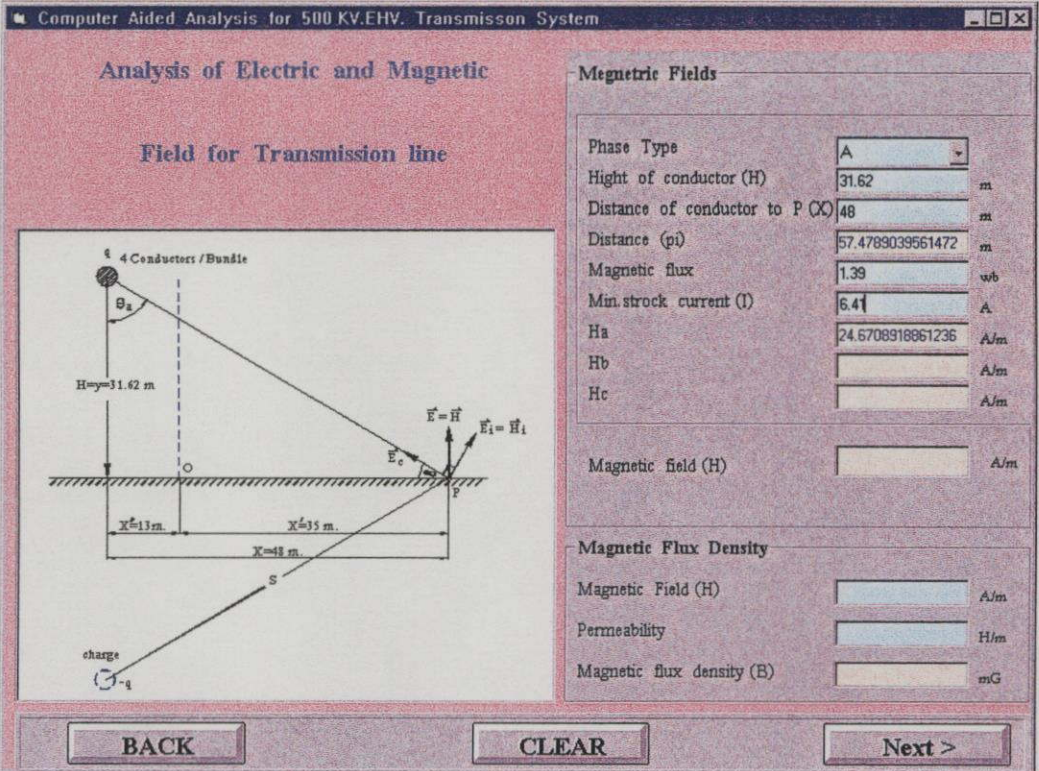
- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

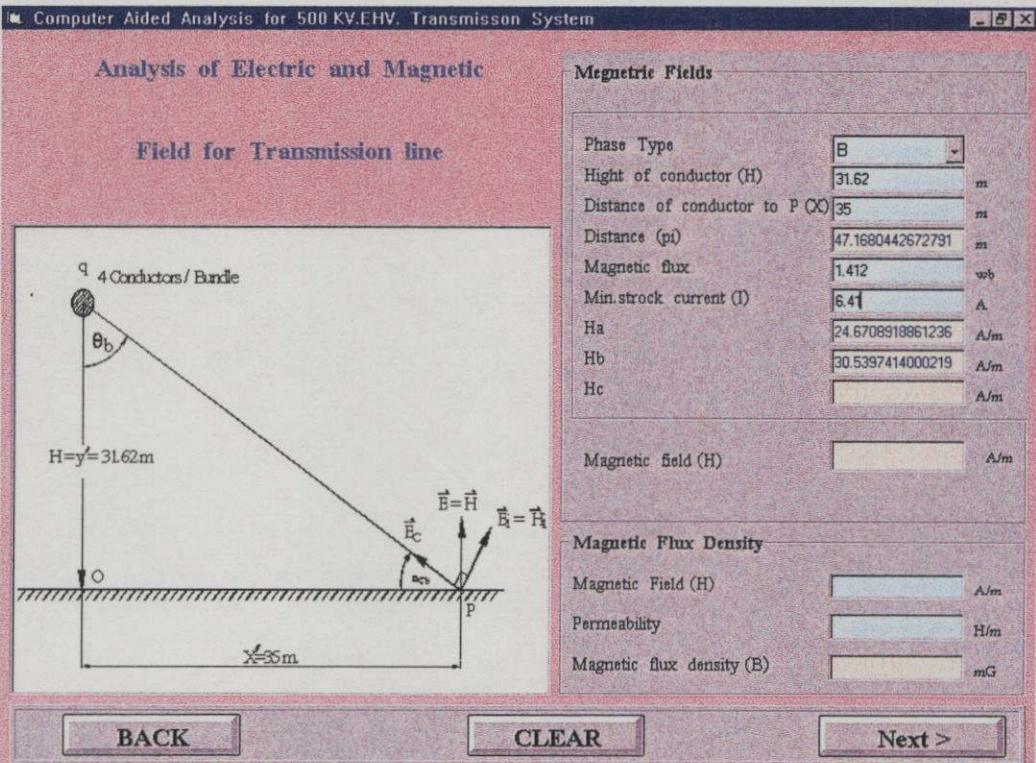
- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

ตารางที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์การเกิดโคโรนาเปรียบเทียบกับผลของโปรแกรม สำหรับสายส่งแรงสูง  
ชนิด  $SL\ 0^\circ$  Suspension

ผลที่ได้จาก	ผลการวิเคราะห์	ผลของโปรแกรม
- <u>FAIR WEATHER</u>		
Corona loss ( $P_c$ : kw/km)	35.619	35.19
- <u>FOUL WEATHER</u>		
Corona loss in rain ( $P_{cr}$ : kw/km)	47.63	47.634
Current loss in rain ( $I_{cr}$ : A/km)	0.165	0.165
Corona loss in frost ( $P_{cs}$ : kw/km)	22.099	22.099
Current loss in frost ( $I_{cs}$ : A/km)	0.0765	0.0765
Audible Noise (AN: dB/ $1\ \mu V$ /m)	52.84	53.161
Radio Noise 1 (RI: dB/ $1\ \mu V$ /m)	43.26	43.37
Radio Noise 2 (RI: dB/ $1\ \mu V$ /m)	37.36	37.37



รูปที่ 5.29 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fieldsและ Magnetic Flux Density ของเฟส A ที่ระยะจุด P 48 เมตร ,ความสูงเสา 31.62 เมตร ของเสา ชนิด SL 0° Suspension



รูปที่ 5.30 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fieldsและ Magnetic Flux Density ของเฟส B ที่ระยะจุด P 35 เมตร ,ความสูงเสา 31.62 เมตร ของเสา ชนิด SL 0° Suspension

Computer Aided Analysis for 500 KV.EHV. Transmisson System

### Analysis of Electric and Magnetic

#### Field for Transmission line

#### Magnetic Fields

Phase Type	C
Height of conductor (H)	31.62 m
Distance of conductor to P (X)	22 m
Distance (pi)	38.5204413266515 m
Magnetic flux	1.391 wb
Min.strook current (I)	6.41 A
Ha	24.6708918861236 A/m
Hb	30.5397414000219 A/m
Hc	36.8395573988425 A/m
Magnetic field (H)	92.050190684988 A/m

#### Magnetic Flux Density

Magnetic Field (H)	92.0501 A/m
Permeability	.000001256636 H/m
Magnetic flux density (B)	115.6734694636 mG

BACK CLEAR Next >

รูปที่ 5.31 หน้าจอการคำนวณ Magnetic Fields และ Magnetic Flux Density ของเฟส C ที่ระยะจุด P 22 เมตร , ความสูงเสา 31.62 เมตร ของเสา ชนิด  $SL 0^\circ$  Suspension

ประกอบด้วย

- ใต้เตลบาร์ : การคำนวณหา Magnetic Fields และ Magnetic Flux Density ของเฟส C

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเคิม :

1. ความสูงของเสาโครงเหล็กชนิด  $SLO^\circ$  Suspension
2. ระยะห่างของตัวนำที่จุด P บนพื้นดินใดๆ
3. ฟลักสนามแม่เหล็ก
4. กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนเสาโครงเหล็ก

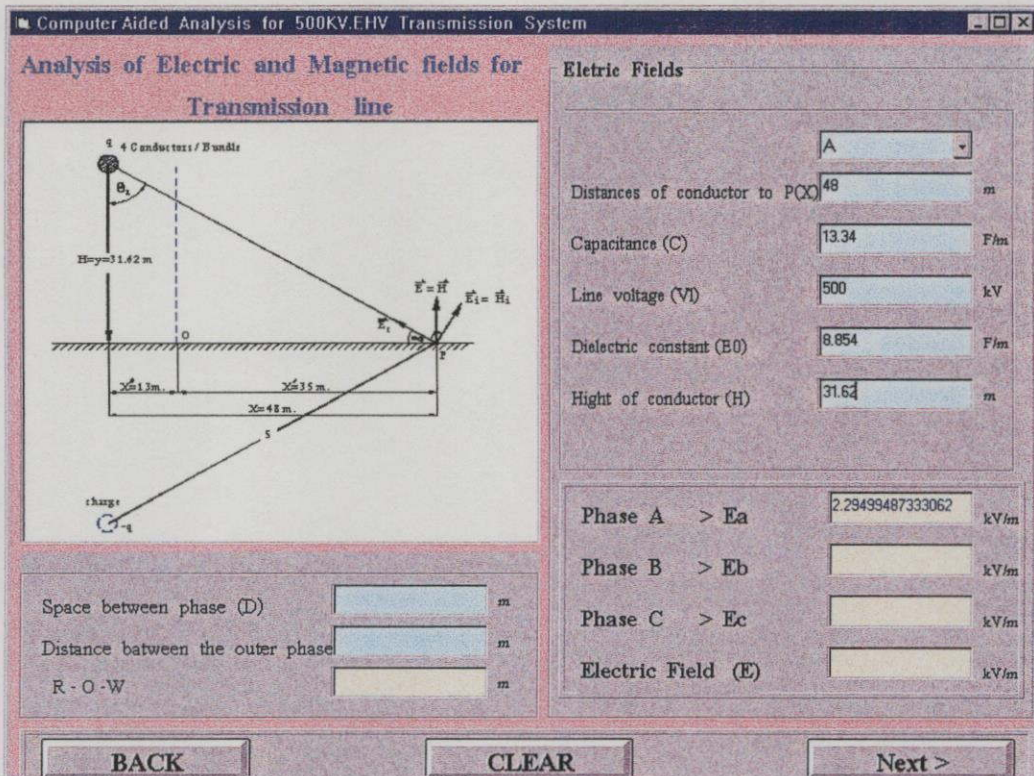
- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. สนามแม่เหล็ก (Magnetic Fields )
2. ความหนาแน่นของฟลักสนามแม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)

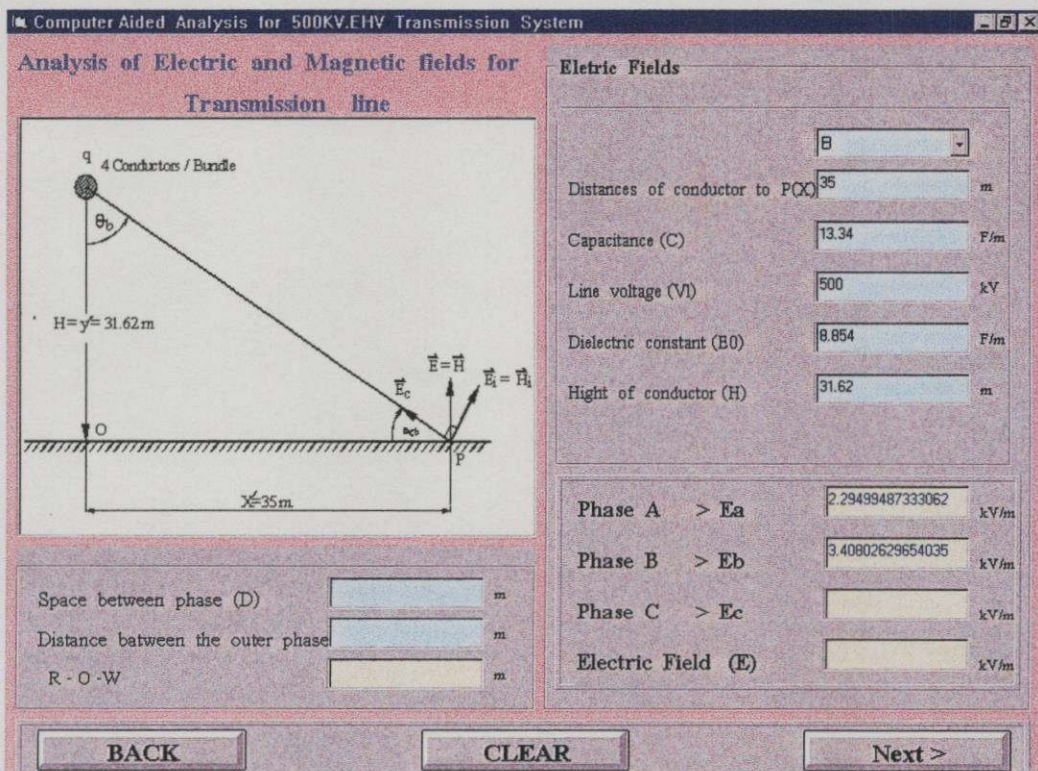
- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ



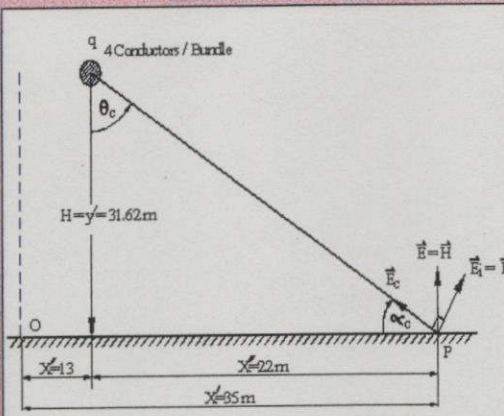
รูปที่ 5.32 หน้าจอการคำนวณ Electric Field ของเฟส A ที่ระยะจุด P 48 เมตร ,ความสูงเสา 31.62 เมตร ของเสาชนิด SL 0° Suspension



รูปที่ 5.33 หน้าจอการคำนวณ Electric Field ของเฟส B ที่ระยะจุด P 35 เมตร ,ความสูงเสา 31.62 เมตร ของเสาชนิด SL 0° Suspension

Computer Aided Analysis for 500KV.EHV Transmission System

### Analysis of Electric and Magnetic fields for Transmission line



4 Conductors / Bundle

$H = y = 31.62\text{m}$

$X = 13$        $X = 22\text{m}$        $X = 35\text{m}$

Space between phase (D)  m

Distance between the outer phase  m

R - O - W  m

#### Electric Fields

Distances of conductor to P(X)  m

Capacitance (C)  F/m

Line voltage (V)  kV

Dielectric constant (E0)  F/m

Height of conductor (H)  m

Phase A > Ea  kV/m

Phase B > Eb  kV/m

Phase C > Ec  kV/m

Electric Field (E)  kV/m

BACK      CLEAR      Next >

รูปที่ 5.34 หน้าจอการคำนวณ Electric Field ของเฟส C ที่ระยะจุด P 22 เมตร , ความสูงเสา 31.62 เมตร ของเสาชนิด  $SL\ 0^\circ$  Suspension

#### ประกอบด้วย

- ใต้เคิลบาร์ :      การคำนวณหา Electric Field ของเฟส C

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. ความสูงของเสาโครงเหล็กชนิด  $SL\ 0^\circ$  Suspension
2. ระยะห่างของตัวนำที่จุด P บนพื้นดินใดๆ
3. ค่าตัวเก็บประจุของตัวนำ
4. ค่า Dielectric Constant
5. ระยะห่างระหว่างเฟสของตัวนำ

- ประมวลผลลัพธ์ :

1. สนามไฟฟ้า (Electric Field)
2. ระยะแนวเขตเดินสายไฟฟ้า(R-O-W)

- ปุ่ม Black :      เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ
- ปุ่ม Clear :      เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์
- ปุ่ม Next :      เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

ตารางที่ 5.8 ผลการลดทอนระดับความเข้มสนามไฟฟ้าเมื่อเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด  
SL 0° Suspension

ความสูงของเสาจาก พื้นดินถึงตัวนำ (m)	$\bar{E}_a$ (kV/m)	$\bar{E}_b$ (kV/m)	$\bar{E}_c$ (kV/m)	$\bar{E}$ (kV/m)
31.62	2.192	3.255	4.88	10.327
33.62	2.242	3.269	4.77	10.281
35.62	2.283	3.271	4.654	10.209
37.62	2.317	3.263	4.536	10.116
39.62	2.342	3.247	4.418	10.007
41.62	2.362	3.223	4.301	9.886

ตารางที่ 5.9 ผลการลดทอนของระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างแนวจุด P ใดๆ เมื่อเพิ่มความสูง  
ของเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด SL 0° Suspension

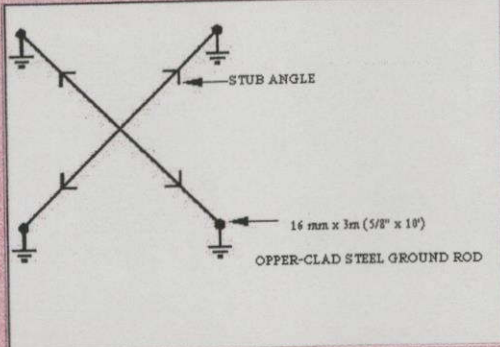
ความสูงของเสาจาก พื้นดินถึงตัวนำ (m)	$\bar{E}$ (kV/m)			
	P = 25 m	P = 30 m	P = 35 m	P = 40 m.
31.62	19.96	14.80	11.80	4.81
33.62	18.98	14.20	11.20	4.75
35.62	17.63	13.55	10.80	4.32
37.62	17.05	12.11	9.76	3.84
39.62	15.64	11.25	8.25	3.15

ตารางที่ 5.10 ผลการลดทอนของระดับความเข้มสนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นของฟลักแม่เหล็ก  
เมื่อเพิ่มความสูงของเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด SL 0° Suspension

ความสูงของเสาจาก พื้นดินถึงตัวนำ (m)	$\bar{H}_a$ (A/m)	$\bar{H}_b$ (A/m)	$\bar{H}_c$ (A/m)	$\bar{H}$ (A/m)	$\bar{B}$ (mG)
31.62	23.004	28.583	34.474	86.081	108.216
33.62	22.686	27.81	32.888	83.384	104.826
35.62	22.341	27.031	31.379	80.751	101.516
37.62	21.974	26.255	29.964	78.193	98.30
39.62	21.591	25.486	28.64	75.717	95.187
41.62	21.195	24.732	27.402	73.328	92.184

