



การวิเคราะห์แรงดันเกินในระบบกราวด์ ของสถานีไฟฟ้าแรงสูง

โดยใช้โปรแกรมเอทีพี/อีเอ็มทีพี

ธนวัฒน์ ฉลาดสกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินงบประมาณประจำปีงบประมาณ ๒๕๕๐

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร



**Analysis of Grounding System Overvoltage
in High Voltage Substation by ATP/EMTP**

TANAWAT CHALARDSAKUL

Rajamangala University of Technology Phra Nakhon



This Report is Funded by Rajamangala University of Technology Phra Nakhon,

Fiscal Year 2007

ชื่อเรื่อง : การวิเคราะห์แรงดันเกินในระบบกราวด์ ของสถานีไฟฟ้าแรงสูง โดยใช้โปรแกรมเอทีพี/อีเอ็มทีพี

ผู้วิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ธนวัฒน์ ฉลาดสกุล หัวหน้าโครงการ
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ร่วมวิจัย

พ.ศ. : ๒๕๕๐

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์การเกิดแรงดันเกินในระบบกราวด์ ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง จะทำการวิเคราะห์ที่สถานีบำเหน็จณรงค์ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยใช้โปรแกรม ATP Draw สร้างโมเดล (Model) ระบบกราวด์ของสถานี แล้วจำลองการเกิดแรงดันเกินจากฟ้าผ่า แล้วดูผลของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นตำแหน่งต่างๆ ผลการทดลองที่ได้ จะใช้เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการทำงานในการออกแบบระบบกราวด์ ภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

ผลการศึกษาของระดับแรงดันเกินบนแบบจำลองระบบกราวด์ (Grid Potential Rise : GPR) พบว่า แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์จะให้ค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 และผลของกระแสผิดพลาด (Fault Current) ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของระบบกราวด์จะทำให้ขนาดของแรงดันเกินสูงกว่าที่ตำแหน่งมุมของระบบกราวด์และผลของความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง (Ground Resistance : R_g) พบว่าขนาดของแรงดันเกินจะมีขนาดสูงขึ้นเมื่อความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูงมีค่าสูง

Title : Analysis of Grounding System Overvoltage in High Voltage Substation by ATP/EMTP

Researcher : Assistant Professor Tanawat Chalardsakul Project Leader
Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) Join project

Year : 2007

Abstract

The analysis of the grounding system overvoltage in High voltage substation will be held at Bumnetnarong substation, Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) by using ATP draw for grounding system's model of substation, also to model overvoltage from lightning and to read the result of overvoltage from differences positions. The advantages of the experiment are to be educated and to who design Grounding system in high voltage substation, EGAT.

The study's result of the over voltage level on Ground Potential Rise: GPR model shows that the π will show close result to the result from the calculation by standard IEEE Std 80-2000 and the result of the Fault Current at the middle position of the Grounding system will result in higher overvoltage than at the result at the corner position of Grounding system. The result of Ground Resistance: R_g shows that the increasing of overvoltage, the increasing of Ground Resistance: R_g

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้ เกิดขึ้นจากความร่วมมือของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย แผนกบำรุงรักษาหม้อแปลงไฟฟ้า ที่ต้องการให้ทำวิจัยกรณีศึกษา เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของการวางแผนระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูง

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนทุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี ๒๕๕๐ ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้การสนับสนุนข้อมูล ขอใจ นายโชคดี สุขสีล นักศึกษาสาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า ที่ให้ความร่วมมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นอย่างดี ตลอดจนขอขอบคุณผู้ที่ให้ความร่วมมือและให้ความอนุเคราะห์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวในที่นี้

ธนวัฒน์ ฉลาดสกุล



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(2)
กิตติกรรมประกาศ	(3)
สารบัญ	(4)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 วิธีการดำเนินการ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของโปรแกรม EMTP	3
2.1.1 ความสามารถของ EMTP-ATPDraw	5
2.1.2 ขั้นตอนในการคำนวณและการทำงานของ EMTP-ATPDraw	7
2.1.3 โครงสร้างของโปรแกรม EMTP ใน ATP-EMTP (Version 3.5)	8
2.1.4 ความสามารถในการใช้งานของ ATPDraw	11
2.2 ทฤษฎีการออกแบบระบบสายดิน	13
2.2.1 ความรู้พื้นฐานระบบสายดินเพื่อความปลอดภัยต่อมนุษย์	13
2.2.2 ขนาดของกระแสที่ร่างกายทนได้	13
2.2.3 ขนาดของกระแสที่ยอมให้ไหลผ่านร่างกาย	14
2.2.4 วงจรสมมูลของการเกิดไฟฟ้าดูด (Equivalent Circuits)	15
2.2.5 ชนิดของการเกิดไฟฟ้าดูด	17
2.3 การออกแบบระบบสายดินสถานีไฟฟ้าแรงสูง (Substation Design of Grounding System)	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและการศึกษาการใช้งานโปรแกรม ATPDraw	26
3.1. บทนำ	25
3.2. การใช้งาน Program ATPDraw	27
3.3. Base Case	30
บทที่ 4 การวิเคราะห์การเกิดแรงดันเกินบนระบบกราวด์ ของสถานีไฟฟ้าแรงสูง	33
4.1. ระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์	33
4.2. คุณสมบัติและขนาดของสายตัวนำ	35
4.3. การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ป้อนข้อมูลใน โปรแกรม ATPDraw	35
4.4. ผลลัพธ์จากการประมวลผล	42
4.5. ผลการศึกษา	42
บทที่ 5 สรุปผลของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	70
5.1 สรุปผลการทดลอง	70
5.2 ประโยชน์ของโครงการ	70
5.3 อุปสรรคในการดำเนินงาน	71
5.4 ข้อเสนอแนะในการศึกษาต่อไป	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก ก แบบสถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์	73
ภาคผนวก ข ผลลัพธ์จากการประมวลผล	75
ภาคผนวก ค การคำนวณระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์	88

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โฟล์ดการทำงานงานของโปรแกรมทรานเซียนด์แม่เหล็กไฟฟ้า EMTP	8
2.2 องค์ประกอบต่างๆ ในโปรแกรม ATP-EMTP	9
2.3 Step Voltage Circuit , E_s	16
2.4 Touch Voltage Circuit , E_t	16
2.5 Basic Shock Situations	17
2.6 การวัดค่าความต้านทานดินของสถานีไฟฟ้า	18
2.7 แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบสายดินสถานีไฟฟ้าแรงสูง	19
2.8 การหาค่าแรงดันช่วงก้าว	21
2.9 Touch Voltage Circuit	23
3.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์ จังหวัดชัยภูมิ	26
3.2 รูปแบบการวางสาย Ground Wire	26
3.3 การเริ่มใช้งาน Program ATP Draw	27
3.4 Open Project dialog box	27
3.5 Menu bar ในกลุ่มคำสั่ง ATP	28
3.6 Settings dialog box	28
3.7 PlotXY dialog box	28
3.8 Menu bar ในกลุ่มคำสั่ง Open Brach Linear	29
3.9 Menu bar ในกลุ่มคำสั่ง Open Sources	29
3.10 การออกแบบระบบ Groundเกิดแรงดันเกินที่มุม	30
3.11 การกำหนดค่าของสายGround	30
3.12 การกำหนดค่าของแรงดันเกิน	31
3.13 การทดลองและผลการทดลองของการเกิดแรงดันเกินในระบบ Groundที่มุม ของสถานีไฟฟ้า	31
3.14 การออกแบบระบบ Groundเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง	32
3.15 การทดลองและผลการทดลองของการเกิดแรงดันเกินในระบบ Ground ที่ตรงกลาง ของสถานีไฟฟ้า	32
4.1 แสดงระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ขนาดแท่งหลักดินขนาด	38
4.3 การกำหนดค่า RLC โปรแกรม ATPDraw	38
4.4 การกำหนดค่า Ground Rod โปรแกรม ATPDraw	39
4.5 การกำหนดค่า Ground Resistance โปรแกรม ATPDraw	40
4.6 การออกแบบระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์	41
4.7 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์เกิดแรงดันเกินที่มุม	42
4.8 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง	44
4.9 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม	47
4.10 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง	48
4.11 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม	50
4.12 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง	51
4.13 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม	53
4.14 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง	54
4.15 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ กรณีที่ไม่มีแท่งหลักดิน เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม	57
4.16 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ กรณีที่ไม่มีแท่งหลักดิน เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ กรณีที่ไม่มีแท่งหลักดิน เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม	60
4.18 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ กรณีที่ไม่มีแท่งหลักดิน เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง	61
4.19 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ เพิ่ม ความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 โอห์ม เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม	63
4.20 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ เพิ่ม ความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 โอห์ม เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง	64
4.21 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ เพิ่ม ความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 โอห์ม เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม	66
4.22 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ เพิ่ม ความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 โอห์ม เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง	67
4.23 ผลแสดงการเปรียบเทียบ เมื่อเพิ่มความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 โอห์ม กับความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูงปกติ 0.067 โอห์ม	69



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบต่าง ๆ ใน EMTP	5
4.1 แสดงแรงดันบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายนน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม และที่ตรงกลาง โดยวัดค่าแรงดันเกินที่แนวทแยงมุม	45
4.2 แสดงแรงดันบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายนน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม และที่ตรงกลาง โดยวัดค่าแรงดันเกินที่มุม	48
4.3 แสดงแรงดันบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม และที่ตรงกลาง โดยวัดค่าแรงดันเกินที่แนวทแยงมุม	52
4.4 แสดงแรงดันบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม และที่ตรงกลาง โดยวัดค่าแรงดันเกินที่มุม	56
4.5 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดแรงดันผิดปกติพร้อมระบบกราวด์แบบพายนน์ และระบบกระจาย	56



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสิ่งจำเป็นที่จะต้องมียกสถานีไฟฟ้าสูง เพราะระบบกราวด์จะทำหน้าที่ระบายกระแสผิดปรกติที่เกิดขึ้นในสถานีไฟฟ้าสูง ให้ไหลลงดินให้รวดเร็วที่สุด ถ้าสถานีไฟฟ้าแรงสูงมีระบบกราวด์ไม่ดี จะทำให้กระแสผิดปรกติที่ไหลลงมายังคงอยู่บนระบบ ทำให้ระบบกราวด์มีแรงดันเกิดขึ้น ซึ่งแรงดันเกินนี้จะทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิตของผู้ปฏิบัติงาน คนที่อยู่ใกล้รั้วของสถานีไฟฟ้าแรงสูง และอุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหาย ทำให้ระบบการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้ไม่ดี ดังนั้นในการออกแบบระบบกราวด์ จึงจำเป็นต้องทำด้วยความถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาวิเคราะห์การเกิดแรงดันเกิน ในระบบกราวด์แบบตาข่าย ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เมื่อมีกระแสผิดปรกติไหลลงสู่ระบบกราวด์ด้วยโปรแกรม ATP Draw

1.2.2 เพื่อศึกษา Model ของระบบกราวด์ที่ได้ผลใกล้เคียงกับการคำนวณ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาผลของแรงดันที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์แบบตาข่ายขณะที่มีกระแสผิดปรกติ (Fault) ไหลสู่ระบบกราวด์แบบตาข่าย โดยใช้ข้อมูลของสถานีไฟฟ้าแรงสูง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยบนข้อกำหนดดังนี้

- พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงมีขนาด 90 x 90 เมตร
- ลักษณะดินเป็นแบบเนื้อเดียว
- ไม่คำนึงถึงผลของสาย Overhead Ground Wire
- ลักษณะกราวด์แบบตาข่าย จะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส
- ใช้ Ground Rod ขนาด 3 เมตร ร่วมกับระบบกราวด์แบบตาข่าย

- กระแสผิดพลาด (Fault) ไหลจากปลายสายของต้น Take off Structure ลงสู่ระบบ
กราวด์แบบตาข่าย โดยไม่คำนึงถึงผลของค่า Impedance ของ Take off Structure

- กระแสผิดพลาด (Fault) ไหลลงที่ตำแหน่งมุมและกลางของระบบกราวด์
- ใช้โปรแกรม ATP Draw ทำการวิเคราะห์

1.3.2 ทำการเปรียบเทียบผลการจำลองจากโปรแกรม ATP Draw กับผลการคำนวณตาม
IEEE Std. 80-2000

1.4 วิธีการดำเนินการ

- 1.4.1 ศึกษาเนื้อหาและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการ
- 1.4.2 ศึกษาการใช้โปรแกรม ATPDraw
- 1.4.3 ศึกษา Model ของระบบกราวด์ ด้วยโปรแกรม ATPDraw
- 1.4.4 ทำการป้อนข้อมูลเพื่อจัดทำเป็น Base Case
- 1.4.5 ทำการทดลองตามโครงการ และบันทึกข้อมูล
- 1.4.6 สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 นำความรู้ที่ศึกษาได้มาใช้แก้ไขปัญหาในระบบกราวด์ ภายในสถานี่ไฟฟ้าแรงสูง ของ
การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- 1.5.2 ทำให้เกิดประโยชน์และความมั่นคงในระบบไฟฟ้า ที่จะมีผลเสียดต่ระบบเศรษฐกิจ
ของประเทศไทย
- 1.5.3 นำความรู้ที่ได้มาประกอบการตัดสินใจในการปฏิบัติงานได้รวดเร็ว

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของโปรแกรม EMTP

วิวัฒนาการของ EMTP การพัฒนาและวิจัยโปรแกรม EMTP ได้กระทำมาระยะเวลาเกือบ 30 ปี ในช่วงต้น ค.ศ. 1960 ได้มีการนำดิจิตอลคอมพิวเตอร์มาใช้งานอย่างกว้างขวางทั่วโลก การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าจึงเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงจากระบบอะนาล็อกมาใช้ดิจิตอลคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ Dr. Dommel แห่งมหาวิทยาลัย Munich ประเทศเยอรมันได้เริ่มพัฒนาโปรแกรมสำหรับการคำนวณทรานเซียนต์ในระบบไฟฟ้าแบบดิจิตอลนี้ขึ้น โดยอาศัยวิธีการของ Schnyder – Bergeron เป็นวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอก ทาง Benneville Power Administration (BPA) ซึ่งจัดตั้งโดยกระทรวงพลังงานของสหรัฐมีความสนใจในวิทยานิพนธ์นี้ จึงเชิญ Dr. Dommel มาเป็นนักวิจัยเพื่อทำการพัฒนาโปรแกรมดังกล่าว จนในปี ค.ศ. 1968 Transient Program Mode 1 ซึ่งมีประมาณ 4,000 บรรทัด ก็เสร็จสมบูรณ์ และถูกนำออกมาเผยแพร่

ในปี ค.ศ. 1972 Dr. Dommel ลาออกจาก BPA โดยมี Dr. W. Scott – Meyer เป็นผู้รับช่วงต่อในการพัฒนาโปรแกรม จนในปี ค.ศ. 1976 ก็มีนักวิจัยอีกหลายคนเข้าร่วมในการพัฒนาโปรแกรม เช่น Dr. Tse Huei Liu และ Dr. Akihiro Ametani นอกจากนี้ Mr. L. Dube ผู้พัฒนา TACS/MODELS, Dr. V. Brandwain ผู้พัฒนาโมเดลเครื่องจักรกลไฟฟ้า, Prof. A. Semlyen ผู้พัฒนาโมเดลสายส่งเข้าร่วม ทำให้โปรแกรม EMTP มีความสามารถมากยิ่งขึ้น จนในช่วงต้นทศวรรษ 1980 โปรแกรม EMTP M 31 ซึ่งมีประมาณ 100,000 บรรทัด ก็เสร็จสมบูรณ์ และถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ทั่วโลก นอกจากขีดความสามารถของโปรแกรมที่ทำให้ EMTP เป็นที่นิยมใช้กันทั่วโลกแล้ว เหตุผลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งก็คือโปรแกรม EMTP ถูกทำให้มีรูปแบบที่ใช้กับคอมพิวเตอร์ได้มากมายหลายหลากชนิด เนื่องจากคอมพิวเตอร์มีมากมายหลายชนิด โปรแกรมที่สร้างขึ้นสำหรับคอมพิวเตอร์ชนิดหนึ่งอาจไม่สามารถใช้กับคอมพิวเตอร์ชนิดอื่นได้ Dr. Scott – Meyer ซึ่งเป็นผู้เชี่ยวชาญของบริษัทผู้ผลิตคอมพิวเตอร์จึงทำการปรับปรุงรูปแบบของโปรแกรม โดยการสร้างไวยากรณ์ใหม่ขึ้นมาเพื่อเขียนแก้ไขการจัดการที่แตกต่างกันของคอมพิวเตอร์แต่ละชนิด จากนั้นก็พัฒนาโปรแกรมสำหรับทำหน้าที่เป็น Editor & Translator (E/T) เพื่อขจัดปัญหาความแตกต่าง

ของคอมพิวเตอร์แต่ละชนิดทำให้โปรแกรม EMTP สามารถนำไปใช้ได้กับคอมพิวเตอร์ส่วนใหญ่ทั่วโลก

การพัฒนาโปรแกรม EMTP ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1966 – 1980 นั้นใช้งบประมาณที่ค่อนข้างสูง ในปี ค.ศ. 1980 งบประมาณที่ได้จากสหรัฐถูกตัดลงทำให้ BPA ไม่สามารถที่จะแบกรับภาระในการพัฒนาโปรแกรม EMTP โดยลำพัง จำเป็นต้องขอเงินสนับสนุนจากผู้ใช้ และ ร่วมมือกับผู้ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม ในปี ค.ศ. 1982 มีการตั้ง จำเป็นต้องขอเงินสนับสนุนจากผู้ใช้ และ ร่วมมือกับผู้ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม ในปี ค.ศ. 1982 มีการตั้ง Development Coordination Group (DCG) ขึ้นโปรแกรม EMTP เริ่มถูกโอนย้ายจาก BPA ไปสู่ DCG ในปี ค.ศ. 1982 Electric Power Research Institute (EPRI) ซึ่งเป็นสถาบันวิจัยของเอกชนที่ทำการค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับการไฟฟ้าของสหรัฐ และประเทศอื่น ๆ ทั่วโลก ได้เข้าร่วมมือกับ DCG เพื่อพัฒนาโปรแกรม EMTP ในเชิงการค้า ในปี ค.ศ. 1984 BPA พัฒนา BPA-EMTP M 42 ออกมาเผยแพร่เป็น version สุดท้ายก่อนจะถูก DCG ห้ามมิให้ทำการพัฒนาโปรแกรมอีกต่อไป Dr. Scott – Meyer จึงแยกออกมาเพื่อพัฒนา EMTP ตัวใหม่โดยเรียกชื่อว่า Alternative Transients Program (ATP) ด้วยความเป็นผู้เชี่ยวชาญทางด้านคอมพิวเตอร์เขาเล็งเห็นว่าในอนาคตคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) จะได้รับความนิยมพุ่งสูงขึ้นในอนาคต จึงได้ปรับปรุงโครงสร้างของโปรแกรม EMTP ให้สามารถทำงานบน PC ได้

จากที่กล่าวมาข้างต้นโปรแกรม EMTP มีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดใหญ่ ๆ คือ EMTP ของ BPA, EMTP ของ DCG/EPRI และ ATP – EMTP ของ Dr. Scott – Meyer นอกจากนี้ยังมี digital simulator และโปรแกรมสำหรับคำนวณสถานะทรานเซียนต์อีกหลายชนิดที่พัฒนาขึ้นมาจาก EMTP ปัจจุบันมีบริษัท และสถาบันต่าง ๆ ที่ใช้ EMTP กว่า 1,000 แห่งทั่วโลก และมีผู้ใช้ส่วนบุคคลอีกกว่า 100,000 คน มีการรวมตัวตั้งเป็น user group ที่ญี่ปุ่น, ยุโรป, อเมริกาเหนือ, อเมริกาใต้ และที่อื่น ๆ ทั่วโลก โดยผู้ใช้ร่วมกันเสนอปัญหา และหาหนทางแก้ไขรวมทั้งพัฒนาปรับปรุงขีดความสามารถของโปรแกรม ทำให้ EMTP เป็นโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้า, วงจรไฟฟ้า และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งในสถานะปกติและสถานะทรานเซียนต์ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย

ทวีปยุโรปมีศูนย์กลางอยู่ที่ประเทศเบลเยียม

ทวีปอเมริกาใต้มีศูนย์กลางอยู่ที่ประเทศบราซิล

ทวีปเอเชียมีศูนย์กลางอยู่ที่ประเทศญี่ปุ่นและอินเดีย

ทวีปออสเตรเลียมีศูนย์กลางอยู่ที่ประเทศออสเตรเลีย

2.1.1 ความสามารถของ ATPDraw

โปรแกรม ATPDraw ประกอบไปด้วยองค์ประกอบของวงจรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์มากมายหลายชนิดนอกจากนี้ยังมีองค์ประกอบของระบบควบคุมอีกด้วย ดังแสดงในตารางที่ 1 วงจรใด ๆ ก็ตามที่สามารถสร้างโดยใช้องค์ประกอบเหล่านี้ได้ ก็จะสามารถทำการวิเคราะห์ได้ เช่น วงจรง่าย ๆ ที่ประกอบด้วยถ่านไฟฉาย หลอดไฟและสวิตช์ หรือวงจรที่ซับซ้อนขึ้น เช่น ระบบไฟฟ้าที่ส่งพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าที่อยู่ห่างออกไปหลายร้อยกิโลเมตรนอกจากนี้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ รอบตัวเรา เช่น เครื่องซักผ้า ที่ประกอบไปด้วยมอเตอร์และวงจรควบคุม ก็สามารถคำนวณวิเคราะห์ได้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบต่าง ๆ ใน ATPDraw

อุปกรณ์	โมเดล	หมายเหตุ
ตัวต้านทาน	R, L, C	ใช้สำหรับวงจรทั่ว ๆ ไป
ตัวเหนี่ยวนำ	RLC in series	
ตัวเก็บประจุ	L, C with initial condition	
หม้อแปลงไฟฟ้า	Ideal transformer R (type 97) Saturable transformer	มีทั้งแบบเฟสเดียว และ 3 เฟส
โหลด และ อุปกรณ์ที่ไม่เป็น เชิงเส้น	Time dependent R (type 97) Current dependent R (type 99) Current dependent L (type 93,98) TACS/MODELS controlled R (type 91)	Saturation Characteristics, Hysteresis Characteristics
กับดักฟ้าผ่า	Current dependent R on exponential form (type 92) Current dependent R and voltage controlled switch TACS controlled arc model	มีทั้งชนิดที่มี gap และไม่มี gap

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบต่างๆ ใน ATPDraw (ต่อ)

เครื่องจักรกลไฟฟ้า	Synchronous machine (type 59) Universal machine (type 19) (SM, IM, DC types supported)	
แหล่งจ่าย	Ramp source (type 12) Two-slope ramp source (type 13) AC source (type 14) DC source (type 11) Surge source (type 15) TACS/MODELS controlled source (type 60)	แหล่งจ่ายแรงดัน แหล่งจ่ายกระแส
สวิตช์	Time controlled switch Voltage controlled switch Statistic switch Systematic switch Measuring switch TACS/MODELS controlled switch	เซอร์กิตเบรกเกอร์ สวิตช์ตัดตอน สวิตช์สำหรับการลัดวงจร
สวิตช์สารกึ่งตัวนำ	Diode Transistor	เป็นอิเล็กทรอนิกส์
วงจรควบคุม	TACS MODEL	Transfer function blocks Algebraic and logical Operators Special – application Devices Input signal sources
สายส่งจ่ายไฟฟ้า สายเคเบิล	Pi equivalent line Distributed parameter line Frequency dependent line	Transposed lines Untransposed lines Cables

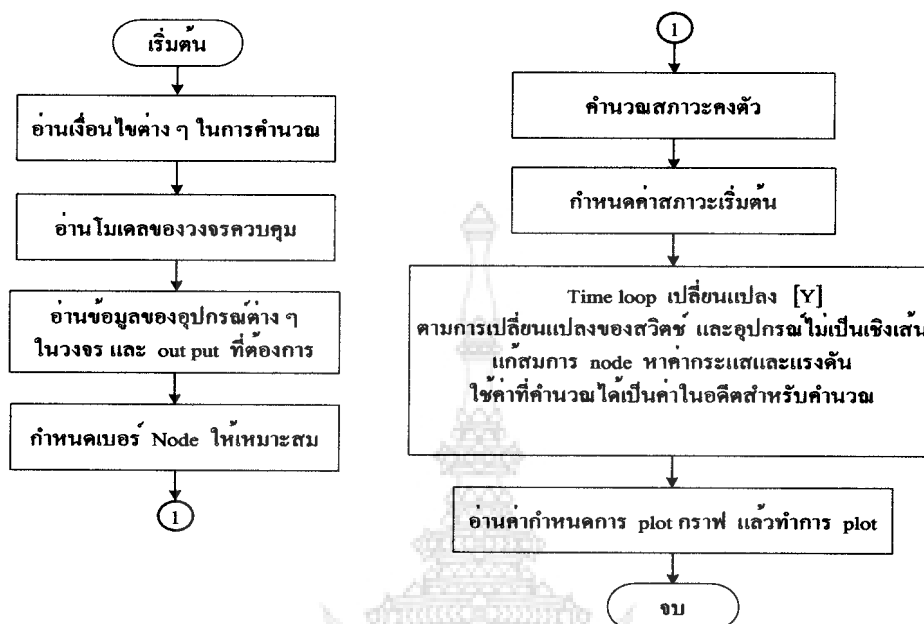
2.1.2 ขั้นตอนในการคำนวณและการทำงานของ ATPDraw

สายส่ง และอุปกรณ์เป็นองค์ประกอบสำคัญในระบบ และเนื่องด้วยพารามิเตอร์ของสายส่งขึ้นกับความถี่ ทำให้การวิเคราะห์ยุ่งยากสลับซับซ้อนยิ่งขึ้น ดังนั้นหลักการของโปรแกรมต่าง ๆ จึงมุ่งไปที่การหาค่าประกอบจำลองที่สามารถนำพารามิเตอร์ประเภทนี้มาพิจารณาได้อย่างถูกต้องและไม่ใช้เวลาคำนวณมากจนเป็นอุปสรรคสำคัญในการวิเคราะห์ระบบที่ใหญ่ ATPDraw เป็นโปรแกรมหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาอย่างเป็นที่น่าพอใจ โดยสามารถนำผลวิเคราะห์ช่วงเวลาที่ผ่านมา ๆ ไปแล้ว มาใช้ในการคำนวณตัวแปร เช่น แรงดันของบัสในเวลาต่อมา ๆ ได้ แต่อย่างไรก็ดี การพึ่งพาผลการวิเคราะห์ในช่วงที่ผ่านมาอาจทำให้เกิดการสะสมเอาข้อผิดพลาดให้ยิ่งเพิ่มมากขึ้นได้ ซึ่งจะต้องระมัดระวังโดยใช้ช่วงเวลา (Time Step) ในการคำนวณแต่ละครั้งไม่ให้ห่างเกินไป พร้อม ๆ กับต้องพิจารณาถึงรายละเอียดในส่วนประกอบของระบบด้วย นั่นคือ ถ้ากำหนดให้ระบบอยู่ในสถานะอยู่ตัวก่อน การคำนวณสำหรับช่วงทรานเซียนต์จะเริ่มที่เวลา $t = 0, \Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t$ เพิ่มขึ้นไปตามลำดับ จนถึงเวลาสูงสุดที่ต้องการ และในขณะที่ทำการวิเคราะห์ที่เวลา t ใด ๆ จะสามารถนำเอาผลคำนวณในเวลาที่ผ่านมา คือ $t - \Delta t, t - 2\Delta t \dots$ ลดลงตามลำดับมาใช้ได้ตามความจำเป็น หลักการของ ATPDraw โดยเบื้องต้น จะเป็นการเขียนสมการแรงดันปม (Node Voltage Equation) ดังสมการที่ (2.1)

$$[Y][V] = [I] \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

เมื่อ $[Y]$ เป็น Nodal Conductance Matrix ที่เป็นเลขจริง
 $[V]$ เป็น Node Voltage Column Vector ที่เวลาขณะใด ๆ
 $[I]$ เป็น Current – Source Column Vector ที่เป็นค่าของกระแสรวมที่พุ่งเข้าสู่ปมนั้นจากปมอ้างอิง (Reference Node) ซึ่งอาจเป็นของแหล่งจ่ายกระแสจริงรวมกับแหล่งจ่ายกระแสสมมูลที่แทนค่าแรงดันและกระแสที่คำนวณได้จากเวลาที่ผ่านมาและจะต้องนำมาพิจารณาในการคำนวณที่เวลาขณะนั้น