Computer Aided Analysis for 500 KV. EHV. Transmission System

### Calculation for Grounding System



STUB ANGLE

OPPER-CLAD STEEL GROUND ROD

16 mm x 3m (5/8" x 10')

Grounding Resistance (R)	14.907719781306	ohm
Ground rod Resistance (R <sub>g</sub> )	115.948749155116	ohm
Ground rod Spacing (M)	5	m
Counterpoise Resistance (R <sub>c</sub> )	10.7143388754559	ohm
Moisture of soil	130.471544715447	%
Estep 50kg	360.907301117614	volt
Btouch 50kg	213.263405205863	volt

**Input Data**

Soil Type	ทรายชั้น	
Number of Ground rod	4	แท่ง
Length of Ground rod (L)	3	m
Diameter of Ground rod (d)	0.016	m
Soil Resistivity (ρ)	200	ohm/m
Length of No.2 AWG (l)	60	m
Depth of Counterpoise (S)	0.5	m
Diameter of Counterpoise (d <sub>c</sub> )	0.00654	m
Time of current flow (ts)	0.5	sec
W <sub>w</sub>	802.4	kg
W <sub>s</sub>	615	kg

**Tower surge impedance**

Height of tower (H)	41	m
Basic of tower (r)	4	m
Tower surge impedance (Z <sub>t</sub> )	160.715271706632	ohm

**Tower Lightning voltage**

soil type	ทรายชั้น	
Lightning stroke current (I <sub>min</sub> )	6.41	kA
Grounding Resistance (R)	14.90	ohm
Tower surge impedance (Z <sub>t</sub> )	160.71	ohm
Tower lightning voltage (V <sub>t</sub> )	1125.69215	volt

BACK CLEAR Next >

รูปที่ 5.35 หน้าจอการคำนวณ Grounding Resistance, Ground rod Resistance, แรงดันช่วงก๊ว, และแรงดันสัมผัสเมื่อปัก Rod 4 แท่ง ของทรายชั้น สำหรับเสา SL 0° Suspension

#### ประกอบด้วย

- ใต้เคเบิลบาร์ : การคำนวณหา Grounding System ของสายส่งแรงสูง SL 0° Suspension

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก :

1. ชนิดของดิน คือ ทรายชั้น
2. จำนวนแท่ง Ground rod 4 แท่ง

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเติม :

1. ความสูงของเสาโครงเหล็กชนิด SL0 Suspension
2. ความต้านทานจำเพาะของดิน
3. ความยาวของสาย Counterpoise ขนาด No. 2 AWG.
4. ความลึกของการปักแท่ง Ground rod
5. เวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย
6. กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเสาโครงเหล็ก
7. น้ำหนักในดิน

8. น้ำหนักดินแห้ง
9. เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของสาย Counterpoise

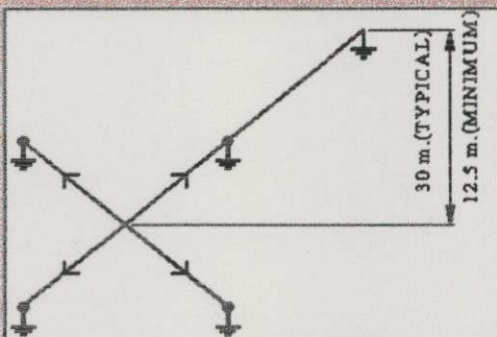
- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. เสรีจิมพีแคนซ์ของเสา
2. ความต้านทานของดิน
3. ความต้านทานของ Ground rod
4. ระยะห่างของ Ground rod
5. ความต้านทานของสาย Counterpoise
6. ความชื้นของดิน (%)
7. แรงดันช่วงก๊าว
8. แรงดันสัมผัส
9. กระแสฟ้าผ่านบนเสาโครงเหล็ก

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ
- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์
- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าจอถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

Computer Aided Analysis for 500 KV EHV Transmission System

Calculation for Grounding System



Input Data	
Soil Type	ทรายชั้น
Number of Ground rod	5 แห่ง
Length of Ground rod (L)	3 m
Diameter of Ground rod (d)	0.016 m
Soil Resistivity ( $\rho$ )	200 ohm/m
Length of No.2 AWG ( $l$ )	60 m
Depth of Counterpoise ( $S$ )	0.5 m
Diameter of Counterpoise ( $d_c$ )	0.00654 m
Time of current flow ( $t_s$ )	0.5 sec
$W_w$	802.4 kg
$W_s$	615 kg

Tower surge impedance	
Height of tower (H)	41 m
Basic of tower (r)	4 m
Tower surge impedance ( $Z_t$ )	160.715271706632 ohm

Tower Lightning voltage	
soil type	ทรายชั้น
Lightning stroke current ( $I_{lin}$ )	6.41 kA
Grounding Resistance (R)	11.926 ohm
Tower surge impedance ( $Z_t$ )	160.715 ohm
Tower lightning voltage (Vt)	1106.62881 volt

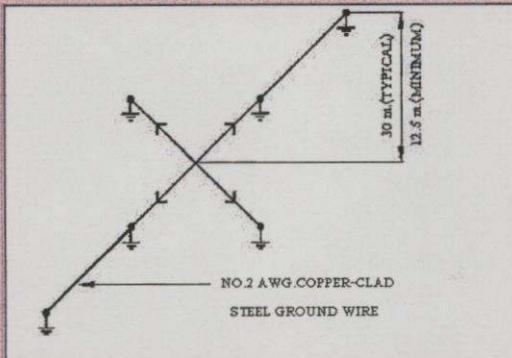
Grounding Resistance (R)	11.9261758290447	ohm
Ground rod Resistance ( $R_g$ )	115.949749195116	ohm
Ground rod Spacing (M)	6	m
Counterpoise Resistance ( $R_c$ )	10.7143388754559	ohm
Moisture of soil	130.471544715447	%
Estep 50kg	360.907301117614	volt
Btouch 50kg	213.263405205863	volt

BACK CLEAR Next >

รูปที่ 5.36 หน้าจอการคำนวณ Grounding Resistance, Ground rod Resistance, แรงดันช่วงก๊าว, และแรงดันสัมผัสเมื่อปัก Rod 5 แห่ง ของทรายชั้น สำหรับเสา  $SL^0$  Suspension

Computer Aided Analysis for 500 KV. EHV. Transmission System

### Calculation for Grounding System



Input Data		
Soil Type	ทรายชั้น	
Number of Ground rod	6	แท่ง
Length of Ground rod (L)	3	m
Diameter of Ground rod (d)	0.016	m
Soil Resistivity ( $\rho$ )	200	ohm/m
Length of No.2 AWG (l)	60	m
Depth of Counterpoise (S)	0.5	m
Diameter of Counterpoise (de)	0.00654	m
Time of current flow (ts)	0.5	sec
Ww	802.4	kg
Ws	614	kg

Tower surge impedance		
Height of tower (H)	41	m
Basic of tower (r)	4	m
Tower surge impedance (Zt)	160.715271706632	ohm

Tower Lightning voltage		
soil type	ทรายชั้น	
Lightning stroke current (Imin)	6.41	kA
Grounding Resistance (R)	9.958	ohm
Tower surge impedance (Zt)	160.715	ohm
Tower lightning voltage (Vt)	1094.01393	volt

Grounding Resistance (R)	9.95835681391236	ohm
Ground rod Resistance (Rg)	115.948749155116	ohm
Ground rod Spacing (M)	6	m
Counterpoise Resistance (Rc)	10.7143388754559	ohm
Moisture of soil	130.471544715447	%
Estep 50kg	360.907301117614	volt
Btouch 50kg	213.263405205863	volt

BACK CLEAR Next >

รูปที่ 5.37 หน้าจอการคำนวณ Grounding Resistance, Ground rod Resistance, แรงดันช่วงก๊าว, และแรงดันสัมผัสเมื่อปัก Rod 6 แท่ง ของทรายชั้น สำหรับเสา SL 0° Suspension

ประกอบด้วย

- ใต้เคิลบาร์ : การคำนวณหา Grounding System ของสายส่งแรงสูง SL 0° Suspension

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเลือก :

1. ชนิดของดิน คือ ทรายชั้น
2. จำนวนแท่ง Ground rod 6 แท่ง

- ข้อมูลที่ผู้ใช้ต้องเดิม :

1. ความสูงของเสาโครงเหล็กชนิด SL0 Suspension
2. ความต้านทานจำเพาะของดิน
3. ความยาวของสาย Counterpoise ขนาด No. 2 AWG.
4. ความลึกของการปักแท่ง Ground rod
5. เวลาที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย
6. กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเสาโครงเหล็ก
7. น้ำหนักในดิน
8. น้ำหนักดินแห้ง

9. เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของสาย Counterpoise

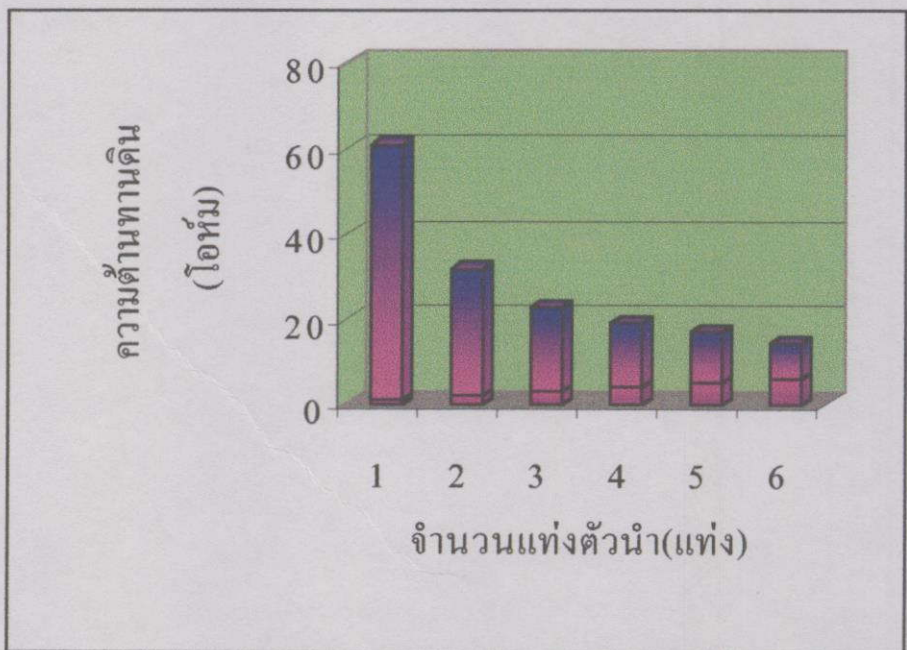
- ประมวลผลผลลัพธ์ :

1. เสรีจิมพีแดนซ์ของเสา
2. ความต้านทานของดิน
3. ความต้านทานของ Ground rod
4. ระยะห่างของ Ground rod
5. ความต้านทานของสาย Counterpoise
6. ความชื้นของดิน (%)
7. แรงดันช่วงก้าว
8. แรงดันสัมผัส
9. กระแสไฟฟ้าบนเสาโครงเหล็ก

- ปุ่ม Black : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการย้อนกลับหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ

- ปุ่ม Clear : เมื่อใช้เมาส์คลิกที่ปุ่มนี้จะเป็นการ Clear ข้อมูลที่ป้อนค่าและประมวลผลลัพธ์

- ปุ่ม Next : เมื่อผู้ใช้ต้องการเปิดหน้าถัดไปของโปรแกรมคำนวณ



รูปที่ 5.38 แสดงกราฟแท่งของค่าความต้านทานของดินลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนแท่ง Ground rod ของทรายเป็น

## บทที่ 6

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 6.1 สรุปผลการวิจัย

ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ระบบสายส่งแรงสูง 500 kV ที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถช่วยวิเคราะห์ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟส วงจรเดี่ยว (Single Circuit) และวงจรคู่ (Double Circuit) โดยอ้างอิงจากข้อมูลมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (EGAT) ตามโครงการศึกษาร่วมกับบริษัทที่ปรึกษา LEMCO Engineers (International), Inc., แห่งสหรัฐอเมริกา และมาตรฐานแต่ละชนิดของอุปกรณ์ที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป 2 มาตรฐานคือ มาตรฐาน ASTM และมาตรฐาน IEC ซึ่งยกเว้นกรณีลูกถ้วยที่ใช้มาตรฐาน ANSI เท่านั้น สำหรับเสาโครงเหล็กที่ส่งจ่ายในระบบ 500 kV จะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้ เสาชนิด Suspension เป็นเสาที่มีไว้เพื่อแขวนสาย เสาชนิด Tension เป็นเสาที่มีไว้เพื่อดึงสาย และชนิด Transpose เป็นเสาที่มีไว้เพื่อ transpose ของสาย จากผลการวิจัยในการวิเคราะห์ของระบบป้องกันฟ้าผ่า เพื่อมิให้ฟ้าผ่าลงสู่สายเฟสโดยใช้สายดินที่พาดอยู่เหนือสายเฟส เป็นตัวนำการไหลของประจุจากฟ้าผ่าลงสู่ดิน จะช่วยให้แรงดันเกินไม่เป็นอันตรายต่อระบบเพราะมีขนาดต่ำ และพิจารณาความเหมาะสมของค่ามุมซิดด์ ( $\theta_S$ ) จะต้องลดโค้ง  $\theta_S$  ให้สั้นลงหรือเป็นศูนย์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับมุม  $\theta_S$  และระยะ  $r_S$  ซึ่งเป็นระยะที่ขึ้นกับขนาดของกระแสฟ้าผ่า ( $I$ ) ถ้ากระแสฟ้าผ่ามากขึ้นระยะ  $r_S$  จะยิ่งยาวมากขึ้น ถ้าฟ้าผ่าเข้ามาสู่ส่วนโค้ง AB ฟ้าผ่าจะกระโดดข้ามระยะโคมดีฟ้าผ่านี้ ( $r_S$ ) ไปยังสายดิน และทำให้เกิดแรงดันเกินฟ้าผ่าที่ยอดเสา โดยมีบางค่าที่อาจทำให้เกิดแรงดันคร่อมลูกถ้วยเกินกว่าค่า  $V_{CFO}$  จึงทำให้เกิดการแลบข้ามกลับ แต่ถ้าฟ้าผ่าเข้ามาสู่ส่วนโค้ง BC จะกระโดดข้ามไปยังสายเฟสซึ่งเป็นการเกิดซิดด์ล้มเหลว ส่วนโค้ง BC นี้จะเรียกว่า “exposed arc” ส่วนโค้งนี้จะแคบลงถ้าระยะ  $r_S$  หรือกระแสฟ้าผ่าสูงขึ้น ระยะ  $X_S$  แปรตามค่ากระแสฟ้าผ่า ดังนั้นถ้ากระแสฟ้าผ่ายิ่งสูง exposed arc และระยะ  $X_S$  ยิ่งสั้นลงหรือหมดไป ถ้ากระแสฟ้าผ่าค่าหนึ่งที่ exposed arc จะหมดไปเป็นกระแสฟ้าผ่าที่ไม่ทำให้เกิดการแลบข้ามลูกถ้วยได้ ระบบซิดด์นี้จึงมีประสิทธิภาพที่ดี การติดตั้งสายซิดด์มิให้ฟ้าผ่าที่มีขนาดกระแสสูง ๆ ฟ้าผ่าลงสู่สายเฟส ในการออกแบบสายซิดด์ต้องคำนึงถึงมุมซิดด์ที่พอเหมาะ และลดค่าความต้านทานของดินให้ต่ำลง 10 โอห์ม เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันเกินคร่อมลูกถ้วยสูงและทำให้เกิดแลบข้ามลูกถ้วยไปยังสายเฟส ดังนั้นถ้ามุมซิดด์ที่วิเคราะห์ได้มีค่ามากกว่าค่ามุมซิดด์ของระบบที่ใช้จริงจะไม่มีเกิดการเกิดซิดด์ล้มเหลว

ในระบบสายส่งแรงสูงจะเกิดการสูญเสียกำลังไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่าการเกิด Corona จะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าบนผิวของตัวนำมีค่าเกินค่า breakdown strength ของอากาศ สำหรับการเกิด Corona จะมากหรือน้อยนั้นจะขึ้นอยู่กับ ผิวของตัวนำ ความหนาแน่นของอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม อุณหภูมิ โดยการเพิ่มความหนาแน่นอากาศ ความชื้น และการเพิ่มขนาดของสายส่งให้

ใหญ่ขึ้นนั้น จะทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของลวดตัวนำลดลง ดังนั้นจึงช่วยลดการสูญเสีย Corona ให้น้อยลง การลดความสูญเสีย Corona ควรมีการจัดวางสายส่งเป็นแบบ 4 บันเดิล(bundle) การส่งกำลังไฟฟ้าด้วยลวดตัวนำแบบบันเดิล ทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของลวดตัวนำลดลงกว่าเมื่อส่งด้วยลวดตัวนำเส้นเดียวสำหรับแต่ละเฟส ผลการวิเคราะห์พบว่าระดับของสัญญาณรบกวนวิทยุในแต่ละจุด เมื่อเกิดสภาวะตัวนำเปียกชื้นหลังฝนตกหรือมีน้ำค้างเกาะบนตัวนำ ค่าสัญญาณรบกวนวิทยุเพิ่มขึ้นประมาณ 17 dB เทียบกับ  $1 \mu V/m$  ( $L_{50}$  Foul Weather) และในสภาพอากาศฝนตกค่าสัญญาณรบกวนวิทยุจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 23 dB เทียบกับ  $1 \mu V/m$  ( $L_1$  Foul Weather) จากสภาพอากาศปกติ ( $L_{50}$  Fair Weather)

ผลการวิเคราะห์สรุปได้ว่าการลดทอนระดับความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะมีค่าลดลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้นของเสาไฟฟ้าแรงสูง ผลจากตารางที่ 5.4 เมื่อออกแบบเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด  $DL3^\circ$  วงจรคู่ที่มีความสูงเพิ่มขึ้นจาก 27.6 m ถึง 37.6 m ค่าระดับความเข้มสนามไฟฟ้า ( $E$ ) ทั้งเฟส A, B, C จะค่อยๆ ลดลง ผลตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นในบริเวณระยะปลอดภัยของแนวเขตเดินสายไฟ 30m และค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจะลดลงเมื่อระยะแนวเขตเดินสายไฟห่างออกไป 35 m ณ ความสูงเสาไฟฟ้าแรงสูง 35.6 m ค่า  $E$  ลดลง 16.20 kV/m ซึ่งจะส่งผลให้มีการหักล้างซึ่งกันและกันของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากวงจรที่ 1 และวงจรที่ 2 ทำให้  $E$  สูงสุดเกิดขึ้นบริเวณที่ตำแหน่งสายไฟฟ้าวางอยู่ การลดทอนความเข้มสนามแม่เหล็ก ( $H$ ) ของเสาไฟฟ้าแรงสูงชนิด  $DL3^\circ$  วงจรคู่ ที่ความสูงเพิ่มขึ้น 37.6 m ผลจากตารางที่ 5.6 ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะค่อยๆ ลดลงเป็น 72.92 A/m และความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ( $B$ ) ลดลงเป็น 91.68 mG ดังนั้นผลการจัดเรียงลำดับเฟสของวงจรที่แตกต่างกัน จะมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า  $E$  และ  $H$  เพื่อช่วยในการออกแบบสายส่งแรงสูงไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในบริเวณแนวสายส่ง

ผลจากการวิเคราะห์ระบบกราวด์ของสายส่งจะพบว่า ชนิดของดินเหนียวจะมีเม็ดดินที่ละเอียดมาก ความชื้นสูง ความอัดแน่นมาก จะมีความต้านทานของ Ground Rod 28.98 โอห์ม เมื่อเพิ่มจำนวนแท่ง Ground Rod 4 แท่งของขาเสาโครงเหล็กแต่ละต้นนั้น ค่าความต้านทานของดินจะลดต่ำลงประมาณ 3.72 โอห์ม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าดินร่วนปนทราย เพราะดินร่วนปนทรายมีเม็ดดินที่โตกว่า การอุ้มน้ำจะน้อย ความชื้นจะต่ำกว่าประมาณ 10.85% จะต้องเพิ่มจำนวนแท่ง Ground Rod 5 แท่ง จึงทำให้ค่าความต้านทานของดินลดลงประมาณ 8.94 โอห์ม และมีความต้านทานของ Ground Rod มากกว่าดินเหนียวถึง 86.96 โอห์ม ส่วนดินทรายชั้นจะมีเม็ดดินที่โต การอุ้มน้ำได้ไม่ดี ความชื้นของดินจะต่ำ จะต้องเพิ่มจำนวนแท่ง Ground Rod 6 แท่ง จึงทำให้ค่าความต้านทานของดินลดลงประมาณ 9.94 โอห์ม ความชื้นของดินจะมีผลต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินและค่าความต้านทานของดินคือ ถ้าความชื้นของดินมากจะทำให้ความต้านทานจำเพาะของดิน และความต้านทานของดินมีค่าต่ำ และพบว่าถ้าเลือกพื้นที่ในการติดตั้งเสาไฟฟ้าแรงสูงเป็นดินเหนียว จะมีค่า  $E_{step}$  และ  $E_{touch}$  น้อยกว่าดินร่วนปนทราย เพราะดินเหนียวสามารถปักแท่ง Ground Rod ที่มีความลึกได้มาก เนื้อดินละเอียด

สามารถยึดจับแท่ง Ground Rod ได้ดีกว่าดินร่วนปนทราย จึงช่วยทำให้  $E_{step}$  และ  $E_{touch}$  มีค่าลดลง และเพื่อป้องกันการเกิด Overvoltage ที่มีสาเหตุเนื่องมาจากฟ้าผ่า สามารถป้องกันมิให้ฟ้าผ่าถูกสาย Conductor โดยตรง ดังนั้นจึงสรุปจากผลวิเคราะห์ได้ว่าชนิดของดิน ความชื้น ความลึก ความอัดแน่น จำนวนแท่ง Ground Rod ระยะห่างของแท่ง Ground Rod และความต้านทานจำเพาะของดิน จะมีผลกระทบต่อค่าความต้านทานของดิน

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

6.2.1 แนวทางในการพัฒนาซอฟต์แวร์นี้ สามารถทำการวิเคราะห์ถึงการเกิดแลบข้ามกลับ (backflashover: BFO) ที่ถูกถ่ายไปยังสายเฟส และทำให้เกิดแรงดันเกินขึ้นบนสายเฟส การคำนวณหาค่า BFO อาจต้องอาศัยวิธีทางสถิติในการวิเคราะห์ เช่น วิธีของมอนติคาโลซึ่งเป็นวิธีการซิมูเลท (Simulation) ด้วยการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามสภาพที่น่าเป็นไปได้ เช่น จะต้องลดค่าความต้านทานของดิน  $R_f$  ให้น้อยๆ จะทำให้โอกาสที่จะเกิดแลบข้ามกลับน้อยลง

6.2.2 สามารถวิเคราะห์การเกิดทรานเซียนต์แม่เหล็กไฟฟ้า และการเกิดแรงดันเกินสวิตชิงในระบบสายส่งแรงสูง 500 kV ซึ่งจะวิเคราะห์ได้ทางโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ โดยการนำโปรแกรม EMTP ที่วิเคราะห์ทางโดเมนของเวลา เพื่อศึกษาแรงดันเกินสวิตชิงในกรณีต่างๆ สำหรับเลือกอุปกรณ์ป้องกัน และเป็นประโยชน์ในการออกแบบสายส่งแรงสูง 500 kV ต่อไป

6.2.3 การวิเคราะห์หาอัตราการเกิดชัตดาวน์(SFO)และอัตราการเกิดแลบข้ามกลับ (BFO) เป็นค่าสถิติที่อาศัยข้อมูลค่าเฉลี่ยหรือค่าสูงสุด - ค่าต่ำสุดเป็นเกณฑ์ในการหา และควรเป็นค่าที่เชื่อถือได้ เพื่อให้การหาค่าอัตราไฟฟ้าดับ (Outage Rate : OR) เนื่องจากฟ้าผ่ามีความแม่นยำยิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ควรต้องใช้ข้อมูลที่สุ่มขึ้น ต้องอาศัยประสบการณ์และใช้ในการประมาณค่า

## บรรณานุกรม

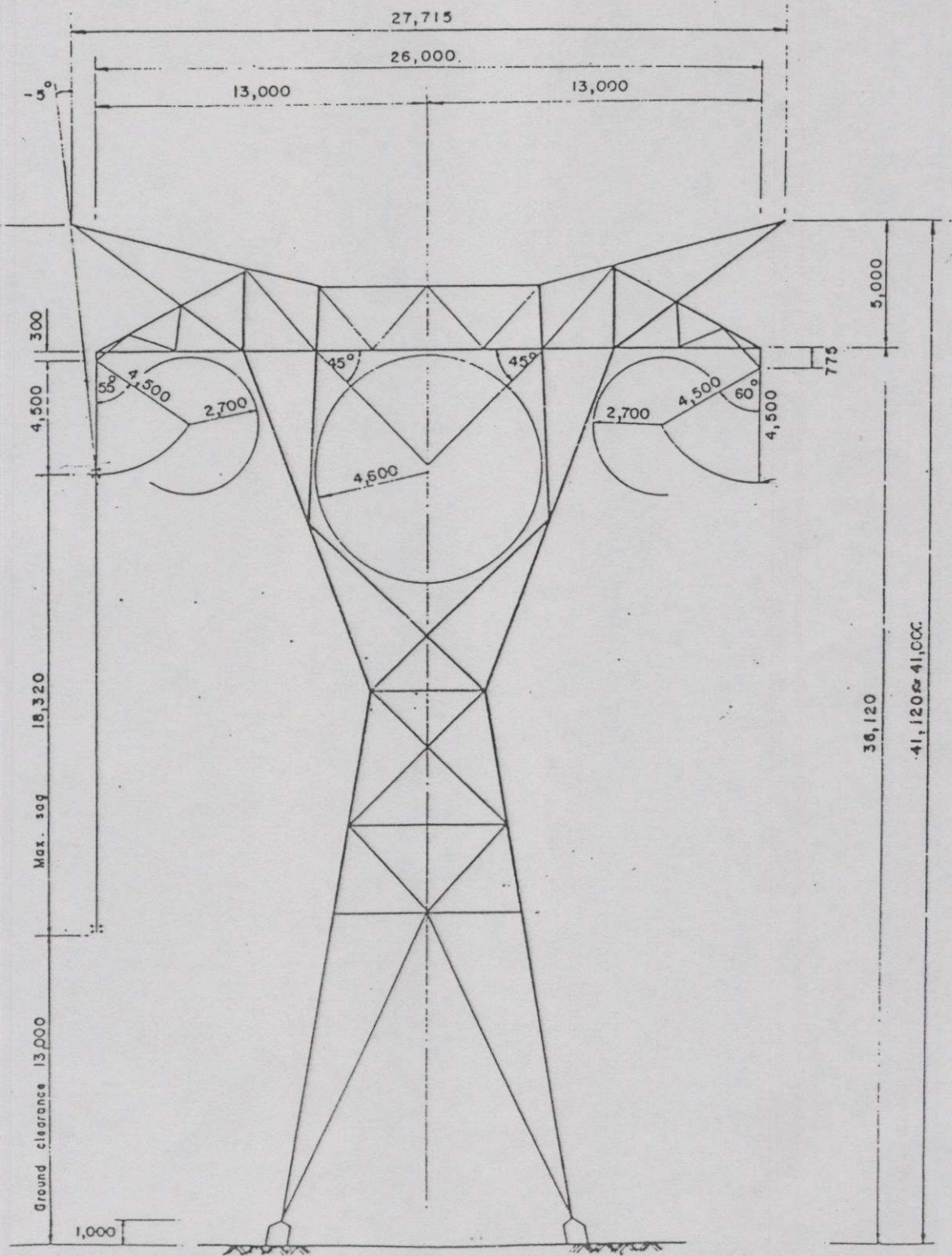
- [1] A.J. Phillips,D.J. Childs and H.M.Schneider, “ Water Drop Corona Effects on Full-Scale 500 kV Non-Ceramic Insulators ”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.14, No.1 January, 1999.
- [2] C. J.Blattner,Senior Member, “Study of Driven Ground Rods and Four Point Soil Resistivity Test” IEEE TPAS., VOL.PAS.- 101 No.,8 August, 1982.
- [3] Brown, G.W. “ Lightning Performance-I and II.” Papers F-77-015-1 and F-77-016-9, IEEE Winter Power Meeting, New York, N.Y., January 30 - February 4 , 1977.
- [4] Electric Power Research Institute, “Transmission Line Reference Book : 345 kV Above ” ,2 nd ed. EPRI, Palo Alto, California, 1982.
- [5] Electricity Generating Authority of Thailand, “ Mae Moh-Bangkok 500 kV. Project Executive Summary & Transmission Design ” Bangkok, May, 1982.
- [6] Electricity Generating Authority of Thailand, “ Contract Documents Vol. II of III Construction of 500 kV.Transmission Line Mae Moh - Tha Tako ”, Bangkok, September, 1983.
- [7] Rakosh Das and Begamudre,“Extra High Voltage AC.Transmission Line Engineering”,John wiley & sons, Inc., New York., 1986.
- [8] S.S. Murthy , “ Transmission Line Structures ”,McGraw -Hill Book Co Pte Ltd, Singapore, 1990.
- [9] Thione, L. “ Partial Discharge and Corona Effect in Electric Power System ” , Italy, 1981.
- [10] Turan Gonen, “ Electrical Power Transmission System Engineering ” Sacramanto, California: John Wiley & Sons, Inc., 1988.
- [11] William D. Stevenson J.R. , “ Element of Power System Analysis ”, 4<sup>th</sup> North Carolina, McGraw -Hill Book Co Pte Ltd , 1982.
- [12] Yilu Liu , “ Calculation of Electric Field and Audible Noise from Transmission Lines with Non-Parallel Conductors ”,IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.11 No.3 July, 1996.
- [13] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย(EGAT) , “ กฟผ. แม่เมาะ ”, ฝ่ายประชาสัมพันธ์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย นนทบุรี , สิงหาคม 2540.
- [14] ชานี ใจประดิษฐ์ธรรม ,ศุติ บรรจงจิตร และมณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์,“ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การเกิดโคโรนาบนสายส่งแรงสูง 500 kV ”,การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ,หน้า 364-367, 12-13 พฤศจิกายน 2541.
- [15] พิทักษ์ ปิ่นอนงค์ และศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, “ การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของสายส่งระยะไกล ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 , ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , หน้า 336-339 , 12-13 พฤศจิกายน 2541.

- [16] ดร. สุรพล ดำรงกิตติกุล, “วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง”, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, พิมพ์ครั้งที่ 1, มกราคม 2535.
- [17] รายงานวิจัยเรื่อง “การเปลี่ยนแปลงค่า Grounding Resistance ของสายส่ง”, รหัสวิจัยเลขที่ 30-50, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, ธันวาคม 2533.
- [18] สุวัฒน์ คลังเปรมจิตต์ และอภิชัย บุรณตระกูล, “ระบบสายส่งแรงดัน 500 กิโลโวลต์”, โครงการงานวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2538.
- [19] ศุภชัย ไพบูลย์, “การวิเคราะห์และการวัดสัญญาณวิทยุที่เกิดจากระบบส่งไฟฟ้าแรงสูง 230-1200 เคลวี”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2535.
- [20] ตำรวย สังข์สะอาด, “ผลของพลังอำนาจไฟฟ้าแรงสูง”, วารสารวิศวกรรมสาร ธันวาคม 2542 หน้า 117-123
- [21] ตำรวย สังข์สะอาด, “เทคโนโลยีการฉนวนในระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงสูง”, เอกสารประกอบการบรรยายทางวิชาการ วันที่ 2-30 กันยายน 2541 ณ ห้องประชุมอาคารปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง, ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [22] สุนทร ฝ่ายหมื่นไวย์ และสิทธิโชค กิตติรักษ์ตระกูล, “การจัดบัสและการป้องกันในสถานีไฟฟ้าย่อย 500 kV แบบใช้ก๊าซเป็นฉนวนชนิดภายในอาคาร”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2541.
- [23] อนันต์ เจนเกรียงไกร, “การวิเคราะห์ตัวนำล่อฟ้าในระบบป้องกันฟ้าผ่า”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2538.
- [24] อลงกรณ์ พรหมสวาสดี, “การศึกษาและการออกแบบระบบต่อลงดิน”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2535.

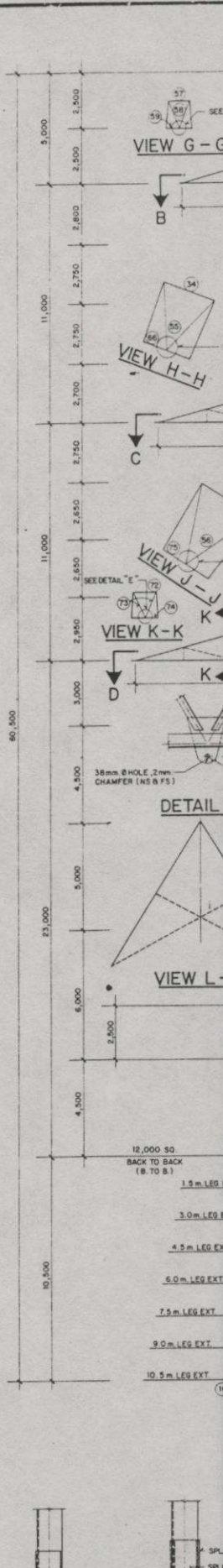
ภาคผนวก ก.

แบบโครงสร้างลักษณะของเสาโครงเหล็กแต่ละชนิด

TANGENT SUSPENSION TOWER CONFIGURATION



TANGENT SUSPENSION TOWER CONFIGURATION



NG CONDITIONS SEE DWG.  
 SEE DWG. MM - ENVL2-T-14.1  
 SHALL BE FROM CG. TO CG.  
 ITED.  
 SIGN DENOTES COMPRESSION  
 LL BE HIGH STRENGTH STEEL HAVING  
 TO ASTM A 441 OR ASTM A 572 GR 50  
 SHALL CONFORM TO ASTM A 36.  
 STM A 394. ALL BOLTS ON

T OF TOWER DANGER SIGNS,  
 IN ACCORDANCE WITH DWG.  
 ACCORDANCE WITH AMERICAN  
 SHALL BE DETAILED TO MINIMIZE  
 I  
 L SUBDIVIDE THE MEMBERS  
 AT THE LEG EXTENSION MAY  
 R TO THE BODY EXTENSION.  
 THAT IT IS COMPATIBLE  
 WITH ALL OTHER LENGTHS OF

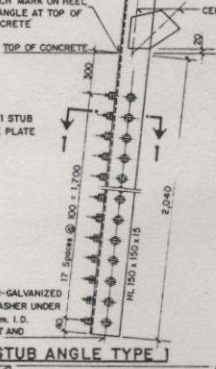
S DOUBLE SHEAR, DS,  
 ON SINGLE SHEAR AND  
 PLATES SHALL HAVE A  
 FICATIONS.  
 THEY SHALL BE MADE ON EACH  
 K  
 WING BRACKETS SHALL BE  
 TER PINS.

PL. 44.5 mm THICK x 373 SQ. & 588  
 WITH 64 mm DIA. HOLES FOR 4-57 mm  
 Ø & 449 ANCHOR RODS 1,630mm.  
 LONG

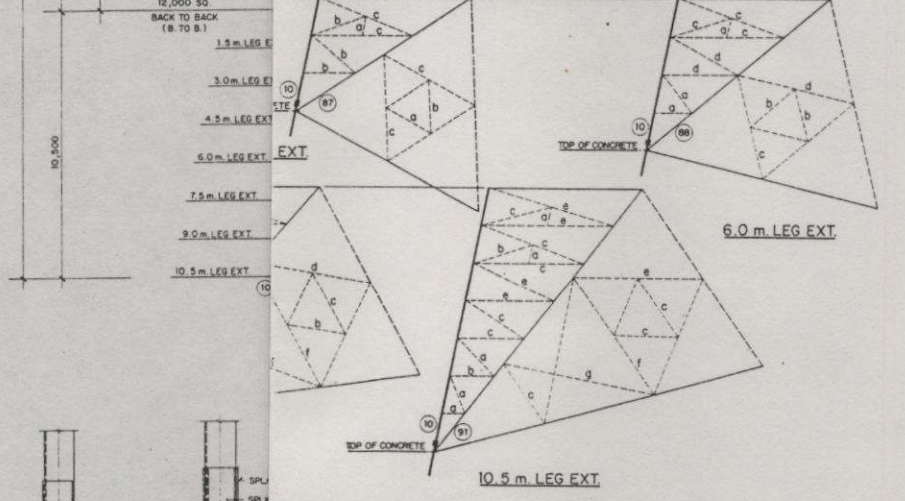
TOP OF CONCRETE FOR TYPE 1 STUB  
 ANGLE DETAIL = TOP OF BASE PLATE  
 FOR TYPE 2 DETAIL,  
 TOP OF CONCRETE TYPE 2  
 STUB ANGLE DETAIL.