การทำงานของโปรแกรม ATPDraw สามารถเขียนเป็นผังโฟว์ชาร์ตได้ดังรูปที่ 2.1

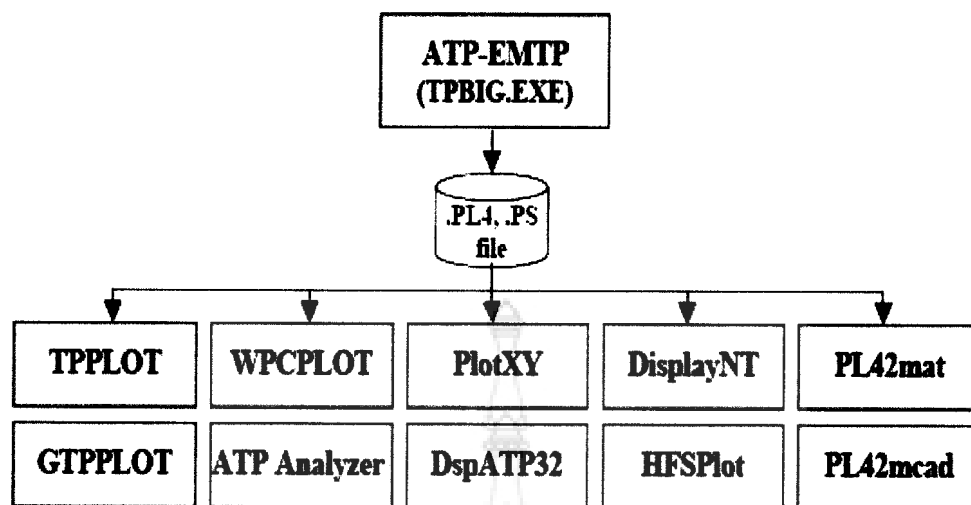


รูปที่ 2.1 โฟว์ชาร์ตการทำงานของโปรแกรมทรานเซียนด์แม่เหล็กไฟฟ้า EMTF

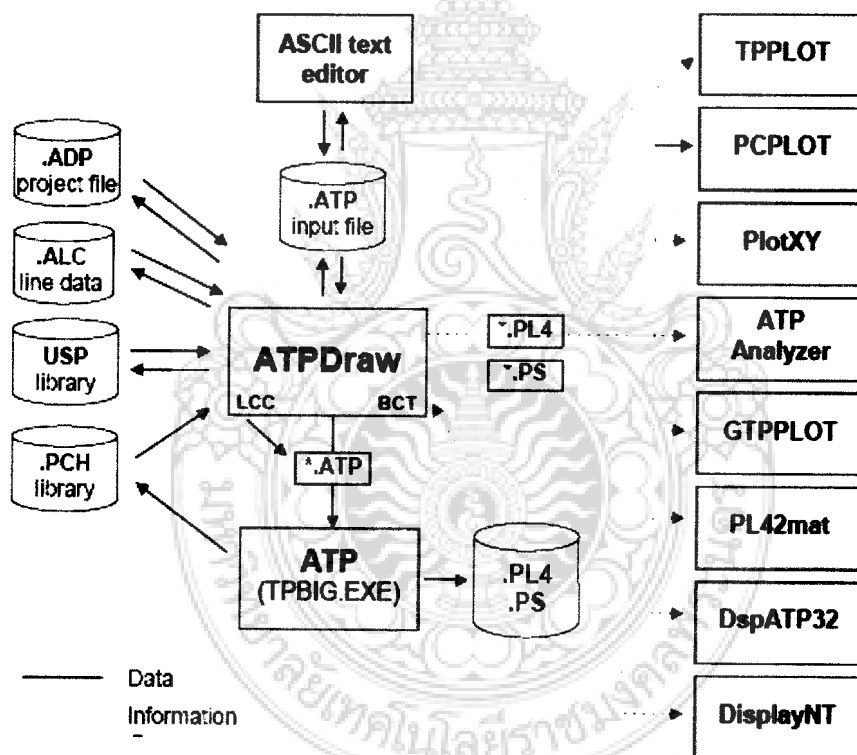
2.1.3 โครงสร้างของโปรแกรม ATPDraw ใน ATP-EMTP (Version 3.5)

โครงสร้างของโปรแกรม ATPDraw สามารถจำแนกการทำงานของ ATPDraw EMTF ได้ 5 ส่วนที่สำคัญดังนี้ และนำมาเขียนเป็นผังได้ดังรูปที่ 2.2

การแสดงผลจะใช้ข้อมูลที่มีอยู่ในคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถที่จะแสดงผลเปรียบเทียบในรูปของเวลา หรือความถี่ ข้อมูลของ ATPDraw จะถูกจัดเก็บในรูปของไฟล์ซึ่งมีนามสกุลเป็น .PI4 และ .PS ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ในภายหลัง และจากที่โปรแกรม ATPDraw ทำการประมวลผลการทดลองไปแล้ว จะมีโปรแกรมต่างๆ ที่จะนำข้อมูลที่ได้อ่านบันทึกไว้ก่อนหน้านี้มาแสดงผลดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.2 (ก) องค์ประกอบต่างๆ ในโปรแกรม ATP-EMTP (Version 3.5)



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบต่างๆ ในโปรแกรม ATP-EMTP

2.1.3.1 TP PLOT คือโปรแกรมนี้จะทำงานที่ DOS และระบบปฏิบัติการต้องสูงกว่า

MS-Windows NT, 2000 , หรือ XP ขึ้นไป โปรแกรม TPLOT จะตรวจสอบ ไฟล์ .pl4 และทำการอ่านข้อมูลจากการประมวลผลของคอมพิวเตอร์จากไฟล์ที่ผ่านมา TPLOT สามารถ พล็อตกราฟ ได้ถึง 20 รูป ในคราวเดียวกัน ในการ พล็อตหนึ่งครั้ง ลักษณะของการ พล็อตจะเทียบกับเวลาคล้ายแบบ PlotXY การพล็อตนั้นจะพล็อตได้ทั้งแบบธรรมดาและแบบอัตโนมัติ ซึ่งจะมีแกนร่วมเป็นแกนเดียวกันและจะมีชื่อบอกคิดมาด้วย รูปกราฟที่พล็อตออกมาได้นั้น เราสามารถปรับเปลี่ยนสีและขนาดได้ตามต้องการและยังสามารถกำจัดส่วนที่ไม่ต้องการออกไปได้อีกด้วย หน้าจอที่เราจะสามารถที่จะเขียนข้อความเพิ่มเติมลงไปได้อีกด้วย

2.1.3.2 GTPLOT คือ โปรแกรมนี้จะทำการ Plot กราฟจากไฟล์ .pl4 ซึ่งเป็น Output ของ ATP อีกทอดหนึ่ง ซึ่งจะรวบรวมเอา GNU FORTRAN และทำการสร้างเป็นกราฟิกแบบ DISLIN โปรแกรมนี้จะใช้งานได้กับ DOS – djgpp , Windows 32 และ Linux โปรแกรม GTPLOT จะสามารถประมวลผลได้จากไฟล์ได้มากถึง 1,000,000 จุด และรองรับการเปลี่ยนแปลงได้ถึง 1,000 ครั้ง และตัว โปรแกรม GTPLOT นี้สามารถพล็อตกราฟได้สูงสุดถึง 20 กราฟ พร้อมๆ กัน ซึ่งมีลักษณะต่างๆ กัน 9 แบบ คือ HP-GL , CGM , WMF , PCX , PostScript , PNG , WFM , JAVA , GNUPLOT สำหรับ FS และ HFS

2.1.3.3 PlotXY คือโปรแกรมนี้จะเป็นการพล็อตแบบดั้งเดิมของโปรแกรม ATP และ EMTP ตัวโปรแกรมทำการออกแบบมาเพื่อให้ใช้งานง่ายและรวดเร็ว เส้นพล็อตใน Microsoft Windows ใช้หลักการของสมการอนุกรมฟูเรียร์ รูปกราฟที่ได้จึงเป็นกราฟอย่างง่ายแสดงออกมาในรูป 32 บิต ใช้การจำค่าที่เลือกไว้จากการ Simulation เพื่อนำมาพล็อตกราฟ การพล็อตกราฟสามารถพล็อตได้มากถึง 8 รูป ใน 1 ครั้ง ซึ่งการพล็อตนั้นจะเทียบกับเวลาหรือแกน XY และตัวโปรแกรมนี้จะช่วยสร้างส่วนโค้งโดยอัตโนมัติจากข้อมูลที่มีอยู่ซึ่งนับว่าเป็นการใช้งานที่ง่าย พร้อมทั้งยังสามารถขยายดูลักษณะของกราฟในระยะใกล้ๆ ได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถคัดลอกไปอยู่ในรูปคลิปบอร์ดเพื่อนำไปใช้ในงานอื่นต่อไปได้อีกด้วย

2.1.3.4 PCPLOT คือ โปรแกรมนี้เป็นการปรับปรุงขึ้นใหม่อีกครั้งในปี ค.ศ. 1997 โดยใช้ภาษา Borland ของ Turbo Pascal ภายใต้ MS-DOS ซึ่งสามารถใช้อ่านไฟล์ .pl4 , C-Link binary และไฟล์ต้นฉบับได้ PCPLOT จะสามารถแสดงส่วนโค้งได้สูงสุด 4 รูป และ 16,000 จุดต่อส่วนโค้ง สามารถบันทึกจำนวนการพล็อตที่เปลี่ยนแปลงที่อยู่ในรูปของไฟล์ ตั้งแต่ 1-100 ได้

โปรแกรม PCPLOT มีการรองรับการใช้งานในรูปแบบของแกนเทียบกับเวลา X-Y และการตอบสนองความถี่พร้อมกันได้ นอกจากนี้ยังสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของสีเส้นและขนาดของเส้นที่พล็อตออกมาได้ ที่สำคัญ คือ ยังสามารถควบคุมความเร็วในการ พล็อตกราฟ ได้อีกด้วย

2.1.3.5 WPCPlot คือโปรแกรมนี้จะสามารถแสดง Output ออกมาเป็นกราฟิกได้สำหรับโปรแกรม ATP-EMTP ที่ทำงานภายใต้ Microsoft windows 95/98/NT/2000 ซึ่งตัวโปรแกรมนี้จะสามารถประมวลผลในรูปแบบของไฟล์ .PI4 ของ C-Link ทำให้ตัวแปรเป็นรูปแบบและชนิดเดียวกันได้สูงสุดถึง 6 ตัวแปร ในไดอะแกรมอันเดียวกัน และยังสามารถขยายดูหรือย้อนกลับไวก่อนหน้าได้ การอ่านข้อมูลมีความรวดเร็วเมื่อนำมาพล็อตส่วนโค้ง ทั้งนี้เราสามารถคัดลอกข้อมูลบนหน้าจอเป็นคลิปบอร์ดหรือบันทึกเป็นไฟล์รูปภาพได้ทั้งแบบสีและขาวดำ

2.1.4 ความสามารถในการใช้งานของ ATPDraw

ความสามารถในการใช้งานของ EMTP สามารถจำแนกออกได้เป็นข้อใหญ่ ๆ ดังนี้

2.1.4.1 การวิเคราะห์ ทรานเซียนต์สำหรับแรงดันเกินฟ้าผ่า, สวิตชิง และชั่วคราว

การวิเคราะห์ในช่วงเวลาดัง ๆ ที่สำคัญคือ การวิเคราะห์แรงดันเกินฟ้าผ่า (Lightning Overvoltage) แรงดันเกินสวิตชิง (Switching Overvoltage) กรณีที่ศึกษาโดยทั่วไป ได้แก่ การส่งจ่ายพลังงาน (Line Energization) การปิดซ้ำโดยอัตโนมัติด้วยความเร็วสูง (High Speed Automatic Reclosure) ซึ่งเป็นการส่งจ่ายพลังงานที่มีผลของประจุหลงเหลือในสายส่ง นอกจากนี้มีกรณีที่ศึกษาเกี่ยวกับกระแสในกับดักเสิร์จ การสวิตชิงที่ทรานฟอร์มเมอร์ (Transformer Switching) การสวิตชิงที่รีแอคเตอร์แรงสูง (High Voltage Reactor Switching) เป็นต้น

การวิเคราะห์ในช่วงเวลาที่ยาวกว่าแบบแรกที่สำคัญ คือ การวิเคราะห์แรงดันเกินชั่วคราว (Temporary Overvoltage) ซึ่งมีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่กำลัง (Power Frequency) หรือเป็นฮาร์โมนิก ของความถี่กำลัง กรณีที่ศึกษาโดยทั่วไป ได้แก่ การละโหลด (Load Rejection) ผลของการเกิดความผิดปกติของดินที่ไม่ได้ดุล (Unbalanced Ground Faults) ผลของสถานะอิ่มตัวของแม่เหล็กในหม้อแปลง เช่น กรณี เฟลด์โรโรโซแนนซ์ ในระบบไฟฟ้าแรงสูง นอกจากนี้ยังมีกรณีการกระตุ้นตัวเองของเครื่องกำเนิด (Generator Self Excitation) เนื่องจากการละโหลดทำให้เกิดความเร็วเกิน (Overspeed) และเกิดแรงดันที่ขั้วของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าด้วย รวมทั้งการวิเคราะห์เกี่ยวกับเสถียรภาพของเครื่องกลไฟฟ้าด้านต่าง ๆ

2.1.4.2 การวิเคราะห์ในสถานะอยู่ตัว (Steady – State)

ใช้ในสถานะเริ่มต้นก่อนการวิเคราะห์ทรานเซียนต์นั้น สามารถนำผลออกมาใช้ได้โดยตรง เช่น กรณีการวิเคราะห์โหลดไฟฟ้าใน EMTP ได้ใช้การวิเคราะห์ในข้อนี้แบบเฟสเซอร์และไม่พิจารณาองค์ประกอบแบบไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากเห็นว่าสถานะอยู่ตัวขององค์ประกอบของระบบที่สำคัญส่วนใหญ่เป็นแบบเชิงเส้น ผลการคำนวณค่ากระแสและกำลังงานที่ไหลเข้าสู่แขนงใด ๆ

2.1.4.3 การวิเคราะห์ทรานเซียนต์และไดนามิคส์ระบบควบคุม

เป็นการวิเคราะห์ที่เทียบได้กับการวิเคราะห์อนาล็อกคอมพิวเตอร์ที่เริ่มใช้กันมาก่อนผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดย TACS (Transient Analysis of Control Systems) จะสามารถเชื่อมการติดต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าได้ ดังนั้น จึงสามารถนำ TACS มาใช้ในงานการควบคุมเครื่องแปลงผันแรงสูงกระแสตรง (HVDC Converter) การกระตุ้นแหล่งจ่าย (Excitation Source) ของเครื่องกลไฟฟ้าระบบ และใช้เป็นองค์ประกอบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ เช่น องค์ประกอบจำลองของแหล่งจ่ายกำลัง, โหลด, สวิตช์ และอุปกรณ์ลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น

2.1.4.5 การวิเคราะห์เพื่อสร้างองค์ประกอบจำลอง และหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

โปรแกรม ATPDraw มีโครงสร้างที่ทำให้โปรแกรมส่วนย่อยที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของระบบสามารถทำการวิเคราะห์โดยอิสระได้ ดังเช่น องค์ประกอบจำลองของสายส่งเคเบิล ซึ่งให้ค่าพารามิเตอร์ได้ทั้งแบบที่ขึ้นและไม่ขึ้นกับความถี่ ค่าความต้านทาน ค่าตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ เสรีจิมพีแดนซ์ และทรานซ์ฟอร์มเมชันแมทริกซ์ (Transformation Matrix) เป็นผลที่ได้รับในการคำนวณสำหรับความถี่ค่าใดค่าหนึ่งที่กำหนดให้ สำหรับเครื่องกลไฟฟ้าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้ ได้แก่ ความเร็ว มุมของโรเตอร์ แรงบิด กระแสในขดลวด และค่าอิมพีแดนซ์

2.2 ทฤษฎีการออกแบบระบบสายดิน [1]

ในการออกแบบสถานีไฟฟ้าแรงสูง ระบบหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการออกแบบก็คือการออกแบบระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าแรงสูง (Substation Grounding System Design) ซึ่งมีระบบนี้มีความสำคัญต่อความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง และผู้ที่อยู่ใกล้สถานีไฟฟ้าแรงสูง รวมถึงความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าด้วย ในการออกแบบระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าแรงสูงที่การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) นำมาใช้งานใน

การออกแบบระบบสายดิน คือ IEEE Std.80 Guide for Safety in AC Substation Grounding [8] ซึ่งเป็นมาตรฐานหลักในการออกแบบ

เนื้อหาของกรออกแบบระบบสายดินสถานีไฟฟ้าแรงสูง เป็นการออกแบบเพื่อความปลอดภัยของคน ซึ่งอยู่บริเวณลานไถขณะเกิดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร รวมถึงแนวทางการออกแบบระบบสายดินรูปแบบต่างๆ เช่น รูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส , รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า , รูปตัว L หรือ T เป็นต้น ทั้งนี้ได้คำนึงถึงขนาดกระแสที่ร่างกายมนุษย์ทนได้ (Range of Tolerable Current) ประเภทและคุณสมบัติของดิน การวัดค่าความต้านทานของดิน (Soil Resistivity Test) การออกแบบระบบสายดิน (Grounding System Design & Calculation) และการเลือกใช้อุปกรณ์ประกอบสายดิน

2.2.1 ความรู้พื้นฐานระบบสายดินเพื่อความปลอดภัยต่อมนุษย์

การออกแบบระบบลงดิน (Grounding system) ก็เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าแรงสูงและผู้อาศัยอยู่รอบข้างสถานีไฟฟ้าแรงสูง และอุปกรณ์ไฟฟ้าในบริเวณลานไถ อันเกิดจากแรงดันช่วงก้าว (Step voltage, E_s) , แรงดันสัมผัส (Touch voltage, E_t) และแรงดันส่งผ่าน (Transfer potential, E_{trans}) ขณะที่เกิดผิดพร่องของวงจรไฟฟ้า (Fault)

2.2.2 ขนาดของกระแสที่ร่างกายทนได้

ผลกระทบของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกายมนุษย์หรือสัตว์จะขึ้นอยู่กับขนาดกระแสและระยะเวลา ซึ่งกระแสนั้นไหลผ่าน รวมถึงความถี่ของกระแสนั้นด้วย อันตรายที่เกิดคือจะไปส่งผลต่อการเต้นของหัวใจ การไหลเวียนของโลหิต รวมถึงกระดูกและกล้ามเนื้อต่างๆ ส่วนผลของความถี่ที่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ที่ 50-60 Hz หากกระแสความถี่นี้ไหลผ่าน 0.1 A ก็สามารถทำให้เสียชีวิตได้แต่หาก ความถี่ 3,000 -10,000 Hz รวมถึงกระแสชั่วขณะ (Lightning surge) แม้ว่ากระแสจะสูงกว่านี้บางครั้ง ร่างกายก็ทนได้ ผลกระทบของขนาดและเวลาที่กระแสไหลผ่านพอสรุปได้

กระแสขนาด 1 mA จะให้ความรู้สึกเล็กน้อยเมื่อได้สัมผัส (Threshold current)

กระแสขนาด 1- 6 mA เป็นค่าสามารถควบคุมร่างกายได้ไม่ถึงอันตราย โดยทั่วไปมีขนาด 10.5 mA สำหรับผู้หญิงและ 16 mA สำหรับผู้ชาย ซึ่งค่า 6 – 9 mA เป็นค่าเริ่มต้นของกระแสในช่วงนี้ 25 mA เป็นค่ากระแสที่ทำให้ความรู้สึกเจ็บปวด และสามารถปล่อยมือที่สัมผัสได้ ทำให้เกิดการหายใจ ถ้าหากเกิดเป็นเวลานานทำให้เกิดเสียชีวิตได้

กระแสขนาด 60 -100 mA จะทำให้หัวใจหยุดเต้น หรือหยุดหายใจเป็นเหตุให้เสียชีวิต

ดังนั้นในการออกแบบระบบลงดิน จะต้องคำนึงถึงค่าของกระแสที่ไหลผ่านร่างกาย จะต้องให้ต่ำกว่าค่ากระแสเริ่มต้นเมื่อสัมผัส (Threshold current) ซึ่งโดยทั่วไปจะกำหนดให้กระแสที่ไหลผ่านร่างกาย (I_B) มีระยะเวลาระหว่าง 0.03 -3 วินาที และร่างกายจะได้รับพลังงานตามสมการดังนี้

$$(I_B)^2 t_s = S_B \quad \text{.....(2.2)}$$

เมื่อ I_B = ขนาดของกระแสที่ไหลผ่านร่างกาย (A)

t_s = ระยะเวลาที่กระแสไหลผ่าน (sec)

S_B = พลังงานที่ร่างกายดูดซับไว้ (J)

จากสมการที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าพลังงานที่ร่างกายได้รับขึ้นอยู่กับกระแส I_B และ เวลา t_s หากเราจำกัดเวลา t_s ให้สั้นลง คือการขจัดความผิดพลาดให้เร็วที่สุดเหตุผลก็คือ

1. กระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายในเวลาสั้นลงเป็นผลให้เกิดอันตรายต่อร่างกายน้อยลง
2. โอกาสที่จะเสียชีวิตน้อยลงเมื่อเวลาของ t_s สั้นลง

2.2.3 ขนาดของกระแสที่ยอมให้ไหลผ่านร่างกาย

การกำหนดค่าระยะเวลาที่กระแสความถี่ขนาด 50-60 Hz ไหลผ่านร่างกายได้โดยให้ 99.5 % ไม่ได้รับอันตราย จากสมการที่ 2.2 พบว่า

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t_B}} \quad \text{..... (2.3)}$$

เมื่อ $K = \sqrt{S_B}$ โดย $S_B = 0.0135$, สำหรับคนมีน้ำหนัก 50 kg
 $S_B = 0.0246$, สำหรับคนมีน้ำหนัก 70 kg

ดังนั้นค่า K สำหรับคนมี 50 kg = $\sqrt{0.0135} = 0.116$

70 kg = $\sqrt{0.0246} = 0.157$

พอสรุปได้ว่าค่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายได้ของคนน้ำหนัก 50 kg คือ

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

จากสมการที่ 2.3 พบว่าเราสามารถหาค่า I_B มีค่าสูงขึ้นอีกได้ หากให้ระยะเวลา t_s สั้นลงซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันต่าง ๆ ว่าตัดวงจรได้เร็วขนาดไหน

2.2.4 วงจรสมมูลของการเกิดไฟฟ้าลัด (Equivalent Circuits)

เมื่อเกิดอุบัติเหตุไฟฟ้าลัดเราสามารถพิจารณาได้ 3 กรณีใหญ่ๆ ของวงจรกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย คือ

กรณีที่ 1 จากมือข้างหนึ่งไปยังเท้าสองข้าง

กรณีที่ 2 จากมือข้างหนึ่งไปยังมืออีกข้างหนึ่ง

กรณีที่ 3 จากเท้าข้างหนึ่งไปยังเท้าอีกข้างหนึ่ง

สำหรับแหล่งจ่ายซึ่งเป็น DC และ AC ที่มีความถี่ไม่สูงมากจะกำหนดให้ร่างกายมีเฉพาะ ความต้านทาน (R_B) เท่านั้น หากเกิดไฟฟ้าลัดกรณีที่ 2 , 3 และไม่คิดความต้านทานของผิวหนังแล้ว ร่างกายจะมีความต้านทานประมาณ 300 Ω หากรวมผลของผิวหนังด้วยจะอยู่ระหว่าง 500-3,000 Ω ในการคำนวณจะเลือกค่า $R_B = 1000 \Omega$ ซึ่งเป็นความต้านระหว่างมือกับเท้าทั้ง 2 ข้าง คือเกิดขึ้นในกรณีแรก กระแสที่ไหลผ่านร่างกายในกรณีนี้ อวัยวะที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดคือหัวใจ

ในการหาวงจรสมมูลของการเกิดไฟฟ้าลัดและให้กระแสในสมการที่ 2.4 และ 2.5 ไหลผ่านร่างกายเราก็สามารถหาค่าแรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานของร่างกายได้โดยให้

I_A = กระแสที่ไหลผ่านร่างกายขณะเกิดไฟฟ้าลัด

R_A = ความต้านทานรวมของวงจรในขณะนั้น

I_B = กระแสที่ไหลผ่านร่างกายโดยไม่ทำอันตรายถึงชีวิต

ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยควรให้ $I_A < I_B$ ก็คือกระแสที่ไหลผ่านร่างกายจะต้องจ่ายพลังงานให้ร่างกายน้อยกว่าขีดจำกัดของพลังงานที่ร่างกายทนได้ ซึ่งคนน้ำหนัก 50 kg = 0.135 J และคนน้ำหนัก 70 kg = 0.0246 J ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นขณะเกิดไฟฟ้าลัด (R_A) เกิดจากความต้านทานของเท้า (R_f) (ความต้านทานของพื้นจะสูงกว่าความต้านทานของเท้า) ในการคำนวณเราจะสมมุติให้เท้าเปรียบเสมือนแผ่นโลหะกลมมีรัศมี $b = (m)$ และไม่คิดความต้านทานของรองเท้า และระยะห่างของเท้าทั้งสองข้างเท่ากับ $df (m)$ จะทำให้เกิดความต้านทานสองอย่าง คือ

$$R_{foot} = \frac{\rho}{4b}, \text{ Self Resistance} \quad \dots\dots\dots (2.6a)$$

$$R_{mfoot} = \frac{\rho}{2\pi d_F}, \text{ Mutual Resistance} \quad \dots\dots\dots (2.6b)$$

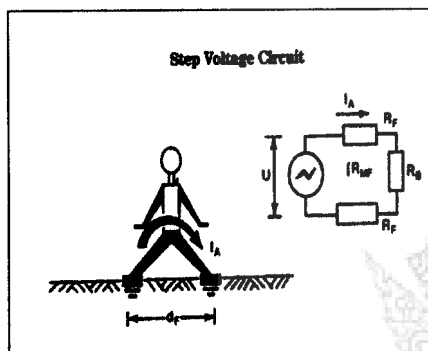
และความต้านทานในดินของเท้าทั้ง 2 ข้างจะอนุกรมและขนานกัน คือ

$$R_{2FS} = 2(R_{foot} - R_{mfoot}) \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

เมื่อความต้านทานเท้าทั้ง 2 ข้างอนุกรมกัน

$$R_{2FP} = \frac{1}{2}(R_{foot} + R_{mfoot}) \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

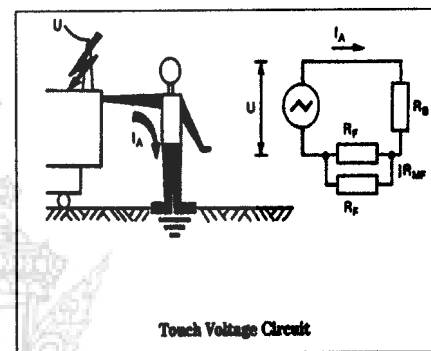
เมื่อความต้านทานเท้าทั้ง 2 ข้างขนานกัน



$$R_A = R_B + 2(R_{foot} - R_{mfoot})$$

$$R_A = R_{Body} + R_{Two Feet in Series}$$

รูปที่ 2.3 Step Voltage Circuit , Et



$$R_A = \frac{1}{2}(R_{foot} + R_{mfoot})$$

$$R_A = R_{Body} + R_{Two Feet in Parallel}$$

รูปที่ 2.4 Touch Voltage Circuit, Et

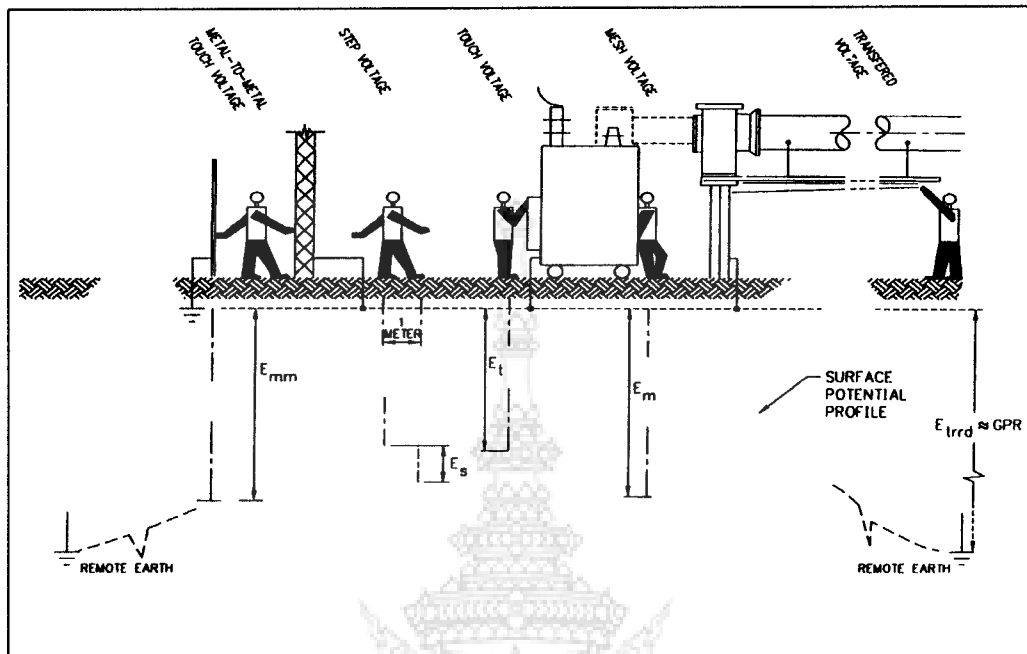
ในรูปที่ 2.3 เป็นวงจรสมมูลของหน้าสัมผัสของเท้าทั้ง 2 ข้างและ ให้แรงดัน U เป็นแรงดัน สูงสุด ที่ต่อขนานอยู่และระยะห่างระหว่างจุดบนผิวดิน คือ dF ดังนั้นเราจะได้อิงจรสมมูลของแรงดันช่วงก้าว (Step Voltage , Es) คือค่าที่กำหนดโดย RA ส่วนในรูปที่ 2.4 เป็นการดูดผ่านมือไปยังเท้าทั้ง 2 ข้างและกำหนดให้ คือแรงดันสัมผัส (Touching Voltage , Et)

จากสมการที่ 2.7 และ 2.8 ถ้าให้ $R_{foot} = 3\rho$ จะได้ค่าของความต้านทาน ซึ่งอนุกรมและขนานกันในรูปตัวแปรใหม่ คือ

$$R_{2FS} = 6.0(\rho) \quad \text{สำหรับหาค่าแรงดัน Es} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

$$R_{2FP} = 1.5(\rho) \quad \text{สำหรับหาค่าแรงดัน Et} \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