18 HOLES - 17mm. Ø in EACH LEG FOR NON-GALVANIZED  
 16-A 307 BOLTS. 55 mm. LONG WITH 1 WASHER UNDER  
 HC HEAD - 6 mm. THICK x 28 mm. O.D. x 17 mm. L.D.  
 PROVIDE 2 5/8" d. HEX NUTS FOR EACH BOLT AND  
 TORQUE 1,000 kg.-cm. AT ASSEMBLY

MEMBER NO.	MAX. STRESS	SECTION	NO. BOLTS	MEMBER NO.	MAX. STRESS	SECTION	NO. BOLTS
1	-24.85	HL 75 x 75 x 9	50S	46	-18.14	HL 130 x 130 x 8	9
2	+13.24	HL 90 x 90 x 8	70S	47	-0.00	L 70 x 70 x 6	4
3	+26.96	HL 110 x 110 x 8	90S	48	+15.31	HL 120 x 120 x 8	8
4	-46.14	HL 130 x 130 x 10	110S	49	-37.58	L 50 x 50 x 5	1
5	+31.40	HL 130 x 130 x 11	120S	50	+16.42	L 45 x 45 x 5	2
6	+56.84	HL 150 x 150 x 12	130S	51	-9.17	L 70 x 70 x 5	4
7	+67.80	HL 150 x 150 x 12	130S	52	+10.30	L 90 x 90 x 6	3
8	-98.72	HL 150 x 150 x 12	130S	53	+7.46	L 100 x 100 x 6	3
9	+73.69	HL 150 x 150 x 12	130S	54	-0.85	L 70 x 70 x 5	2
10	-105.02	HL 150 x 150 x 12	130S	55	+6.63	L 90 x 90 x 6	3
11	+74.43	HL 150 x 150 x 12	140S	56	+10.74	L 100 x 100 x 6	3
12	-97.48	L 50 x 50 x 5	2	57	-9.59	L 45 x 45 x 5	1
13	+75.32	L 75 x 75 x 5	4	58	-0.01	L 45 x 45 x 5	3
14	-20.24	L 100 x 100 x 7	5	59	+0.08	L 45 x 45 x 5	1
15	+18.47	HL 90 x 90 x 6	5	60	-5.58	L 50 x 50 x 6	2
16	-17.84	L100 x 100 x 6	5	61	+10.56	L 60 x 60 x 5	4
17	+16.18	L 90 x 90 x 6	5	62	+0.00	L 90 x 90 x 6	2
18	+18.69	L 100 x 100 x 7	5	63	+0.06	L 45 x 45 x 5	1
19	+9.74	L 100 x 100 x 6	6	64	-0.03	L 45 x 45 x 5	3
20	-18.33	HL 100 x 100 x 6	5	65	+0.02	L 45 x 45 x 5	1
21	+17.40	L 110 x 110 x 8	5	66	+0.02	L 45 x 45 x 5	1
22	-30.14	L 110 x 110 x 8	4	67	+0.01	L 60 x 60 x 5	3
23	+19.61	L 110 x 110 x 8	3	68	-2.54	L 50 x 50 x 6	2
24	-11.89	L 110 x 110 x 8	3	69	+6.58	L 60 x 60 x 5	4
25	+9.60	L 120 x 120 x 8	2	70	+10.74	L 60 x 60 x 5	4
26	-2.82	L 150 x 150 x 10	2	71	-3.50	L 90 x 90 x 6	2
27	+6.97	L 75 x 75 x 5	2	72	+0.00	L 45 x 45 x 5	2
28	-6.04	L 60 x 60 x 5	1	73	+0.63	L 45 x 45 x 5	1
29	+1.23	L 60 x 60 x 5	1	74	+0.82	L 45 x 45 x 5	3
30	+0.54	L 60 x 60 x 5	3	75	-0.28	L 45 x 45 x 5	1
31	-0.04	L 60 x 60 x 5	3	76	+0.01	L 45 x 45 x 5	1
32	+1.83	L 60 x 60 x 5	1	77	-0.01	L 70 x 70 x 5	3
33	-28.03	HL 100 x 100 x 7	6	78	+8.86	L 50 x 50 x 6	2
34	+13.65	L 50 x 50 x 5	5	79	+0.00	L 60 x 60 x 5	4
35	-3.60	L 50 x 50 x 5	5	80	+0.00	L 90 x 90 x 6	2
36	+1.51	L 75 x 75 x 5	5	81	+0.00	L 80 x 80 x 6	2
37	-3.38	L 70 x 70 x 5	2	82	+0.00	L 150 x 90 x 9	2
38	+3.85	L 110 x 110 x 8	5	83	+0.00	L 100 x 100 x 6	3
39	-8.88	L 70 x 70 x 5	2	84	+6.33	L 110 x 110 x 8	2
40	+2.58	L 75 x 75 x 5	5	85	-5.33	L 90 x 90 x 6	3
41	-3.72	L 80 x 80 x 6	2	86	+8.20	L 100 x 100 x 6	3
42	+1.80	L 90 x 90 x 6	2	87	-7.73	L 100 x 100 x 7	3
43	-2.24	L 75 x 75 x 5	2	88	+5.37	L 90 x 90 x 6	3
44	+0.00	L 65 x 65 x 6	4	89	+5.34	L 90 x 90 x 6	3
45	+14.47	L 65 x 65 x 6	4	90	+7.23	L 80 x 80 x 6	3
				91	-7.19	L 90 x 90 x 6	3
					+7.21	L 100 x 100 x 6	3



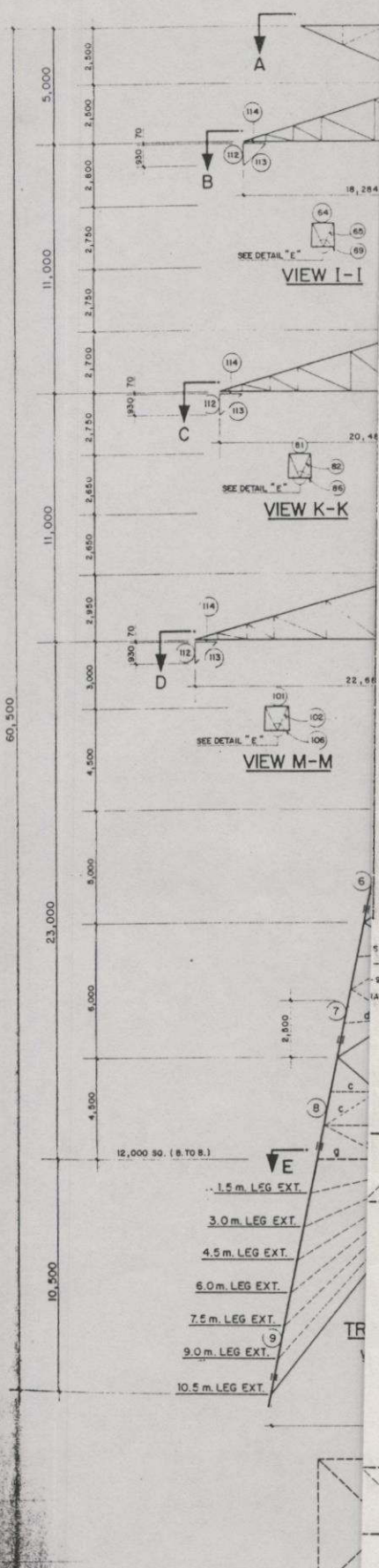
REDUNDANT MEMBERS			
a	L 45 x 45 x 5	1	
b	L 50 x 50 x 5	1	
c	L 60 x 60 x 5	1	
d	L 65 x 65 x 5	1	
e	L 70 x 70 x 5	1	
f	L 75 x 75 x 5	1	
g	L 80 x 80 x 6	1	
h	L 90 x 90 x 6	1	
i	L 100 x 100 x 6	2	
j	L 120 x 120 x 8	2	



ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND

500 KV TRANSMISSION SYSTEM PROJECT  
 DL LIGHT ANGLE SUSPENSION TOWER  
 STRUCTURAL DESIGN

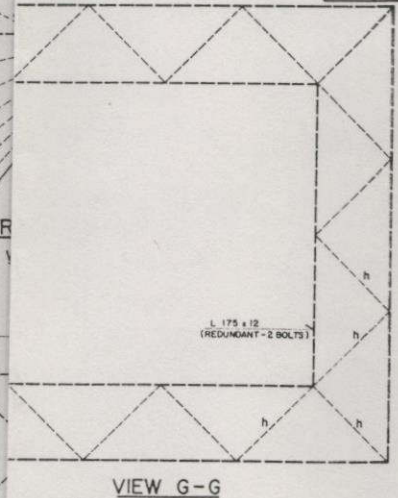
10.5m LEG EXT.



MEMBER	STRESS	SECTION	BOLTS	MEMBER	STRESS	SECTION	NO. BOLTS
42	- 4.57 + 4.05	L 80 x 6	2	83	- 0.60 + 1.94	2HL 130 x 10	2
43	- 1.21 + 3.32	L 50 x 5	1	84	- 3.99 + 3.94	HL 70 x 5	4
44	- 10.86 + 12.55	L 75 x 5	4	85	- 1.79 + 3.49	L 45 x 5	2
45	- 2.86 + 5.21	L 45 x 5	2	86	- 2.28 + 2.35	2L 45 x 5	2
46	- 11.17 + 8.06	L 75 x 6	3	87	- 2.74 + 5.47	L 50 x 5	2
47	- 11.52 + 8.47	L 90 x 6	3	88	- 0.44 + 1.37	L 50 x 5	1
48	- 4.15 + 5.80	L 90 x 6	2	89	- 0.75 + 2.24	L 45 x 5	1
49	- 3.28 + 0.00	L 60 x 5	2	90	- 1.93 + 6.81	L 60 x 5	4
50	- 0.00 + 35.77	HL 100 x 6	9	91	- 1.38 + 11.46	L 100 x 6	3
51	- 71.64 + 35.74	HL 130 x 10	15	92	- 5.86 + 6.47	L 45 x 5	2
52	- 0.00 + 34.75	HL 100 x 6	9	93	- 0.92 + 3.13	L 50 x 6	3
53	- 67.72 + 30.92	HL 130 x 9	14	94	- 2.48 + 5.25	L 45 x 5	2
54	- 0.00 + 35.03	HL 100 x 6	9	95	- 1.54 + 1.43	L 45 x 5	2
55	- 64.77 + 27.75	HL 130 x 9	13	96	- 0.53 + 0.21	L 45 x 5	1
56	- 5.66 + 0.47	L 45 x 5	2	97	- 0.43 + 2.20	L 100 x 6	3
57	- 0.90 + 10.76	L 50 x 6	3	98	- 0.83 + 4.79	L 45 x 5	2
58	- 2.46 + 0.25	L 45 x 5	2	99	- 0.76 + 1.90	L 90 x 6	2
59	- 0.34 + 3.32	L 45 x 5	2	100	- 0.51 + 4.21	L 90 x 6	2
60	- 1.52 + 0.22	L 45 x 5	1	101	- 3.85 + 0.90	L 45 x 5	2
61	- 11.19 + 2.13	L 100 x 6	3	102	- 0.90 + 4.43	L 45 x 5	3
62	- 0.81 + 4.78	L 50 x 5	2	103	- 0.90 + 3.01	2HL 130 x 10	2
63	- 5.65 + 0.96	L 90 x 6	2	104	- 0.60 + 2.28	L 60 x 5	4
64	- 3.29 + 0.00	L 45 x 5	2	105	- 1.70 + 3.40	L 45 x 5	2
65	- 0.00 + 9.22	L 45 x 5	3	106	- 0.28 + 2.32	2L 45 x 5	2
66	- 0.00 + 1.85	2HL 130 x 10	2	107	- 2.64 + 0.82	L 50 x 5	2
67	- 11.57 + 6.13	HL 70 x 5	4	108	- 0.42 + 1.33	L 50 x 5	1
68	- 1.93 + 3.63	L 45 x 5	2	109	- 3.75 + 0.23	L 45 x 5	1
69	- 0.14 + 0.41	2L 45 x 5	2	110	- 4.15 + 7.99	L 70 x 5	3
70	- 2.93 + 0.91	L 50 x 5	2	111	- 0.80 + 0.11	L 100 x 7	3
71	- 0.45 + 1.44	L 45 x 5	1	112	- 5.00 + 0.08	2HL 60 x 5	4 DS
72	- 5.66 + 0.47	L 45 x 5	2	113	- 3.46 + 0.00	2L 50 x 5	4 DS
73	- 0.91 + 11.07	L 50 x 6	3	114	- 0.90 + 4.77	2L 45 x 5	3 DS
74	- 2.47 + 0.25	L 45 x 5	2	115	- 2.38 + 4.72	L 110 x 8	2
75	- 0.34 + 3.41	L 45 x 5	2	116	- 3.77 + 5.30	2L 150 x 90 x 9	2 DS
76	- 1.53 + 0.21	L 45 x 5	1	117	- 0.90 + 8.90	L 100 x 8	2
77	- 11.36 + 2.19	L 100 x 6	3	118	- 5.83 + 5.72	L 110 x 8	2
78	- 0.83 + 4.79	L 45 x 5	2	119	- 9.93 + 5.99	L 110 x 8	2
79	- 5.74 + 0.99	L 90 x 6	2	120	- 2.64 + 4.35	2L 200 x 90 x 9	2 DS
80	- 0.56 + 3.74	L 75 x 5	2	121	- 0.31 + 10.31	L 120 x 8	3
81	- 3.63 + 0.00	L 45 x 5	2	122	- 3.84 + 6.02	L 130 x 8	2
82	- 0.00 + 8.36	L 45 x 5	3				

REDUNDANT MEMBERS		
a	L 45 x 45 x 5	1
b	L 50 x 50 x 5	1
c	L 60 x 60 x 5	1
d	L 65 x 65 x 5	1
e	L 70 x 70 x 5	1
f	L 75 x 75 x 5	1
g	L 80 x 80 x 6	1
h	L 90 x 90 x 6	1
i	L 100 x 100 x 6	2
j	L 120 x 120 x 8	2

5. AND DETAILS  
 -T- 4.24  
 9" CROSSARMS  
 DRAWING MM - ENVL2-T-4.23

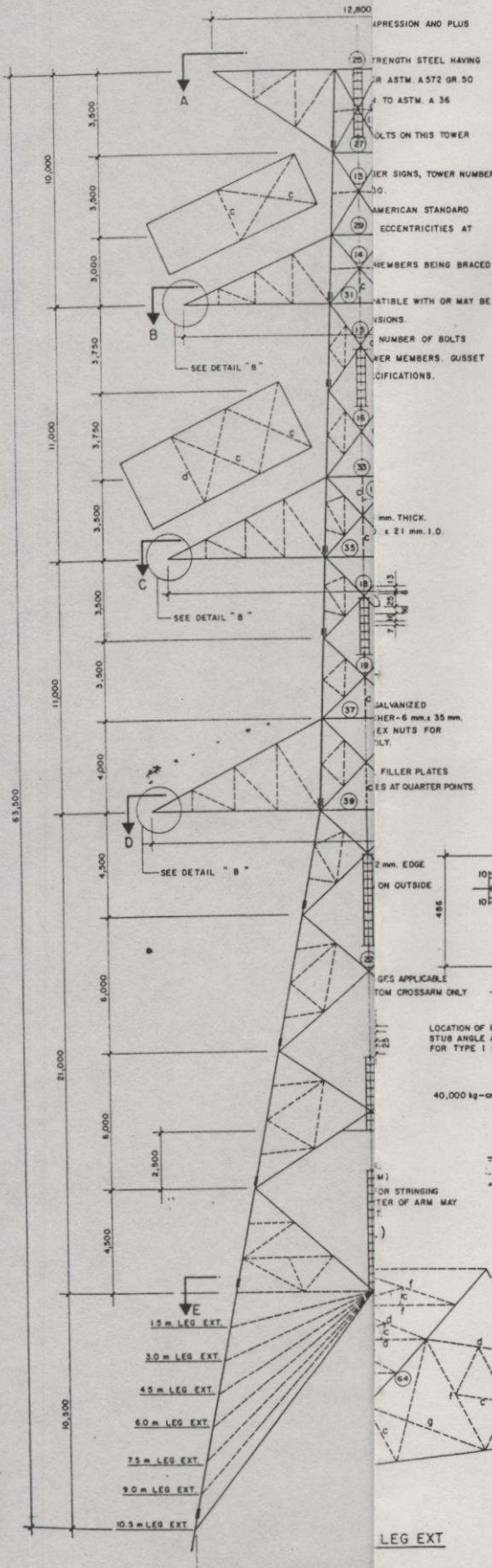


**VIEW G-G**

**ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND**

SUBMITTED <i>[Signature]</i> CHECKED <i>[Signature]</i> RECOMMENDED <i>[Signature]</i> PROJECT SUPERINTENDENT ENGR CONCURRED <i>[Signature]</i> DESIGNER <i>[Signature]</i>	<b>500 KV TRANSMISSION SYSTEM PROJECT</b>  <b>DM MEDIUM ANGLE SUSPENSION TOWER</b> <b>STRUCTURAL DESIGN - WITH 0°-3° ARMS</b>
--	--

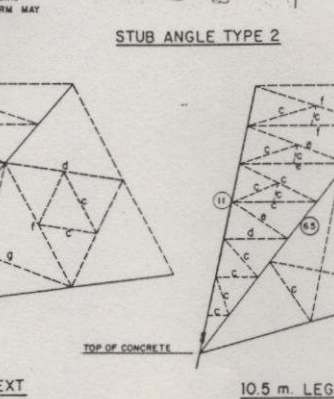
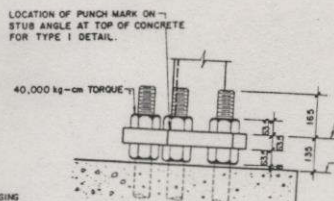
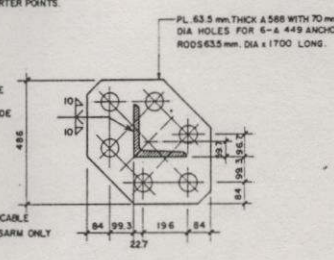
DWG MM-EHYL 2-T-4.25  
2-T-14.2  
TO CG OF THE MEMBERS



MEMBER	STRESS	MAX	SECTION	NO	BOLTS
1	- 2.56 + 2.07		HL 90 x 8	2DS	
2	- 27.06 + 15.98 + 43.48		HL 90 x 8	5DS	
3	+ 39.49		HL 130 x 9	7DS	
4	- 88.02 + 72.01		HL 130 x 12	9DS	
5	- 125.45 + 112.48		HL 150 x 15	10DS	
6	- 173.90 + 152.27		HL 200 x 15	14DS	
7	- 218.08 + 188.93		HL 200 x 20	14DS	
8	- 210.72 + 173.58		HL 200 x 20	14DS	
9	- 210.56 + 173.85		HL 200 x 20	14DS	
10	- 219.55 + 177.71		HL 200 x 20	14DS	
11	- 219.87 + 177.59		HL 200 x 20	14DS	
12	- 4.36 + 4.83		L 65 x 5	2	
13	- 3.74 + 4.46		L 65 x 5	2	
14	- 18.64 + 23.02		L 100 x 7	5	
15	- 36.88 + 33.22		L 130 x 9	6	
16	+ 31.52		L 120 x 8	5	
17	- 37.58 + 43.72		HL 130 x 9	6	
18	- 55.36 + 47.71		HL 150 x 10	7	
19	- 43.19 + 50.07		HL 130 x 10	7	
20	- 62.44 + 61.76		HL 150 x 12	8	
21	- 58.31 + 52.83		L 175 x 12	8	
22	- 36.20 + 39.50		L 175 x 12	5	
23	- 26.43 + 23.26		L 175 x 12	4	
24	- 20.04 + 21.84		L 150 x 10	3	
25	- 3.74 + 4.57		L 60 x 5	2	
26	- 0.53 + 0.12		L 60 x 5	1	
27	- 2.42 + 0.44		L 60 x 5	2	
28	- 0.72 + 1.13		L 60 x 5	1	
29	- 4.58 + 17.82		HL 75 x 5	5	
30	- 5.51 + 6.43		L 65 x 5	2	
31	- 46.33 + 35.44		HL 110 x 10	6	
32	- 4.90 + 9.06		L 75 x 6	2	

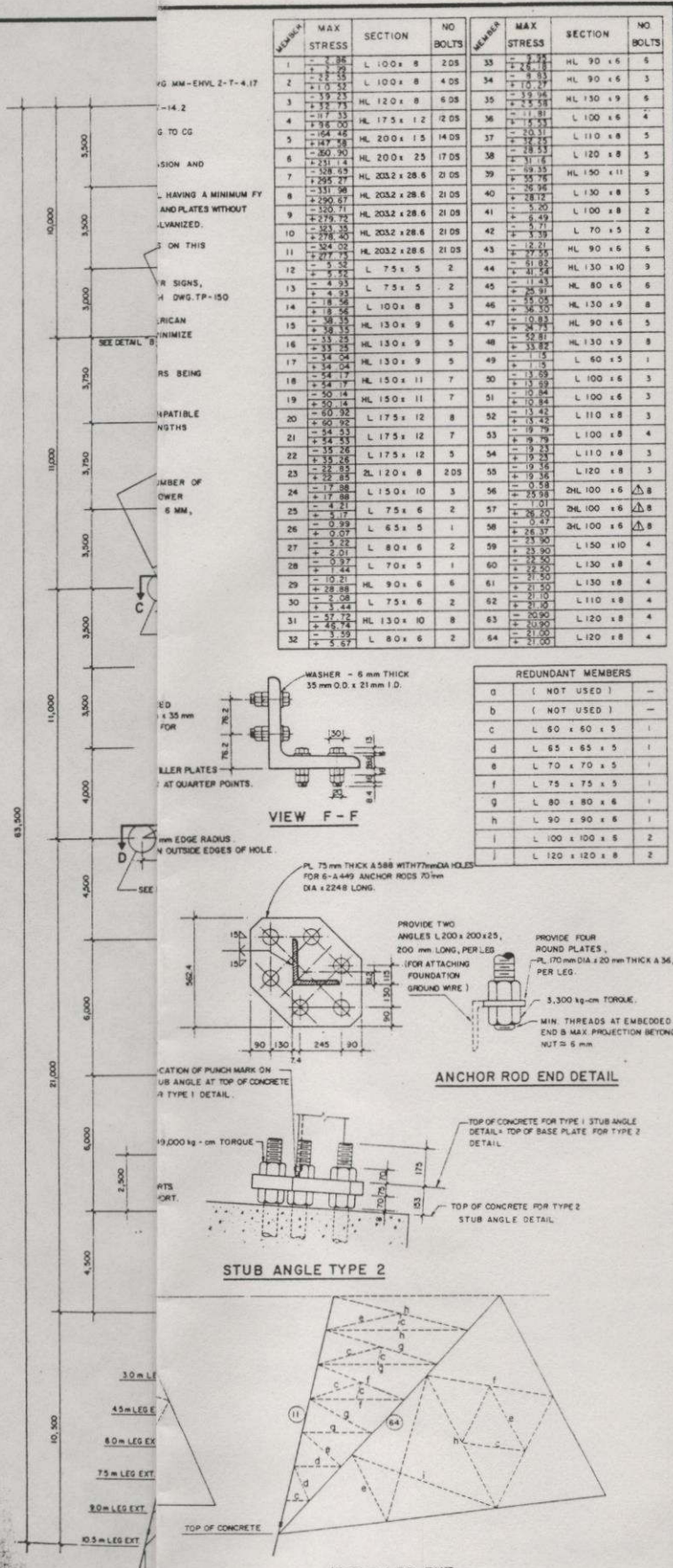
MEMBER	STRESS	MAX	SECTION	NO	BOLTS
33	- 3.98 + 18.62		HL 75 x 5	5	
34	- 7.62 + 9.90		L 75 x 5	3	
35	- 38.04 + 26.87		HL 110 x 10	5	
36	- 8.90 + 12.30		L 80 x 6	3	
37	- 5.84 + 19.79		HL 80 x 6	4	
38	- 19.80 + 23.02		HL 100 x 6	5	
39	- 33.10 + 21.20		HL 120 x 8	5	
40	- 9.30 + 10.83		L 90 x 6	3	
41	- 4.55 + 6.75		L 90 x 8	2	
42	- 4.82 + 1.58		L 70 x 5	2	
43	- 6.09 + 28.03		HL 90 x 6	6	
44	- 62.70 + 30.96		HL 110 x 10	8	
45	- 5.69 + 26.28		HL 80 x 6	6	
46	- 55.66 + 26.14		HL 110 x 10	8	
47	- 5.35 + 25.02		HL 80 x 6	5	
48	- 50.12 + 24.41		HL 120 x 8	8	
49	- 1.28 + 1.56		L 60 x 5	1	
50	- 14.87 + 13.10		L 90 x 6	4	
51	- 11.53 + 10.46		L 90 x 6	3	
52	- 15.68 + 10.34		L 110 x 8	3	
53	- 15.30 + 15.30		L 100 x 6	4	
54	- 14.52 + 14.52		L 100 x 6	3	
55	- 14.43 + 14.43		L 100 x 8	3	
56	- 0.29 + 26.32		ZHL 100 x 6	8	
57	- 0.69 + 26.37		ZHL 100 x 6	8	
58	- 0.31 + 26.01		ZHL 100 x 6	8	
59	- 24.09 + 25.39		L 150 x 10	4	
60	- 23.45 + 24.96		L 130 x 10	4	
61	- 23.25 + 24.59		L 120 x 8	4	
62	- 23.44 + 24.29		L 120 x 8	4	
63	- 23.77 + 24.10		L 110 x 8	4	
64	- 24.38 + 24.15		HL 110 x 8	4	
65	- 25.46 + 24.47		L 120 x 8	4	

REDUNDANT MEMBERS		
q	( NOT USED )	-
b	( NOT USED )	-
c	L 60 x 60 x 5	1
d	L 65 x 65 x 5	1
e	L 70 x 70 x 5	1
f	L 75 x 75 x 5	1
g	L 80 x 80 x 6	1
h	L 90 x 90 x 6	1
i	L 100 x 100 x 6	2



ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND

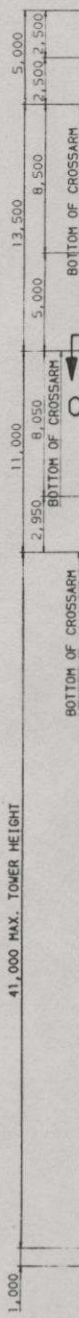
500 kW TRANSMISSION SYSTEM PROJECT  
DT 20 TENSION TOWER  
STRUCTURAL DESIGN



TRANSPOSITION TOWER  
LOADS (IN METRIC TONS)  
AND INCLUDE OVERLOAD FACTORS  
(WIND ON TOWER AND WIRE TENSIONS)



SIGN CONVENTION FOR LOADS



LOADING POINTS

	LOADING POINTS							WIND ON TOWER KG./M. <sup>2</sup>	TENSION IN KG./WIRE	
	2	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6		SUBCOND.	S.W.
5.61	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88			
5.56	6.61	5.69	6.61	6.61	6.61	7.53	6.61	147	5,064	1,923
5.61	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88			
0	0	-0.51	0	0	+0.51	0	0	147	2,816	1,002
5.61	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88	5.88			
5.52	6.18	5.30	6.18	6.18	6.18	7.07	6.18	147 COS θ	8 = 15° 4,883   1,854	
								147 SIN θ	8 = 30° 4,312   1,632	
									8 = 45° 3,604   1,340	
5.52	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98			
3.0	3.55	2.95	3.55	3.55	4.15	3.55	91		3,933	1,479
6.3	11.25									
5.52	9.40	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98			
3.0	3.55	2.95	3.55	3.55	4.15	3.55	91		3,933	1,479
	5.20									
3.9	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07	13.07			
0	0	-0.62	0	0	0.62	0	0		3,432	1,155
7.5	8.93									

AS SHOWN.

ENSIONS ARE MINIMUM FROM SURFACE OF STEEL (NOT FROM MEMBER GAGES OR WORKING LINES)  
POINT ON THE CONDUCTOR OR CONDUCTOR HARDWARE.  
SHOWN ARE IN MILLIMETERS.  
ON TOWER ARE TO THE WORKING LINES EXCEPT AS OTHERWISE NOTED.  
795 MCM, 54/7 ACSR, CONDUCTOR, WT.=1.52 KG./M., DIA.=27.73 MM., RATED BREAKING  
300 KG. (4 SUB-CONDUCTORS PER PHASE BUNDLE).  
A17 NO. 8 ALUMINUM-CLAD STEEL, WT.=0.39 KG./M., DIA.=9.78 MM., RATED BREAKING  
27 KG. OR 3/8 INCH EHS STEEL, WT.=0.406 KG./M., DIA.=9.14 MM., RATED BREAKING  
85 KG.  
DESIGNED FOR ONE OR BOTH CIRCUITS INSTALLED. FOR THE PURPOSES OF TOWER DESIGN,  
TOWER SHALL BE DEFINED AS THE THREE PHASE BUNDLES AND THE CORRESPONDING SHIELD WIRE  
ADJACENT TO ONE ANOTHER ON ONE SIDE OF THE TOWER.  
FOR THE PURPOSES OF TOWER DESIGN, REFER TO THE TOWER DESIGN DRAWINGS AND THE TOWER SPECIFICATION.  
DESIGNED FOR MAINTENANCE LOADS (SAME AS HEAVY PHASE VERTICAL LOADS FROM CASE VI)  
APPLIED ABOVE CONDUCTOR SUPPORT POINTS.  
TOWER SHALL BE TOTALLY INTERCHANGEABLE WITH BASIC BODY OR EITHER BODY EXTENSION  
TOWER SHALL BE DESIGNED FOR USE OF ANY COMBINATION OF BASIC BODY AND LEG EXTENSIONS OR  
SHOULDER EXTENSION AND LEG EXTENSIONS. THIS SHALL INCLUDE ANY COMBINATION OF LEG EXTENSION  
LOADING IN A MAXIMUM DIFFERENTIAL OF LEG HEIGHT OF SIX METERS BETWEEN ANY TWO LEGS.

**TRANSVERSE WIND**  
DESIGNED WITH A TRANSVERSE WIND OF 100 KG./M.<sup>2</sup> ACTING ON THE WIRES AND 147 KG./M.<sup>2</sup>  
ACTING ON THE TOWER, 27°C FINAL TENSIONS, OLF.=1.30 (SEE NOTES A, C, E, F, G).

**LONGITUDINAL WIND**  
DESIGNED WITH A LONGITUDINAL WIND OF 147 KG./M.<sup>2</sup> ACTING ON TRANSVERSE FACES OF  
TOWER AND WIND ON WIRES, 27°C FINAL TENSIONS, OLF.=1.30 (SEE NOTES A, C, E, F, G).

**OBLIQUE WIND**  
DESIGNED WITH A WIND OF 100 COS<sup>2</sup> θ KG./M.<sup>2</sup> ACTING ON THE WIRES AND 147 COS θ KG./M.<sup>2</sup>  
ACTING ON THE TOWER, 27°C FINAL TENSIONS, PLUS AN UNBALANCED LONGITUDINAL LOAD APPLIED AT  
EACH ATTACHMENT LOCATION EQUAL TO 100X OF THE TENSION IN THE SHIELD WIRE OR 65X OF  
THE TENSION IN THE CONDUCTOR PHASE BUNDLE, OLF.=1.10 (SEE NOTES B, C, E, F, G).

**WIRES**  
DESIGNED WITH A TRANSVERSE WIND OF 62 KG./M.<sup>2</sup> ACTING ON THE WIRES AND 91 KG./M.<sup>2</sup>  
ACTING ON THE TOWER, 27°C FINAL TENSIONS, PLUS AN UNBALANCED LONGITUDINAL LOAD APPLIED AT  
EACH ATTACHMENT LOCATION EQUAL TO 100X OF THE TENSION IN THE SHIELD WIRE OR 65X OF  
THE TENSION IN THE CONDUCTOR PHASE BUNDLE, OLF.=1.10 (SEE NOTES B, C, E, F, G).

**INSULATOR STRINGS**  
DESIGNED WITH A TRANSVERSE WIND OF 62 KG./M.<sup>2</sup> ACTING ON THE WIRE  
AND 91 KG./M.<sup>2</sup> ACTING ON THE TOWER, 27°C FINAL TENSIONS, PLUS AN ADDITIONAL VERTICAL LOAD  
APPLIED AT EACH ATTACHMENT LOCATION EQUAL TO THE WEIGHT OF A FULL  
PHASE BUNDLE, PLUS AN ADDITIONAL LONGITUDINAL LOAD AT THE SAME PHASE  
ATTACHMENT LOCATION EQUAL TO 30X OF THE TENSION IN THE PHASE BUNDLE, OLF.=1.10  
(SEE NOTES B, C, E, F, G).

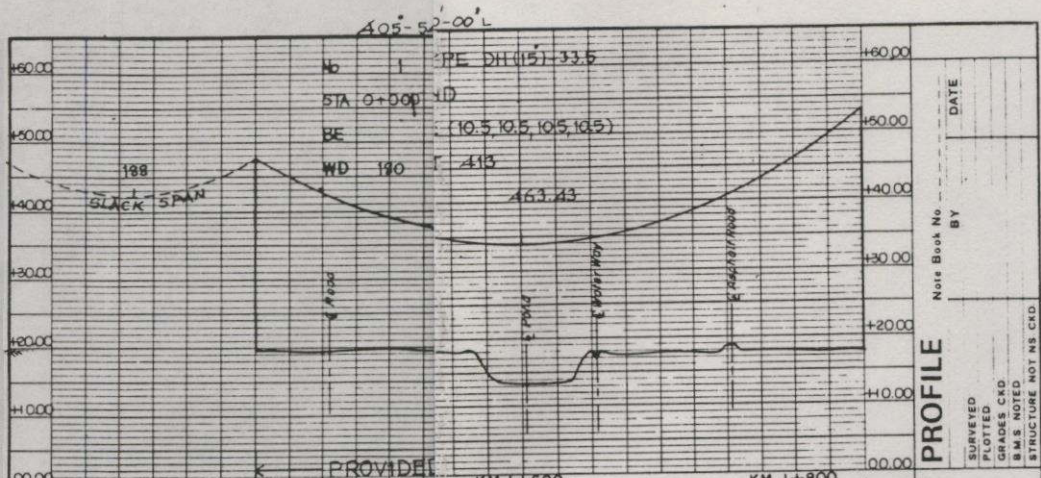
**ICE AND / OR MAINTENANCE**  
DESIGNED WITH NO WIND, 4°C INITIAL TENSIONS, WITH AN ADDITIONAL VERTICAL LOAD AT ANY OR  
ALL ATTACHMENT POINTS SIMULTANEOUSLY OF 1,000 KG. PLUS 33X OF THE SHIELD WIRE  
OR 33X OF THE TENSION IN THE CONDUCTOR PHASE BUNDLE, PLUS AN ADDITIONAL LONGITUDINAL LOAD AT ANY ONE, WIRE ATTACHMENT  
LOCATION SIMULTANEOUSLY OF 50X OF THE SHIELD WIRE OR PHASE BUNDLE TENSION, OLF.=1.30  
(SEE NOTES B, C, E, F, G).

CENTER  
DO NOT AMEND  
MANUALLY

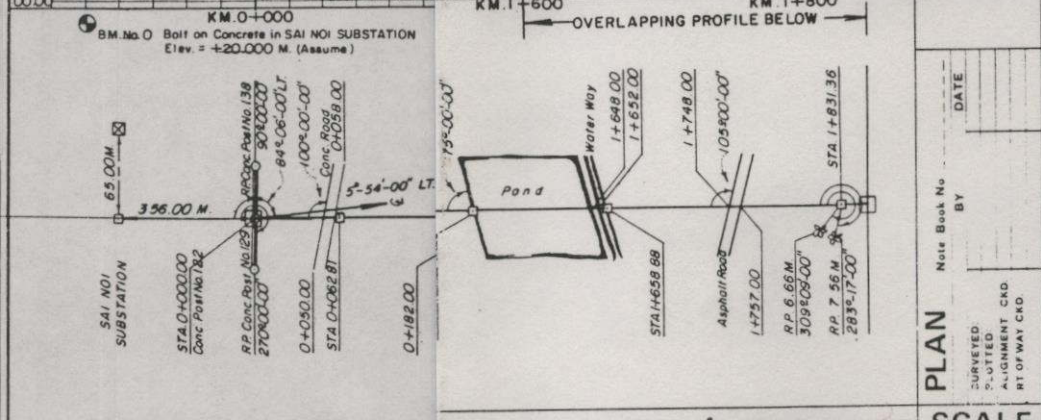
GENERATING AUTHORITY OF THAILAND

500 KV TRANSMISSION SYSTEM PROJECT

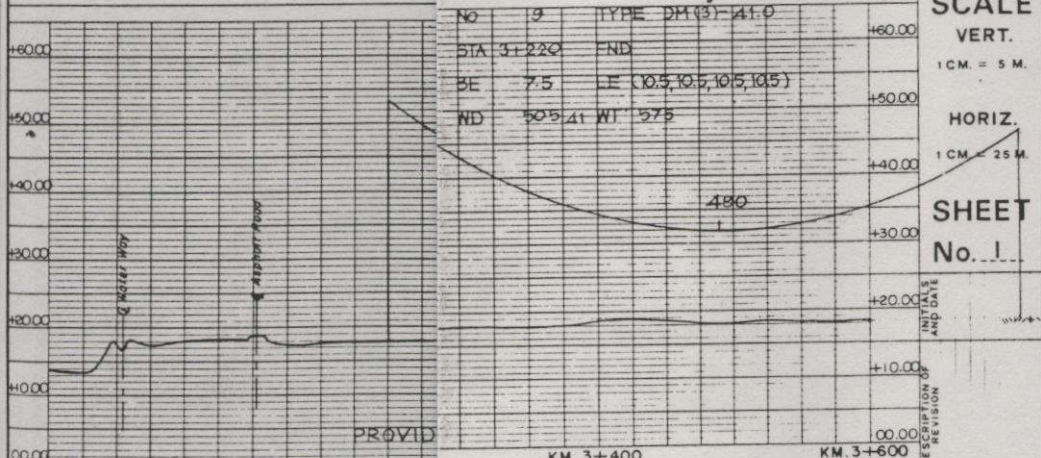
TRANSPOSITION TOWER



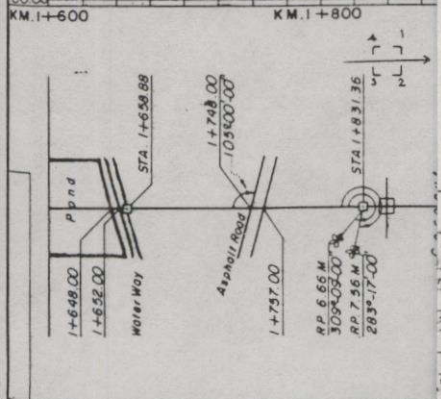
PROFILE	
SURVEYED	DATE
PLOTTED	BY
GRADES CKD	
B.M.S. NOTED	
STRUCTURE NOT NS CKD	



PLAN	
SURVEYED	DATE
PLOTTED	BY
ALIGNMENT CKD	
RT-OF-WAY CKD	



SCALE	
VERT.	1 CM = 5 M.
HORIZ.	1 CM = 25 M.
SHEET No. 1	
INITIALS AND DATE	
DESCRIPTION OF REVISION	



**ELECTRICITY GENERATING AUTHORITY OF THAILAND**

**500 KV. TRANSMISSION LINE  
SAI NOI - NONG CHOK  
(SECTION 1)**

**PLAN & PROFILE**  
STA. 0+000.00 - STA. 3+350.00

DRAFTED DRAWN CHECKED APPROVED	SUBMITTED DATE TRANSMISSION LINE ENGINEERING PROJECT DIVISION
VEATCH CONSULTANT 1/4-30-8048	SUBMITTED DATE DIRECTOR, TRANSMISSION SYSTEM ENGINE

APPROVED: *[Signature]* DATE: *1/9/92*  
 CHIEF SURVEY DIVISION  
 APPROVED: *[Signature]* DATE: *1/9/92*  
 DEPUTY GENERAL MANAGER - HYDRO POWER AND TRANSMISSION SYSTEM DEVELOPMENT  
 DIRECTOR, PROJECT AND EXPLOIT. DEPT.