2.2.5 ชนิดของการเกิดไฟฟ้าดูด



รูปที่ 2.5 Basic Shock Situations

ในรูปที่ 2.5 แสดงถึงการเกิดไฟฟ้าดูดในสถานีไฟฟ้า เมื่อเกิด fault แบบง่ายๆ ในขณะลัดวงจรในสถานีไฟฟ้าพื้นดินในบริเวณสถานีไฟฟ้าจะอึดตัวไปด้วยกระแสไฟฟ้าที่ออก จาก Grid หรือส่วนอื่นๆ อุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งต่อลงดินเป็นผลให้เกิด Potential gradient และเป็นปัจจัยเริ่มต้นที่ทำให้เกิดแรงดัน ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

Ground potential rise (GPR) คือแรงดันสูงสุดที่ระบบลงดินนั้นติดตั้งอยู่เทียบกับการต่อลงดินอ้างอิง (Remote Earth)

Step Voltage, (E_s) คือแรงดันระหว่างเท้า 2 ข้างโดยทั่วไปกำหนดระยะห่าง 1 เมตร

Touch Voltage Circuit, (E_t) คือแรงดันระหว่าง GPR และแรงดันผิวดินซึ่งคนนั้นยืนอยู่ขณะที่มือสัมผัสอยู่กับ โครงเหล็กของอุปกรณ์ซึ่งต่ออยู่กับระบบลงดิน

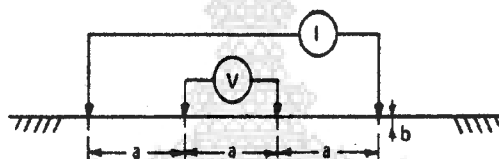
Mesh Voltage (E_m) คือแรงดัน E_t สูงสุดที่ Mesh ของระบบลงดิน

Transfer potential, (E_{trns}) เกิดขึ้นเป็นกรณีพิเศษของแรงดัน E_t ส่งผ่านออกไปนอกสถานีไฟฟ้า เช่นคนยืนอยู่นอกสถานีไฟฟ้าแต่ไปสัมผัสอยู่กับตัวนำ หรือโครงเหล็กซึ่งต่ออยู่กับระบบลงดินของสถานีไฟฟ้านั้นๆ

2.3 การออกแบบระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าแรงสูง [1]

ก่อนที่จะถึงวิธีการออกแบบระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าแรงสูง เราจำเป็นต้องรู้ถึงวิธีการหาค่าความสามารถในการนำกระแสของดิน (Soil Resistivity, ρ) ก่อน ซึ่งทาง กฟผ. ได้ใช้วิธีการวัดตามมาตรฐาน IEEE Std. 81 แบบ Four Point Method ที่ระยะห่างระหว่าง Electrode เท่ากัน หรือเรียกอีกอย่างว่า Wenner Arrangement วิธีนี้จะให้ค่าแม่นยำมากที่สุดในทางปฏิบัติ การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีนี้จะใช้แท่ง Electrode 4 แท่ง ฝังในดินเป็นแนวเส้นตรง โดยให้ Electrode แต่ละแท่งวางห่างกัน a

และต่อกลึงลงไปในดิน b นำกระแสทดสอบ I ต่อระหว่างแท่ง Electrode คู่นอกและ Potential ต่อระหว่างแท่ง Electrode คู่ใน และวัดค่าความต้านทาน(R) ด้วย Potentiometer หรือ High impedance voltmeter ซึ่งการวัดของเครื่องมือวัดเป็นการนำค่า V มาหารกับค่า I นั้นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การวัดค่าความต้านทานดินของสถานีไฟฟ้า

ในการวัดเราจะกำหนดจุดที่จะวัดให้ครอบคลุมพื้นที่สถานีไฟฟ้าแรงสูงแต่ละจุดจะวัดออกไปเป็น 2 ทิศทาง และนำข้อมูลค่าความต้านทาน (R) ที่ได้มาเฉลี่ยและนำมาคำนวณหาค่า ρ

ดังสมการ

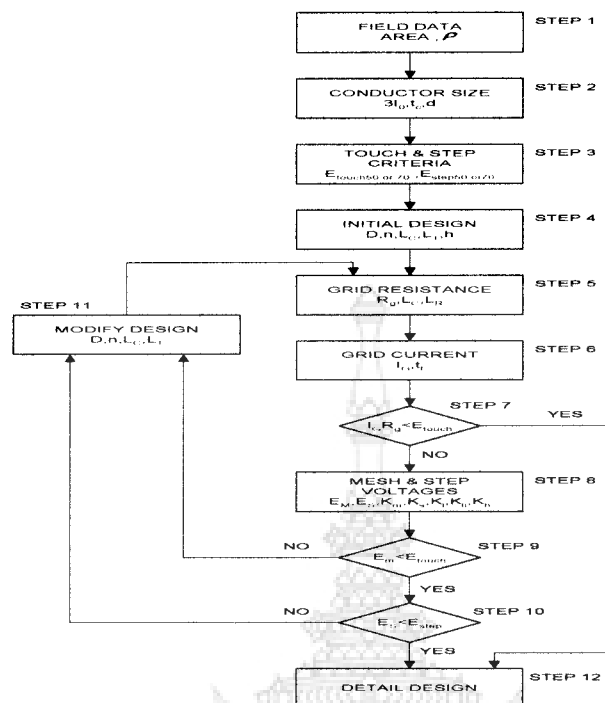
$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

ในทางปฏิบัติค่า b จะไม่เกิน $0.1 a$ ดังนั้น $b = 0$

$$\rho = 2\pi a R$$

และประมาณว่าค่า ρ ที่วัดได้นี้ เป็นการวัดค่า ρ ที่ความลึกเท่ากับ a เพราะกระแสจะไหลใกล้ผิวดินของแท่ง Electrode ที่ระยะห่างเท่ากับ a เมื่อวัดค่าที่ระยะต่างๆ ได้แล้ว ก็นำไป Plot กราฟ ก็จะทำให้เราสามารถแยกได้ว่าที่แต่ละความลึกของดินมีค่า ρ เป็นอย่างไร

จากนั้นนำค่าที่ได้ไปใช้ในการออกแบบระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าแรงสูงตามขั้นตอน ดังแสดงตามโฟว์ชาร์ตดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบสายเคเบิลสถานีไฟฟ้าแรงสูง

2.3.1 ขั้นตอนที่ 1 Field Data

เป็นขั้นตอนแรกที่เราต้องรู้ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานออกแบบระบบสายเคเบิลซึ่งประกอบด้วย

- ขนาดของสถานีไฟฟ้าแรงสูง (Area)
- ค่าของขนาด Fault ของกระแสสูงสุดที่จะเกิดภายในสถานีไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นค่าที่คำนวณได้จาก Short Circuit Current แบบ Three Phase Fault ($3I_0$) โดยมีการพยากรณ์ (Forecast) ว่าจะสามารถครอบคลุมในอนาคตด้วย แต่การออกแบบสถานีไฟฟ้าอุตสาหกรรมข้อมูลดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เพราะเป็นหน่วยงานที่มีหน้าที่และมีข้อมูลดังกล่าว
- ค่าระยะเวลาสูงสุดที่สามารถปลดกระแสได้วงจร (Duration of Fault Current ; Clearing Time (t_c)) โดยทั่วไปจะกำหนดระหว่าง 0.25-1.0 sec ในที่นี้เราจะให้ Clearing Time (t_c) = 1.0 sec
- ความต้านทานของผิวดิน (Crushed-Stone or Crushed Rock Resistivity : ρ) การใช้หินโรยหน้าจะเป็นการเพิ่มค่าความต้านทานของผิวดินซึ่งจะเป็นการลดกระแสไหลผ่านร่างกาย

ได้ หินโรยหน้าจะใช้ค่าความต้านทานประมาณ 1000-5000 $\Omega-m$ ในที่นี้จะใช้ค่าที่ 3,000 $\Omega-m$

- ค่าความต้านทานของดินทางไฟฟ้า (Soil Resistivity ; ρ) ซึ่งจะเป็นการตรวจวัดจากพื้นที่ที่ก่อสร้างจริง ด้วยวิธี 4-Point Method ดังรายละเอียดในหัวข้อ 2.3 แต่ในที่นี้เราจะสมมุติค่าที่วัดได้เป็นค่าความต้านทานดิน (Soil Resistivity Test at 0.5 m) มีค่าเท่ากับ 10 $\Omega-m$ และค่าความต้านทานดิน (Soil Resistivity Test at 10.0 m) มีค่าเท่ากับ 12.5 $\Omega-m$

2.3.2 ขั้นตอนที่ 2 Conductor Size

เป็นขั้นตอนหาขนาดสายดิน (Ground Conductor) ที่จะนำมาใช้ในระบบ ความสำคัญในส่วนนี้ก็คือหากเราไม่มีการหาขนาดสายดินที่ถูกต้อง จะมีผลเสียก็คือถ้าเราเลือกใช้สายขนาดเล็กกว่า ก็จะมีผลทำให้หากเกิด Fault ขึ้นในระบบ ขนาดกระแสที่เกิดขึ้นจะทำให้สายดินที่ใช้ในระบบหลอมละลายเกิดความเสียหายได้ และเลือกขนาดที่ใหญ่เกินไปกว่า ผลจะทำให้มีการลงทุนเกินจากเป็นจริง

สูตร กระแสที่ไหลผ่านตัวนำ

$$I = A \sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

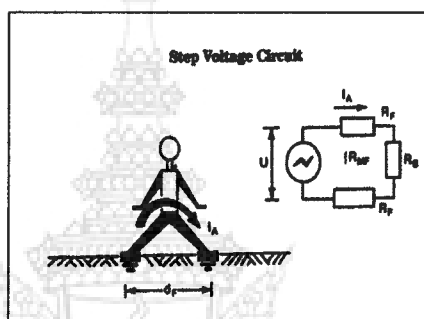
เมื่อ	I =	ขนาดกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ
	A =	พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ
	Tm =	อุณหภูมิหลอมเหลวของตัวนำ
	Ta =	อุณหภูมิใช้งาน (40°C)
	Tr =	อุณหภูมิอ้างอิงของค่าคงที่ของตัวนำที่พิจารณา
	α_0 =	สปส.ความต้านทานของตัวนำที่ 0°
	α_r =	สปส.ความต้านทานของตัวนำที่ Tr
	ρ_r =	ค่าความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ Tr ($\mu\Omega/cm^3$)
	K_0 =	$1/\alpha_0$ หรือ $1/\alpha_r - T_r$
	t_c =	เวลาที่กระแสไหลผ่าน
	TCAP =	ตัวประกอบความจุความร้อน

2.3.3 ขั้นตอนที่ 3 Step & Touch Voltage

แนวคิดในการหาค่าแรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัส (Step and Touch voltage) เพื่อความปลอดภัยของบุคคล ซึ่งอยู่ในบริเวณลานไถไม่ได้รับอันตรายจากไฟฟ้าดูด เมื่อเกิด fault ทำให้โดยการจำกัดขนาดของกระแสที่ไหลผ่านร่างกายต้องไม่จ่ายพลังงานเกินขีดจำกัดที่ร่างกายทนได้โดยกำหนดอยู่ในรูปของ E_s และ E_t ดังนี้

2.3.3.1 การหาค่า E_s

$$E_s = (R_B + R_{2FS}) I_B \quad \dots\dots\dots (2.13)$$



รูปที่ 2.8 การหาค่าแรงดันช่วงก้าว

R_B คือค่าที่ร่างกายจะมีความต้านทานประมาณ 300 Ω หากรวมผลของผิวหนังด้วยจะอยู่ระหว่าง 500-3,000 Ω ในการคำนวณจะเลือกค่า $R_B = 1000 \Omega$

$$R_{2FS} = (R_{foot} - R_{mfoot}) \quad \text{เมื่อความต้านทานเท้าทั้ง 2 ข้างอนุกรมกัน}$$

$$I_B = \frac{K}{\sqrt{t_s}} \quad \text{เมื่อ } K = \sqrt{S_B}$$

เมื่อให้ $S_B = 0.0135$, สำหรับคนที่มีน้ำหนัก 50 kg

$S_B = 0.0243$, สำหรับคนที่มีน้ำหนัก 70 kg

ดังนั้นค่า K สำหรับคน 50 kg = $\sqrt{0.0135} = 0.116$

70 kg = $\sqrt{0.0246} = 0.157$

พอสรุปได้ว่าค่ากระแสที่ไหลผ่านร่างกายได้ของคนหนัก 50 kg และ 70 kg คือ

$$I_{B50} = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$I_{B70} = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

นำค่าที่ได้มาแทนในสมการ $E_s = (R_B + R_{2FS})I_B$ ก็จะได้สมการ E_s ในรูปของ $C_s(h_s, k)$

$$E_{s50} = [1000 + 6.0C_s(h_s, k)\rho_s]0.116 / \sqrt{t_s} \quad \text{สำหรับคนน้ำหนัก 50 kg}$$

$$E_{s70} = [1000 + 6.0C_s(h_s, k)\rho_s]0.157 / \sqrt{t_s} \quad \text{สำหรับคนน้ำหนัก 70 kg}$$

แทนค่าลงในสูตรจะได้ $C_s(h_s, k)$ ดังนี้

$$\begin{aligned} C_s(h_s, k) &= 1 - a \frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{(2h_s + a)} \\ &= 1 - 0.09 \frac{\left(1 - \frac{10}{3000}\right)}{[2(0.1) + 0.09]}, \quad a = 0.09 \\ &= 0.6907 \end{aligned}$$

เมื่อ $C_s = 1$ เมื่อไม่ได้โรยหน้าด้วยหิน (วัสดุแตงผิว)

$$\rho_s = \text{ความต้านทานของวัสดุแตงผิว} = 3000 \, \Omega - m$$

$$\rho = \text{ความต้านทานของดิน} = 10 \, \Omega - m$$

$$h_s = \text{ความสูงของวัสดุแตงผิว} = 0.10 \, m.$$

$$t_s = \text{Duration of shock current} = 1.0 \, \text{sec.}$$

เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งโดยส่วนน้อยจะมีคนน้ำหนักประมาณ 50 kg เข้าปฏิบัติงาน

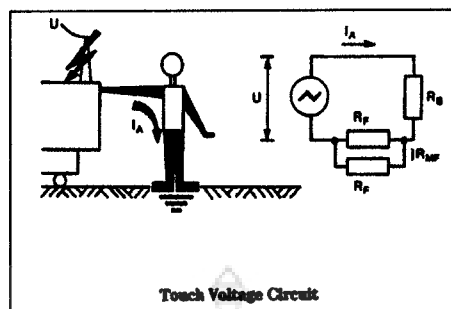
$$E_{Step50} = [1000 + 6.0C_s(h_s, k)\rho_s]0.116 / \sqrt{t_s}$$

$$E_{Step50} = [1000 + 6.0(0.6907)(3000)]0.116 / \sqrt{1} = 1558.18 \, V$$

2.3.3.2 การหาค่า E_t

ในการทำงานเดียวกับค่าของ E_t จะได้

$$E_t = (R_B + R_{2FP})I_B \quad \dots\dots\dots (2.14)$$



รูปที่ 2.9 Touch Voltage Circuit

$$R_{2FP} = \frac{1}{2}(R_{foot} + R_{mfoot}) = 1.5(\rho) = 1.5C_s(h_s, k)\rho \quad \text{เมื่อความต้านทานเข้าทั้ง 2 ข้าง}$$

ขนานกัน

แทนค่า

$$E_{S50} = [1000 + 1.5C_s(h_s, k)\rho_s]0.116 / \sqrt{t_s} \quad \text{สำหรับคนน้ำหนัก 50 kg}$$

$$E_{S70} = [1000 + 1.5C_s(h_s, k)\rho_s]0.157 / \sqrt{t_s} \quad \text{สำหรับคนน้ำหนัก 70 Kg}$$

เมื่อ $C_s = 1$ เมื่อไม่ได้โรยหน้าด้วยหิน (วัสดุแต่งผิว)

เพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานซึ่งโดยส่วนน้อยจะมีคนน้ำหนักประมาณ 50 kg เข้าปฏิบัติงาน

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s(h_s, k)\rho_s)0.116 / \sqrt{t_s}$$

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5(0.6907)(3000))0.116 / \sqrt{1} = 476.55 V$$

เพื่อความปลอดภัยแล้ว ค่าของ E_t, E_m จะน้อยกว่าค่า E_t ที่ยอมให้เกิดขึ้นได้

2.3.4. ขั้นตอนที่ 4 Initial Design

การออกแบบการวางระบบ Ground Grid และการฝังระบบ Ground Rod ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญมากต่อการความปลอดภัยและการประหยัดงบประมาณในการลงทุน เราจึงควรกำหนดการวางระบบที่มีความเหมาะสมในเบื้องต้นเราจึงกำหนดเท่าที่จำเป็นและตรวจสอบในขั้นตอนต่อไป

2.3.4.1 การหาพื้นที่ที่ใช้ติดตั้งสายตัวนำ (Total area enclosed by ground grid)

2.3.4.2 การหาความยาวของตัวนำ (Total length of ground grid conductor)

หากกำหนดระยะห่างระหว่างสายตัวนำ (Spacing between parallel conductor) โดยกำหนดที่ค่าระยะห่างเท่ากับ D ที่ระยะห่างที่เท่ากันที่ 3.00 เมตร

2.3.4.3 การหาความยาวของ Ground Rod (Total length of ground grid conductor)

ในการออกแบบสถานีไฟฟ้า จำนวนของตัว Ground Rod (@5/8" Dia. x 10' L) ไม่เป็นสิ่งที่สำคัญมากนัก เพราะว่าเป็นการนำจำนวนความยาวที่ได้ไปรวมกับความยาวของตัวนำ (Ground Grid) แต่ในการออกแบบเรายังนิยมที่จะใช้ Ground Rod ในการวางระบบสายดินร่วมกับระบบ Ground ดังนั้นจึงไม่มีเกณฑ์การกำหนดที่แน่นอนว่าจะต้องใช้จำนวนเท่าไร

2.3.4.4 หาความยาวรวมของสายดินทั้งระบบ (Total length of ground grid conductor)

$$L = L_C + L_R$$

2.3.4.5 การกำหนดค่าการฝังลึกของสายตัวนำ (h)

โดยมีการฝังลึกที่ 0.50 เมตร

2.3.5 ขั้นตอนที่ 5 Grid Resistance

ในการหาค่าความต้านทานระบบสายดิน (Grid Resistance ; Rg) จะมีการกำหนดขนาดค่าความต้านทานสายดิน โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยจะกำหนดในเงื่อนไขการออกแบบระบบสายดินสถานีไฟฟ้าแรงสูงไว้ที่ค่าไม่เกิน 1 Ω ดังนั้นในขั้นตอนหาค่า Rg จะเห็นว่ามีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานดิน ซึ่งหากว่าค่าความต้านทานดินมีค่าสูงมาก ค่าความต้านทานระบบสายดินก็จะมีค่าสูงมากด้วย

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

2.3.6 ขั้นตอนที่ 6 Grid Current & Grid Potential Rise

2.3.6.1 ในการหาค่า Max. Grid Current ; Ig เราควรนำค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ Load Flow Diagram ที่หาค่าของขนาด Fault ที่มีกระแสสูงสุดที่จะเกิดภายในสถานีไฟฟ้า ซึ่งจะเป็ค่าที่คำนวณได้จาก Short Circuit Current แบบ Three Phase Fault (3Io) โดยมีการพยากรณ์ (Forecast) ว่าจะสามารถครอบคลุมในอนาคตด้วย แต่การออกแบบสถานีไฟฟ้าอุตสาหกรรม ข้อมูลดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย

2.3.6.2 การหาค่าแรงดันที่เกิดจากระบบสายดิน (Grid Potential Rise ; GPR) นั่นคือการนำค่าความต้านทานระบบสายดิน (Grid Resistance ; Rg) มาคูณกับค่ากระแสสายดิน (Max. Grid Current ; Ig) ดังสูตร

$$GPR = I_g \times R_g \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

2.3.7 ขั้นตอนที่ 7 Grid Potential Rise

เป็นขั้นตอนที่เป็นการเปรียบเทียบค่าที่ได้จาก Grid Potential Rise (GPR) กับค่าแรงดัน Touch Voltage ดังนี้ $GPR (I_g \times R_g) < E_{touch50}$ ถ้าเป็นไปตามนี้ก็สามารถข้ามขั้นตอนไปที่ขั้นตอนที่ 12 ซึ่งเป็นการทำ Detail Design ได้เลย แต่ถ้าเป็น $GPR (I_g \times R_g) > E_{touch50}$ จะต้องเข้าไปทำในขั้นตอนที่ 8 ต่อไป

2.3.8 ขั้นตอนที่ 8 Mesh & Step

การหาค่าของแรงดันช่วงก้าว (Step voltage, E_s) ซึ่งเกิดขึ้นรอบ ๆ บริเวณสถานีไฟฟ้า นั้น ๆ ขณะที่เกิด fault ในการออกแบบระบบลงดินรวมทั้งการกระจายความต่างศักย์ในบริเวณรอบ ๆ ลานไคไฟฟ้าในทางปฏิบัติแล้ว การคำนวณ E_s , E_s แบบง่าย ๆ จะกำหนดให้ผังบริเวณเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือรูปตัว L และให้เนื้อดินมีความต่อเนื่อง (Uniform soil)

2.3.9 ขั้นตอนที่ 9 , 10 , 11 Mesh Voltage is below the tolerable touch Voltage & Step Voltage is below the tolerable step Voltage & Modify Design

ในขั้นตอนที่ 9 และ 10 เป็นขั้นตอนที่ตรวจสอบงานออกแบบในขั้นตอนที่ 4 Initial Design ว่าสามารถใช้ในการออกแบบจริงในขั้นตอนที่ 12 Detail Design โดยมีเงื่อนไขดังนี้

$$E_m < E_{touch50} \quad \text{และ} \quad E_s < E_{step50}$$

จะเห็นว่าเราสามารถนำข้อมูลจากรายการคำนวณที่ได้ไปใช้งานออกแบบได้ แต่ในทางกลับกันถ้าค่าที่ได้ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดก็จะต้องเข้าสู่ขั้นตอนที่ 11 โดยต้องมีการปรับปรุงข้อมูลในขั้นตอนที่ 4 ที่ค่า ระยะการวาง Ground Grid ให้ใกล้มากขึ้น ก็จะได้ค่าความยาวสายตัวนำมากขึ้น และกลับไปเริ่มในขั้นตอนที่ 4-10 ใหม่ จนกว่าจะได้ผ่านเงื่อนไขในขั้นตอนที่ 9 & 10

2.3.10. Detail Design

ในขั้นตอนนี้เป็นการนำแบบตัวอย่างงานก่อสร้างและค่าระยะการวาง Ground Grid มาวางระบบสายดินสถานีไฟฟ้าจะเห็นว่าในการออกแบบระบบสายดินสถานีไฟฟ้าแรงสูงจะมีขั้นตอนในการคำนวณหลายขั้นตอนเพื่อให้สถานีไฟฟ้ามีความปลอดภัยทั้งระบบและชีวิตผู้ปฏิบัติงาน อีกทั้งมีความปลอดภัยต่อระบบสายดินเอง

บทที่ 3

การออกแบบและการศึกษาการใช้งานโปรแกรม ATPDraw

3.1 บทนำ

เป้าหมายของการศึกษาระบบสายดินภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยใช้ Program ATPDraw เป็นเครื่องมือช่วยในการดำเนิน การจำลองระบบสายดินภายในสถานีไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เพื่อสะดวกในการศึกษาถึงสาเหตุที่มีการเกิดแรงดันเกินในระบบสายดินและออกแบบสถานีไฟฟ้าแรงสูง ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองโดยใช้ Program ATPDraw ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 สถานีไฟฟ้าแรงสูงบ้านฉางชลบุรี จังหวัดชลบุรี

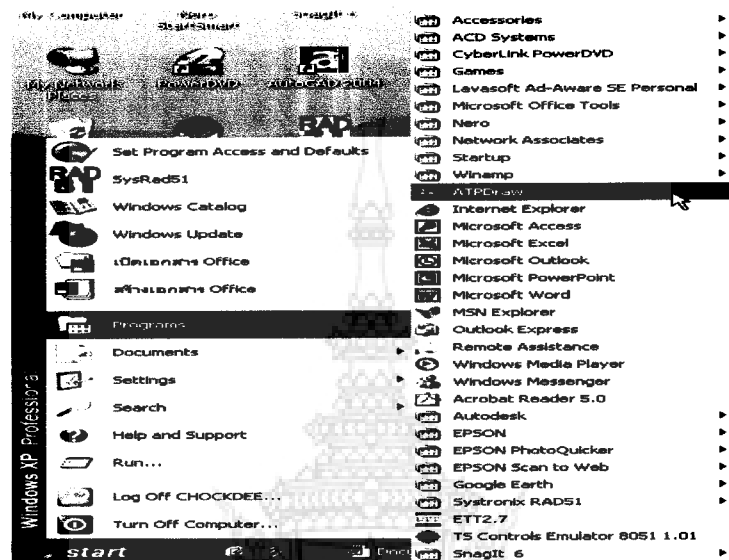


รูปที่ 3.2 รูปแบบการวางสาย Ground Wire

3.2 การใช้งาน Program ATPDraw

Program ATP Draw เป็นโปรแกรมที่ใช้งานได้เหมือนกับ Program EMTP ที่สามารถใช้งานบน Window มีลักษณะการทำงานแบบ Interactive และการแสดงผลแบบ Graphics

3.2.1 การใช้งาน โดยเลือก Program ATP Draw

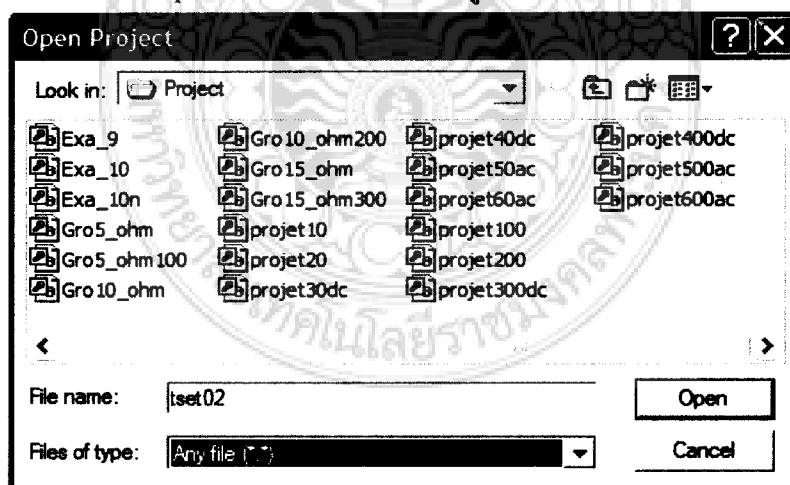


รูปที่ 3.3 การเริ่มใช้งาน Program ATP Draw

3.2.2 กลุ่มคำสั่ง Project

New : การสร้าง Case ใหม่

Open : การเปิด Case ที่มีอยู่แล้ว



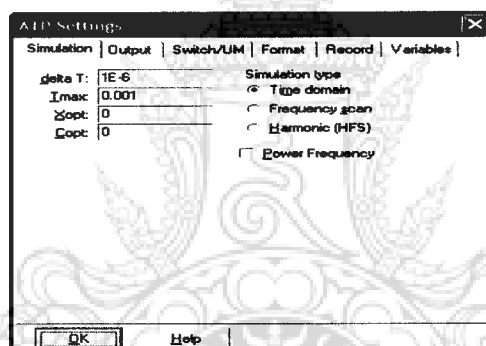
รูปที่ 3.4 Open Project dialog box

3.2.3 กลุ่มของคำสั่ง ATP

ATP	
Settings...	F3
run ATP	F2
Edit ATP-file	F4
Edit LIS-file	F5
Make File As...	
Make Names	
Edit Commands...	
run ATP	Ctrl+Alt+0
run ATP (file)	Ctrl+Alt+1
run PlotXY	Ctrl+Alt+2
Edit Text	Ctrl+Alt+3

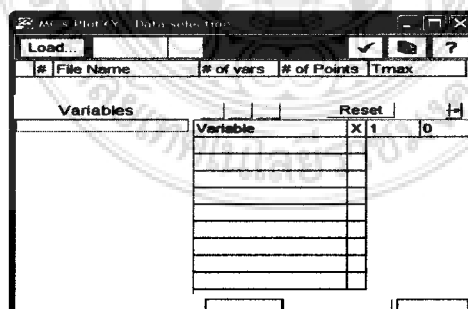
รูปที่ 3.5 Menu bar ในกลุ่มคำสั่ง ATP

3.2.4 กลุ่มคำสั่ง Settings (F3)