JOB NO. *119/92* DWG. NO. **TM-EHV5-T-2.1** REV.

## ภาคผนวก ข.

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ผลงานวิจัยเรื่อง “การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การเกิดโคโรนาบนสายส่งแรงสูง 500 kV. ”, ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21, ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , หน้า 364-367 , 12-13 พฤศจิกายน 2541.
2. ผลงานวิจัยเรื่อง “การออกแบบสายส่งแรงสูง 500 kV.กรณีศึกษาแม่เมาะ3- ท่าตะโก โดยใช้คอมพิวเตอร์” ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 16 ฉบับที่ 4 , ธันวาคม 2542

## การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การเกิดโคโรนาบนสายส่งแรงสูง 500 kV.

## Computer Aided Analysis of Corona Effects On 500 kV. EHV. Transmission Lines

ชานี ใจประดิษฐ์ธรรม ศุทธิ บรรจงจิตร มณฑล ถิลาจินดาไกรฤกษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร.(02)326-9902

## บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การเกิดโคโรนาบนสายส่งแรงสูง 500 kV. เป็นการวิเคราะห์การเกิดปรากฏการณ์โคโรนา ตั้งแต่ค่าแรงดันวิกฤตที่ทำให้อากาศแตกตัวจนถึงค่าแรงดันวิกฤตที่สามารถมองเห็นแสงเรืองๆเป็นสีม่วง ค่าแรงดันพื้นผิวเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำ และการหาค่าลึงสูงเฉลี่ยในสายส่งตัวนำไฟฟ้าที่เกิดจากโคโรนา นอกจากนี้แล้วโปรแกรมยังสามารถวิเคราะห์ถึงผลกระทบทั้งในระบบสายส่งแรงสูง และระบบที่อยู่ใกล้กันที่เกิดเสียงแทรกรบกวนทางวิทยุและเสียงรบกวน ได้ขึ้นเป็นแคชเชลในสภาพอากาศปกติ และสภาพอากาศแปรปรวน เช่น ฝนตกหนักหรืออากาศหนาวจัด โดยจะพิจารณาจากระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า 3 เฟสวางจรเดียวที่มีระยะทางเป็น 335 km. ในระหว่างสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ 3(MM3)ถึงท่าตะโก(TTK) ซึ่งนับว่าเป็นสิ่งจำเป็นยิ่งอย่างหนึ่งในการออกแบบสายส่งแรงสูง การคำนวณทั้งหมดจะอ้างอิงจากข้อมูลของมาตรฐานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ 3 จ.ลำปาง[3] ได้กำหนดค่าต่างๆที่ขอบของเขตเดินสายไฟฟ้าไว้คือค่าAN น้อยกว่า 55 dB (A) , ค่าRI เป็น 40 dB และCorona lossเป็น 36 kw/kmขณะสภาพอากาศปกติ

## Abstract

This paper presents the computer aided analysis of corona effects on 500 kV. Extra High Voltage Transmission Lines.(EHVTL) Uses to analysis the factors effecting corona,the disruptive critical voltage of corona , the visual critical voltage is luminous glow , the surface voltage gradient on the underside of conductor. the maximum conductor surface voltage gradients for the centre and outer phase, and the power loss of corona. Then the program will analysis of resules. Is audible noise and radio interference in decibel for fair weather and foul weather. The transmission system will consist of single circuit lines extending a distance 335 km.from the Mae Moh3(MM3) generating plant to an intermediate substation at Tha Tako (TTK). By using the of reference EGAT and MM3 standard. [3] The audible noise is less than 55 dB (A) at right-of-way edge during wet weather.

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้ประชาชนและโรงงานอุตสาหกรรมต่างมีความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังนั้นทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย จึงจำเป็นต้องหาแนวทางที่สามารถส่งพลังงานไฟฟ้าให้ทันกับความต้องการเหล่านั้น อาจมีการคิดประดิษฐ์ขึ้นได้ถ้ามีการเพิ่มแรงดันของสายส่งกำลังไฟฟ้าสูงเกินกว่าแรงดันขีดจำกัด จึงนำไปโปรแกรม VISUAL PROGRAM ที่เขียนมีลักษณะแบบ Object Oriented Program มาช่วยวิเคราะห์ดังกล่าวนี้ เพื่อการคำนวณลด voltage gradient ด้วยการเลือกขนาดสายส่งเป็น 795 MCM, ACSR ชนิดจำนวนเส้น 54 Al. /7 St. "Condor" และทำตัวนำเป็น 4 Bundle ซึ่งจะทำให้ผลของ Coronaที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับมาตรฐานทั่วไป

## 2. ทฤษฎี

ในสภาวะปกติอากาศที่ล้อมรอบสายตัวนำจะมีคุณสมบัติเป็นฉนวน เมื่อแรงดันระหว่างสายส่งสูงขึ้นจนถึงแรงดันวิกฤต หรือแรงดันวิกฤตลดต่ำลงมากกว่ปกติ จะทำให้อากาศที่ล้อมรอบสายตัวนำเกิดการแตกตัวกลายเป็นตัวนำชั่วคราวเรียกว่า "แรงดันวิกฤตที่ทำให้แตกตัว" การแตกตัวของอากาศทำให้เกิดไอออนและกรดไนตริก ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของความเข้มสนามไฟฟ้าบนตัวนำเป็นจำนวนมากไปกระทำกับอนุภาคของอากาศ ขณะที่อากาศแตกตัวจะเกิดเสียงดังพอจะได้ยิน

## 3. ขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม

ขั้นตอนที่ 1 ตำรวจข้อมูลพื้นที่บริเวณระบบส่งจ่าย

โดยทั่วไปแล้วพื้นที่บริเวณระบบส่งจ่าย แรงดันวิกฤตมีความสัมพันธ์กับสภาพอากาศ จึงต้องใช้ความดันบรรยากาศ, รัศมีของหุ้มน้ำค่าตัวประกอบความหนาแน่นของอากาศ เขียนความสัมพันธ์ดังนี้

$$\delta = \frac{3.9211b}{273+t} \quad (1)$$

โดย  $\delta$  คือความหนาแน่นสัมพันธ์ของอากาศ

$b$  คือความกดดันของอากาศ = 74 Cm.-Hg

$t$  คืออุณหภูมิรอบสายส่ง ( $^{\circ}\text{C}$ )

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541

$$D_{eq} = \sqrt[6]{D_{ab}D_{ac}D_{ba}D_{bc}D_{ca}D_{cb}} \quad \text{C.n.} \quad (2)$$

- รัศมีระยะห่างระหว่างเฟสของกลุ่มตัวนำ(Bundle)

: D = 1300 Cm.

- รัศมีของสายส่งตัวนำ : r = 1.386 Cm.

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณค่าแรงดันวิกฤตที่มองเห็นแสงสีม่วงรอบตัวนำ ( $V_v$ ) และค่าแรงดันวิกฤตที่ทำให้อากาศแตกตัว ( $V_o$ ) จากสมการที่(5), (6)

เมื่อ 
$$E_v = E_o \delta \left( 1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (3)$$

$$V_v = E_v r \ln \frac{D_{eq}}{r} \quad \text{kV.} \quad (4)$$

จาก(4)จะได้

$$V_v = E_o \delta \left( 1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}} \right) r \ln \frac{D_{eq}}{r}$$

$$\therefore V_v = 21.21 \delta m_1 m_v \left( 1 + \frac{0.3}{\sqrt{\delta r}} \right) r \ln \frac{D_{eq}}{r} \quad \text{kV.} \quad (5)$$

$$\therefore V_o = 21.21 \delta m_1 m_o r \ln \frac{D_{eq}}{r} \quad \text{kV.} \quad (6)$$

โดย  $m_1$  คือค่าตัวประกอบสภาพอากาศ

= 1 สำหรับอากาศปกติ

= 0.8 สำหรับฝนตกหนัก

$m_v$  คือค่าตัวประกอบความขรุขระของผิวตัวนำ

= 0.80-0.85 สำหรับการมองเห็นโคโรนาในแบบทั่วไปบนสายดีเกลือ ขณะใช้งานจริง

= 0.70-0.75 สำหรับการมองเห็นโคโรนาในระยะใกล้บนสายดีเกลือ ขณะใช้งานจริง

$m_o$  คือค่า irregularity factor of  $V_o$  ( $0 \leq m_o \leq 1$ )

= 0.80-0.87 สำหรับ  $V_o$  เกิดจากสายดีเกลือน้อยกว่าหรือเท่ากับ 7 เส้น ขณะใช้งานจริง

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบสภาพอากาศบริเวณระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาว่าสภาพอากาศปกติหรือสภาพอากาศแปรปรวน (Select fair weather or foul weather) เช่น สภาพอากาศฝนตกชุก, สภาพอากาศหนาวจัด, ควีนหมอกปกคลุม และเกิดหิมะเบาบาง เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 5 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดโคโรนาเนื่องจากสภาพอากาศปกติ (Corona loss) หาได้ดังนี้

(a) Peek's formula :

$$P_c = \frac{241}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{d}} (V - V_o)^2 * 10^{-5} \quad \text{kw/km} \quad (7)$$

$$P_c = \frac{390}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{d}} (V - V_o)^2 * 10^{-5} \quad \text{kw/mile} \quad (8)$$

(b) Peterson's formula :

$$P_c = 1.11066 * 10^{-4} \dots \quad (9)$$

$$P_c = \frac{1.7874 * 10^{-4}}{\left[ \ln \left( \frac{D_{eq}}{r} \right) \right]^2} f V^2 F \quad \text{kw/mile} \quad (10)$$

หรือ

$$P_c = 20.931 f F \left[ \frac{V}{\log \left( \frac{D_{eq}}{r} \right)} \right]^2 * 10^{-6} \quad \text{kw/km} \quad (11)$$

$$P_c = 33.7 f F \left[ \frac{V}{\log \left( \frac{D_{eq}}{r} \right)} \right]^2 * 10^{-6} \quad \text{kw/mile} \quad (12)$$

โดย  $P_c$  คือกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากโคโรนา(kw)

$V$  คือแรงดันไฟฟ้าในระบบสายส่ง = 288.68 kV/ph

$f$  คือความถี่ในระบบสายส่ง = 50 Hz

$F$  คือโคโรนาฟังก์ชัน = 1.71

ขั้นตอนที่ 6 หาค่าแรงดันพื้นผิวเกรเดียนท์ภายใต้ตัวนำสูงสุดสำหรับเฟสจุดศูนย์กลางและเฟสภายนอก ( $E_{mc}, E_{mo}$ ) จากสมการที่ (13), (14)

$$E_{mc} = \frac{\left( 1 + \frac{4\sqrt{2}r}{S} \right) V}{4r \ln \frac{D}{4\sqrt{2}rS^3}} \quad \text{kV/Cm.} \quad (13)$$

$$E_{mo} = \sqrt{3} \left\{ \left( \frac{4\sqrt{2}}{S} + \frac{2}{d} \right) \left( \frac{V}{\ln \frac{4h}{d} + 2 \ln \frac{2h}{S} + \ln \frac{2h}{\sqrt{2}S}} \right) \right\} \quad \text{หน่วย kV/Cm.} \quad (14)$$

โดย

$S$  คือระยะห่างตัวนำ 2 เส้นในกลุ่มBundle เดียวกัน = 45.7 Cm.

$h$  คือความสูงของเสาโครงเหล็ก = 41 m.

$d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ = 2.773 Cm.

ขั้นตอนที่ 7 คำนวณค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดโคโรนาเนื่องจากสภาพอากาศฝนตกหนักหรืออากาศหนาวจัด และกระแสไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดจากโคโรนา หาได้ดังนี้

$$P_c = P_F + 0.3606 K V_L r^2 \ln(1 + 10\rho) \sum_{i=1}^{3N} E_i^5 \quad \text{kw/3phase} \quad (15)$$

$$i_c = \frac{P_c \sqrt{3}}{V_L} \quad \text{A/km.} \quad (16)$$

โดย  $P_c$  คือการสูญเสียโคโรนา 3 เฟสจากสภาพอากาศแปรปรวน

$K$  คือค่าคงที่ =  $5.35 \times 10^{-10}$  for rain  
 =  $1.27 \times 10^{-9}$  for snow

$V_L$  คือ Conductor voltage(Line) = 500 kV

$E_i$  คือ Surface voltage gradient (kV/Cm)

$\rho$  คือ Heavy rain rate = 12.7 mm/hr

Light snow rate = 0.127 mm/hr

$N$  คือจำนวนตัวนำใน Bundleของแต่ละเฟส = 4

$r$  คือ Conductor radius = 1.386 Cm

$i_c$  คือ Corona loss current (A/km.)

ขั้นตอนที่ 8 คำนวณการเกิดเสียงรบกวนได้อินและเสียงรบกวนทางวิทยุ (Audible noise and Radio interference)[2] จากสมการดังนี้

for  $N \geq 3$

$$AN_i = 120 \cdot \log E_{am,i} + 55 \cdot \log d - 114 \cdot \log D_i + 26.4 \cdot \log N - 128.4 \quad \text{dB} \quad (17)$$

$$AN = 10 \cdot \log \sum_{i=1}^3 10^{0.1 AN_i} \quad \text{dB} \quad (18)$$

โดย  $E_{am,i}$  คือแรงดันเกรเดียนท์พื้นผิวเฉลี่ยบน Bundle ในเฟส  $i$

$d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวนำ = 2.773 Cm.

$D_i$  คือระยะห่างเสาอากาศจากเฟส  $i$  ถึงตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องตรวจระดับสัญญาณ (m)

หาแนวระดับของเสียงรบกวนทางวิทยุ ( $RI$ ) เนื่องจากแต่ละเฟสที่มีจุดการวัด [2] ดังนี้

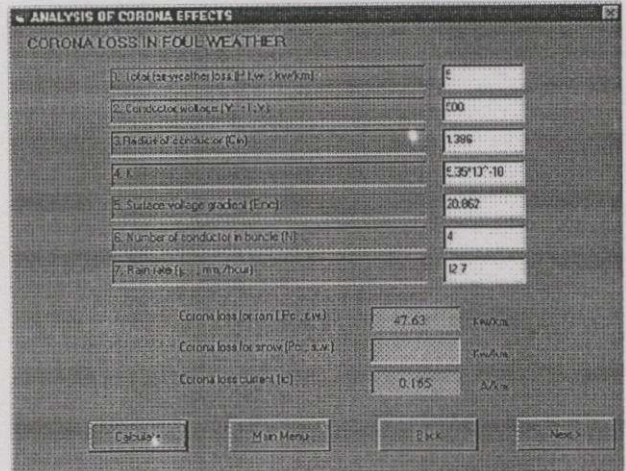
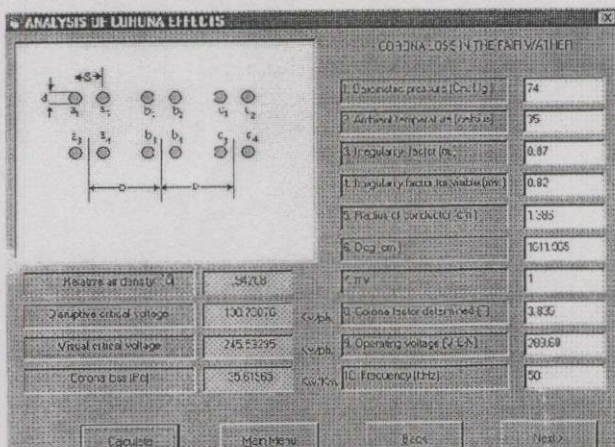
$$RI_i = 3.5 E_m + 6d - 33 \cdot \log \left( \frac{D_i}{20} \right) - 30 \quad (19)$$

$$RI = RI_\phi + 32 \cdot \log \frac{D_\phi}{D} \quad \text{dB} \quad (20)$$

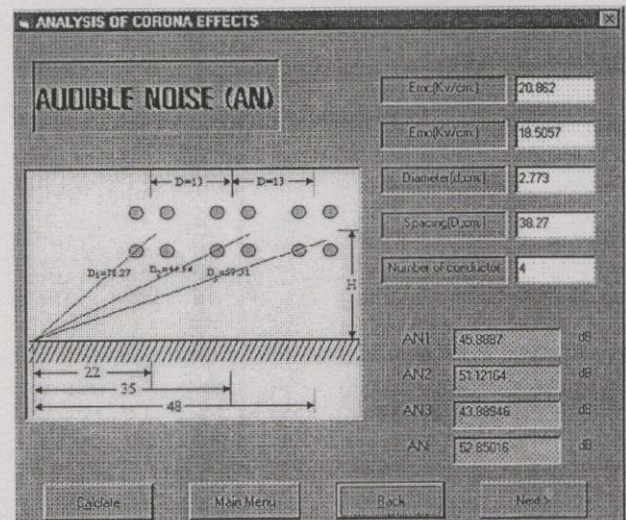
$$RI_1 = (\text{ค่าเฉลี่ยสูงสุดทั้ง 2 ค่าของระดับ } RI + 1.5) \quad (21)$$