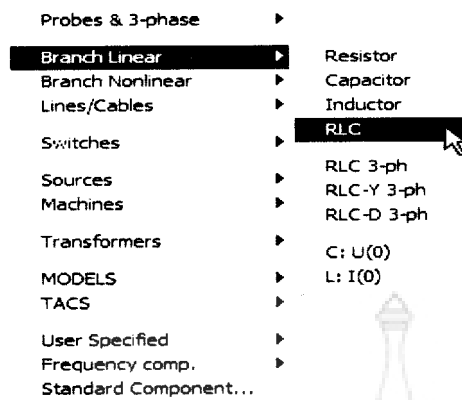
รูปที่ 3.6 Settings dialog box

3.2.5 กลุ่มคำสั่ง PlotXY



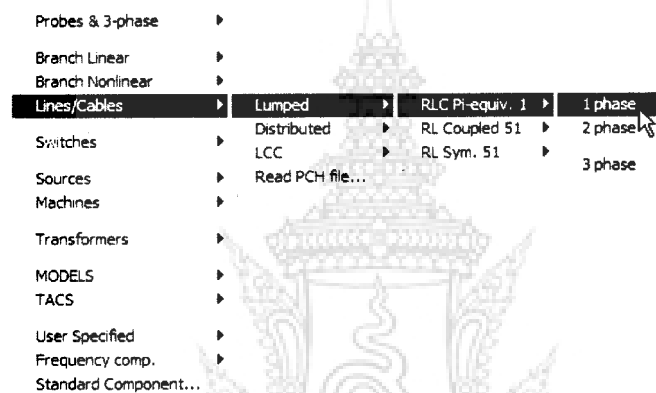
รูปที่ 3.7 PlotXY dialog box

3.2.6 คำสั่งการออกแบบ Model



(ก) Menu bar แบบ Distributed

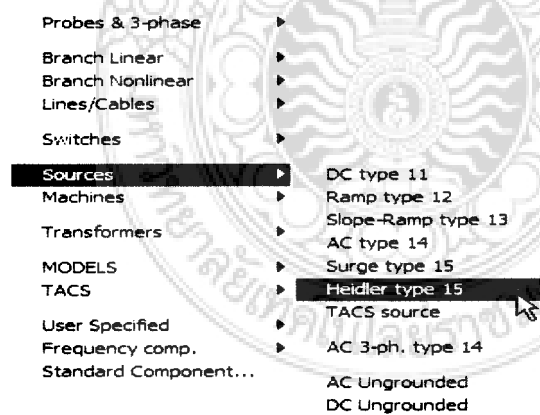
(ข) สัญลักษณ์ RLC



(ค) Menu bar แบบ Pi-equivocation

(ง) สัญลักษณ์ RLC

รูปที่ 3.8 Menu bar ในกลุ่มคำสั่ง Open Branch Linear



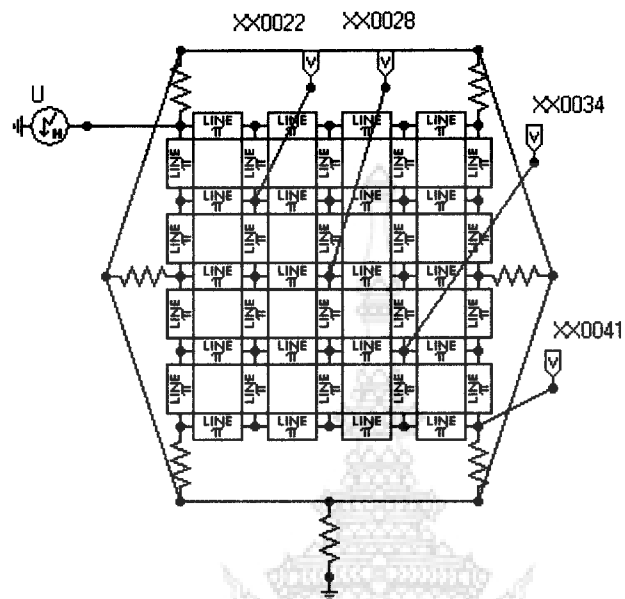
(ก) Menu bar Open Sources

(ข) สัญลักษณ์ Surge

รูปที่ 3.9 Menu bar ในกลุ่มคำสั่ง Open Sources

3.3 Base Case

3.3.1 การเกิดแรงดันเกินในระบบ Ground ที่มุมของสถานีไฟฟ้า



รูปที่ 3.10 การออกแบบระบบ Ground เกิดแรงดันเกินที่มุม

Component: LINEPI_1.SUP

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R	0	From	1	$\times\times 0001$
L	10	To	1	$\times\times 0002$
C	0.1			

Group No: 0 Label:

Comment:

☐ Hide
☐
☐ \$Vintage,1

OK Cancel Help

รูปที่ 3.11 การกำหนดค่าของสาย Ground

Component: HEIDLER.SUP

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
U/I	0	HEI	1	XX0001
Amp	10000			
T _f	1.2E-6			
tau	5E-5			
n	2			
Tsta	0			
Tsto	1			

Group No: 0 Label: U

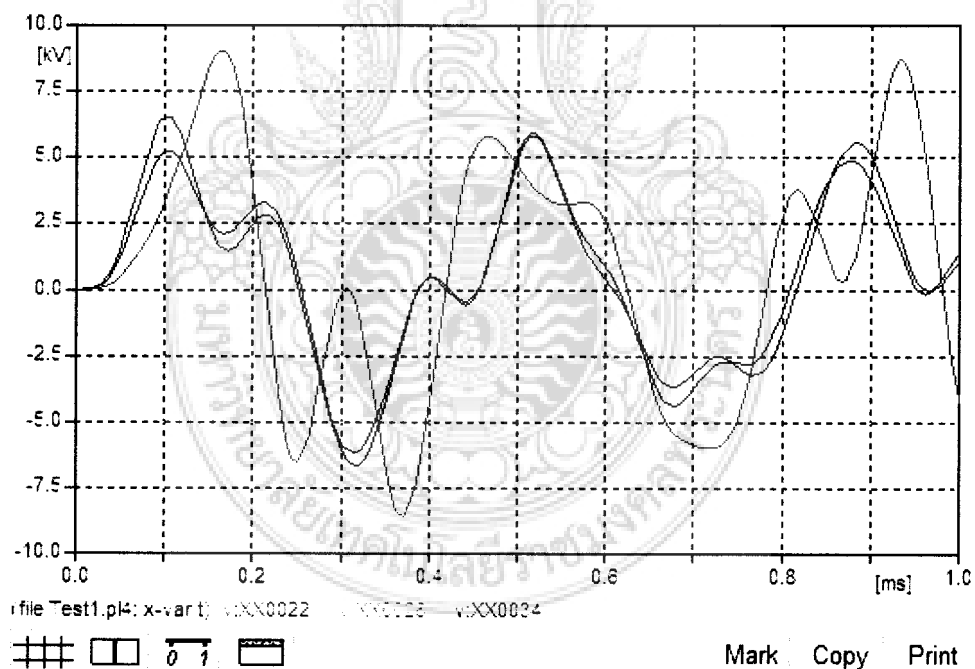
Comment:

☐ Hide

☐

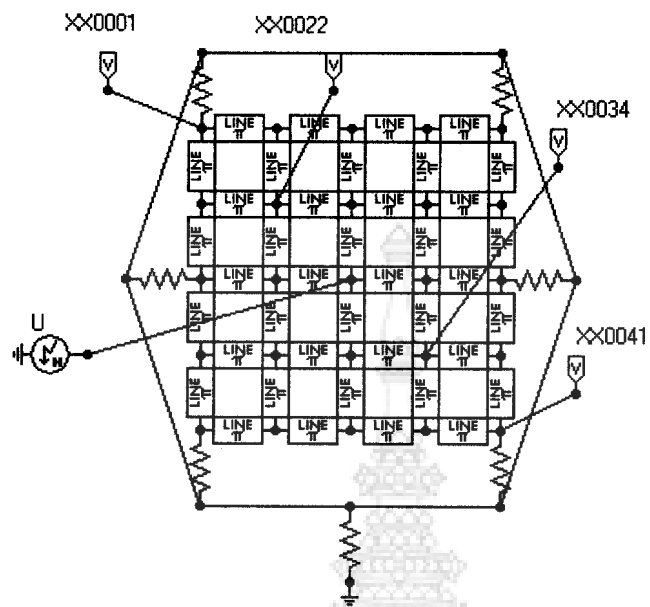
OK Cancel Help

รูปที่ 3.12 การกำหนดค่าของแรงดันเกิน

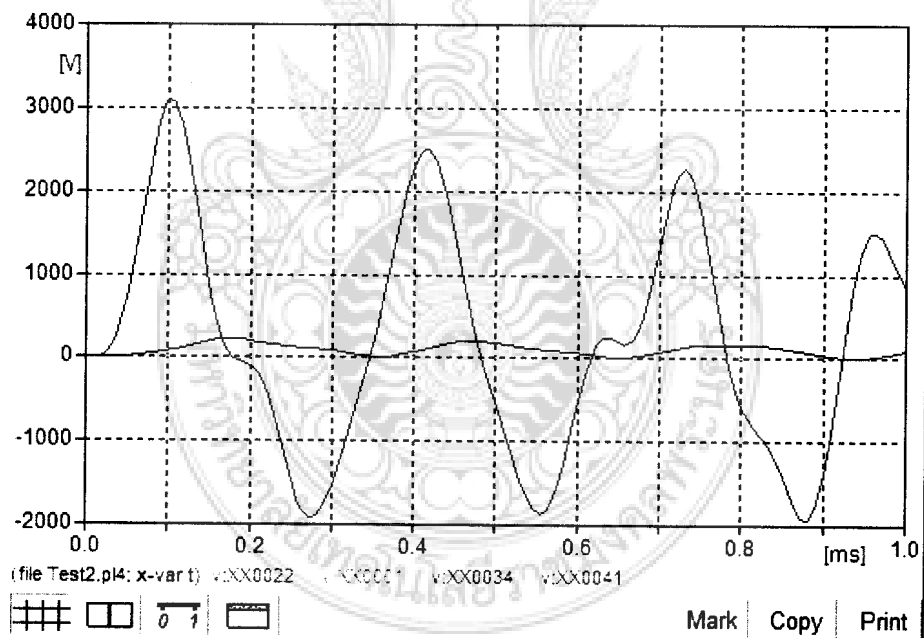


รูปที่ 3.13 การทดลองและผลการทดลองของการเกิดแรงดันเกินในระบบ Ground ที่มุมของสถานีไฟฟ้า

3.3.2 การเกิดแรงดันเกินในระบบ Ground ที่ตรงกลางของสถานีไฟฟ้า



รูปที่ 3.14 การออกแบบระบบ Ground เกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง



รูปที่ 3.15 การทดลองและผลการทดลองของการเกิดแรงดันเกินในระบบ Ground ที่ตรงกลางของสถานีไฟฟ้า

บทที่ 4

การวิเคราะห์การเกิดแรงดันเกินบนระบบกราวด์ ของสถานีไฟฟ้าแรงสูง

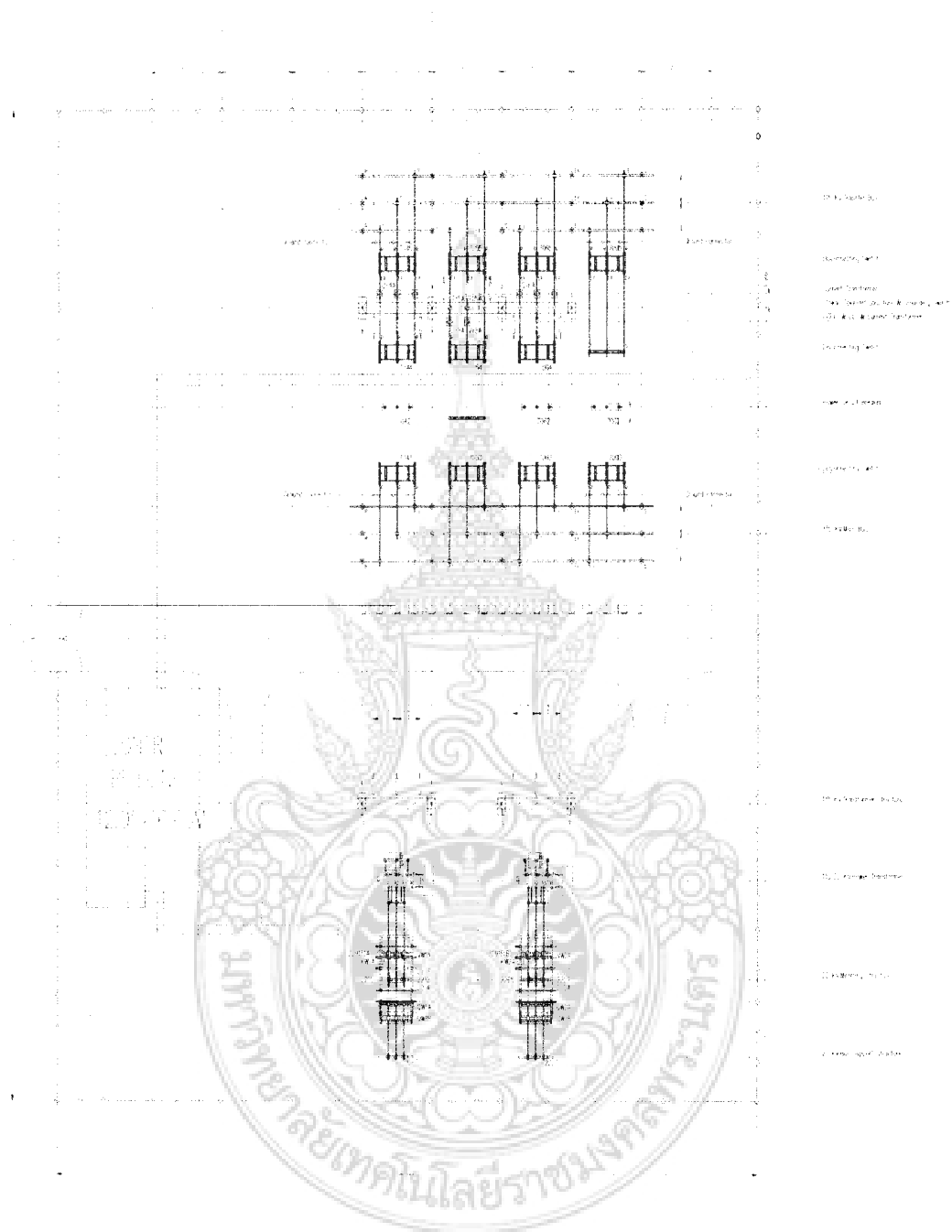
บทนำ

ในบทนี้จะเสนอผลการศึกษาค้นคว้าจริงที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์สถานีไฟฟ้าแรงสูง บำเหน็จณรงค์ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์หรือแบบกระจาย ที่ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณมากที่สุด [ภาคผนวก ก.] คือ

1. ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นสูงสุดบนระบบกราวด์ โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์
2. ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นสูงสุดบนระบบกราวด์ โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย
3. ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นสูงสุดบนระบบกราวด์ โดยไม่มีแท่งหลักดิน (Ground Rod)
4. ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นสูงสุดบนระบบกราวด์ โดยค่าความต้านทาน ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงมีค่าสูงขึ้น (ค่าความต้านทาน 5 โอห์ม)

4.1 ระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์

ในสถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์ของ กฟผ. ระบบกราวด์ได้ออกแบบตามมาตรฐาน IEEE Std 80 [10] เป็นระบบกราวด์แบบตาข่ายขนาด 12.80 x 12.80 เมตรและมีแท่งหลักดินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 3 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 4.1 แสดงระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบ้านเนินจันรงค์

4.2 คุณสมบัติและขนาดของสายตัวนำ

พื้นที่หน้าตัด	Awg	NO. 4/0
จำนวนเส้นและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง	mm.	19 , diameter 2.68
เนื้อที่ (คำนวณ)	mm ²	107.2
เส้นผ่านศูนย์กลางค้ำนอก	mm.	13.4
น้ำหนักมาตรฐาน	kg/meter	0.9719
ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงที่ 20 °C	Ω /km	0.1641
สัมประสิทธิ์การขยายตัวตามเส้น x 10 ⁻⁶		16.9
จำนวนเส้น		19
เส้นผ่านศูนย์กลาง	mm.	2.68
เส้นผ่านศูนย์กลางที่ยอมให้ผิดพลาดได้	mm.	± 0.0268
การบิดตัวใน 250 mm	%	ไม่น้อยกว่า 30
ความเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ 20 °C	%	ไม่น้อยกว่า 100

4.3 การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้ป้อนข้อมูลในโปรแกรม ATPDraw [3][6]

4.3.1 การคำนวณหาค่า RLC ของสายกราวด์ที่มีความยาวช่วงสาย 12.80 เมตร

4.3.1.1 หาค่าความต้านทาน (R)

$$R = \frac{\rho_c}{\pi r^2} \quad \Omega / m$$

โดย

$$\rho_c = \text{ค่า Resistivity} \quad 1.55 \times 10^{-8} \quad \Omega / m$$

$$r = \text{ค่ารัศมีของสาย} \quad 6.7 \quad mm$$

แทนค่า

$$R = \frac{1.55 \times 10^{-8}}{\pi (6.7)^2} = 1.09909 \times 10^{-4} \quad \Omega / m$$

เพราะฉะนั้นค่าความต้านทานที่ความยาว 12.80 เมตร

$$= 1.40683 \times 10^{-3} \quad \Omega$$

4.3.1.2. หาค่าInductance (L)

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2ha}} - 1 \right) \quad mH / m$$

โดย

$$l = \text{ความยาวช่วงสาย} \quad 12.80 \quad \text{เมตร}$$

$$h = \text{ความลึกของสายที่ฝังดิน} \quad 0.5 \quad \text{เมตร}$$

$$L = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{2 \times 12.80}{\sqrt{2 \times 0.5 \times (6.7 \times 10^{-3})}} - 1 \right) = 755.24645 \quad mH / m$$

เพราะฉะนั้นค่าInductanceที่ความยาว 12.80 เมตร

$$= 9667.28256 \quad mH$$

4.3.1.3. หาค่าCapacitance (C)

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2ha}} - 1 \right)} \quad \mu F / m$$

โดย

$$\epsilon_0\epsilon_r = \text{Earth permittivity} \quad 8 \times 10^{-11} \quad F / m$$

$$C = \frac{2\pi(8 \times 10^{-11})}{\left(\ln \frac{2 \times 12.80}{\sqrt{2 \times 0.5 \times (6.7 \times 10^{-3})}} - 1 \right)} = 1.056 \times 10^{-4} \quad \mu F / m$$

เพราะฉะนั้นค่า Capacitance ที่ความยาว 12.80 เมตร

$$= 1.35583 \times 10^{-3} \quad \mu F$$

4.3.2 การคำนวณหาค่า RLC ของสายกราวด์ที่มีความยาวช่วงสาย 6.40 เมตร

4.3.2.1 หาค่าความต้านทาน (R)

$$R = \frac{\rho_c}{\pi r^2} \quad \Omega / m$$

โดย

$$\rho_c = \text{ค่า Resistivity} \quad 1.55 \times 10^{-8} \quad \Omega / m$$

$$r = \text{ค่ารัศมีของสาย} \quad 6.7 \quad \text{mm}$$

แทนค่า

$$R = \frac{1.55 \times 10^{-8}}{\pi(6.7)^2} = 1.09909 \times 10^{-4} \quad \Omega / m$$

เพราะฉะนั้นค่าความต้านทานที่ความยาว 6.40 เมตร

$$= 7.03416 \times 10^{-4} \quad \Omega$$

4.3.2.2. หาค่าInductance (L)

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2ha}} - 1 \right) \quad mH / m$$

โดย

$$l = \text{ความยาวช่วงสาย} \quad 6.40 \quad \text{เมตร}$$

$$h = \text{ความลึกของสายที่ฝังดิน} \quad 0.5 \quad \text{เมตร}$$

$$L = \frac{1}{2\pi} \left(\ln \frac{2 \times 6.40}{\sqrt{2 \times 0.5 \times (6.7 \times 10^{-3})}} - 1 \right) = 644.93865 \quad mH / m$$

เพราะฉะนั้นค่าInductanceที่ความยาว 6.40 เมตร

$$= 4127.60736 \quad mH$$

4.3.2.3. หาค่าCapacitance (C)

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2ha}} - 1 \right)} \quad \mu F / m$$

โดย

$$\epsilon_0\epsilon_r = \text{Earth permittivity} \quad 8 \times 10^{-11} \quad F / m$$

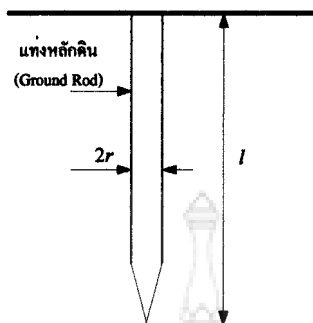
$$C = \frac{2\pi(8 \times 10^{-11})}{\left(\ln \frac{2 \times 6.40}{\sqrt{2 \times 0.5 \times (6.7 \times 10^{-3})}} - 1 \right)} = 1.240 \times 10^{-4} \quad \mu F / m$$

เพราะฉะนั้นค่าCapacitanceที่ความยาว 6.40 เมตร

$$= 7.93874 \times 10^{-4} \quad \mu F$$

4.3.3 การคำนวณหาค่า R ของแท่งหลักดิน (Ground Rod) [2]

แท่งหลักดินขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 มิลลิเมตร ยาว 3 เมตร



รูปที่ 4.2 ขนาดแท่งหลักดินขนาด

$$\begin{aligned} R_e &= \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \\ &= \frac{12.56}{2\pi(3)} \ln \frac{4 \times 3}{0.016} \\ &= 4.3891 \, \Omega \end{aligned}$$

โดย

R_e = ความต้านทานของแท่งหลักดิน (โอห์ม)

ρ = ค่า Resistivity ของดิน (โอห์ม-เมตร)

d = เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งหลักดิน (เมตร)

l = ความยาวของแท่งหลักดิน (เมตร)

นำพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายไฟเข้าไปในส่วนของโปรแกรม ATPDraw และได้แบบจำลองเทียบเคียงของสายดังแสดงในรูปที่ 4.3

Attributes				
DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R	4.3891	From	1	
L	9667.28256	To	1	
C	0.00135583			
Group No: 0		Label		
Comment:				
		☐ High ☐ ☐ \$Vintage,1		
OK		Cancel Help		

ก. แบบพายนั้

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R	0.1941	From	1	
L	1.69E-5	To	1	
C	0			

Group No: 0 Label:

Comment:

Output
0 - No

☐ Hide
☐ gVintage.1

OK Cancel Help

ข. แบบกระจาย

รูปที่ 4.3 การกำหนดค่า RLC โปรแกรม ATPDraw

นำพารามิเตอร์ต่างๆ ของแท่งหลักดิน (Ground Rod) ใส่เข้าไปในส่วนของโปรแกรม ATPDraw และได้แบบจำลองเทียบเคียงของสายดังแสดงในรูปที่ 4.4

Attributes

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
RES	4.3891	From	1	
		To	1	

Group No: 0 Label:

Comment:

Output
0 - No

☐ Hide
☐ gVintage.1

OK Cancel Help

รูปที่ 4.4 การกำหนดค่า Ground Rod โปรแกรม ATPDraw

นำพารามิเตอร์ต่างๆ ของค่าความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง (Ground Resistance) ใส่เข้าไปในส่วนของโปรแกรม ATPDraw และได้แบบจำลองเทียบเคียงของสายคังแสดงในภาพ

DATA	VALUE	NODE	PHASE	NAME
RES	0.057	From To	1 1	

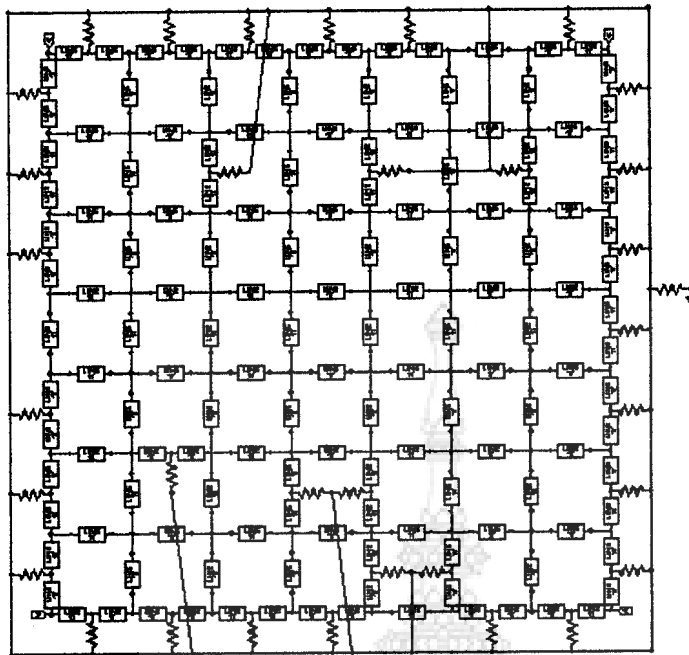
Group No: 0 Label: Comment: Output: 0 - No Hide: \$Vintage.1

OK Cancel Help

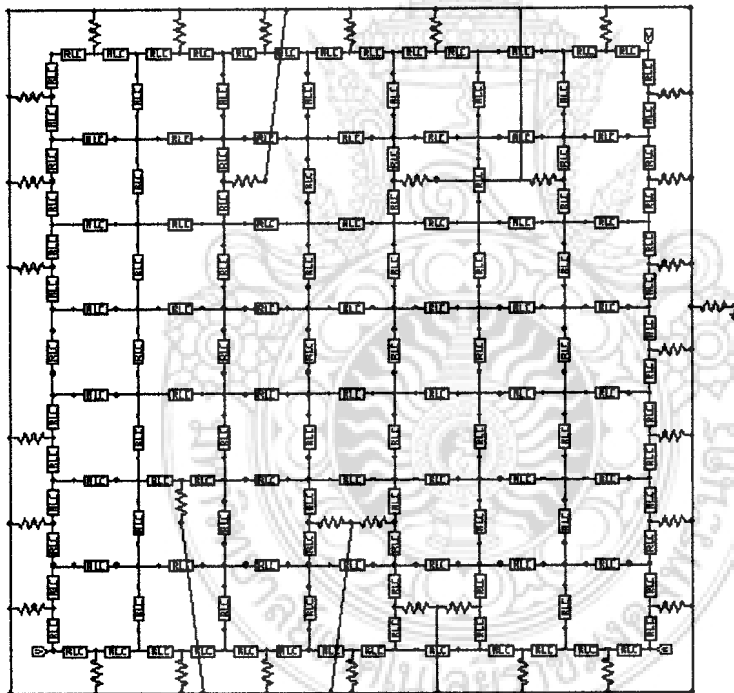
รูปที่ 4.5 การกำหนดค่า Ground Resistance โปรแกรม ATPDraw

นำแบบจำลองเทียบเคียงต่าง ๆ มาต่อตามแบบระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์ได้ดังรูปที่ 4.6





ก. แบบพายน



ข. แบบกระจาย

รูปที่ 4.6 การออกแบบระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์

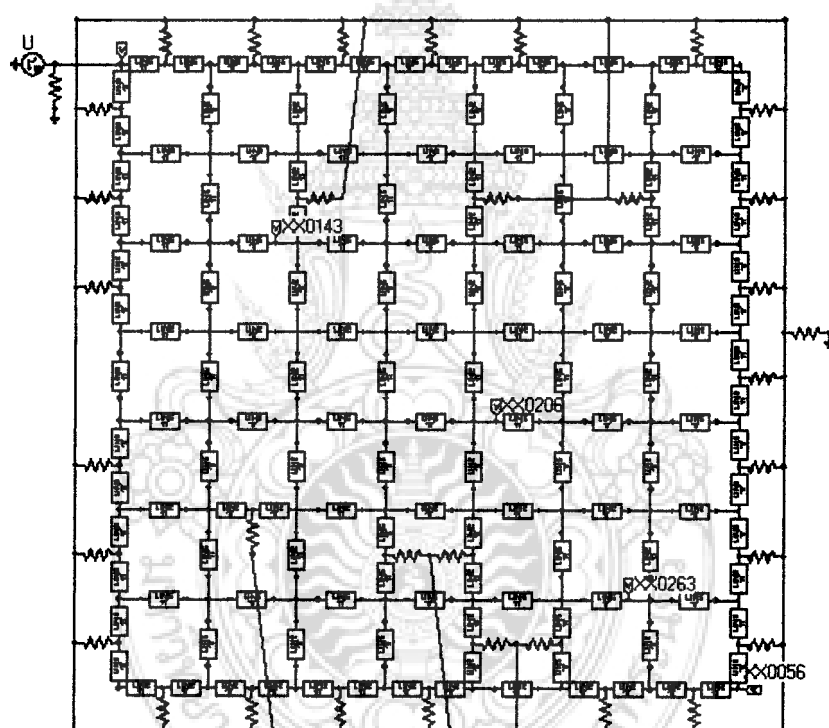
4.4 ผลลัพธ์จากการประมวลผล

รายละเอียดของผลลัพธ์ที่ได้หลังการประมวลผล แสดงไว้ในภาคผนวก ก. หรือดูได้ในหัวข้อ 4.5

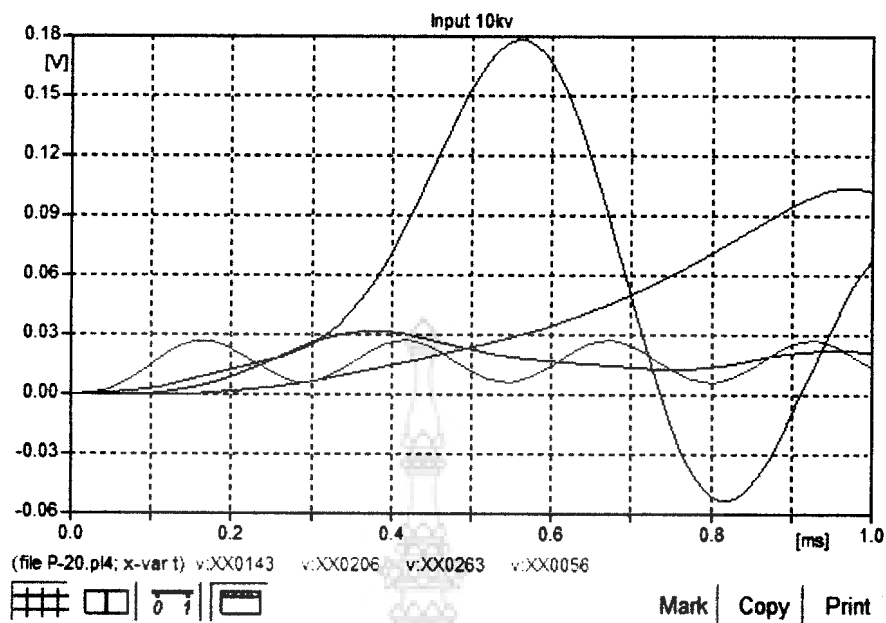
4.5 ผลการศึกษา

4.5.1 ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นสูงสุดบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน

4.5.1.1 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม วัดค่าแรงดันแบบทแยงมุม



ก. การออกแบบ



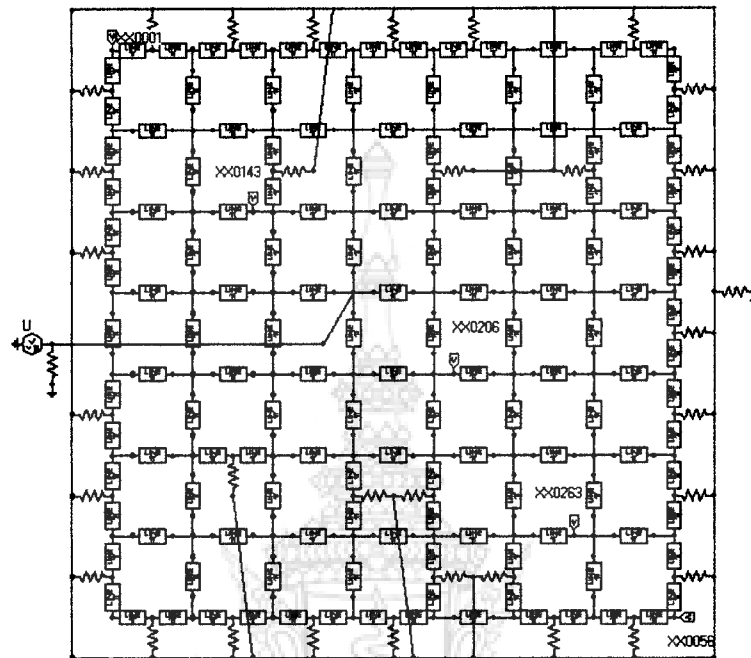
ข. กราฟแสดงผล

File P-20.pl4
 5.6300E-04
 0.17816
 0.03034
 0.018039
 7.3252E-03
☐ Interpolation

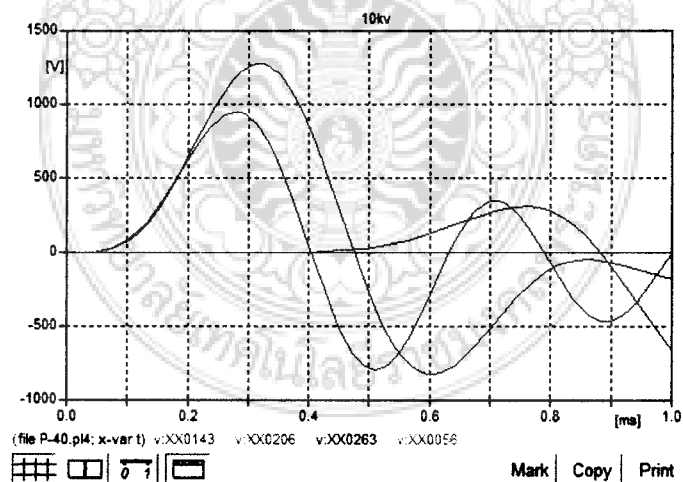
ค. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.7 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนต่าง ๆ
 แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์เกิดแรงดันเกินที่มุม

4.6.1.2 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง วัดค่าแรงดันแบบทแยงมุม



ก. การออกแบบ



ข. กราฟแสดงผล

File P-40.pl4
 3.1700E-04
 845.3
 1277.5
 0.43445
 7.1470E-03
☐ interpolation

ก. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.8 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนียวน้ำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ
 แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

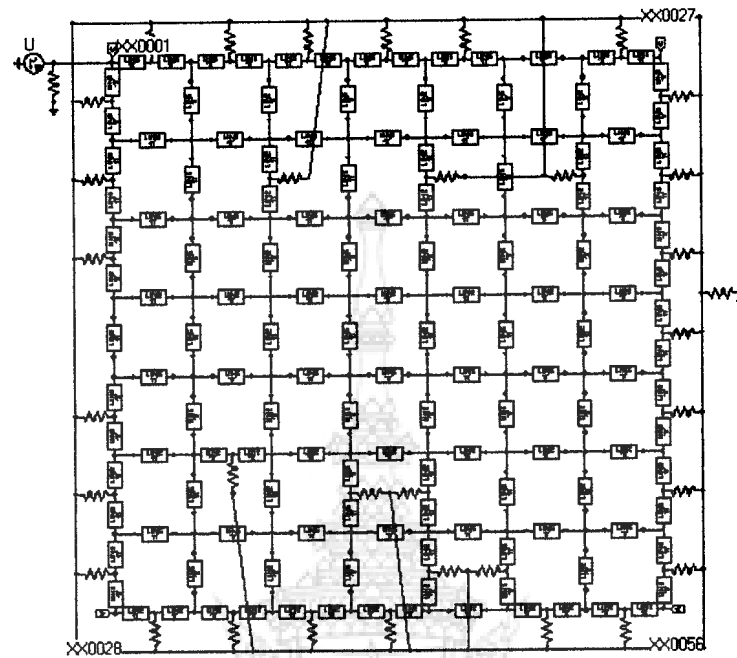
ผลลัพธ์มีแรงดันที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงแรงดันบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม และที่ตรงกลาง โดยวัดค่าแรงดันเกินที่แนวทแยงมุม

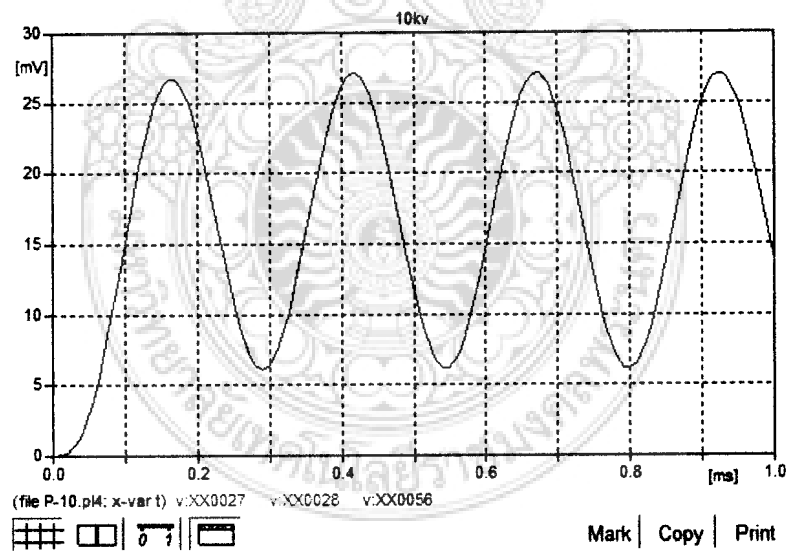
ชื่อโหนด	แรงดันผิดปกติที่มุมระบบกราวด์ ขนาดแรงดัน (10 กิโลโวลต์)	แรงดันผิดปกติที่กลางระบบกราวด์ ขนาดแรงดัน (10 กิโลโวลต์)
XX0143	0.17816 โวลต์	845.3 โวลต์
XX0206	0.03034 โวลต์	1277.5 โวลต์
XX0263	0.018039 โวลต์	0.43445 โวลต์
XX0056	0.0073252 โวลต์	0.007147 โวลต์

ผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่า การเกิดแรงดันผิดปกติที่กลางของระบบกราวด์ โดยวัดค่าแรงดันเกินที่แนวทแยงมุม จะมีแรงดันเกินสูงสุดก็คือ 1277.5 โวลต์

4.5.1.3 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม วัดค่าแรงดันที่มุม



ก. การออกแบบ



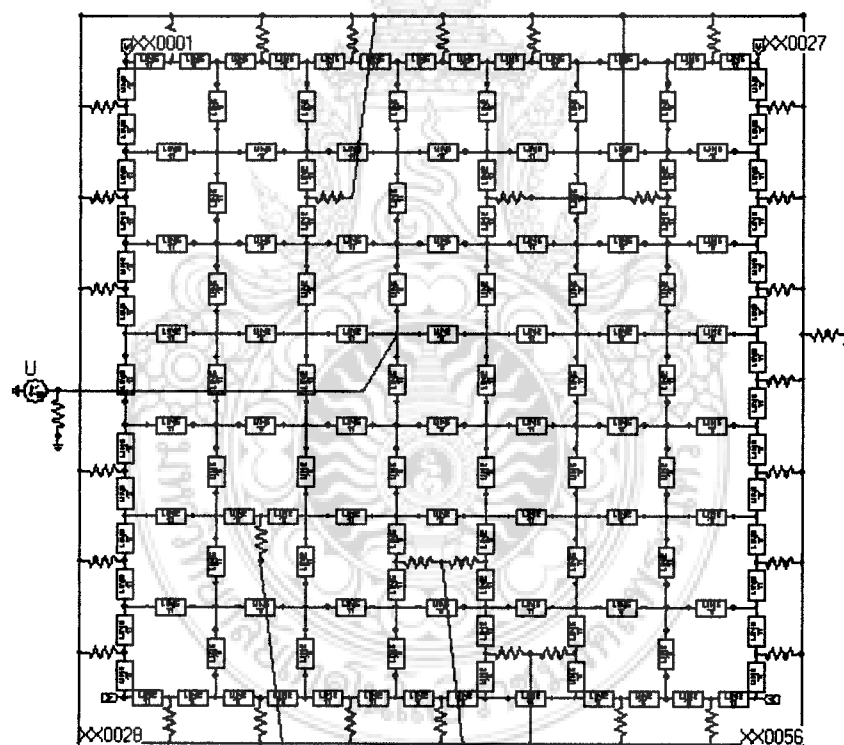
ข. กราฟแสดงผล

File P-10.pl4
 4.9900E-04
 0.012011
 0.01201
 0.01201
☐ interpolation

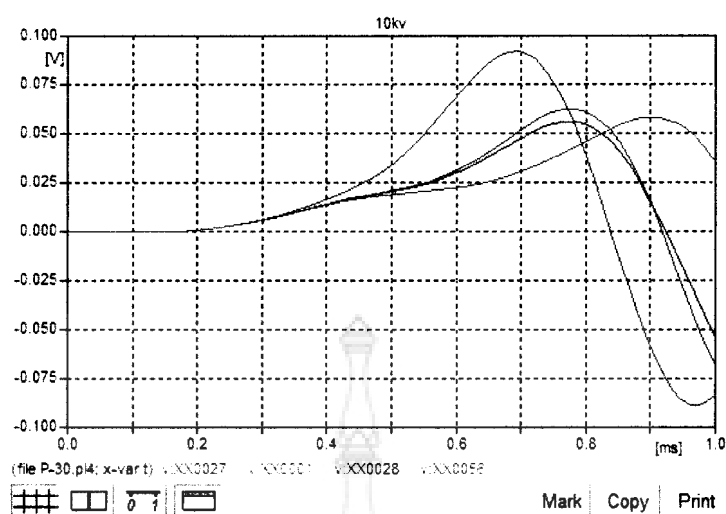
ค. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.9 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนดต่าง ๆ
 แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม

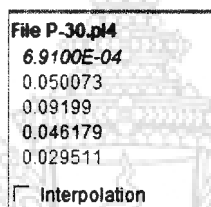
4.5.1.4 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง วัดค่าแรงดันที่มุม



ก. การออกแบบ



ข. กราฟแสดงผล



ค. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.10 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ
แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

ผลลัพธ์มีแรงดันที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.2

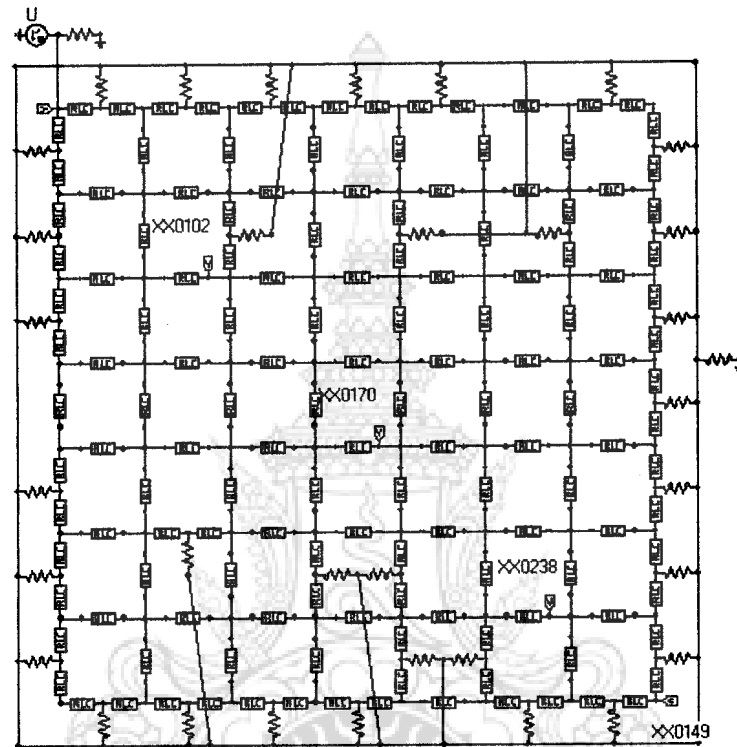
ตารางที่ 4.2 แสดงแรงดันบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม และที่ตรงกลาง โดยวัดค่าแรงดันเกินที่มุม

ชื่อโหนด	แรงดันผิดปร้องลงที่มุมระบบกราวด์	แรงดันผิดปร้องลงที่กลางระบบกราวด์
	ขนาดแรงดัน (10 กิโลโวลต์)	ขนาดแรงดัน (10 กิโลโวลต์)
XX0027	0.012011 โวลต์	0.050073 โวลต์
XX0001	0.01201 โวลต์	0.09199 โวลต์
XX0028	0 โวลต์	0.046179 โวลต์
XX0056	0.01201 โวลต์	0.029511 โวลต์

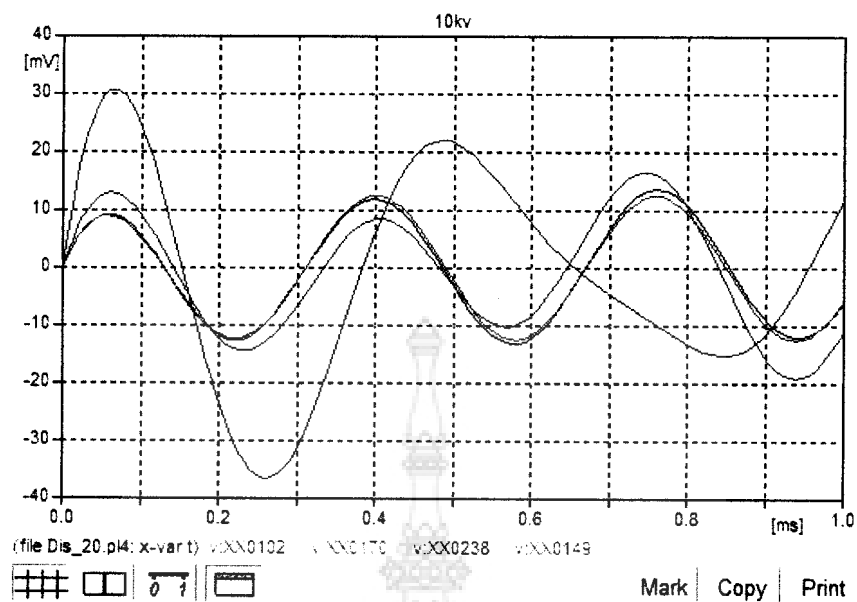
ผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่า การเกิดแรงดันผิดปร้องลงที่มุม และการเกิดแรงดันผิดปร้องที่ตรงกลาง ของระบบกราวด์ โดยวัดค่าแรงดันเกินที่มุม จะมีแรงดันเกินที่ต่ำมากและใกล้เคียงกัน

4.5.2 ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นสูงสุดบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย

4.5.2.1 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม วัดค่าแรงดันแบบทแยงมุม



ก. การออกแบบ



ข. กราฟแสดงผล

File Dis_20.pl4

6.7000E-05

0.030713

0.012915

9.1069E-03

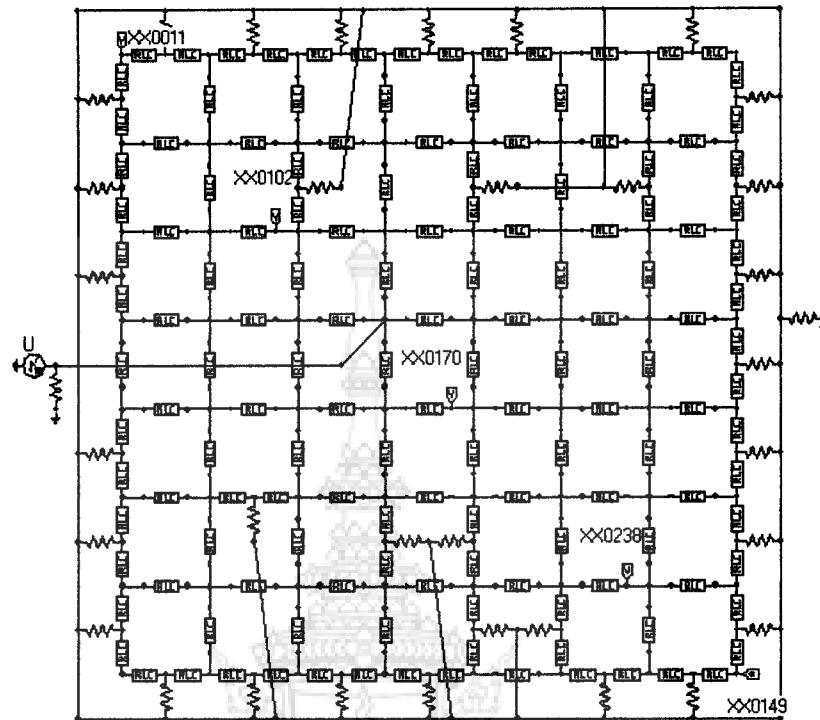
8.8123E-03

☐ Interpolation

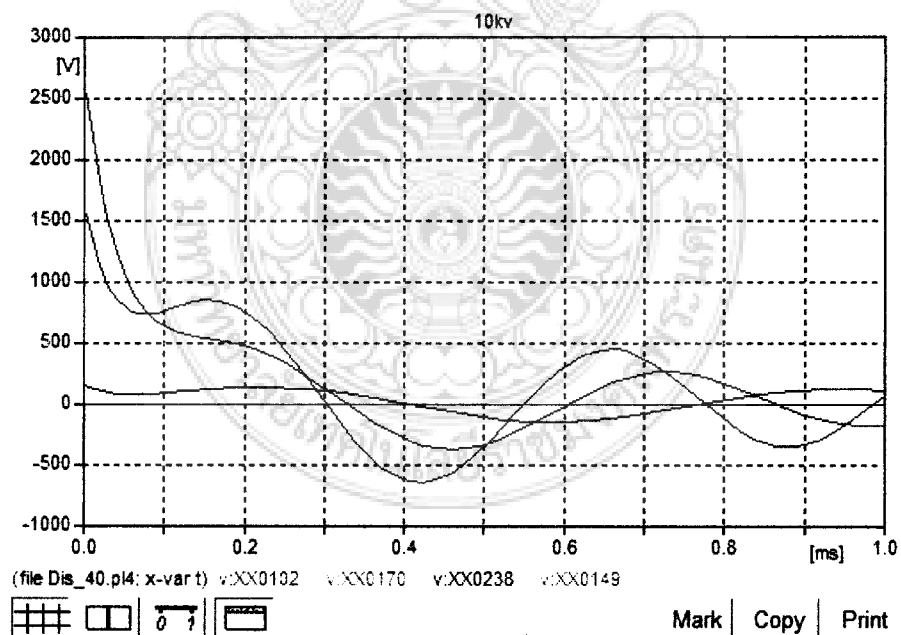
ก. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.11 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนต่าง ๆ
แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม

4.6.2.2 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง วัดค่าแรงดันแบบทแยงมุม



ก. การออกแบบ



ข. กราฟแสดงผล

File Dis_40.pl4

6.0000E-06

1446.5

2352.7

142.68

1.3680E-03

☐ Interpolation

ค. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.12 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ

แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

ผลลัพธ์มีแรงดันที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

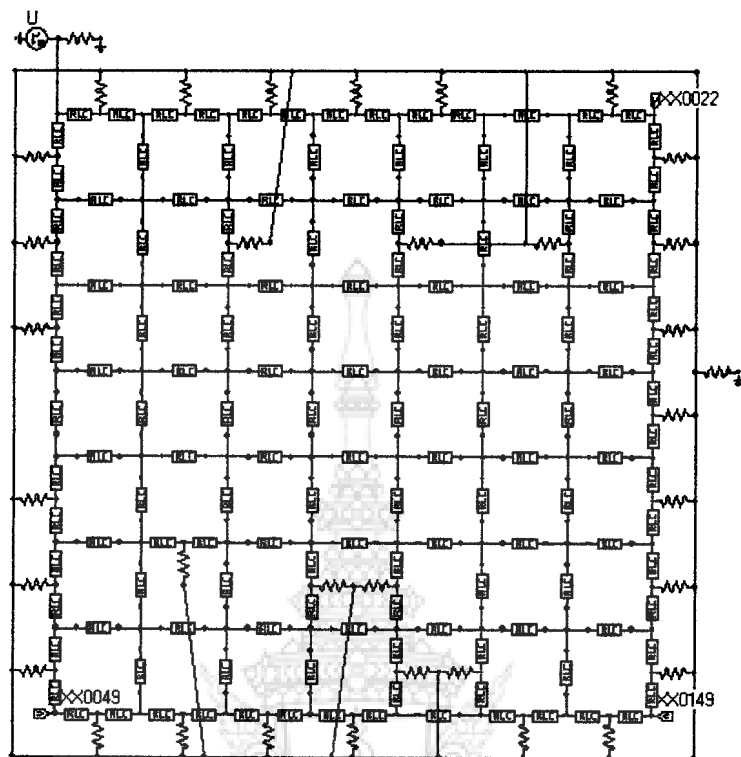
ตารางที่ 4.3 แสดงแรงดันบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย

เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม และที่ตรงกลาง โดยวัดค่าแรงดันเกินที่แนวทแยงมุม

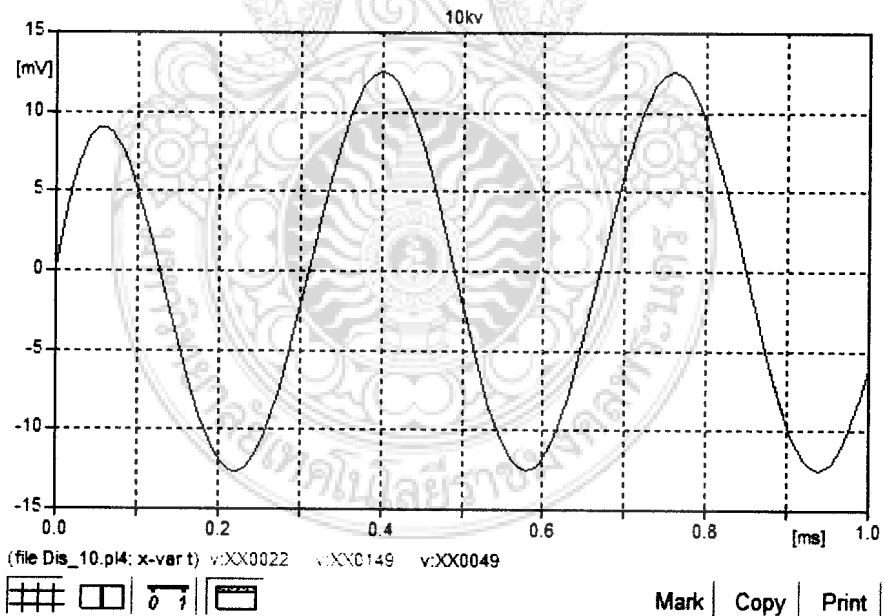
ชื่อ โหนด	แรงดันผิดปกติที่มุมระบบกราวด์ ขนาดแรงดัน (กิโลโวลต์)	แรงดันผิดปกติที่กลางระบบกราวด์ ขนาดแรงดัน (กิโลโวลต์)
XX0102	0.030713 โวลต์	1446.5 โวลต์
XX0170	0.012915 โวลต์	2352.7 โวลต์
XX0238	0.0091069 โวลต์	142.68 โวลต์
XX0149	0.0088123 โวลต์	0.001368 โวลต์

ผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่า การเกิดแรงดันผิดปกติที่กลางระบบกราวด์ โดยวัดค่าแรงดันเกินที่แนวทแยงมุม จะมีแรงดันเกินสูงสุดที่ 2352.7 โวลต์

4.5.2.3 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม วัดค่าแรงดันที่มุม



ก. การออกแบบ



จ. กราฟแสดงผล

File Dis_10.pl4

4.0400E-04

0.012491

0.012492

0.012491

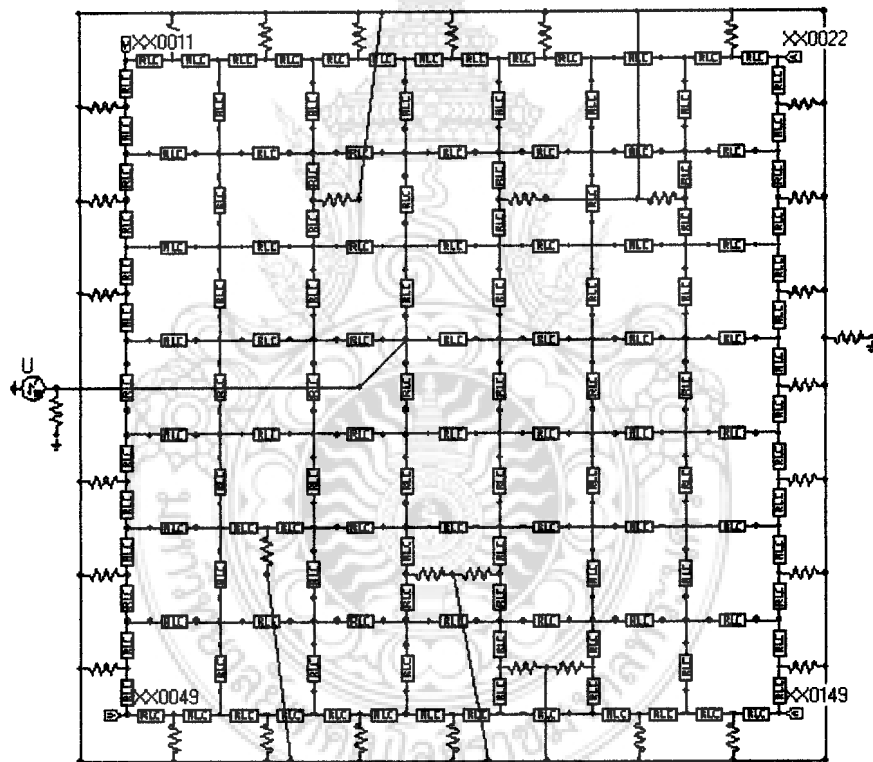
☐ Interpolation

ก. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

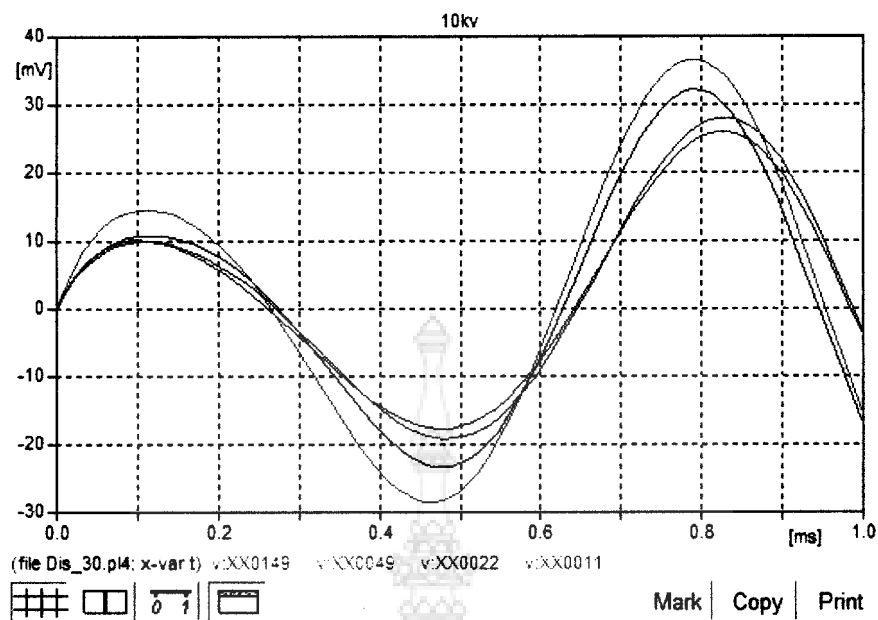
รูปที่ 4.13 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ

แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม

4.5.2.4 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง วัดค่าแรงดันที่มุม



ก. การออกแบบ



ข. กราฟแสดงผล

File Dis_30.pl4

7.9800E-04

0.025188

0.027093

0.032129

0.036485

☐ Interpolation

ค. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.14 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนต่าง ๆ

แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

ผลลัพธ์มีแรงดันที่เกิดขึ้นบนระบบกราวด์ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงแรงดันบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย
เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม และที่ตรงกลาง โดยวัดค่าแรงดันเกินที่มุม

ชื่อโหนด	แรงดันผิดปกติที่มุมระบบกราวด์ ขนาดแรงดัน (10 กิโลโวลต์)	แรงดันผิดปกติที่กลางระบบกราวด์ ขนาดแรงดัน (10 กิโลโวลต์)
XX0149	0.012492 โวลต์	0.05188 โวลต์
XX0049	0.012491 โวลต์	0.027093 โวลต์
XX0022	0.012491 โวลต์	0.032129 โวลต์
XX0011		0.036485 โวลต์

ผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่า การเกิดแรงดันผิดปกติที่มุม และที่ตรงกลาง ของระบบกราวด์
โดยวัดค่าแรงดันเกินที่มุม จะมีแรงดันเกินที่ต่ำมากและใกล้เคียงกัน

ผลการเปรียบเทียบการเกิดแรงดันผิดปกติบนระบบกราวด์แบบพายน์ และระบบกระจาย ดัง
แสดงในตารางที่ 4.5

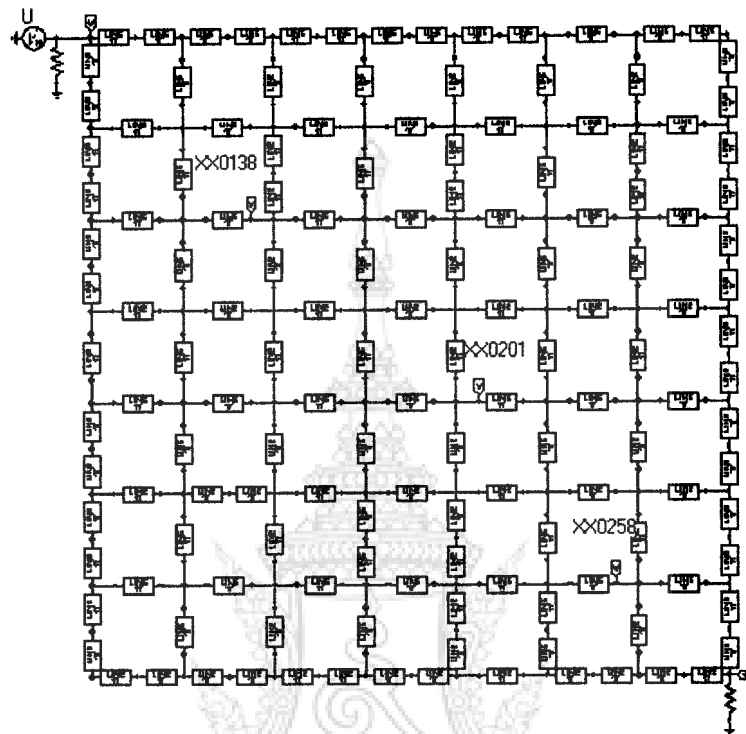
ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดแรงดันผิดปกติบนระบบกราวด์แบบพายน์
และระบบกระจาย

ชื่อโหนด	แรงดันผิดปกติแบบกระจาย ขนาดแรงดัน (กิโลโวลต์)	แรงดันผิดปกติแบบพายน์ ขนาดแรงดัน (กิโลโวลต์)
XX0102	1446.5 โวลต์	845.3 โวลต์
XX0170	2352.7 โวลต์	1277.5 โวลต์
XX0238	142.68 โวลต์	0.43445 โวลต์
XX0149	0.001368 โวลต์	0.007147 โวลต์

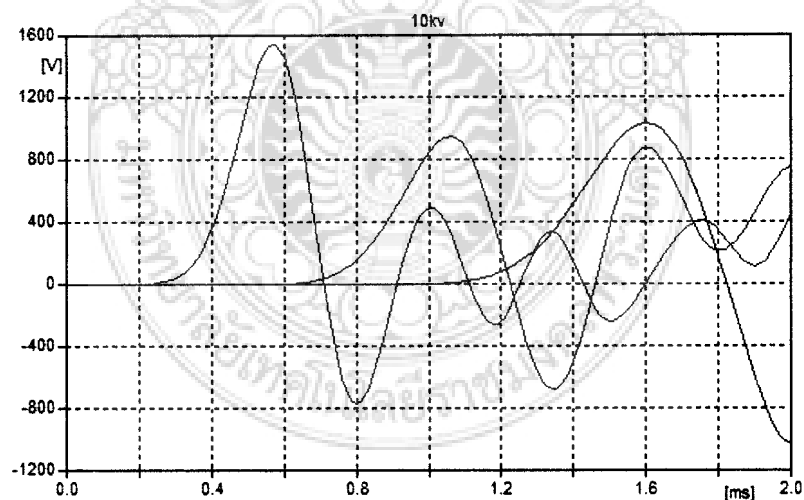
ผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่า การออกแบบการเกิดแรงดันผิดปกติแบบพายน์ เกิดแรงดันผิดปกติ
ใกล้เคียงค่าที่คำนวณมากที่สุด คือ 1277.5 โวลต์ (ผลการคำนวณจากภาคผนวก ก.) เพราะฉะนั้นจึง
พิจารณาการออกแบบ แบบพายน์ ทำการออกแบบต่อไป

4.5.3 ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นสูงสุดบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายน์ โดยไม่มีแท่งหลักดิน (Ground Rod)

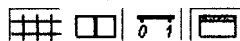
4.5.3.1 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม วัดค่าที่แนวทแยงมุม



ก. การออกแบบ



(file P-rod10.pl4: x-var1) v:XX0138 v:XX0201 v:XX0258



Mark Copy Print

ข. กราฟแสดงผล

File P-rod10.pl4

5.7000E-04

1539.6

1.8163

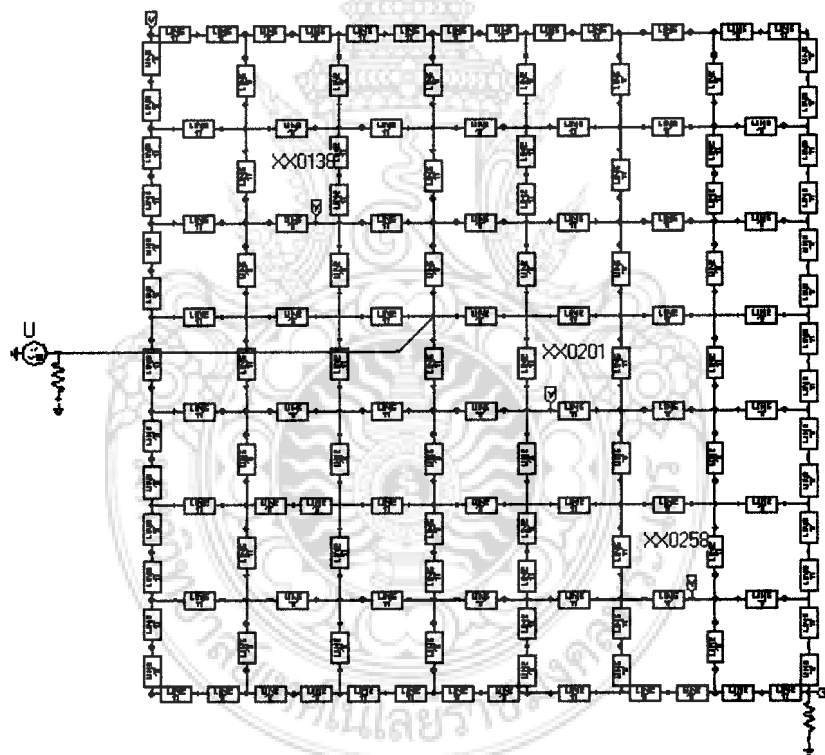
1.5747E-05

Interpolation

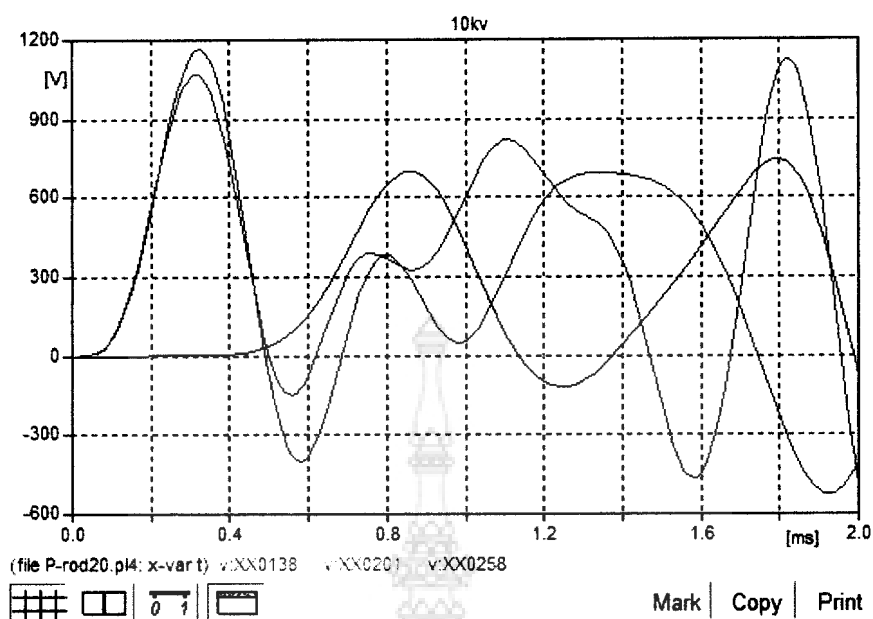
ค. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.15 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ
กรณีที่ไม่มีการเหนี่ยวนำหลักดิน เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม

4.5.3.2 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง วัดค่าที่แนวทแยงมุม



ก. การออกแบบ



ข. กราฟแสดงผล

File P-rod20.pl4

3.2000E-04

1069.5

1165.7

0.45933

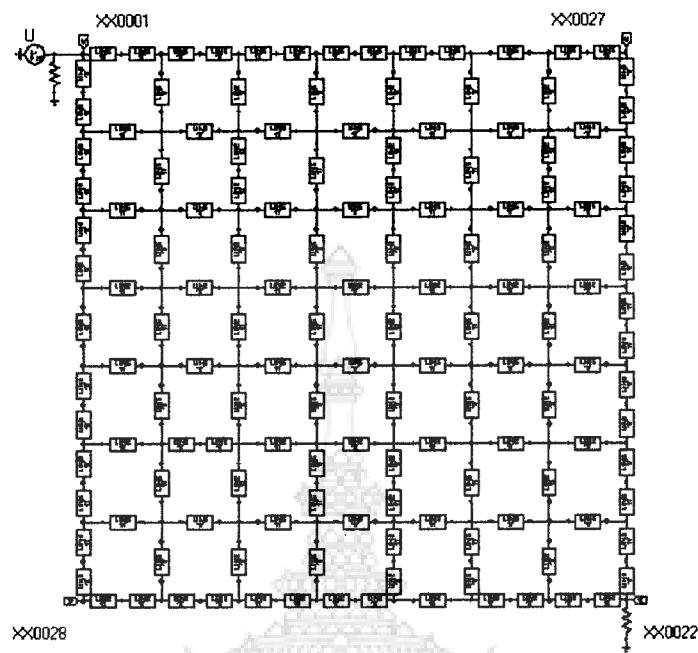
☐ Interpolation

ค. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

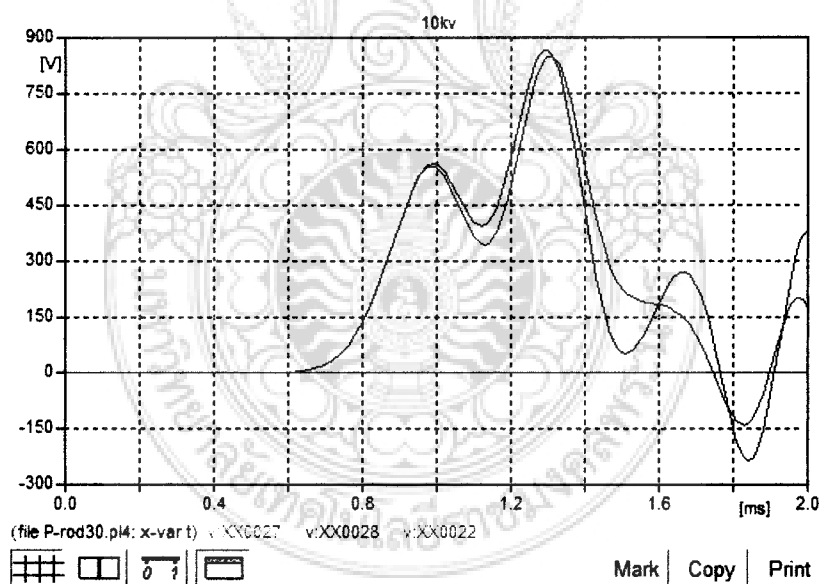
รูปที่ 4.16 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนต่าง ๆ

กรณีที่ไม่มีการเหนี่ยวนำ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

4.5.3.3 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม วัดค่าแรงดันที่มุม



ก. การออกแบบ



ข. กราฟแสดงผล

File P-rod30.pl4

1.3000E-03

847.49

865.41

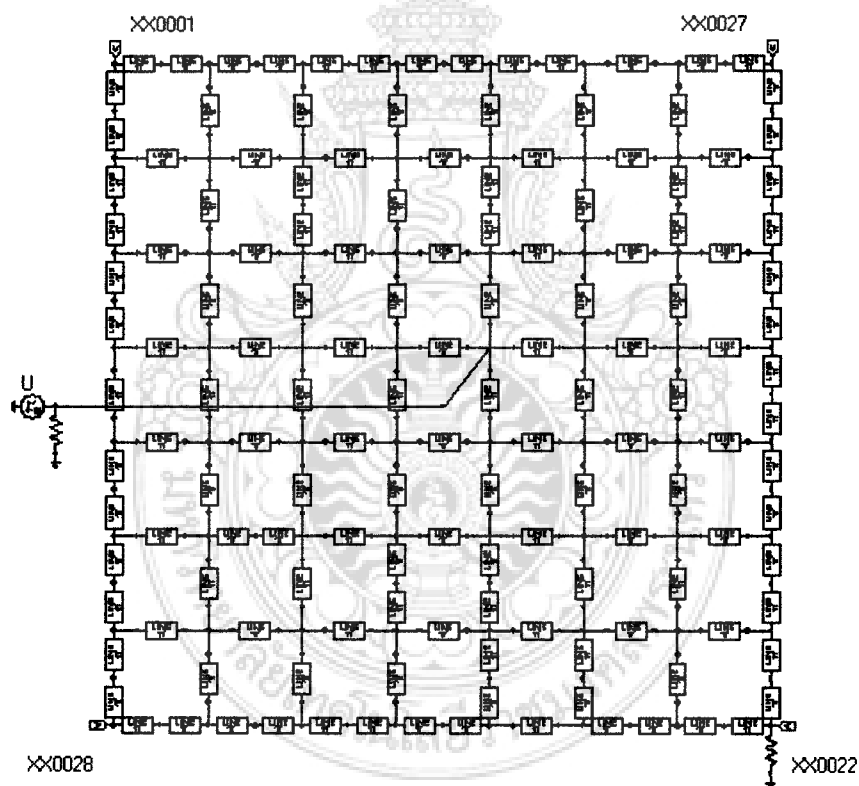
8.6684E-05

☐ Interpolation

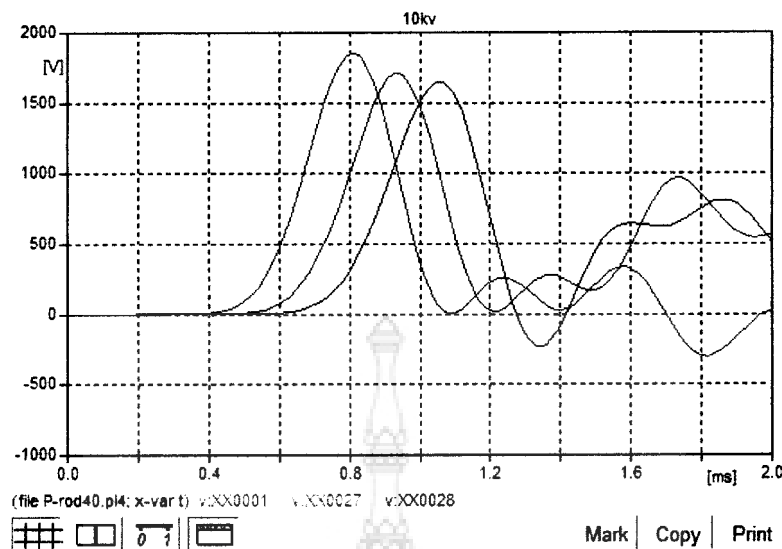
ก. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.17 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ
กรณีที่ไม่มีการต่อหลักดิน เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม

4.5.3.4 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง วัดค่าที่มุม



ก. การออกแบบ



ข. กราฟแสดงผล

File P-rod40.pl4

8.2000E-04

1158.6

1847.5

392.91

☐ Interpolation

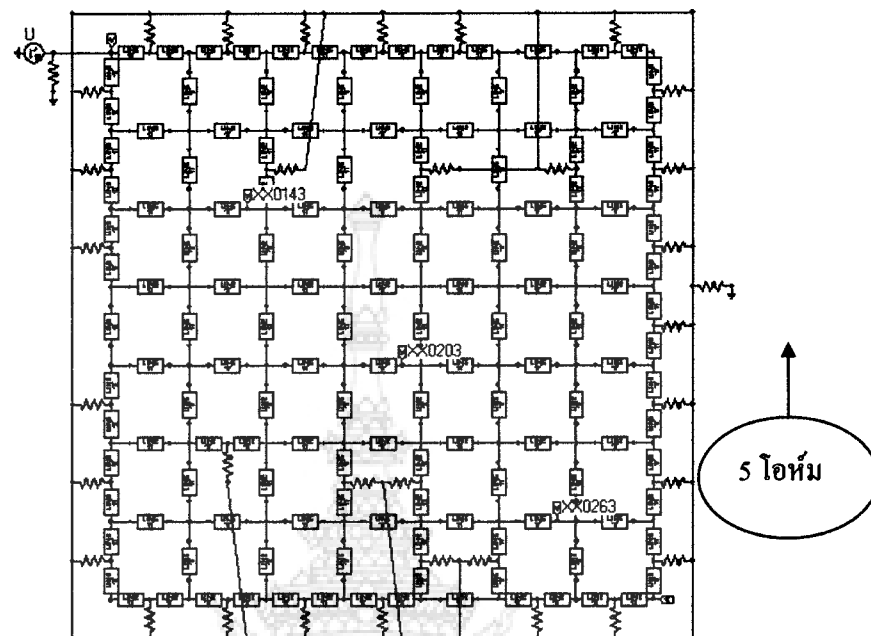
ค. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.18 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนต่าง ๆ
กรณีที่ไม่ใช่แท่งหลักดิน เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

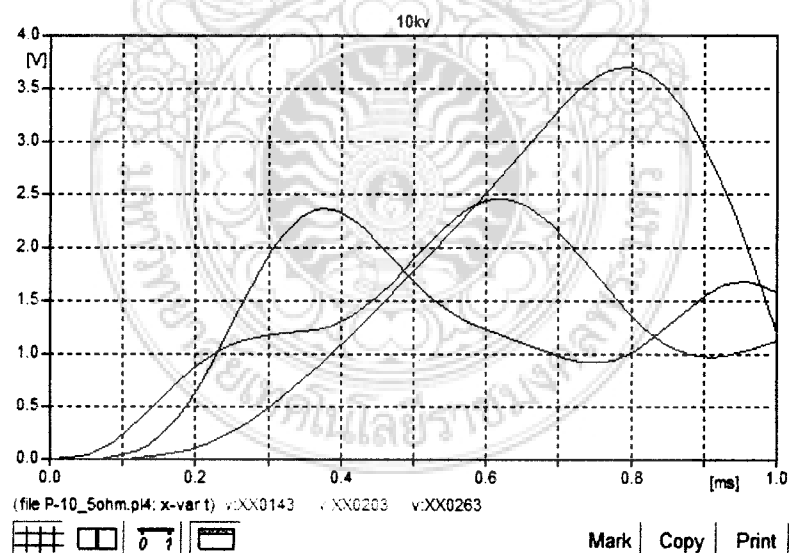
ผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่า เมื่อเกิดแรงดันเกินในระบบกราวด์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดแรงดันเกินลงที่
กลางสถานี และวัดค่าแรงดันในแนวทแยงมุม จะพบว่าแรงดันจะสูงสุด

4.5.4 ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้นสูงสุดบนระบบกราวด์โดยใช้แบบจำลองระบบกราวด์
แบบพายน์ โดยค่าความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูงมีค่าสูงขึ้น (ค่าความต้านทาน 5 โอห์ม)

4.5.4.1 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม วัดค่าที่แนวทแยงมุม



ก. การออกแบบ



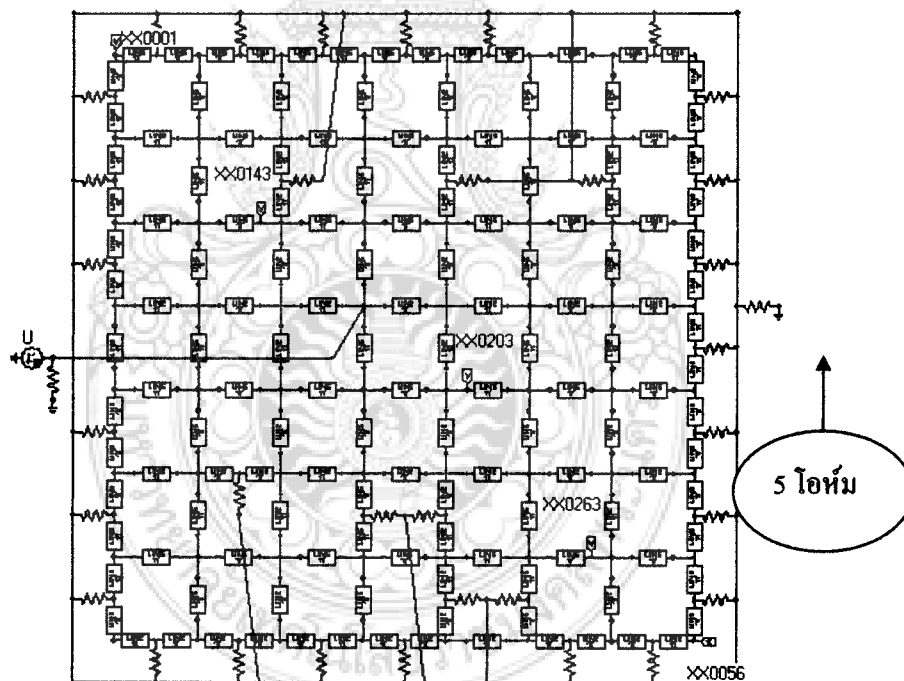
ข. กราฟแสดงผล

File P-10_5ohm.pl4
 7.9100E-04
 1.4243
 3.693
 0.9864
☐ Interpolation

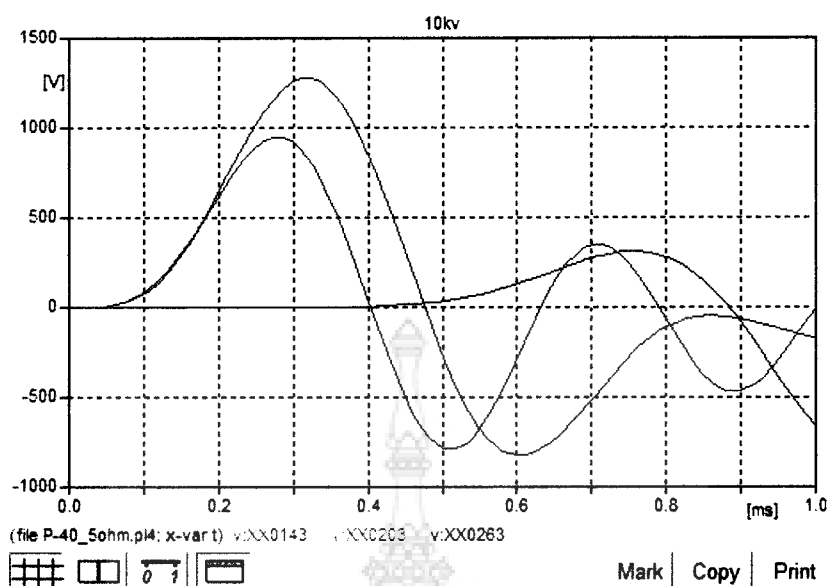
ข. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.19 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ เพิ่ม
 ความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 โอห์ม เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม

4.5.4.2 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง วัดค่าที่แนวทแยงมุม



ก. การออกแบบ



ข. กราฟแสดงผล

File P-40_5ohm.pl4

3.1500E-04

855.9

1277.1

0.47311

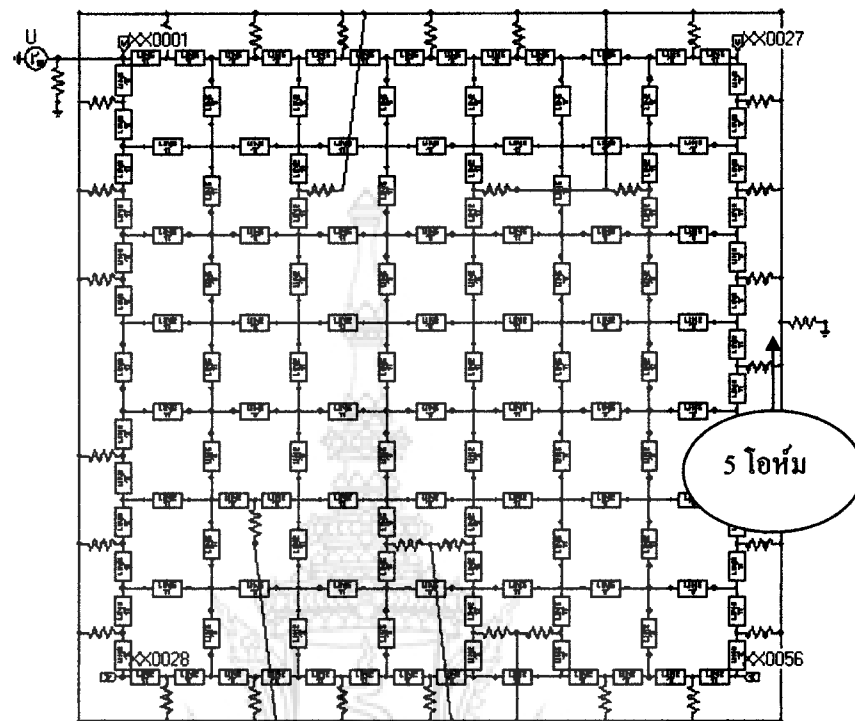
☐ Interpolation

ค. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

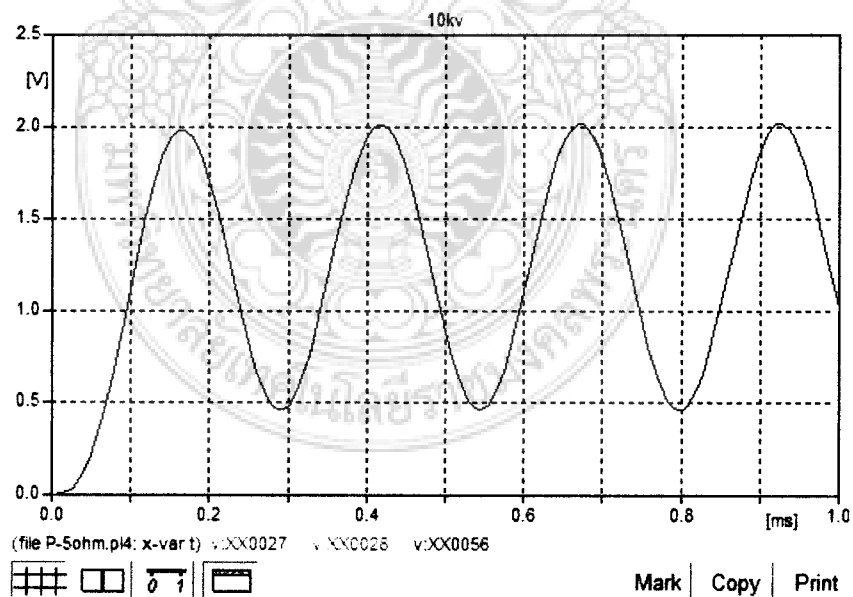
รูปที่ 4.20 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนต่าง ๆ เพิ่ม

ความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 โอห์ม เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

4.5.4.3 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม วัดค่าแรงดันที่มุม



ก. การออกแบบ



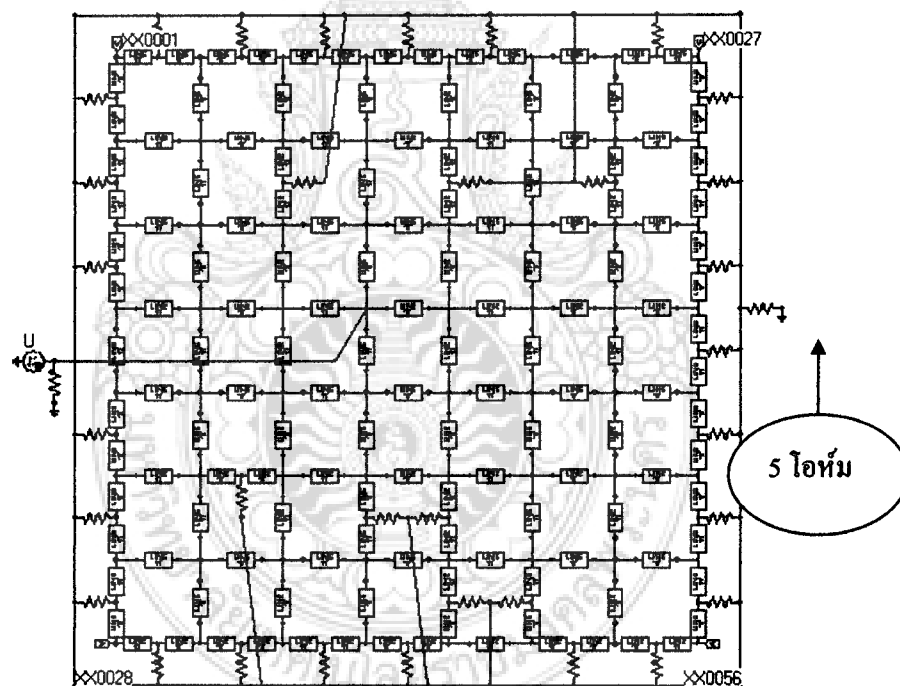
ข. กราฟแสดงผล

File P-5ohm.pl4
 1.6700E-04
 1.9842
 1.9843
 1.9843
☐ Interpolation

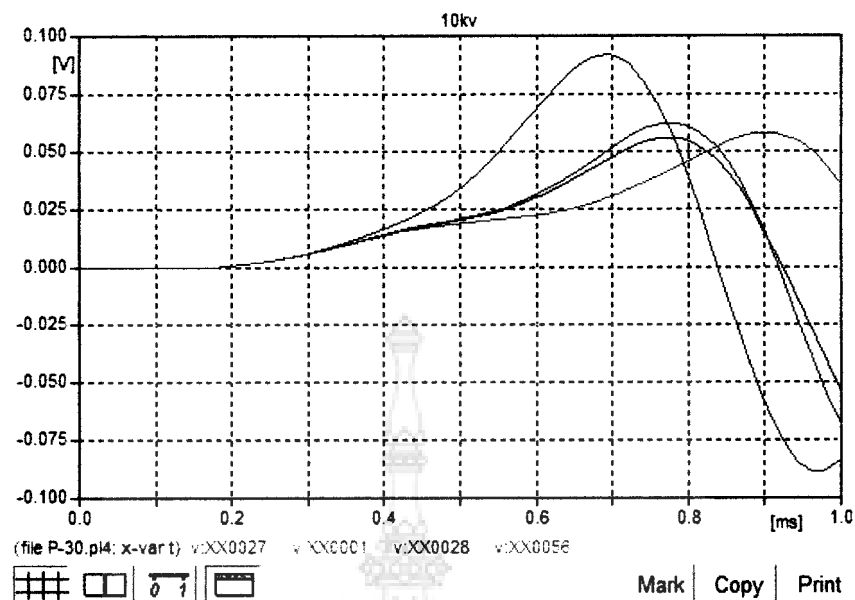
ก. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.21 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่างๆ เพิ่ม
 ความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 โอห์ม เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม

4.5.4.4 เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง วัดค่าแรงดันที่มุม



ก. การออกแบบ



ข. กราฟแสดงผล

File P-30.pl4

6.8900E-04

0.049621

0.091985

0.045799

0.029285

☐ Interpolation

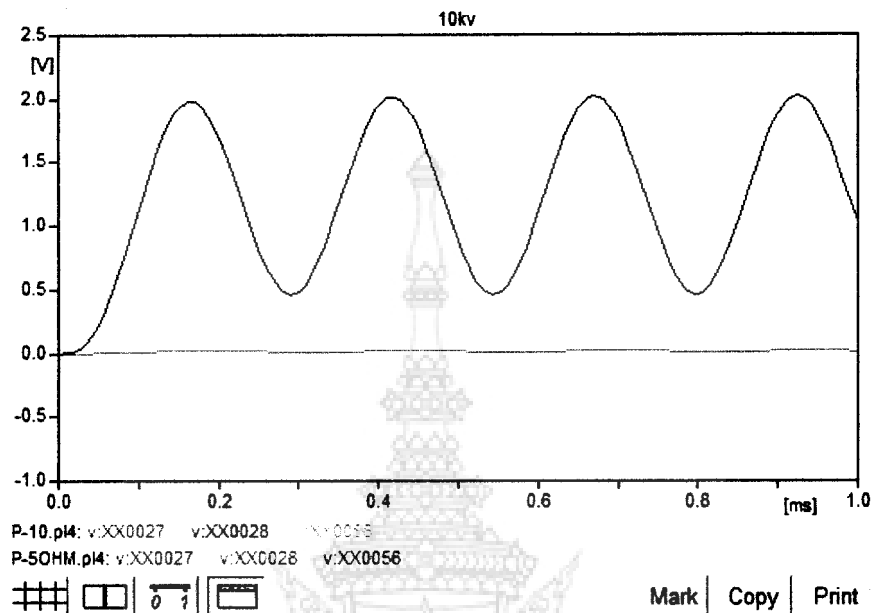
ค. แสดงผลค่าแรงดันสูงสุด

รูปที่ 4.22 ผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ เพิ่ม

ความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 โอห์ม เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

ผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่า เมื่อเกิดแรงดันเกินในระบบกราวด์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเกิดแรงดันเกินลงที่กลางสถานี และวัดค่าแรงดันในแนวทแยงมุม จะพบว่าแรงดันจะสูงสุด

4.5.5 เปรียบเทียบการเกิดแรงดันผิดปร้องบนระบบกราวด์แบบพายนน์ เมื่อ เพิ่มความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 โอห์ม กับความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูงปกติ 0.067 โอห์ม



รูปที่ 4.23 ผลแสดงการเปรียบเทียบ เมื่อเพิ่มความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง 5 โอห์ม กับความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูงปกติ 0.067 โอห์ม

ผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่า เมื่อความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูงเพิ่มขึ้น ค่าแรงดันที่ตกคร่อมในระบบกราวด์ก็มากขึ้นตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ขนาดของแรงดันเกินบนระบบกราวด์ ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้ คือ

1. ผลการศึกษาของระดับแรงดันเกินบนแบบจำลองระบบระบบกราวด์ (Grid Potential Rise : GPR) พบว่า แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายนั้จะให้ค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณ ตามมาตรฐาน IEEE Std. 80-2000 ดังข้อมูลในภาคผนวก ก.
2. ผลของกระแสผิดพลาด (Fault Current) พบว่ากระแสผิดพลาดไหลลงที่กลางของระบบกราวด์จะทำให้ขนาดของแรงดันเกินสูงกว่ากระแสผิดพลาดไหลลงที่มุมของระบบกราวด์
3. ผลของแท่งหลักดิน (Ground Rod) พบว่าการมีแท่งหลักดินทำให้ขนาดของแรงดันเกินมีค่าสูงกว่าการไม่มีแท่งหลักดิน
4. ผลของความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง (Ground Resistance : R_g) พบว่าขนาดของแรงดันเกินจะมีขนาดสูงขึ้นเมื่อความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูงมีค่าสูง

5.2 ประโยชน์ของโครงการ

1. ทำให้ทราบแบบจำลองระบบระบบกราวด์ที่เหมาะสมในการนำไปวิเคราะห์หาขนาดของแรงดันเกินที่เกิดบนระบบกราวด์(Grid Potential Rise : GPR) กับสถานีไฟฟ้าแรงสูง
2. ทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อขนาดของแรงดันเกินที่เกิดบนระบบกราวด์ คือ ตำแหน่งของกระแสผิดพลาดที่ไหลลงสู่ระบบกราวด์, การมีแท่งหลักดิน และ ค่าความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูง
3. สามารถนำผลการศึกษาไปเป็นข้อมูลในการแก้ไขระบบกราวด์ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงได้ตรงตามสาเหตุที่ทำให้ขนาดของแรงดันเกินที่เกิดบนระบบกราวด์มีค่าสูงขึ้น

5.3 อุปสรรคในการดำเนินงาน

1. งานในส่วนแรกเป็นการศึกษาการใช้งานโปรแกรม ATPDraw ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่แสดงไว้ในเอกสารอ้างอิง แต่เนื่องจากมีข้อมูลไม่เพียงพอ จึงต้องอาศัยการคำนวณด้วยมือ เพื่อตรวจสอบ
2. เนื่องจากการศึกษาเกี่ยวกับหัวข้อนี้แม้จะมีการดำเนินการมาก่อนแต่ก็ไม่ได้มีการบันทึกไว้อย่างเป็นระบบ จึงทำให้การดำเนินการค้นคว้าทฤษฎีจากเอกสารที่เกี่ยวข้องเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก
3. ข้อมูลเกี่ยวกับการคำนวณหาค่าความต้านทาน (R) ค่าความนำ (L) และค่า (C) ของสายส่งไฟฟ้า ไม่ได้มีการรวบรวมไว้ และบางข้อมูลไม่มีผู้ใช้งานมานานทำให้การค้นหาค่าเป็นไปได้ยาก
4. การหาข้อมูลยืนยันตรวจสอบผลการศึกษาระทำได้ยากคาดว่าไม่มีการเก็บข้อมูล ดังนั้นจึงกระทำได้เพียงตรวจสอบกับผลการคำนวณเท่านั้น

5.4 ข้อเสนอแนะในการศึกษาต่อไป

1. ทำการศึกษาว่าช่วงระยะห่างของกราวด์กริดมีผลต่อขนาดของแรงดันเกินที่เกิดบนระบบกราวด์หรือไม่
2. ทำการศึกษาหาขนาดของแรงดันเกินที่เกิดขึ้น ในดิน (Voltage Profile)



บรรณานุกรม

1. วิศวกรรมสถานไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารประกอบการสัมมนาทางวิชาการ หลักสูตรการออกแบบและบำรุงรักษาสถานไฟฟ้าแรงสูงสำหรับอุตสาหกรรม โดย ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. วิศวกรรมสถานไฟฟ้าแรงสูง ดร.ตำรวจ สังข์สะอาด, เรื่อง ไฟผ่าและการป้องกัน

3. Transmission Line Reference Book-200KV and Above , Third Edition

Lightning and Grounding , Metal Tower and Reinforced Concrete Foundations

4. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 11 , No. 2 , April 1999

Computer Analysis of Transient Voltage in Large Grounding Systems.

5. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-102 , No.9 ,

September 1983 Impulse Behavior of Ground Electrodes

6. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 5 , No. 4 , November 1990

An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems.

7. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 14 , No. 3 , July 1999

Frequency – Dependent Grounding System Calculation by Means of a Conventional Nodal Analysis Technique

8. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 12 , No. 1 , January 1997

Frequency – Dependent and Transient Characteristics of Substation Grounding Systems.

9. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 9 , No. 4 , October 1994

EMTP-Based Model for Grounding System Analysis

10. ANSI/IEEE Std. 80

An American National Standard IEEE guide for Safety in AC Substation Grounding

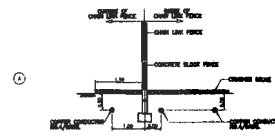
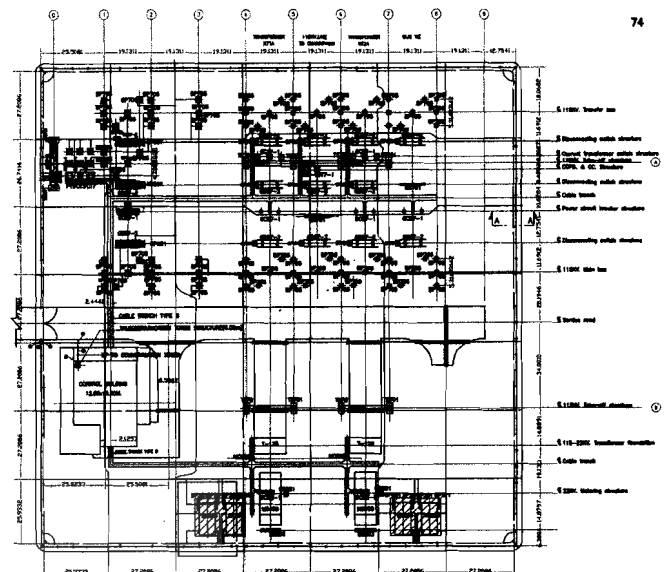
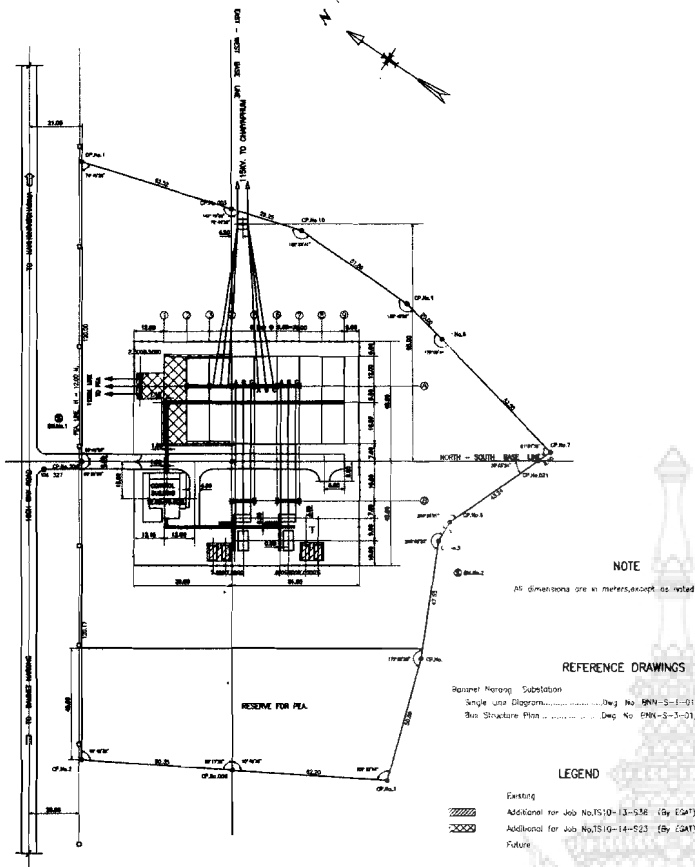
ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

แบบสถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์





- NOTES**
- All dimensions are in meters, except as noted.
 - The ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
 - Ground level shall be 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.

REFERENCE DRAWINGS

Bamnet Narong Substation
General Arrangement Plan Job No. ENN-S-1-01/01
Bus Structure Plan Job No. ENN-S-3-01/01
Substation Structure Layout Job No. ENN-S-7-01/01
Control Building Equipment Layout Job No. SE-10-7-01/01/01
Typical Grounding Connection Job No. SE-10-10-01/01/01
Telecommunication Tower Grounding System Job No. SE-10-10-01/01/01

LEGEND

Indicates ground level 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
Indicates ground level 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
Indicates ground level 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
Indicates ground level 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
Indicates ground level 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
Indicates ground level 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
Indicates ground level 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
Indicates ground level 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
Indicates ground level 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.
Indicates ground level 10.00 m above sea level, unless otherwise indicated.

BAMNET NARONG SUBSTATION

ภาคผนวก ข

ผลลัพธ์จากการประมวลผล



1. คำพาราโมเตอร์ของความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่างๆ แบบจำลองระบบกรวด์แบบพายน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม

```

Comment card. KOMPAR > 0.
Marker card preceding new EMTF data case.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Misc. data. 1.000E-06 1.000E-03 0.000E+00
Misc. data. 500 1 1 1 0 0 1 0 0
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
Series R-L-C. 1.323E+01 0.000E+00 0.000E+00
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
Card of names for time-step loop output.
Blank card ending requests for output variables.
Column headings for the 5 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as
First 5 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage)
Step Time xx0143 xx0001 xx0206 xx0056 xx0263
0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
500 .5E-3 .154047152 .470675154 .023925253 .011778913 .022559687
% % % % % Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.
1000 .1E-2 .068011822 .213686E-4 .101912991 .013525135 .021623356
Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step
Variable maxima : .178197298 9987.34692 .10367139 .027073385 .031832746
Times of maxima : .561E-3 .1E-5 .973E-3 .417E-3 .376E-3
Variable minima : -.05337964 0.0 0.0 0.0 0.0
Times of minima : .817E-3 0.0 0.0 0.0 0.0
Blank card terminating all plot cards.
Actual List sizes for the preceding solution follow.
Size 11-10: 99 180 180 1 1450 0 183 0 0 0
Size 11-20: 0 5 -9999 -9999 -9999 0 0 0 23 0
Size 21-30: 0 0 458 0 -9999 1 -9999 -9999 -9999 0
Seconds for overlays 1-5 : 0.311 0.000 0.311 -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays 6-11 : 0.020 0.000 0.020
Seconds for overlays 12-15 : 0.010 0.000 0.010
Seconds for time-step loop : 0.050 0.000 0.050
Seconds after DELTAT-loop : 0.000 0.000 0.000
Totals : 0.391 0.000 0.391

```

2. ค่าพารามิเตอร์ของความสัมพันธ์แรงดันเหี่ยวหวานที่ตำแหน่งไหนค่าง ๆ แบบจำลอง

ระบบกราฟแบบพายน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

[illegible]

แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายนน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม วัดค่าแรงดันที่มุม

[illegible]

แบบจำลองระบบกราวด์แบบพายนน์ เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง วัดค่าแรงดันที่มุม

```

Extrema of output variables follow.  Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima : .062306417 .091991494 .055965353 .058152742
Times of maxima : .776E-3 .69E-3 .773E-3 .9E-3
Variable minima : -.06962151 -.08882098 -.05390189 0.0
Times of minima : .1E-2 .969E-3 .1E-2 0.0

Blank card terminating all plot cards. |BLANK PLOT
Actual list sizes for the preceding solution follow. 13-Jun-06 07:36.54
Size 1-10: 99 180 180 1 1444 0 183 0 0 0
Size 11-20: 0 4 -9999 -9999 -9999 0 0 0 23 0
Size 21-30: 0 0 458 0 -9999 1 -9999 -9999 -9999 0
Seconds for overlays 1-5 : 0.271 0.000 0.271 -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays 6-11 : 0.030 0.000 0.030
Seconds for overlays 12-15 : 0.020 0.000 0.020
Seconds for time-step loop : 0.050 0.000 0.050
Seconds after DELTAT-loop : 0.020 0.000 0.020

-----
Totals : 0.391 0.000 0.391

```

5. ค่าพารามิเตอร์ของผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนต่าง ๆ
แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม

[illegible]

Card of names for time-step loop output.	xx0102xx0149xx0170xx0238xx0011
Blank card ending requests for output variables.	BLANK OUTPUT

Column headings for the 5 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows

First 5 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);

Step	Time	xx0102	xx0149	xx0170	xx0238	xx0011
------	------	--------	--------	--------	--------	--------

0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----

```

500      .5E-3      .02165279 -.00216127 -.00328261 -.00313002 .470675154
%%% Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.

```

Done dumping plot points to C-like disk file.

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.

Variable maxima : .030722138 .012516033 .016679701 .013661393 9987.34692

Times of maxima :	.66E-4	.4E-3	.746E-3	.761E-3	.1E-5
-------------------	--------	-------	---------	---------	-------

Variable minima : -.03656153 -.01263827 -.01910663 -.0131961 0.0

Times of minima :	.261E-3	.22E-3	.939E-3	.578E-3	0.0
-------------------	---------	--------	---------	---------	-----

Blank card terminating all plot cards.

Actual List Sizes for the preceding solution follow. 10-Jun-06 06.50.00

Size	1-10:	99	180	180	1	1440	0	183	0	0
------	-------	----	-----	-----	---	------	---	-----	---	---

Size 11-20:	0	5	-9999	-9999	-9999	0	0	0	23
-------------	---	---	-------	-------	-------	---	---	---	----

Size 21-30:	0	0	453	0	-9999	0	-9999	-9999	-9999
-------------	---	---	-----	---	-------	---	-------	-------	-------

Seconds for overlays 1-5 : 0.541 0.000 0.541 -- (CP: wait; Real)

Seconds for overlays 1-5 :	0.341	0.000	0.341
Seconds for overlays 6-11 :	0.020	0.000	0.020

Seconds for overlays 9-11 :	0.020	0.000	0.020
Seconds for overlays 12-15 :	0.020	0.000	0.020

```

seconds for overlays in 10 : 0.020 0.000 0.020
seconds for time-step loop : 0.070 0.000 0.070

```

```

seconds for time sleep loop :      0.070      0.000      0.070
seconds after DELTAT-loop :      0.030      0.000      0.030

```

Totals :	0.681	0.000	0.681
----------	-------	-------	-------

6. ค่าพารามิเตอร์ของผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนคต่าง ๆ
แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

[illegible]

```
Card of names for time-step loop output.      | xx0102xx0149xx0170xx0238xx0011
Blank card ending requests for output variables. | BLANK OUTPUT
```

Column headings for the 5 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows

First 5 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);

Step	Time	xx0102	xx0149	xx0170	xx0238	xx0011
------	------	--------	--------	--------	--------	--------

```

0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0      0.0
500    .5E-3    -346.56653    -.01737818    -330.62837    -106.14341    -.02676865
%%% Final time step, PLTFILE dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.
1000   -1E-2    82.6063855    -.00427926    -166.92403    119.254284    -.01578303

```

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.

Variable maxima :	1568.29195	.026043357	2554.87398	154.627259	.036593203
Times of maxima :	.1E-5	.826E-3	.1E-5	.1E-5	.79E-3
Variable minima :	-638.2929	-.01771913	-368.10209	-141.24875	-.02848948
Times of minima :	.42E-3	.477E-3	.46E-3	.581E-3	.463E-3

Blank card terminating all plot cards.				BLANK PLOT						
Actual List Sizes for the preceding solution follow.				10-Jun-06 06.52.51						
Size 1-10:	99	180	180	1	1430	0	183	0	0	0
Size 11-20:	0	5	-9999	-9999	-9999	0	0	0	23	0
Size 21-30:	0	0	451	0	-9999	0	-9999	-9999	-9999	0
Seconds for overlays 1-5 :		0.281		0.000		0.281	--	(CP: wait; Real)		
Seconds for overlays 6-11 :		0.010		0.000		0.010				
Seconds for overlays 12-15 :		0.010		0.000		0.010				
Seconds for time-step loop :		0.020		0.000		0.020				
Seconds after DELTAT-loop :		0.000		0.000		0.000				
Totals :				0.321	0.000	0.321				

แบบจำลองระบบกราวด์แบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม วัดค่าแรงดันที่มุม

```

Column headings for the 3 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows ....
First 3 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
Step      Time      XX0022      XX0149      XX0049
0          0.0        0.0         0.0         0.0
500        .5E-3      -.00216144  -.00216127  -.00216131
% % % % % Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.
1000       .1E-2      -.00594745  -.00594679  -.00594703

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output
variable maxima : .012515876 .012516033 .012515932
Times of maxima : .4E-3 .4E-3 .4E-3
variable minima : -.01263823 -.01263827 -.01263826
Times of minima : .22E-3 .22E-3 .22E-3

```

```

Blank card terminating all plot cards.
Actual List sizes for the preceding solution follow.
Size 1-10: 99 180 180 1 1440 0 183 0 0 0 0
Size 11-20: 0 3 -9999 -9999 -9999 0 0 0 23 0
Size 21-30: 0 0 453 0 -9999 0 -9999 -9999 -9999 0
Seconds for overlays 1-5 : 0.330 0.000 0.330 -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays 6-11 : 0.000 0.000 0.000
Seconds for overlays 12-15 : 0.010 0.000 0.010
Seconds for time-step loop : 0.061 0.000 0.061
Seconds after DELTAT-loop : 0.000 0.000 0.000
-----
Totals : 0.401 0.000 0.401

```

8. คำพารามิเตอร์ของผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนคต่าง ๆ
แบบจำลองระบบกรวดแบบกระจาย เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง วัดค่าแรงดันที่มุม

[illegible]

Card of names for time-step loop output. xx0149xx0049xx0022xx0011
Blank card ending requests for output variables. BLANK OUTPUT

Column headings for the 4 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows

First 4 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);

Step	Time	xx0149	xx0049	xx0022	xx0011
------	------	--------	--------	--------	--------

0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
---	-----	-----	-----	-----	-----

	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
500	.5E-3	-.01737818	-.018984	-.02276744	-.02676865

```

% % % % % Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.

```

Done dumping plot points to C-like disk file.

1000	.1E-2	-.00427926	-.00390272	-.01713498	-.01578303
------	-------	------------	------------	------------	------------

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.

variable maxima : .026043357 .028129683 .032196557 .036593203

Times of maxima :	.826E-3	.827E-3	.792E-3	.79E-3
-------------------	---------	---------	---------	--------

```
variable minima : -.01771913 -.01917674 -.02331721 -.02848948
```

Blank card terminating all plot cards. | BLANK PLOT

Actual List Sizes for the preceding solution follow. 13-Jun-06 07.46.13

Size 1-10:	99	180	180	1	1430	0	183	0	0	0
------------	----	-----	-----	---	------	---	-----	---	---	---

Size 11-20:	0	4	-9999	-9999	-9999	0	0	0	23	0
-------------	---	---	-------	-------	-------	---	---	---	----	---

Size 21-30:	0	0	451	0	-9999	0	-9999	-9999	-9999	0
-------------	---	---	-----	---	-------	---	-------	-------	-------	---

```
Seconds for overlays 1-5 : 0.200 0.000 0.200 -- (CP: wait; Real)
```

Seconds for overlays 6-11 :	0.010	0.000	0.010
-----------------------------	-------	-------	-------

seconds for overlays 12-15 :	0.000	0.000	0.000
------------------------------	-------	-------	-------

```

seconds for time-step loop :    0.030    0.000    0.030

```

```
Seconds after DELTAT-loop : 0.000 0.000 0.000
```

Totals :	0.240	0.000	0.240
----------	-------	-------	-------

9. ค่าพารามิเตอร์ของความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนคต่าง ๆ แบบจำลองระบบกราวด์ แบบพายนน์ ไม่มีแท่งหลักดินเมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม

[illegible]

Card of names for time-step loop output.	xx0001xx0138xx0201xx0022xx0258
Blank card ending requests for output variables.	BLANK OUTPUT

column headings for the 5 EMTF output variables follow. These are divided among the 3 possible classes as follows

Step	Time	xx0001	xx0138	xx0201	xx0022	xx0258
1	00:00:00					
2	00:00:01					
3	00:00:02					
4	00:00:03					
5	00:00:04					
6	00:00:05					
7	00:00:06					
8	00:00:07					
9	00:00:08					
10	00:00:09					
11	00:00:10					
12	00:00:11					
13	00:00:12					
14	00:00:13					
15	00:00:14					
16	00:00:15					
17	00:00:16					
18	00:00:17					
19	00:00:18					
20	00:00:19					
21	00:00:20					
22	00:00:21					
23	00:00:22					
24	00:00:23					
25	00:00:24					
26	00:00:25					
27	00:00:26					
28	00:00:27					
29	00:00:28					
30	00:00:29					
31	00:00:30					
32	00:00:31					
33	00:00:32					
34	00:00:33					
35	00:00:34					
36	00:00:35					
37	00:00:36					
38	00:00:37					
39	00:00:38					
40	00:00:39					
41	00:00:40					
42	00:00:41					
43	00:00:42					
44	00:00:43					
45	00:00:44					
46	00:00:45					
47	00:00:46					
48	00:00:47					
49	00:00:48					
50	00:00:49					
51	00:00:50					
52	00:00:51					
53	00:00:52					
54	00:00:53					
55	00:00:54					
56	00:00:55					
57	00:00:56					
58	00:00:57					
59	00:00:58					
60	00:00:59					
61	00:01:00					
62	00:01:01					
63	00:01:02					
64	00:01:03					
65	00:01:04					
66	00:01:05					
67	00:01:06					
68	00:01:07					
69	00:01:08					
70	00:01:09					
71	00:01:10					
72	00:01:11					
73	00:01:12					
74	00:01:13					
75	00:0					

0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----

```

% % % % % Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.

```

Done dumping plot points to C-like disk file.

200 .002 .44044E-13 443.275296 752.536663 .001703434 -1023.7191

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.

Variable maxima : 8486.55198 1539.64064 946.235565 .005300981 1028.51542

Times of maxima : .1E-4 .57E-3 .00106 .0018 .0016

times of maxima :	1.1E-4	1.57E-3	1.00100	1.0018	1.0010
variable minima :	0.0	-769.50824	-677.44105	0.0	-1023.7191

Variable minima :	0.0	-7.09, 3.0824	-0.77, 4.4103	0.0	-1023.7191
Times of minima :	0.0	.8E-3	.00134	0.0	.002

Blank card terminating all plot cards. [BLANK PLOT

Actual List Sizes for the preceding solution follow. 10-Jun-06 07.03.58

Size	1-10:	98	147	147	1	1189	0	150	0	0
------	-------	----	-----	-----	---	------	---	-----	---	---

Size 11-20:	0	5	-9999	-9999	-9999	0	0	0	23
-------------	---	---	-------	-------	-------	---	---	---	----

Size 11-20:	0	0	-9999	-9999	-9999	0	0	0	23
Size 21-30:	0	0	361	0	-9999	1	-9999	-9999	-9999

Seconds for overlays 1-5 : 0.190 0.000 0.190 -- (CP: wait: Real)

seconds for overlays 1-5 :	0.190	0.000	0.190	-- (CP, wait, real)
seconds for overlays 6-11 :	0.010	0.000	0.010	

seconds for overlays 0-11 :	0.010	0.000	0.010
seconds for overlays 12-15 :	0.000	0.000	0.000

seconds for overlays 12-13 :	0.000	0.000	0.000
seconds for time-step loop :	0.010	0.000	0.010

```

seconds for TIME-step loop :      0.010      0.000      0.010
seconds after DELTAT-loop :      0.000      0.000      0.000

```

Totals :	0.210	0.000	0.210
----------	-------	-------	-------

10. ค่าพารามิเตอร์ของความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งไหนคต่าง ๆ แบบจำลองระบบกราวด์ แบบพายน์ ไม่มีแท่งหลักดินเมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

[illegible]

Card of names for time-step loop output.	xx0001xx0138xx0201xx0022xx0258
Blank card ending requests for output variables.	BLANK OUTPUT

Column headings for the 5 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows

First 5 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);

Step	Time	xx0001	xx0138	xx0201	xx0022	xx0258
------	------	--------	--------	--------	--------	--------

0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----

```

      %%% Final time step.  PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.

```

Done dumping plot points to C-like disk file.

200	.002	282.19006	-491.94431	-399.73146	.005473195	-77.004682
-----	------	-----------	------------	------------	------------	------------

Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.

Variable maxima : 1870.6514 1126.02625 1165.72756 .005473195 743.983617

Times of maxima :	.81E-3	.00182	.32E-3	.002	.00179
-------------------	--------	--------	--------	------	--------

Variable minima : -52.756955 -491.94431 -525.52436 0.0 -118.69074

Blank card terminating all plot cards.

BLANK PLOT

Actual List Sizes for the preceding solution follow. 10-Jun-06 07.06.57

Size	1-10:	98	147	147	1	1176	0	150	0	0	0
------	-------	----	-----	-----	---	------	---	-----	---	---	---

Size 11-20:	0	5	-9999	-9999	-9999	0	0	0	23	0
-------------	---	---	-------	-------	-------	---	---	---	----	---

Size 21-30:	0	0	358	0	-9999	1	-9999	-9999	-9999	0
-------------	---	---	-----	---	-------	---	-------	-------	-------	---

```
Seconds for overlays 1-5 : 0.201 0.000 0.201 -- (CP: Wait; Real)
```

Seconds for overlays 2-5 :	0.000	0.000	0.000
Seconds for overlays 6-11 :	0.000	0.000	0.000

Seconds for overlays 12-15 :	0.010	0.000	0.010
------------------------------	-------	-------	-------

```

seconds for time-step loop :      0.010      0.000      0.010

```

seconds for time step loop :	0.020	0.000	0.020
seconds after DELTAT-loop :	0.000	0.000	0.000

Totals :	0.221	0.000	0.221
----------	-------	-------	-------

11. ค่าพารามิเตอร์ของผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ
เพิ่มความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูงเป็น 5 โอห์ม เมื่อเกิดแรงดันเกินที่มุม

```

Comment card. KOMPAR > 0.
Marker card preceding new EMTF data case.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Misc. data. 1.000E-06 1.000E-03 0.000E+00
Misc. data. 500 1 1 1 0 0 1 0 0
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
Comment card. KOMPAR > 0.
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
Series R-L-C. 1.323E+01 0.000E+00 0.000E+00
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
Card of names for time-step loop output.
Blank card ending requests for output variables.
Column headings for the 5 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows ...
First 5 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
Step Time XX0143 XX0001 XX0203 XX0056 XX0263
0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
500 .5E-3 1.88969669 .470675154 1.77406209 .875034704 1.68166206
% % % % Final time step, PLTFILE dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.
1000 .1E-2 1.12908544 .213686E-4 1.18330605 1.00386407 1.57758819
Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output
Variable maxima : 2.45621244 9987.34692 3.69310139 2.01757856 2.36767732
Times of maxima : .618E-3 .1E-5 .792E-3 .924E-3 .377E-3
Variable minima : 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
Times of minima : 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
Blank card terminating all plot cards.
Actual List Sizes for the preceding solution follow.
Size 1-10: 99 180 180 1 1450 0 183 0 0 0
Size 11-20: 0 5 -9999 -9999 -9999 0 0 0 23 0
Size 21-30: 0 0 458 0 -9999 1 -9999 -9999 -9999 0
Seconds for overlays 1-5 : 0.261 0.000 0.261 -- (CP: wait; Real)
Seconds for overlays 6-11 : 0.010 0.000 0.010
Seconds for overlays 12-15 : 0.010 0.000 0.010
Seconds for time-step loop : 0.020 0.000 0.020
Seconds after DELTAT-loop : 0.000 0.000 0.000
Totals : 0.301 0.000 0.301

```

12. ค่าพารามิเตอร์ของผลแสดงความสัมพันธ์แรงดันเหนี่ยวนำที่ตำแหน่งโหนดต่าง ๆ
เพิ่มความต้านทานของสถานีไฟฟ้าแรงสูงเป็น 5 โอห์ม เมื่อเกิดแรงดันเกินที่ตรงกลาง

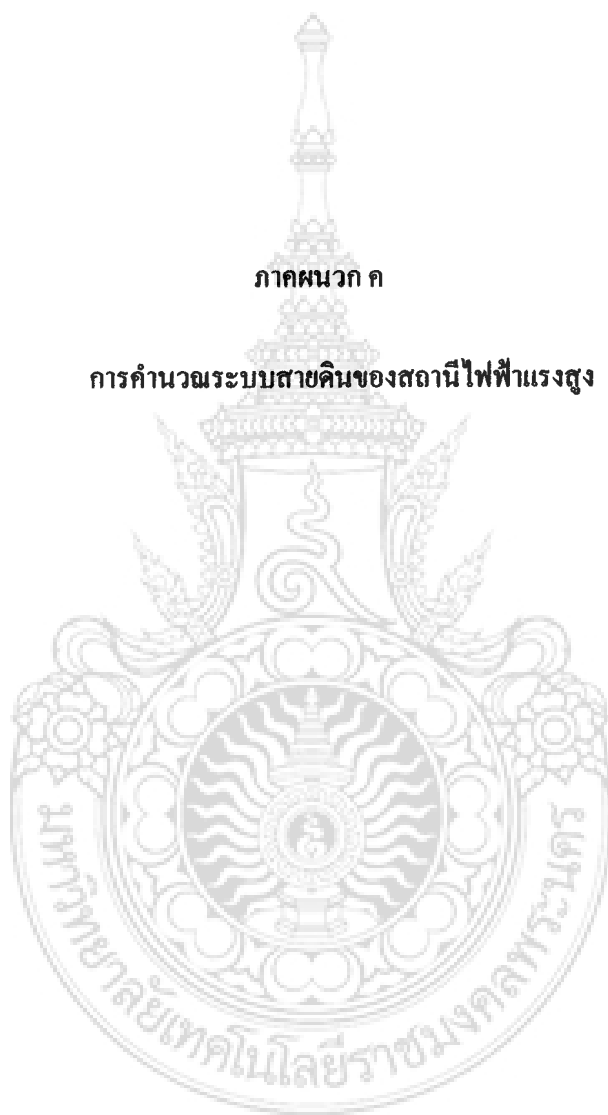
```

Comment card. KOMPAR > O.
Marker card preceding new EMTF data case.
Comment card. KOMPAR > O.
Comment card. KOMPAR > O.
Comment card. KOMPAR > O.
Comment card. KOMPAR > O.
Comment card. KOMPAR > O.
Misc. data. 1.000E-06 1.000E-03 0.000E+00
Misc. data. 500 1 1 1 0 0 1 0 0
Comment card. KOMPAR > O.
Comment card. KOMPAR > O.
Comment card. KOMPAR > O.
Comment card. KOMPAR > O.
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
Series R-L-C. 1.323E+01 0.000E+00 0.000E+00
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
1st of PI-ckt. 7.000E-04 4.128E+00 7.900E-10
Card of names for time-step loop output.
Blank card ending requests for output variables.
column headings for the 5 EMTF output variables follow. These are divided among the 5 possible classes as follows ....
First 5 output variables are electric-network voltage differences (upper voltage minus lower voltage);
Step Time xx0143 xx0001 xx0203 xx0056 xx0263
0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
500 .5E-3 -781.31804 1.42026432 -274.19938 1.40511193 34.6954657
% % % % Final time step, PLTFIL dumps plot data to ".PL4" disk file.
Done dumping plot points to C-like disk file.
1000 .1E-2 -.83776727 -.50213097 -175.01877 -.38411985 -668.833
Extrema of output variables follow. Order and column positioning are the same as for the preceding time-step loop output.
Variable maxima : 947.902967 1.57365036 1277.56364 1.51462833 311.800071
Times of maxima : .279E-3 .645E-3 .318E-3 .636E-3 .755E-3
Variable minima : -790.62148 -.50213097 -824.24096 -.38411985 -668.833
Times of minima : .511E-3 .1E-2 .603E-3 .1E-2 .1E-2
Blank card terminating all plot cards.
Actual List Sizes for the preceding solution follow. 10-Jun-06 07.16.16
Size 1-10: 99 180 180 1 1444 0 183 0 0 0
Size 11-20: 0 5 -9999 -9999 -9999 0 0 0 23 0
Size 21-30: 0 0 458 0 -9999 1 -9999 -9999 -9999 0
Seconds for overlays 1-5 : 0.240 0.000 0.240 -- (CP: Wait; Real)
Seconds for overlays 6-11 : 0.010 0.000 0.010
Seconds for overlays 12-15 : 0.000 0.000 0.000
Seconds for time-step loop : 0.030 0.000 0.030
Seconds after DELTAT-loop : 0.000 0.000 0.000
Totals : 0.280 0.000 0.280

```

ภาคผนวก ค

การคำนวณระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าแรงสูง



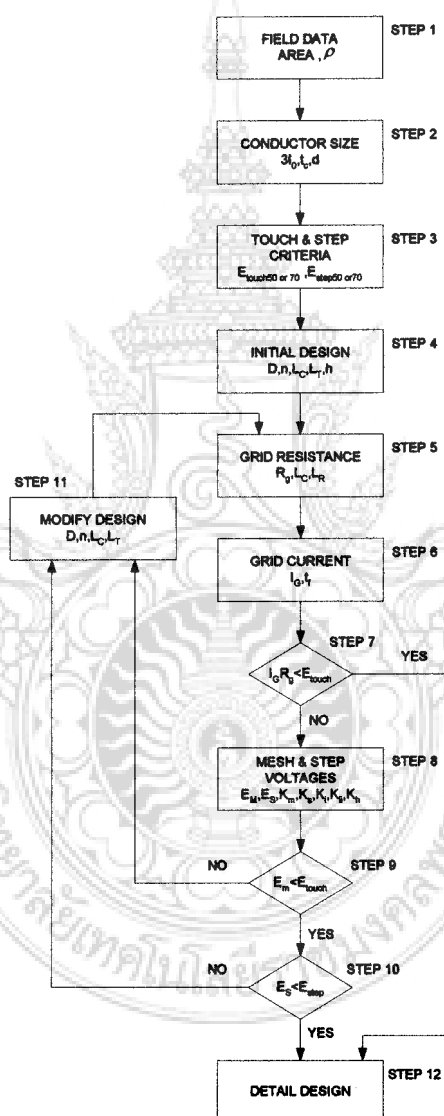
การคำนวณระบบสายดินของสถานีไฟฟ้าแรงสูง

ตาม IEEE Std.80 - 2000

เอกสารอ้างอิง

1. มาตรฐาน IEEE Std80-2000
2. Drawing No. BNN-S-5 (Substation Grounding System)
3. ค่า Soil Resistivity จากการทดสอบ

ขั้นตอนการออกแบบ



ขั้นตอนที่ 1 ข้อมูลเบื้องต้น

1. พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบ่าเหนือจระเข้ม 90x90 เมตร หรือ 8100 ตารางเมตร
2. ค่า Soil Resistivity ที่ความลึก 0.50 เมตร (ρ_{50cm}) = 10 $\Omega - m$
ค่า ρ_{50cm} จะนำไปใช้ในการหาค่า Touch Voltage and Step Voltage เพราะว่าเป็น

ตำแหน่งที่ใกล้กับจุดปฏิบัติงาน

3. ค่า Soil Resistivity Average จากการทดสอบ $\frac{\rho_{max} + \rho_{min}}{2}$

$$\rho_{min} = 8.33 \Omega - m$$

$$\rho_{max} = 16.79 \Omega - m$$

$$\rho_{AV} = 12.56 \Omega - m$$

ค่า (ρ_{AV}) จะนำไปใช้ในการหาค่า ความต้านทานของสถานีไฟฟ้า (R_g)

ขั้นตอนที่ 2 การหาขนาดของสายกราวด์ (Size of Ground Conductors) A_c

สูตร

$$A_c = I_g \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP \ln \left[1 + \left(\frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}}$$

โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตกำหนดให้ใช้สาย Copper annealed soft-drawn

กำหนดให้

$$I_g = \text{ขนาดกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ (กำหนดโดย กฟผ)} = 20.00 \text{ kA}$$

$$\rho_r = \text{ค่าความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ } 20^\circ C = 1.7241 \mu\Omega - cm$$

$$t_c = \text{เวลาที่กระแสไหลผ่าน} = 1.0 \text{ second}$$

$$\alpha_r = \text{สปส.ความต้านทานของตัวนำที่อุณหภูมิ } 20^\circ C = 0.00393 / ^\circ C$$

$$TCAP = \text{ความสามารถในการนำความร้อน} = 3.422 \text{ J/(cm}^3 \cdot ^\circ C)$$

$$T_m = \text{อุณหภูมิหลอมเหลวของตัวนำ (กำหนดที่ 70 \%)} = 700^\circ C$$

$$T_a = \text{อุณหภูมิใช้งาน} = 40^\circ\text{C}$$

$$K_0 = 1/\alpha_0 \text{ หรือ } 1/\alpha_r - T_r = 234$$

แทนค่า

$$A_c = 20 \sqrt{\frac{1 \times 0.00393 \times 1.7241 \times 10^4}{3.422 \ln \left[1 + \left(\frac{700 - 40}{234 + 40} \right) \right]}}$$

$$A_c = 80.36 \text{ mm}^2$$

ค่าที่ใช้แทนค่าทั้งหมดได้จากตารางของ Material Constants โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยกำหนดให้ใช้ Copper, annealed soft-drawn

เมื่อได้ค่า A_c จึงนำค่า A_c ไปพิจารณาเปรียบเทียบกับขนาดสาย Ground โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยพิจารณาเลือกสาย Ground เบอร์ 4/0 AWG มีขนาด 107.20 mm^2 หรือ 0.0134 เมตร ในการเลือกสาย Ground จะต้องเลือกให้เหมาะสมที่สุด โดยถ้าหากเลือกขนาดเล็ก จะไม่สามารถทนแรงดันเกินได้ หรือถ้าเลือกขนาดใหญ่เกินไป จะทำให้ต้นทุนในการลงทุนจะมากขึ้น

Material constants

Description	Material conductivity (%)	α_r factor at 20°C ($1/^\circ\text{C}$)	K_0 at 0°C (0°C)	Fusing* temperature T_m ($^\circ\text{C}$)	ρ_r 20°C ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	TCAP thermal capacity [$\text{J}/(\text{cm}^3\cdot^\circ\text{C})$]
Copper, annealed soft-drawn	100.0	0.003 93	234	1083	1.72	3.42
Copper, commercial hard-drawn	97.0	0.003 81	242	1084	1.78	3.42
Copper-clad steel wire	40.0	0.003 78	245	1084	4.40	3.85
Copper-clad steel wire	30.0	0.003 78	245	1084	5.86	3.85
Copper-clad steel rod ^b	20.0	0.003 78	245	1084	8.62	3.85
Aluminum, EC grade	61.0	0.004 03	228	657	2.86	2.56
Aluminum, 6003 alloy	53.5	0.003 53	263	652	3.22	2.60
Aluminum, 6201 alloy	52.5	0.003 47	268	654	3.28	2.60
Aluminum-clad steel wire	20.3	0.003 60	258	657	8.48	3.58
Steel, 1020	10.8	0.001 60	605	1510	15.90	3.28
Stainless-clad steel rod ^c	9.8	0.001 60	605	1400	17.50	4.44
Zinc-coated steel rod	8.6	0.003 20	293	419	20.10	3.93
Stainless steel, 304	2.4	0.001 30	749	1400	72.00	4.03

*From ASTM standards.

^bCopper-clad steel rods based on 0.254 mm (0.010 in) copper thickness.^cStainless-clad steel rod based on 0.508 mm (0.020 in) No. 304 stainless steel thickness over No. 1020 steel core.

Material	Conductivity (%)	T_m^a (°C)	K_f
Copper, annealed soft-drawn	100.0	1083	7.00
Copper, commercial hard-drawn	97.0	1084	7.06
Copper, commercial hard-drawn	97.0	250	11.78
Copper-clad steel wire	40.0	1084	10.45
Copper-clad steel wire	30.0	1084	12.06
Copper-clad steel rod	20.0	1084	14.64
Aluminum EC Grade	61.0	657	12.12
Aluminum 5005 Alloy	53.5	652	12.41
Aluminum 6201 Alloy	52.5	654	12.47
Aluminum-clad steel wire	20.3	657	17.20
Steel 1020	10.8	1510	15.95
Stainless clad steel rod	9.8	1400	14.72
Zinc-coated steel rod	8.6	419	28.96
Stainless steel 304	2.4	1400	30.05

^aSee 11.3.3 for comments concerning material selection.

ขั้นตอนที่ 3 การหาค่า Touch Voltage and Step Voltage

กำหนดน้ำหนักคนที่ 50 กิโลกรัม

สูตร

$$E_{touch50} = \frac{(1000 + 1.5C_s(h_s, K)\rho_s)0.116}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{step50} = \frac{(1000 + 6.0C_s(h_s, K)\rho_s)0.116}{\sqrt{t_s}}$$

กำหนดให้

$$C_s(h_s, K) = 1 - \frac{a \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{(2h_s + a)} \quad (a = 0.09)$$

C_s = ค่าความต้านทานชั้นกลางระหว่างคนกับพื้นผิว

ρ_s = ความต้านทานของวัสดุแต่งผิว = 3000 $\Omega - m$

ρ = ความต้านทานของดิน = 10 $\Omega - m$

$$\begin{aligned}
 h_s &= \text{ความสูงของวัสดุแต่งผิว} &= 0.10 \text{ เมตร} \\
 t_s &= \text{ช่วงระยะเวลา shock current} &= 1.0 \text{ วินาที} \\
 a &= \text{ขนาดของเท้าคน} &= 0.09
 \end{aligned}$$

$$= 1 - 0.09 \frac{0.09 \left(1 - \frac{10}{3000} \right)}{[2(0.1) + 0.09]}$$

$$C_s = 0.6907$$

แทนค่า

$$\begin{aligned}
 E_{touch50} &= \frac{(1000 + 1.5 \times 0.6907 \times 3000) 0.116}{\sqrt{1}} \\
 &= 476.54 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{step50} &= \frac{(1000 + 6.0 \times 0.6907 \times 3000) 0.116}{\sqrt{1}} \\
 &= 1558.16 \text{ Volt}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 4 ข้อมูลการออกแบบการวางระบบ Ground (Initial Design)

1. พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบำเหน็จณรงค์ ขนาด 90x90 เมตร
พื้นที่ทั้งหมด = 8100 ตารางเมตร
2. กำหนดระยะห่างระหว่างสายตัวนำ (D) = 12.80 เมตร
3. กำหนดจำนวนการวาง Ground grid = 7 x 7 ช่อง
4. กำหนดจำนวน Ground rod (n_r) = 46
5. ความยาวของสาย Ground (L_c) (90 x 16) = 1440 เมตร
6. ความยาวของ Ground rod (L_r) = 3 เมตร
7. ความยาวของ Ground rod รวมทั้งหมด (L_R) (46 x 3) = 138 เมตร
8. ความยาวของสาย Ground ทั้ง 4 ด้านรอบสถานีไฟฟ้า (L_p) = 360 เมตร
9. ความยาวทั้งหมดของระบบ Ground ($L_T = L_c + L_R + L_p$) = 1938 เมตร

ขั้นตอนที่ 5 การหาค่าความต้านทานระบบสายดินของสถานีไฟฟ้า (Determination of grid resistance)

สูตร

$$R_g = \rho_{AV} \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right]$$

กำหนดให้

L_T = ความยาวทั้งหมดของระบบ Ground = 1938 เมตร

A = พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบ่อน้ำเหนือจรมรงค์ ขนาด 90x90 เมตร

พื้นที่ทั้งหมด = 8100 ตารางเมตร

ρ_{AV} = ค่า Soil resistivity average จากการทดสอบ = $12.56 \Omega - m$

h = ความลึกของ ground grid conductor = 0.5 m

แทนค่า

$$= 12.56 \left[\frac{1}{1938} + \frac{1}{\sqrt{20 \times 8100}} \left(1 + \frac{1}{1 + 0.5\sqrt{\frac{20}{8100}}} \right) \right]$$

$$R_g = 0.0681 \quad \Omega$$

ขั้นตอนที่ 6 การหาค่าสูงสุดของ Grid Potential Rise (GPR)

สูตร

$$GPR = I_g \times R_g$$

กำหนดให้

$$I_g = \text{ขนาดกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ (กำหนดโดย กฟผ)} = 20.00 \text{ kA}$$

$$R_g = \text{ความต้านทานระบบสายดินของสถานีไฟฟ้า} = 0.0681 \text{ } \Omega$$

แทนค่า

$$\begin{aligned} GPR &= 20 \times 0.0681 \\ &= 1362 \text{ Volt.} \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 7 การเปรียบเทียบค่าของ Grid potential rise (GPR) กับค่าTouch voltage

$$E_{touch50} = 476.54 \text{ Volt}$$

$$GPR = 1362 \text{ Volt.}$$

เงื่อนไข

$$GPR < E_{touch50}$$

$$GPR > E_{touch50}$$

สิ้นสุดการออกแบบ โดยข้ามไปที่ขั้นตอนที่ 12

ดำเนินการต่อในขั้นตอนต่อไป

ขั้นตอนที่ 8 การคำนวณหาค่า mesh voltage (E_m) and step voltage (E_s)

สูตร

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_g}{L_M}$$

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_g}{L_S}$$

กำหนดให้

E_m = Mesh voltage

E_s = Step voltage)

ρ = ค่า Soil Resistivity ที่ความลึก 0.50 เมตร (ρ_{50cm}) = 10 $\Omega - m$

I_g = กระแสสูงสุดของสถานีไฟฟ้า = 20.00 kA

K_i = ค่า factor ของการจัดเรียง Grid รูปแบบต่างๆ

หาค่า $K_i = 0.644 + 0.148n$

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d$$

n = Effective number of parallel conductor in a given grid

$$n_a = \frac{2L_c}{L_p} \quad , \quad = \frac{2 \times 1938}{360} = 10.766$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} = 1 \quad ; \quad \text{มีค่า=1 เมื่อ Grid เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส}$$

$$n_c = \left[\frac{L_x L_y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_x L_y}} = 1 \quad ; \quad \text{มีค่า=1 เมื่อ Grid เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าและสี่เหลี่ยมจัตุรัส}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} = 1 \quad ; \quad \text{มีค่า=1 เมื่อ Grid เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า สี่เหลี่ยมจัตุรัส และรูปตัว L}$$

$$= 10.766 \times 1 \times 1 \times 1$$

$$n = 10.766$$

แทนค่า

$$K_i = 0.644 + (0.148 \times 10.766) = 2.237$$

หาค่า
$$L_M = L_C + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R$$

L_M = ผลรวม $L_C + L_R$ ของ mesh voltage

L_C = ความยาวของสาย Ground = 1938 เมตร

L_r = ความยาวของ Ground rod = 3.00 เมตร

L_R = ความยาวของ Ground rod รวมทั้งหมด = 138 เมตร

L_x = ความยาวของสาย Ground ในแนวแกน X = 90.00 เมตร

L_y = ความยาวของสาย Ground ในแนวแกน Y = 90.00 เมตร

$$L_M = 1938 + \left[1.55 + 1.22 \left(\frac{3}{\sqrt{90^2 + 90^2}} \right) \right] 138$$

$$L_M = 1946.54 \text{ เมตร}$$

หาค่า
$$L_S = 0.75L_C + 0.85L_R$$

L_S = ผลรวม $L_C + L_R$ ของ step voltage

L_C = ความยาวของสาย Ground = 1938 เมตร

L_R = ความยาวของ Ground rod รวมทั้งหมด = 138 เมตร

แทนค่า

$$= (0.75 \times 1938) + (0.85 \times 138)$$

$$L_S = 1570.8 \text{ เมตร}$$

หาค่า
$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

K_s = Spacing factor for step voltage

h = ความลึกของ Ground grid conductor = 0.5 เมตร

D = กำหนดระยะห่างระหว่างสายตัวนำ = 12.80 เมตร

n = Effective number of parallel conductor in a given grid = 10.766

แทนค่า

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0.5} + \frac{1}{12.80 + 0.5} + \frac{1}{12.80} (1 - 0.5^{10.766-2}) \right]$$

$$K_s = 0.367$$

หาค่า

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2+h)^2}{8Dh} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \left[\frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right]$$

K_m = Spacing factor for mesh voltage

h = ความลึกของสาย Ground = 0.5 เมตร

D = ความห่างระหว่างสาย Ground แต่ละเส้น = 12.80 เมตร

n = Effective number of parallel conductor in a given grid = 10.766

d = ขนาดของสาย Ground เบอร์ 4/0 AWG = 0.0134 เมตร

K_{ii} = Corrective weighting factor conductors on the corner mesh = 1.00

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad \text{ของ Grid ที่ไม่มี ground rod}$$

$$K_{ii} = 1.00 \quad \text{ของ Grid ที่มี ground rod}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.5}{1}}$$

$$K_h = 1.225$$

กำหนดให้

K_h = ผลที่ได้จากความลึกของ Grid

h = ความลึกของสาย Ground = 0.5 เมตร

h_0 = ความลึกของสาย Ground ที่ใช้อย่างอิง = 1.0 เมตร

แทนค่า

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{1280^2}{16 \times 0.5 \times 0.0134} + \frac{(1280 + 2 \times 0.5)^2}{8 \times 1280 \times 0.5} - \frac{0.5}{4 \times 0.0134} \right] + \frac{1}{1.225} \ln \left[\frac{8}{\pi((2 \times 10766) - 1)} \right] \right]$$

$$K_m = 0.911$$

แทนค่า

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M} = \frac{10 \times 0.911 \times 2.237 \times 20 \times 10^3}{1946.54}$$

$$= 209.38 \text{ Volt}$$

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_s} = \frac{10 \times 0.367 \times 2.237 \times 20 \times 10^3}{1570.8}$$

$$= 104.53 \text{ Volt}$$

ขั้นตอนที่ 9, 10 การตรวจสอบการออกแบบในขั้นตอนที่ 4 Initial Design ว่าสามารถใช้ในการออกแบบจริงในขั้นตอนที่ 12 Detail Design ดังเงื่อนไขต่อไปนี้

เงื่อนไขที่ 1

$E_m < E_{touch50}$ สิ้นสุดการออกแบบเพื่อไปปรับปรุงข้อมูลในขั้นตอนที่ 11

$E_m > E_{touch50}$ ดำเนินการต่อในขั้นตอนต่อไป

$$E_m = \text{Mesh voltage} = 209.38 \text{ Volt}$$

$$E_{touch50} = \text{touch voltage} = 476.54 \text{ Volt}$$

เงื่อนไขที่ 2

$E_s < E_{step50}$ สิ้นสุดการออกแบบเพื่อไปปรับปรุงข้อมูลในขั้นตอนที่ 11

$E_s > E_{step50}$ ดำเนินการต่อในขั้นตอนต่อไป

$$E_s = \text{Step voltage} = 104.53 \text{ Volt}$$

$$E_{step50} = \text{Criteria value of step voltage} = 1558.16 \text{ Volt}$$

ขั้นตอนที่ 11 การปรับปรุงข้อมูล

1. กำหนดระยะห่างระหว่างสายตัวนำ (D)
2. กำหนดจำนวน Ground rod (n_r)
3. ความยาวของสาย Ground grid (L_c)
4. ความยาวของ Ground rod (L_r)
5. ความยาวของ Ground rod รวมทั้งหมด (L_R)

ทำการออกแบบต่อในขั้นตอนที่ 5 และต่อไปจนจบขั้นตอน

ขั้นตอนที่ 12 การรวบรวมข้อมูลในการออกแบบ

A_c = ขนาดของสายกราวด์	=	107.20	mm ²
I_g = ขนาดกระแสที่ไหลผ่านตัวนำ (กำหนดโดย กฟผ)	=	20.00	kA
ρ = ค่า Soil Resistivity ที่ความลึก 0.50 เมตร (ρ_{50cm})	=	10.00	$\Omega - m$
ρ_{av} = ค่า Soil Resistivity Average	=	12.56	$\Omega - m$
ρ_s = ความต้านทานของวัสดุแต่งผิว	=	3000	$\Omega - m$
h_s = ความสูงของวัสดุแต่งผิว	=	0.10	เมตร
t_c = เวลาที่กระแสไหลผ่าน	=	1.0	วินาที
h = ความลึกของ ground grid conductor	=	0.5	เมตร
d = ขนาดของสาย Ground เบอร์ 4/0 AWG	=	0.0134	เมตร
A = พื้นที่ของสถานีไฟฟ้าแรงสูงบ้านหนึ่งจณรงค์ ขนาด 90x90 เมตร			
พื้นที่ทั้งหมด	=	8100	ตารางเมตร
D = ความห่างระหว่างสาย Ground แต่ละเส้น	=	12.80	เมตร
R_g = ความต้านทานของสถานีไฟฟ้า	=	0.0681	Ω
$E_{touch50}$ = ค่า touch voltage ที่คนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม	=	476.54	Volt
E_{step50} = ค่า step voltage ที่คนน้ำหนัก 50 กิโลกรัม	=	1558.16	Volt
E_m = ค่า Mesh voltage	=	209.38	Volt
E_s = ค่า Step voltage	=	104.53	Volt
L_T = ความยาวทั้งหมดของระบบ Ground	=	1938	เมตร