$$RI_2 = RI_1 - 6 \text{ dB} \quad (22)$$

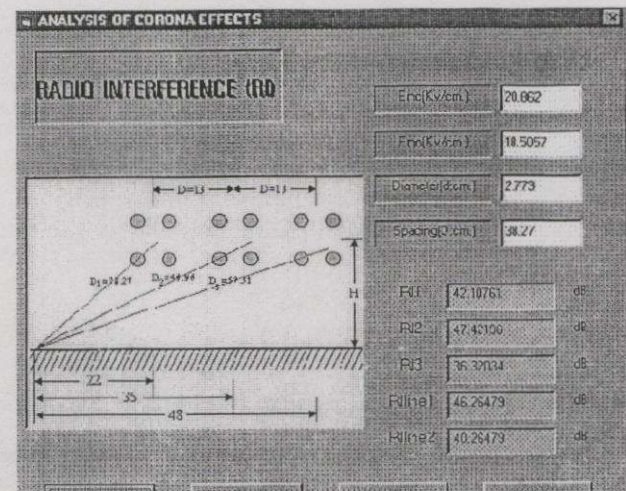
#### 4. ผลการคำนวณโปรแกรม



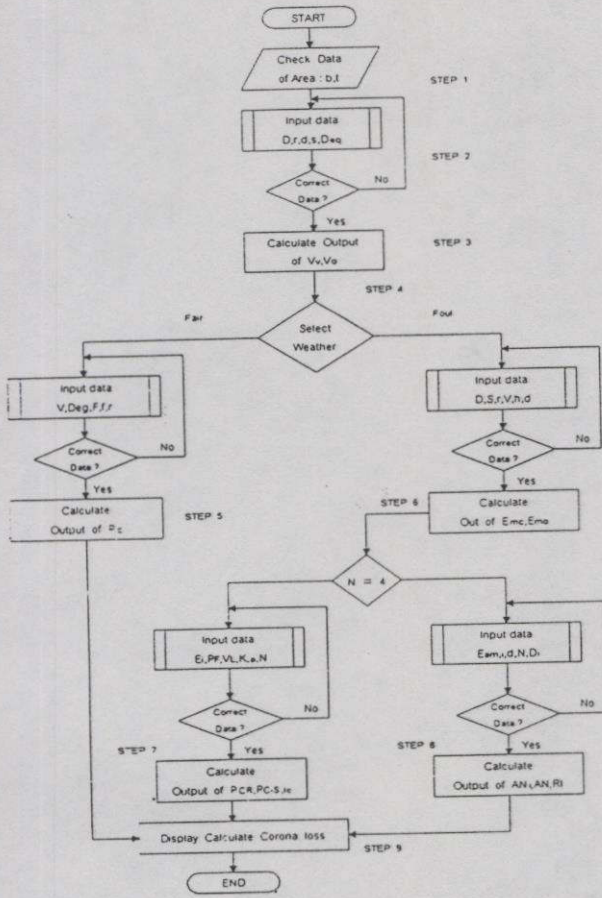
รูปที่ 2 หน้าจอ การคำนวณการสูญเสีย corona ในอากาศฝนตกขุก



รูปที่ 3 หน้าจอการคำนวณ AUDIBLE NOISE



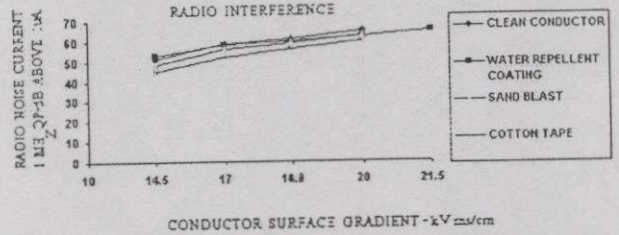
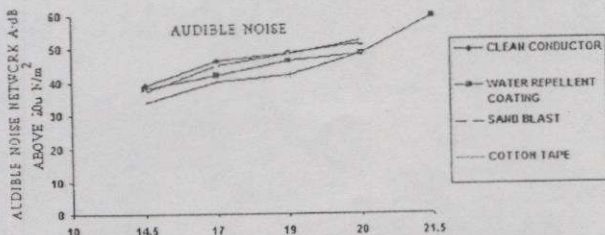
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 พ.ศ. 2541



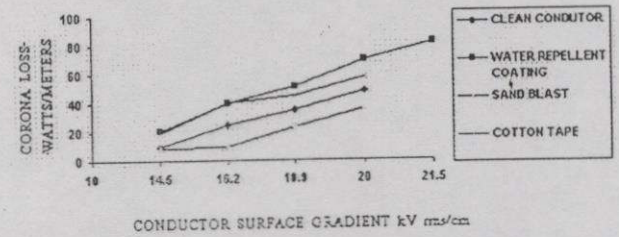
รูปที่ 5 แผนผังการคำนวณโปรแกรมวิเคราะห์โคโรนา

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลมาตรฐาน EGAT กับผลการวิเคราะห์โปรแกรม

ค่ามาตรฐาน EGAT	ข้อมูลมาตรฐาน EGAT (B)	ผลการวิเคราะห์โปรแกรม
FAIR WEATHER		
$P_c$ (kw / km)	36	35.619
FOUL WEATHER		
$P_{c,sw}$ (kw / km)	52	47.63
$I_{c,sw}$ (A / km)	0.169	0.165
$P_{c,sw}$ (kw / km)	18.9	22.099
$I_{c,sw}$ (A / km)	0.065	0.0765
AN (dB)	55	52.84
RI (dB)	40	40.26



รูปที่ 7 กราฟ RADIO INTERFERENCE ในขณะที่ฝนตก



รูปที่ 8 กราฟการสูญเสีย corona loss ในขณะที่ฝนตก

5. บทสรุป

จากการทดสอบผลการทำงานของโปรแกรม โดยนำข้อมูลจากมาตรฐานของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยตามโครงการศึกษาร่วมกับบริษัทที่ปรึกษา LEMCO Engineers (International), Inc., แห่งสหรัฐอเมริกา ที่ได้ทำการออกแบบสายส่งแรงสูง 500 kV จริง [3] ในระหว่างสถานีไฟฟ้าอ้อมแม่เกาะ 3 (MM3) ถึงท่าตะโก (TTK) และจากสถานีไฟฟ้าอ้อมท่าตะโกถึงสถานีไฟฟ้าอ้อมหนองจอก (NCO) มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมที่จัดทำขึ้น ผลที่ได้ตามตารางเปรียบเทียบข้างต้นค่าที่ได้จึงใกล้เคียงกัน ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ของโปรแกรมสามารถนำไปใช้งานได้จริง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณวราภรณ์ ชัยสาวัฒน์ ผู้เป็นพรหมของลูกที่ให้กำลังใจ แนวทางในการประพฤติปฏิบัติธรรม สร้างบุญบารมีและขอขอบคุณคุณสุทัศน์ สุขสวัสดิ์, คุณชัยยุทธ เพชรตั้ง, คุณสุนทร ชูเดือน ที่ให้ความเอื้อเฟื้อข้อมูลและคำแนะนำที่ดี จนทำให้บทความวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Electric Power Research Institute. "Transmission Line Reference Book: 345 kV and Above," 2nd ed. EPRI, Palo Alto, California, 1982.
- [2] Rakosh Das and Begamudre. "Extra High Voltage AC Transmission Line Engineering", John Wiley & Sons, Inc., New York., 1986.
- [3] Electricity Generating Authority of Thailand. "Mae Moh-Bangkok 500 kV Project Executive Summary & Transmission Design".

**การออกแบบระบบสายส่งแรงสูง 500 kV.  
กรณีศึกษาแม่เมาะ 3 - ท่าตะโก โดยใช้คอมพิวเตอร์**  
**The Design of 500 kV. EHV. Transmission System  
by Using Computer  
for Case Study of Mae Moh 3 - Tha Tako**

ชำนาญ ใจประดิษฐ์ธรรม      สุทธิ บรรจงจิตร      มณฑล ลีลาจินดาไกรฤกษ์  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า    คณะวิศวกรรมศาสตร์    สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

**บทคัดย่อ**

บทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบสายส่งแรงสูง 500 kV. ในกรณีศึกษาแม่เมาะ 3-ท่าตะโก โดยใช้คอมพิวเตอร์ นำโปรแกรม Visual Basic ที่มีลักษณะการเขียนแบบ Object Oriented Program เข้ามาช่วยออกแบบ ซึ่งเริ่มจากการเลือกระดับแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมในการส่งจ่ายจะวิเคราะห์จากระยะทางกับกำลังไฟฟ้าที่จ่าย การเลือกขนาดของสายตัวนำ การเลือกชนิดของเสาโครงเหล็กและลูกถ้วย การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายส่ง เช่น ค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ ค่าความจุของสายส่ง กระแสไฟฟ้าต้านทาง ค่าคงที่ของการแพร่กระจายคลื่น ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ต้านทาง เปอร์เซนต์โวลต์เดจรกฎเลขัน และประสิทธิภาพของสายส่ง เพื่อให้ได้ขนาดสายส่งทางกายภาพที่เหมาะสมกับขนาดกำลังไฟฟ้าที่ผู้ส่งจะส่งมากที่สุด การออกแบบนี้จะพิจารณาถึงความเหมาะสมระหว่างโครงสร้างของเสาโครงเหล็กกับแนวเขตการเดินทางสาย(route line), ความปลอดภัยของแนวเขตการเดินทางสายไฟฟ้า(Right of way)ระยะห้อยและแรงดึงของสายไฟฟ้า (Sag and Tension) ผลของแรงลมและน้ำแข็งที่กระทำต่อสายตัวนำ นอกจากนี้แล้วโปรแกรมยังสามารถออกแบบฐานรากของเสาโครงเหล็ก ซึ่งจะเลือกชนิดของดินที่จะติดตั้งเสาบริเวณนั้น การคำนวณทั้งหมดจะอ้างอิงจากข้อมูลของมาตรฐานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย [1, 2]

**Abstract**

This paper presents the design of 500 kV.EHV. transmission system by using computer, for case study of Mae Moh 3 - Tha Tako. The design by Visual Basic program consists of appropriate selection of voltage varying with distance and distributing power, size selection of conductor, type of tower and insulator ; as well as calculation of transmission parameters such as: resistance , inductance, capacitance , the sending - end current , the propagation constant , the characteristic impedance of the line, the sending - end power factor , the percentage of voltage regulation and efficiency of the transmission lines. This design considers the suitability between tower configuration and route line area , the safety of right of way, the sag and tension of the phase conductor, the effect of wind and ice on the phase conductor. Then the program will foundation design of the tower. by using the of reference EGAT. Standard. [1, 2]

## 1. บทนำ

เนื่องจากความต้องการในการใช้พลังงานไฟฟ้าของประชาชนและโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ นับวันจะเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจึงจำเป็นต้องหาแนวทางที่สามารถส่งพลังงานไฟฟ้าให้ทันกับความต้องการเหล่านั้น เพื่อลดความสูญเสียในสายส่งให้เหลือน้อยที่สุดและเพิ่มความเชื่อถือ รวมทั้งสมรรถนะในระบบส่งพลังงานไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพสูง ทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ จึงได้ศึกษาและวางแผนร่วมกับบริษัทวิศวกรที่ปรึกษาโดยมีความเห็นตรงกันว่า ควรที่จะเปลี่ยนระบบการส่งพลังงานไฟฟ้าระยะไกลจากระบบ 230 kV. ให้เป็นระบบ 500 kV. จากสถานีไฟฟ้าย่อยแม่เมาะ3(MM3)ถึงสถานีไฟฟ้าย่อยท่าตะโก(TTK) จังหวัดนครสวรรค์ จำนวน 2 วงจรเป็นระยะทางประมาณ 335 km.

## 2. ทฤษฎี

### 2.1 การออกแบบเสาโครงเหล็ก (Tower Design)

เสาโครงเหล็กวงจรเดี่ยวแบบ Horizontal arrangement วงจรคู่เป็นแบบ Vertical arrangement มีช่วงเสาเฉลี่ย (Ruling span) 490 m. และ 420 m. สำหรับเสาวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ตามลำดับ ในการออกแบบจะต้องมีข้อมูลประกอบดังนี้

- ลูกถ้วย (Insulators) ใช้เป็นประเภทลูกถ้วยแขวน (Suspension) แบบ ball and socket ลักษณะ V-string ชนิดมาตรฐาน ANSI Class 52-8 จำนวน 26 ลูก และ I-string จำนวน 27 ลูก ชุดลูกถ้วยที่เป็นแบบ Tension ใช้จำนวนลูกถ้วย ANSI Class 52-11 จำนวน 27 ลูก สำหรับ Double tension string และ ANSI class 52-8

- การเลือกสายไฟฟ้า (Conductor Selection) สายไฟฟ้าที่นำมาพิจารณาถึงการสูญเสียทางไฟฟ้าของระบบจะพบว่า สายไฟฟ้าขนาด 795 MCM ACSR ชนิดจำนวนเส้น 54 Al/7 St. "Condor" ทำเป็น 4 Bundle จะเหมาะสมที่สุด ซึ่งจะมีค่าก่อสร้างถูกอีกทั้งสะดวกในการก่อสร้าง

- แนวเขตเดินสายไฟฟ้า (Right-of-way : R-O-W) โดยคำนึงถึงการแกว่งของสายไฟฟ้าด้วยแรงลม 29 m/s จะทำให้สายไฟฟ้าแกว่งประมาณ 45 องศา ความกว้างของเขตเดิน

สายไฟฟ้าจะต้องการข้างละ 35 เมตร เมื่อสายส่งวงจรเดี่ยวแบบ Horizontal arrangement ใช้ลูกถ้วยแบบ IVI และด้านข้างละ 30 เมตรสำหรับสายส่งวงจรเดี่ยวแบบ VVV และสายส่งวงจรคู่ใช้ลูกถ้วยแบบ V ทั้งหมด

- แรงลม (Wind speeds) ได้นำความเร็วลมที่วัดตามสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยาในรอบ 30 ปี นำมาคำนวณทำเป็นความเร็วลมที่ 50 ปี จะได้แรงลม 33.8 m/sec. ที่ความสูง 10 m. เหนือพื้นดิน หาได้ดังนี้

$$W_T = \bar{W} + \sigma K_I \quad m/sec. \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{W_w}{(w + W_i)} \right] \quad \text{องศา} \quad (2)$$

โดย  $W_T$  คือ ความเร็วลมในช่วงเวลาที่ผ่านไป (m/sec)

$\theta$  คือ มุมที่สายส่งเบี่ยงเบนไปจากแนวตั้ง (องศา)

$\bar{W}$  คือ ค่าเฉลี่ยของสถิติความเร็วลมที่ปีสุดท้าย

$$= 19.1 \text{ m/sec.}$$

$w$  คือ น้ำหนักของสายส่งตัวนำ = 1.52 kg/m

$W_w$  คือ แรงลมที่กระทำต่อสายส่งแรงสูง = 2.79 kg/m

$W_i$  คือ น้ำหนักของละอองน้ำจากแรงลม = 1.45 kg/m

- ชนิดของเสาโครงเหล็ก (Tower type) จะมีลักษณะเป็นไปตามความต้องการทางไฟฟ้าและความแข็งแรงเช่น ระยะห่างของสายไฟฟ้าเนื่องจาก Switching Surge ระยะห้อยนจะแบ่งตามตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 ชนิดของเสาโครงเหล็กตามลักษณะการใช้งาน

Tower	Circuit type	Insulator assemblies type	Deviation Angle (Degree)
SL 0°	Single	Suspension	0
T 40°	Single	Tension	0-40
DL 3°	Double	Suspension	0-3
DM 9°	Double	Suspension	3-9
DH 15°	Double	Suspension	3-15
DT 20°	Double	Tension	0-20
DT 40°	Double	Tension	0-40
DTR 0°	Double	Transpose	0

- สมรรถนะของสายส่งในระยะยาว (Performance of Long Transmission lines) หากจากสมการที่ (3) และ(4)

$$V_S = V_R \text{Cosh} \gamma l + I_R Z_c \text{Sin} \gamma l \quad \text{V.} \quad (3)$$

$$I_S = \frac{V_R}{Z_c} \text{Sin} \gamma l + I_R \text{Cosh} \gamma l \quad \text{A.} \quad (4)$$

โดย  $V_S$  คือ ค่า Sending - end Voltage (V)

$V_R$  คือ ค่า Receiving- end Voltage (V)

$I_S$  คือ ค่า Sending - end Current (A)

$I_R$  คือ ค่า Receiving- end Current (A)

$Z_c$  คือ ค่า Characteristic Impedance ( $\Omega$ )

$\gamma l$  คือ ค่า Propagation Constant of the line ( $\Omega$ )

$$\%V_{Reg} = \frac{V_{R,NL} - V_{R,FL}}{V_{R,FL}} * 100 \quad (5)$$

โดย  $\%V_{Reg}$  คือ เปอร์เซ็นต์โวลต์เตจเรกกูเลชัน

$V_{R,NL}$  คือ แรงดันไฟฟ้าปลายทางขณะไม่มีโหลด (V)

$V_{R,FL}$  คือแรงดันไฟฟ้าปลายทางขณะโหลดเต็มพิกัด (V)

-หาระยะห้อยและแรงดึงในสายเมื่อปิกเสาดังระดับ

(Sag and Tension calculation) การจึงสายระหว่างเสา A

และเสา B ในบริเวณที่เป็นแนวชัน มีความสูงต่างระดับกัน

เท่ากับ h จุดห้อยต่ำสุดจะเคลื่อนมาทางเสาด้านล่าง จะหาค่า

$X_1$  และ  $X_2$  ได้จากสมการที่ (6) และ(7)

$$X_1 = \frac{L}{2} - \frac{T_0 h}{WL} \quad (6)$$

$$X_2 = \frac{L}{2} + \frac{T_0 h}{WL} \quad (7)$$

หาระยะห้อย  $Y_1$  และ  $Y_2$  จากสมการที่ (8)และ (9)

$$Y_1 = \frac{W}{2T_0} \left( \frac{L}{2} - \frac{T_0 h}{WL} \right)^2 \quad (8)$$

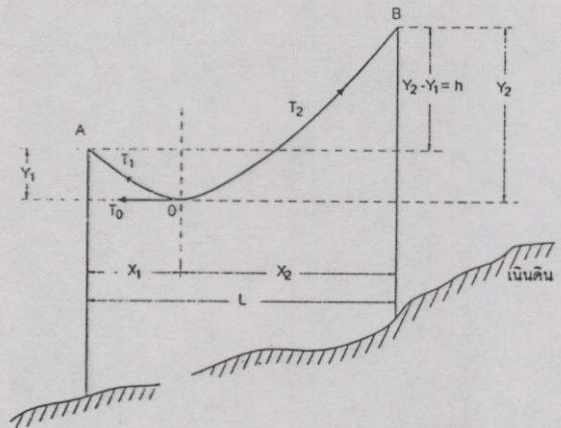
$$Y_2 = \frac{W}{2T_0} \left( \frac{L}{2} + \frac{T_0 h}{WL} \right)^2 \quad (9)$$

ถ้าแทน X ด้วย  $X_1$  และ  $X_2$  ในสมการที่ (6) และ(7)

จะได้แรงดึง  $T_1$  และ  $T_2$  ดังสมการที่ (10) และ(11) ดังนี้

$$T_1 = T_0 \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{W}{T_0} \right)^2 \left( \frac{L}{2} - \frac{T_0 h}{WL} \right)^2 \right] \quad (10)$$

$$T_2 = T_0 \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{W}{T_0} \right)^2 \left( \frac{L}{2} + \frac{T_0 h}{WL} \right)^2 \right] \quad (11)$$



รูปที่ 1 ระยะห้อยและแรงดึงในสายที่อยู่บนพื้นต่างระดับ

### 2.2 การออกแบบฐานราก (Foundation Design) [2]

จะออกแบบตามแรงกระทำจากเสาโครงเหล็กและ

ตามสภาพดิน ได้ออกแบบไว้เป็นแบบฐานแผ่ (Pad Type)

และฐานเสาเข็ม (Pile Type) ฐานแผ่จะมีขนาดและความลึก

ต่างๆ กันตามสภาพดิน ซึ่งจะเจาะสำรวจทุก ๆ ที่ตั้งเสา

ชนิดของดินแบ่งเป็น 5 Class จะขึ้นอยู่กับความแข็งของดิน ใน

กรณีที่ดินชั้นบนมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนัก การ

ออกแบบฐานรากแผ่จะเหมาะสมที่สุด หากจากสมการดังนี้

- ตรวจสอบสำหรับการยกสูงขึ้น (Check for Uplift)

$$T_u = \pi CBD + S_f \frac{\pi}{2} BrD^2 K_u \tan \theta + W_c \quad t \quad (12)$$

โดย

$$S_f = 1 + \frac{mH}{B} \quad (13)$$

$$K_p = \tan^2 \left( 45 + \frac{\theta}{2} \right) \quad (14)$$

$$K_u = K_p \tan \left( \frac{2\theta}{3} \right) \quad (15)$$

โดย

$T_u$  คือ ค่า uplift resistance (t)

$W_c$  คือ น้ำหนักที่รับแรงบีบอัด = 80.114 t

$W_p$  คือ น้ำหนักที่รับแรงยกสูงขึ้น = 57.33 t

$r$  คือ ความหนาแน่นของดิน เป็นดินชนิดปนทราย  
ก่อนข้าง แข็ง (Class 4) = 1.79 t/m<sup>3</sup>

$$Q_u = 2\pi(C + K_s r \tan\theta) \left[ \frac{R_s X^2}{2} + D \tan\alpha \frac{X^2}{2} - \frac{X^3}{3} \tan\alpha \right]_0^D \quad (16)$$

$$T_{u,t} = T_u + Q_s \quad (17)$$

โดย  $Q_s$  คือ uplift resistance along the shearing plane (t)

$T_{u,t}$  คือ ค่า total uplift resistance (t)

$K_s$  คือ ค่า constant = 1.4 (เปิดตาราง)

-ตรวจสอบหาค่ากำลังที่รับน้ำหนักสูงสุดของฐานราก

(Check for Ultimate Bearing Capacity of Spread footing:

$Q_{ul}$ ) ตามสมการของ Terzaghi ดังนี้

$$Q_{ul} = CN_c + U \cdot D \cdot N_q + 0.5B \cdot U \cdot N_r \quad (18)$$

โดย

$C$  คือ ค่าความเชื่อมแน่นของดิน

$D$  คือ ความลึกของฐานรำนับจากผิวดิน

$B$  คือ ความกว้างของฐานราก

-ตรวจสอบค่าความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุก  
ประลัยของดิน (Check for Ultimate Bearing Capacity of  
Soil:  $Q_u$ ) หาได้จากสมการ(19)ดังนี้

$$Q_u = CN_c S_c d_c i_c + q(N_q - 1) S_q d_q i_q + \frac{1}{2} B r N_r S_r d_r i_r w' \quad (19)$$

หน่วย t/m<sup>2</sup>

โดย

$N_c, N_q, N_r$  คือ ค่า Bearing Capacity Factor ที่แปรเปลี่ยน

ตามค่า Angle of friction ของดิน (เปิดตาราง)

$S_c, S_q, S_r$  คือ ค่า Shape Factor

$d_c, d_q, d_r$  คือ ค่า Depth Factor

$i_c, i_q, i_r$  คือ ค่า Inclination Factor

-ตรวจสอบการทรุดตัวของฐานรากของเสาโครงเหล็ก

(Check for Settlement:  $S_i$ )

เนื่องจากดินส่วนมากเป็นลักษณะ Granular Soil อาจ  
เกิดการทรุดตัวขึ้นตามคุณสมบัติยึดหยุ่นของดิน หาได้ตาม  
สมการที่ (20) ดังนี้

$$S_i = I_p q B \left( \frac{1 - \nu^2}{E_s} \right) \quad cm. \quad (20)$$

โดย

$I_p$  คือ ค่าตัวประกอบที่ส่งผลกระทบต่อทรุดตัวที่จุด

ศูนย์กลางของฐานราก = 1.12

$E_s$  คือ ค่า Modulus of elasticity of soil = 27.6 MN/m<sup>2</sup>

$q$  คือ ค่าน้ำหนักของดินที่ถมบนฐานราก = 5.728 t/m<sup>2</sup>

$\nu$  คือ ค่า Poisson's Ratio = 0.25-0.4

### 3. หลักการออกแบบและการคำนวณโปรแกรม

โปรแกรม Visual Basic 6.0 เป็นโปรแกรมที่ Run และ  
สร้างบนระบบปฏิบัติการ Windows ซึ่งเป็นระบบที่เข้าใจได้  
ง่ายต่อผู้ใช้ เมื่อเริ่มใช้งานโปรแกรมจะแสดง Dialog Box  
สำหรับใช้งาน จะมีขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมหาดังนี้  
ขั้นตอนที่ 1

เลื่อน MOUSE ไป Click เลือกชนิดของวงจรและชนิด  
ของเสาโครงเหล็ก เช่น SingleCircuit ได้แก่ SL0, T 40°  
Double Circuit ได้แก่ DL 3°, DM 9°, DH 15°, DT 20°  
ขั้นตอนที่ 2

เริ่มป้อนข้อมูลที่ต้องการ เช่น ระยะทางการส่ง กำลัง  
ไฟฟ้า Power factor, ค่า Resistance, Inductance, Capacitance  
ขั้นตอนที่ 3

ป้อนข้อมูลคำนวณหาระยะหย่อนและแรงดึงของสาย  
ต่ง (Sag and Tension) ที่กระทำบนเสาโครงเหล็ก  
ขั้นตอนที่ 4

เลื่อน Mouse ไป Click ที่ CALCULATE หน้าจอเมนู  
จะแสดงผล เช่น แรงดันไฟฟ้าที่ต้นทาง กระแสไฟฟ้าที่ต้นทาง  
Efficiency Loss % Voltage Regulation

ขั้นตอนที่ 5

เลื่อน Mouse ไป Click ที่ Menu "Wind" เพื่อเข้าสู่การ  
คำนวณหาผลของแรงลม น้ำแข็งที่กระทำบนสายตัวนำ ระยะ  
Pulling Span และความยาวของสายตัวนำต่อช่วงเสา

ขั้นตอนที่ 6

เลื่อน Mouse ไปClick ที่Menu "Insulator" หน้าจอจะแสดงข้อมูลเกี่ยวกับจำนวนและชนิดของลูกถ้วย ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 Class คือ Class 52-8 และ Class 52-11

ขั้นตอนที่ 7

เลื่อน Mouse ไปClick ที่ Menu "Foundation" เมื่อเข้าสู่การคำนวณ แล้วเลื่อน Mouse ไปClick ที่ Soil type เพื่อเลือกชนิดของดิน และป้อนค่าตัวประกอบต่างๆ ของฐานราก เช่น Angle of friction soil , Average cohesion of soil

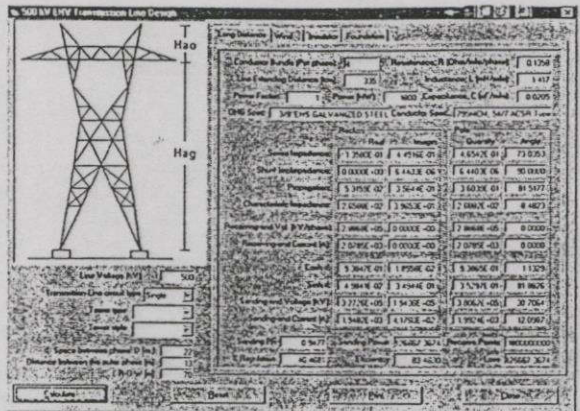
ขั้นตอนที่ 8

เลื่อน Mouse ไปClick ที่ Calculate หน้าจอจะแสดงภาพหน้าตัดของฐานรากโดยมี 2 ชนิดคือ Pad type foundation และ Pile type foundation

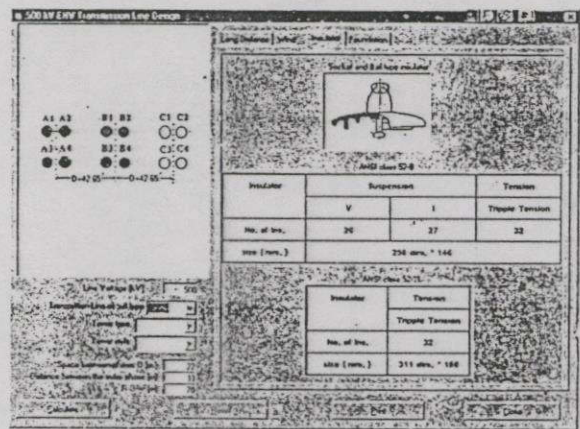
ขั้นตอนที่ 9

ถ้าต้องการทำการคำนวณอีกครั้ง ให้เลื่อน Mouse ไป Click ที่ปุ่ม Reset และทำการป้อนข้อมูลใหม่ ถ้าต้องการจะออกจากโปรแกรมให้เลื่อน Mouse ไปClick ที่ปุ่ม Close

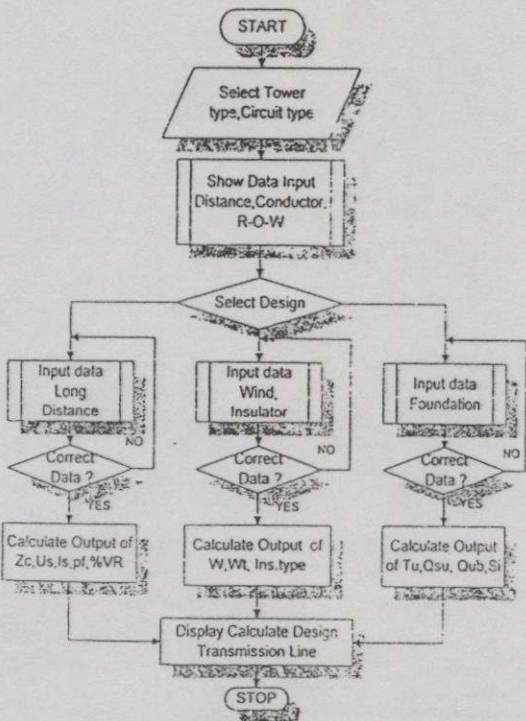
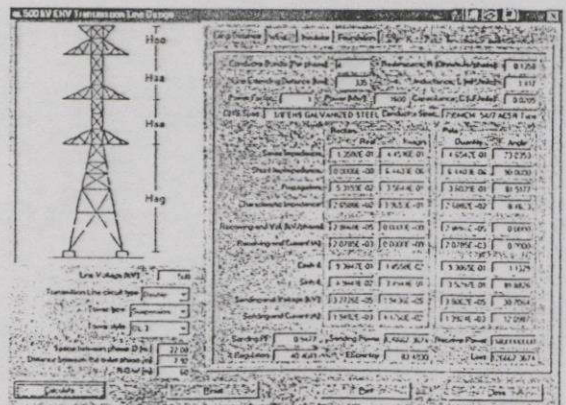
4.ผลการออกแบบโปรแกรม

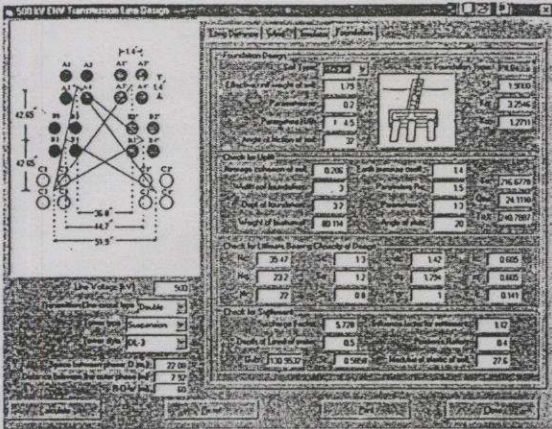


รูปที่ 3 หน้าจอการคำนวณหาสมรรถนะในสายส่งระยะยาวของเสาโครงเหล็กชนิด SLO วงจรเดี่ยว

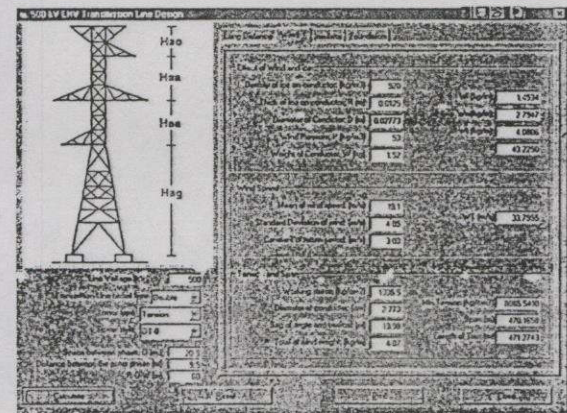


รูปที่ 4 หน้าจอการหาข้อมูลของชนิดและจำนวนลูกถ้วยของเสาโครงเหล็กชนิด SLO วงจรเดี่ยว





รูปที่ 6 หน้าจอการคำนวณการออกแบบฐานรากชนิด PILE ของเสาโครงเหล็กชนิด DL3 วงจรคู่



รูปที่ 7 หน้าจอคำนวณหาผลของแรงลมที่กระทำบนสายคาน้ำของเสาโครงเหล็กชนิดเสา DTR Suspension วงจรคู่

5. บทสรุป

จากตารางที่ 2 ผลจากการออกแบบโปรแกรมของสายส่งแรงสูง 500 kV. กรณีศึกษาแม่เมาะ3 – ท่าตะโก เปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐานการไฟฟ้าฝ่ายผลิตฯ ผลที่ได้จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์จะใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน จึงสามารถนำไปช่วยในการตัดสินใจเลือกชนิดของเสาโครงเหล็ก ชนิดของวงจรและลักษณะทางกายภาพของระบบ ส่วนการออกแบบฐานรากยังไม่สามารถป้อนข้อมูลเกี่ยวกับดินให้ละเอียดเหมือนกับสภาพงานจริงได้ เนื่องจากสภาพภูมิประเทศจริงสภาพของดิน อาจมีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกัน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลมาตรฐาน EGAT กับผลโปรแกรมของสายส่งชนิด DL3 วงจรคู่

ผลที่ได้จาก	ผลโปรแกรม		มาตรฐาน EGAT	
	(1)	(2)	(1)	(2)
1. Wind speeds				
$w_T$ (m/sec)	33.9	23.98	33.8	23
$\theta$ (องศา)	43	41.5	43.21	41
2. Performance of Long Transmission lines				
$V_s$ (kV)	658.68	598.72	656.49	590.3
$I_s$ (kA)	1.98	2.09	1.99	2.14
$V_{Reg}$ (%)	40.43	25.52	40.41	26.2
3. Sag and Tension at 75°C for Ruling span 490 m.				
$Y_1$ (m)	18.50	13.80	17.10	13.60
$Y_2$ (m)	-	20.15	-	20.73
$T_1$ (kg)	1697	890	1684	902
$T_2$ (kg)	-	2494	-	2599
4. Foundation design				
$T_{II}$ (t)	215.46	210	215.38	208
$Q_s$ (t)	21.5	18.7	22.07	19.4
$Q_{II}$ (t/m <sup>3</sup> )	134	125	130.9	127
$S_i$ (cm)	0.52	0.39	0.58	0.36

(1)\* ลักษณะภูมิประเทศพื้นราบ, (2)\* ภูมิประเทศภูเขา

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคุณเทพิทช์ ปิ่นอนงค์ คุณสรวิชัย หิมะมาน คุณวีระชัย ยอดเพชรและคุณกิตติ เที๋ชรต้นทัด กองวิศวกรรมสายส่ง ฝ่ายวิศวกรรมระบบส่ง การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยที่เอื้อเฟื้อข้อมูลเอกสารตลอดจนให้คำแนะนำ

7. เอกสารอ้างอิง

[1] EGAT, Contract Documents Vol. II & III Construction of 500 kV. Transmission Line MAE MOH – THA TAKO  
 [2] Electricity Generating Authority of Thailand, “Mae Moh-Bangkok 500 kV. Project Executive Summary & Transmission Design”, Bangkok, May, 1982.

## ประวัติผู้เขียน

นายธานี ใจประดิษฐ์ธรรม สถานที่เกิดอำเภอเมือง จังหวัดชุมพร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปีการศึกษา 2536 ผลงานทางวิชาการมีดังนี้ “ การใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์การเกิดโคโรนาบนสายส่งแรงสูง 500 kV ” ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 21 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี , 12-13 พ.ย. 2541. และ “ การออกแบบสายส่งแรงสูง 500 kV กรณีศึกษาแม่เมาะ 3 -ท่าตะโกโดยใช้คอมพิวเตอร์ ” ได้รับการตีพิมพ์ลงในวารสารวิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 16 ฉบับที่ 4 , ธันวาคม 2542

ปี พ.ศ. 2536 ทำงานเป็นอาจารย์ประจำ สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง โรงเรียนเทคโนโลยีบ้านโป่ง-บริหารธุรกิจ จ. ราชบุรี ปี พ.ศ. 2537 ทำงานบริษัทเกาหงอินดัสเตรียส จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรออกแบบและติดตั้ง สถานที่นิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. ปี พ.ศ. 2538-2539 เข้ารับราชการอาจารย์ประจำ สาขาวิชาไฟฟ้ากำลัง คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตพระนครเหนือ