

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาโปรแกรม TLW ในระบบไฟฟ้ากำลัง

THE STUDY OF TRANSMISSION LINE WORKSTATION PROGRAM IN  
POWER SYSTEMS



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2549

การศึกษาโปรแกรม TLW ในระบบไฟฟ้ากำลัง

THE STUDY OF TRANSMISSION LINE WORKSTATION PROGRAM IN  
POWER SYSTEMS



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาโปรแกรม TRANSMISSION LINE WORKSTATION ในระบบไฟฟ้า  
กำลัง

ผู้จัดทำ



1. นายกาญจน์ พวงมะลิ
2. นายกิตติทัต ไชยคำ
3. นายพงศกร แซ่อึ้ง
4. นายศัลยา บัณฑิตพานิชชา

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การศึกษาโปรแกรม TRANSMISSION LINE WORKSTATION ในระบบไฟฟ้ากำลัง

นายกาญจน์ พวงมะลิ

นายกิตติทัต ไชยคำ

นายพงศกร แซ่อึ้ง

นายศัลยา บัณฑิตพานิชชา

รศ.ดร. วีระเชษฐุ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2549

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ ศึกษาเกี่ยวกับระดับความเข้มสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่เกิดในระบบไฟฟ้ากำลัง และเสนอการสร้างเครื่องวัดสนามไฟฟ้าเพื่อใช้วัดค่าความเข้มของสนามไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลังและปรับเทียบค่าที่วัดได้กับเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ (AC electric field meter) และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation (TLW)

ประโยชน์ที่จะได้รับจากปริญญานิพนธ์นี้ ทำให้ทราบว่าปริมาณของความเข้มสนามไฟฟ้า ณ ตำแหน่งและบริเวณใดมีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงเพื่อที่จะเป็นแนวทางในการปฏิบัติงานได้ถูกต้องและปลอดภัยรวมถึงการหาทางป้องกันและแก้ไขเพื่อเป็นประโยชน์และข้อมูลในการออกแบบสายส่งในระบบไฟฟ้ากำลังต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE STUDY OF TRANSMISSION LINE WORKSTATION PROGRAM IN  
POWER SYSTEMS**

Karn Puangmali

Kittitat Chaikam

Pongsakorn Sae-aung

Sanlaya Bandidpanitcha

Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern Advisor

2006

**ABSTRACT**

The purpose of this project is to study the level of electric field strength and magnetic field density. The prototype of electric field measurement is designed to measure the electric field strength in power systems which is calibrated to the commercial AC electric field meter to analyze the magnetic field density comparing with transmission line workstation (TLW) program.

The advantage of this thesis is to form the quantity of electric field strength in any area. TLW also gives the suitable electric field level for power system based on safety and economic strategy design.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง จาก รศ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมชาติ จิรวิภากร และอาจารย์ นรเศรษฐ พัฒนเดช ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางและแก้ไขข้อบกพร่องด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วย ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ขอขอบคุณ เพื่อนๆและรุ่นพี่ทุกคน ในห้องปฏิบัติการและการวิจัย ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า Electro Magnetic Compatibility (EMC) ที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยจนสำเร็จไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่พนักงานการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคประเทศแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัยและขอขอบคุณ คุณปิยะบุตร พุฒพานุบาล ที่ได้แนะนำแนวทางในการออกแบบเครื่องวัดสนามไฟฟ้า

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่คอยอบรมสั่งสอนและให้กำลังใจในการศึกษาตลอดมา จนประสบความสำเร็จจนทุกวันนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูปภาพ.....	VII
สารบัญตาราง.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทำงาน.....	4
2.1 กฎของCoulomb.....	4
2.2 กฎของFaraday.....	6
2.3 สนามไฟฟ้า .....	9
2.4 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	10
2.4.1 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	11
2.4.2 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	12
2.5 สนามไฟฟ้าในวัสดุฉนวนต่างชนิดซ้อนกันหรือผสมกัน.....	12
2.6 การฉนวนซ้อนกันด้วยฉนวนก๊าซและฉนวนของแข็ง.....	14
2.6.1 การฉนวนโดยใช้ฉนวนแทรกผสมกัน.....	16
2.6.2 การฉนวนซ้อนกันเป็นชั้นในทรงกระบอกแกนร่วม.....	18
2.7 การหักเหของสนามไฟฟ้าในฉนวน .....	21
2.8 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้าแรงสูง.....	23
2.8.1 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวนำสายไฟฟ้าควบ.....	23
2.8.2 ผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อคนและสัตว์.....	24
2.9 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	25
2.10 คลื่นแม่เหล็กและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกันอย่างไร.....	25
2.11 มาตรฐานของการได้รับพลังงานจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า.....	26
2.12 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีปัญหาเกี่ยวกับผู้ที่ใส่เครื่องกระตุ้นหัวใจหรืออุปกรณ์ทางการแพทย์อื่นๆหรือไม่.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญ(ต่อ)

	หน้า
2.13 ผลกระทบต่อสุขภาพของคลื่นสนามไฟฟ้า.....	27
2.14 หลักการของเครื่องวัดสนามไฟฟ้า.....	28
2.14.1 ภาครับสัญญาณ.....	28
2.15 วงจรออปแอมป์.....	29
2.15.1 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเครื่องหมาย.....	30
2.15.2 วงจรขยายสัญญาณและกรองความถี่ต่ำผ่านได้.....	30
2.15.3 วงจรกรองสัญญาณทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูง.....	31
2.15.4 วงจรแปลงสัญญาณจาก AC เป็น DC.....	32
2.15.5 AD521 (ANALOG DEVICES).....	32
2.16 สรุป.....	33
<b>บทที่ 3 การออกแบบเครื่องวัดสนามไฟฟ้า.....</b>	<b>34</b>
3.1 แนวคิดในการออกแบบเครื่องวัดสนามไฟฟ้า.....	34
3.1.1 ภาครับสัญญาณ.....	35
3.1.2 ภาคขยายสัญญาณ.....	35
3.1.3 ภาคเรกติไฟร์.....	37
3.1.4 ภาคแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล.....	37
3.1.5 ภาคแสดงผล.....	37
3.2 วงจรเครื่องวัดสนามไฟฟ้า.....	38
3.3 วงจรเครื่องวัดสนามไฟฟ้าที่แสดงการทำงานในแต่ละภาค.....	39
3.4 สรุป.....	40
<b>บทที่ 4 การทดลองใช้โปรแกรม TLW ในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง.....</b>	<b>41</b>
4.1 บทนำ.....	41
4.2 วัตถุประสงค์การทดลอง.....	41
4.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	41
4.4 วิธีการทดลอง.....	41
4.5 แผนผังการทดลอง.....	42
4.6 การทดลอง.....	42
4.6.1 การทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m (เรียงเฟส A-B-C).....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.6.2 การทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m (สลับเฟส A-C-B).....	45
4.6.3 การทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m (สลับเฟส B-A-C).....	47
4.6.4 การทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m (สลับเฟส C-B-A).....	50
4.6.5 การทดลองที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m (เรียงเฟส A-B-C).....	52
4.6.6 การทดลองที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m (สลับเฟส A-C-B).....	55
4.6.7 การทดลองที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m (สลับเฟส B-A-C).....	57
4.6.8 การทดลองที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m (สลับเฟส C-B-A).....	60
4.6.9 การทดลองที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m (เรียงเฟส A-B-C).....	62
4.6.10 การทดลองที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m (สลับเฟส A-C-B).....	65
4.6.11 การทดลองที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m (สลับเฟส B-A-C).....	67
4.6.12 การทดลองที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m (สลับเฟส C-B-A).....	70
4.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	72
4.8 สรุปผลการทดลอง.....	74
บทที่ 5 การทดสอบวัดสนามไฟฟ้าจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ ระดับแรงดัน 22 kV และ 115 kV .....	75
5.1 บทนำ.....	75
5.2 วัตถุประสงค์ในการทดสอบ.....	75
5.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ.....	75
5.4 วิธีการทดสอบ.....	75

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.5 ผลที่ได้จากการทดสอบ.....	76
5.5.1 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าจากสถานที่จริงที่แรงดัน 22 KV กระแส 400 A และ 115 KV กระแส 1300 A ตามลำดับโดยลักษณะ การวัดที่ด้านข้างของสายส่งไฟฟ้า.....	76
5.5.2 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าจากสถานที่จริงที่แรงดัน 115 KV และ 22 KV โดยลักษณะการวัดที่ได้เสาส่งไฟฟ้า.....	78
5.6 สรุปผลการทดลอง.....	79
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	80
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	80
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	80
6.3 งานที่ควรดำเนินการต่อไป.....	81
ภาคผนวก.....	82
ภาคผนวก ก. เครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าและภาพการทดลอง.....	83
ภาคผนวก ข. ข้อมูลที่ใช้กับโปรแกรม TLW.....	87
ภาคผนวก ค. ข้อมูลอุปกรณ์.....	96
กิตติกรรมประกาศ.....	115
เอกสารอ้างอิง.....	116

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ทฤษฎีต่างๆ ที่ต้องนำมาใช้ในการสร้างเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้า.....	4
2.2 สนามไฟฟ้าที่ระยะ R จากประจุ $Q^+$ .....	5
2.3 ลักษณะของสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุหลายประจุ.....	6
2.4 แสดงประจุไฟฟ้าที่ 2 ตำแหน่ง.....	7
2.5 แสดงการเคลื่อนที่ประจุไฟฟ้าแนวตั้งฉาก.....	8
2.6 สนามไฟฟ้าในแผ่นระนาบคู่ขนาน.....	9
2.7 ลักษณะการเกิดสนามไฟฟ้า.....	11
2.8 ฉนวน 2 ชนิดซ้อนกันภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	13
2.9 หน้าตัดของสายเคเบิล Coaxial ที่มีการฉนวนซ้อนเป็นชั้น.....	18
2.10 กราฟแสดงสนามไฟฟ้ากระจายในสายเคเบิล Coaxial.....	20
2.11 รูปแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อพุ่งผ่านรอยต่อที่มี $\epsilon_1 > \epsilon_2$ .....	21
2.12 การทดสอบค่าแรงดันเบรกดาว์นของแผ่นฉนวนของแข็ง ( $\epsilon_2$ ) สัญลักษณ์ ลูกศรในรูปแสดงบริเวณที่มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง (เมื่อ $\epsilon_2 > \epsilon_1$ ).....	22
2.13 แสดงการวัดสัญญาณของสนามไฟฟ้า.....	29
2.14 ออปแอมป์ 8-pin Dual-in-line Package.....	29
2.15 วงจร Non-inverting Amplifier.....	30
2.16 Current Feedback Amplifier Low-Pass Filter.....	30
2.17 Current Feedback Sallen – Key Low – Pass Filter.....	31
2.18 Current Feedback Sallen – Key High – Pass Filter.....	32
2.19 AC to DC converter.....	32
2.20 AD521 (Instrumentation Amplifier).....	33
2.21 ขาของ IC AD521.....	33
3.1 รูป (ก) แนวคิดในการออกแบบ และ รูป (ข) เครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น.....	34
3.2 Inverting Amplifier.....	35
3.3 Non - Inverter Amplifier.....	36
3.4 วงจรเครื่องวัดสนามไฟฟ้า.....	38
3.5 วงจรเครื่องวัดสนามไฟฟ้าที่แสดงการทำงานในแต่ละภาค.....	39
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	42
4.2 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	43

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	43
4.4 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	44
4.5 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	44
4.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	45
4.7 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	45
4.8 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	46
4.9 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	46
4.10 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	47
4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	47
4.12 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	48
4.13 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	48
4.14 ค่าสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	49
4.15 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	49
4.16 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	50
4.17 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	50
4.18 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	51
4.19 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	51
4.20 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	52
4.21 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	52
4.22 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	53
4.23 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	53
4.24 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	54
4.25 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	54
4.26 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	55
4.27 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	55
4.28 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	56
4.29 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	56
4.30 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	57
4.31 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	57
4.32 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.33 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	58
4.34 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	59
4.35 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	59
4.36 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	60
4.37 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	60
4.38 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	61
4.39 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m .....	61
4.40 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m.....	62
4.41 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m...62	
4.42 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	63
4.43 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	63
4.44 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m .....	64
4.45 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	64
4.46 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m...65	
4.47 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m .....	65
4.48 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	66
4.49 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	66
4.50 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	67
4.51 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอนที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m...67	
4.52 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	68
4.53 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	68
4.54 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m .....	69
4.55 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	69
4.56 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m...70	
4.57 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m .....	70
4.58 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	71
4.59 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	71
4.60 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m.....	72
5.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า ที่วัดจากเครื่องวัดเชิงพาณิชย์ กับเครื่องวัดที่สร้างขึ้นที่แรงดัน 22 kV.....	77
5.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า ที่วัดจากเครื่องวัดเชิงพาณิชย์ กับ เครื่องวัดที่สร้างขึ้นและโปรแกรม TLW ที่แรงดัน 115 kV.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าจำกัดสูงสุดของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก 50/60 Hz.....	24
2.2 ข้อกำหนดความกว้างเขตเดินสายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต.....	24
5.1 ผลการทดสอบวัดไฟฟ้าที่แรงดัน 22 kV.....	76
5.2 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 115 kV ที่เฟส A.....	77
5.3 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 115 kV ที่เฟส B.....	77
5.4 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 115 kV ที่เฟส C.....	78
5.5 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 115 kV และ 22 kV โดยลักษณะการวัดที่ ได้แสงส่งไฟฟ้า.....	78



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญของปัญหา

การศึกษาโปรแกรม Transmission Line Workstation เป็นการใช้งานของโปรแกรม ในด้านการวิเคราะห์และคำนวณหาค่าปริมาณของสนามไฟฟ้าและปริมาณของสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น บริเวณสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ทำให้เรารู้ปริมาณว่าที่บริเวณนั้นมีค่าสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ว่ามีขนาดเท่าไร โดยใช้เครื่องมือวัดสนามไฟฟ้ามาตรฐานทำการวัดค่าและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือที่สร้างขึ้น และเปรียบเทียบผลของสนามไฟฟ้าที่ได้กับการประมวลผลของโปรแกรม Transmission Line Workstation

เนื่องจากในปัจจุบันเรารู้ว่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มีผลกระทบซึ่งทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ และอุปกรณ์ไฟฟ้าบางชนิด ตั้งแต่ระบบไฟฟ้าได้เข้ามามีส่วนร่วมในชีวิตประจำวันของเราอำนาจของสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเราไม่อาจที่จะหลีกเลี่ยงได้ เพราะอุปกรณ์ไฟฟ้าจะไม่สามารถที่จะทำงานได้ถ้าปราศจากอำนาจของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป ก็จะมีค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแตกต่างกันออกไป โดยผู้ที่อยู่อาศัยในสภาพแวดล้อมที่มีค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมากก็อาจก่อให้เกิดอันตรายขึ้นได้ เช่น อาจเกิดโรคมะเร็งต่อมน้ำเหลืองบวม เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่เราจำเป็นที่จะต้องรู้ปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เพื่อที่จะออกแบบระบบป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์หรืออาจจะหลีกเลี่ยงที่จะอยู่ในบริเวณที่มีปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นได้

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการศึกษาโปรแกรม Transmission Line Workstation ในการวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ในระบบไฟฟ้าว่าเกิดขึ้นได้อย่างไร
2. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้า ว่ามีหลักการทำงานอย่างไร เพื่อเข้าใจหลักการทำงานของเครื่องมือวัด เพื่อที่จะสามารถใช้เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ในการวัดค่าปริมาณสนามไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง
3. เพื่อสามารถนำความรู้มาออกแบบสร้างเครื่องวัดสนามไฟฟ้า ได้อย่างถูกต้อง

4. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรม Transmission Line Workstation ในการประมวลผลของค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ และเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นว่าผลที่ได้เป็นอย่างไร

5. เพื่อศึกษาถึงแหล่งกำเนิดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น สายส่งไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง เพื่อที่จะเป็นข้อมูลทางด้านงานวิศวกรรมต่อไป

6. เพื่อนำผลของปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนำมาวิเคราะห์ว่าปริมาณใดในระบบไฟฟ้ามีปริมาณมากน้อยเพียงใด เพื่อหาทางที่จะหลีกเลี่ยงเพื่อที่จะป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับร่างกายมนุษย์ และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าบางชนิด

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดงานวิจัย

1. ศึกษาการใช้เครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ ในการวัดปริมาณค่าสนามไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง

2. ศึกษาโปรแกรม Transmission Line Workstation เพื่อนำมาใช้ในการหาค่าของปริมาณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

3. ออกแบบสร้างเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้า

4. ศึกษาวิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ และผลที่ได้จากเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น และจากการคำนวณด้วยโปรแกรม Transmission Line Workstation นำมาเปรียบเทียบวิเคราะห์ความถูกต้อง

### 1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ทำการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ว่ามีหลักการเกิดอย่างไร

2. ศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ว่ามีผลกระทบอย่างไรกับร่างกายมนุษย์ และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าบางชนิด

3. ศึกษาการเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

4. ออกแบบสร้างเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้า

5. ทดสอบเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น และทำการปรับเทียบมาตรฐานกับเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าเชิงพาณิชย์

6. ศึกษาการใช้โปรแกรม Transmission Line Workstation ในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง

7. ทดสอบวัดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ขนาดแรงดัน 22 kV, 33 kV และ 115 kV

8. ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์กับผลที่ได้เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น และผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม Transmission Line Workstation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1. สามารถเข้าใจถึงทฤษฎีการเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
2. ทำให้สามารถมีความเข้าใจในการใช้เครื่องมือวัดสนามไฟฟ้า ในการวัดค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้ากำลัง
3. สามารถใช้โปรแกรม Transmission Line Workstation ในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
4. สามารถนำผลที่ได้ มาแทนแนวทางในการวิจัยเรื่องต่างๆ ทางด้านสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
5. สามารถรู้ถึงปริมาณของสามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เพื่อหาวิธีหลีกเลี่ยงอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับร่างกายเราได้
6. เพื่อเป็นข้อมูลใช้ในการออกแบบระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศ

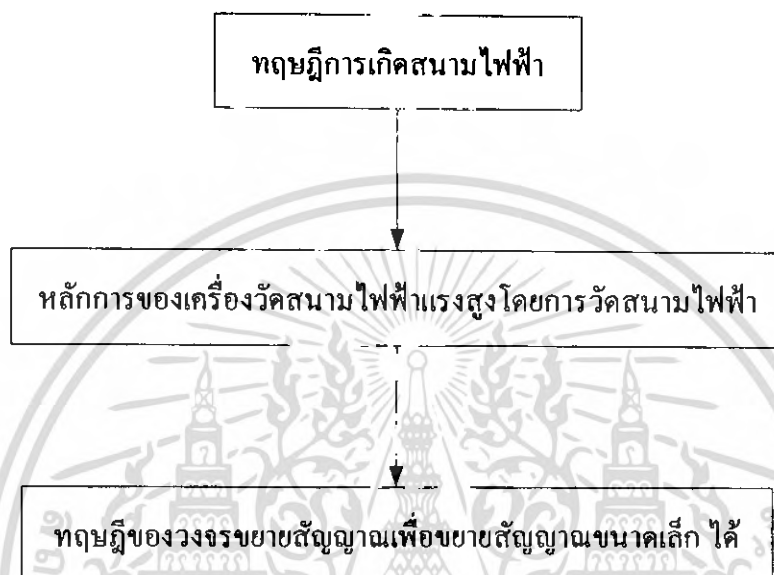


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการทํางาน

ทฤษฎีที่นำมาใช้ในการสร้างเครื่องวัดสนามไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องสามารถจำแนกได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ทฤษฎีต่างๆ ที่ต้องนำมาใช้ในการสร้างเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้า

การสร้างเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้านั้นสิ่งที่ต้องรู้คือ รู้ว่าการเกิดสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นได้อย่างไรและสนามไฟฟ้ามีลักษณะเป็นอย่างไร จึงจะสามารถที่จะรู้ว่าควรทำการวัดได้อย่างไร และต้องศึกษาเทคนิคการวัดไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้หลักการวัดสนามไฟฟ้า เพื่อที่จะสามารถนำมาสร้างอุปกรณ์ที่จะทำการวัด สุดท้ายต้องศึกษาวงจรรขยายสัญญาณ เนื่องจากผลที่ได้จากการวัดนั้นจะเป็นสัญญาณที่มีขนาดเล็กมาก จึงต้องสร้างวงจรรขยายเพื่อขยายสัญญาณเล็กๆ และแสดงผลออกมาเป็นค่าที่สามารถอ่านได้ ทั้งหมดเป็นแนวทางในการศึกษา เพื่อที่จะนำมาสร้างเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าแรงสูงโดยใช้เทคนิคการวัดสนามไฟฟ้า โดยจะจำแนกหลักการและทฤษฎีต่างๆดังนี้

#### 2.1 กฎของ Coulomb [1]

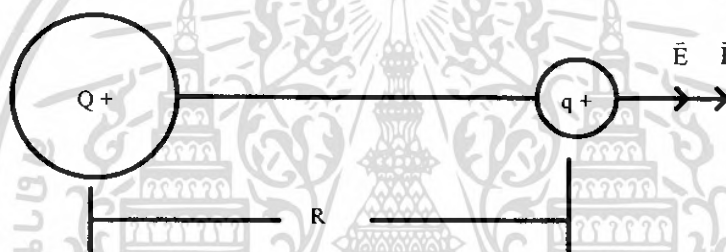
มีวัตถุขึ้นเล็กๆ 2 ชิ้นวางห่างกันค่าหนึ่งในสุญญากาศโดยมีระยะห่างมากกว่า ขนาดของวัตถุโดยที่วัตถุแต่ละชิ้นมีประจุห่อหุ้มอยู่เป็นขนาด  $Q_1$  และ  $Q_2$  พบว่าจะเกิดแรงกระทำประจุทั้งสองแรงกระทำค่านี แปรผันตรงกับผลคูณของประจุทั้งสองและแปรผกผันกับระยะห่างกำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4 \pi \epsilon_0 R^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ	F	คือ	แรงที่กระทำกันระหว่างประจุ, N
	$\epsilon$	คือ	permittivity
	$Q_1$	คือ	ประจุไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่ 1, C
	$Q_2$	คือ	ประจุไฟฟ้าที่ตำแหน่งที่ 2, C
	R	คือ	ระยะห่างของประจุทั้งสอง, m

จากการที่ประจุไฟฟ้า สามารถส่งแรงกระทำระหว่างกันได้ ดังนั้นเมื่อมีการนำประจุไฟฟ้าไปวาง ณ ตำแหน่งต่างๆ กัน จะพบว่ามีความแรงไฟฟ้ากระทำต่อประจุที่นำไปวางเสมอ ในกรณีนี้จะกล่าวว่ามีสนามไฟฟ้าที่บริเวณที่นำประจุไปวาง โดยประจุที่นำไปวางนั้นจะมีค่าบวกหนึ่งหน่วยโดยจะเรียกแรงที่กระทำต่อประจุว่า ความเข้มสนามไฟฟ้า (E)



รูปที่ 2.2 สนามไฟฟ้าที่ระยะ R จากประจุ  $Q^+$

ถ้าแรงที่กระทำต่อประจุทดสอบขนาด  $q^+$  มีขนาดของแรงกระทำเป็น F จะเขียนเป็นสมการของขนาดสนามไฟฟ้าได้เป็น

$$E = \frac{F}{q^+} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.1 เราก็จะได้ว่า

$$F = \frac{Q^+ q^+}{4 \pi \epsilon_0 R^2} \quad (2.3)$$

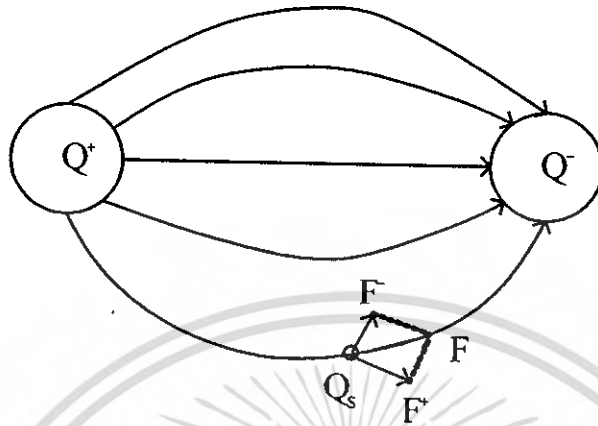
เมื่อเราแทนค่าจากสมการที่ 2.3 ลงไปในสมการที่ 2.2 จะได้ว่า

$$E = \frac{Q^+}{4 \pi \epsilon_0 R^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ	E	คือ	ความเข้มสนามไฟฟ้า, V/m
	$q^+$	คือ	ประจุทดสอบ +1 หน่วย, C
	Q	คือ	ประจุที่นำไปวาง, C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเราพิจารณาในสนามไฟฟ้าเนื่องจากมีประจุหลาย ๆ ประจุ ขนาดและทิศของสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่งนั้นก็คือ ผลรวมแบบเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุจุดแต่ละจุด ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ลักษณะของสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุหลายประจุ

จากรูปที่ 2.3 จะอธิบายได้ว่า  $Q_s$  คือ ประจุทดสอบบวกหนึ่งหน่วย  $Q^+$  คือประจุบวกนำไปวางไว้  $Q^-$  คือประจุลบที่นำไปวางไว้  $F^+$  คือแรงที่ประจุบวกกระทำกับประจุทดสอบเป็นแรงผลัก  $F^-$  คือแรงที่ประจุลบกระทำกับประจุทดสอบนี่จะเป็นแรงดูด ซึ่งจะได้แรงลัพธ์ คือ  $F$  โดยแรงลัพธ์ที่ได้เรียกว่าเส้นแรงสนามไฟฟ้า ซึ่งแรงที่กระทำต่อประจุทดสอบนี่จะเป็นค่าความเข้มสนามไฟฟ้านั่นเอง ซึ่งในด้านไฟฟ้าแรงสูงนั้นจะบอกเป็นแรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่อวัสดุฉนวนซึ่งสนามไฟฟ้านี้ จะทำให้เกิดความเครียดต่อวัสดุฉนวน เพราะมีแรงไปกระทำอยู่ถ้าจุดใดที่มีค่าสนามไฟฟ้ามากกว่าค่าความคงทนของฉนวน ฉนวนนั้นก็เสียสภาพการเป็นฉนวนไป จึงทำให้เราสามารถสรุปเป็นนิยามของสนามไฟฟ้าได้ว่า

สนามไฟฟ้า คือ พื้นที่ที่สะสมพลังงานสนามไฟฟ้า ผลลัพธ์ของสนามไฟฟ้าคือ แรงทางไฟฟ้าที่กระทำต่อฉนวน ค่าของพลังงานไฟฟ้าได้คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า

## 2.2 กฎของ Faraday [1]

กล่าวไว้ว่าจำนวนเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าที่พุ่งออกมาจะเท่ากับจำนวนประจุ

$$\Psi = Q \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\Psi$  คือ ฟลักซ์ไฟฟ้า

แต่ละพื้นที่จะมีเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าไม่เท่ากัน คือจะมีความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าไม่เท่ากันนั่นเอง ซึ่งความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าหาได้จากจำนวนเส้นฟลักซ์ไฟฟ้าหารด้วยพื้นที่ผิว ความหนาแน่นเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า (Electric flux density)

$$D = \frac{Q}{A} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $D$  คือ ความหนาแน่นเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า  
 $A$  คือ พื้นที่ผิว,  $m^2$

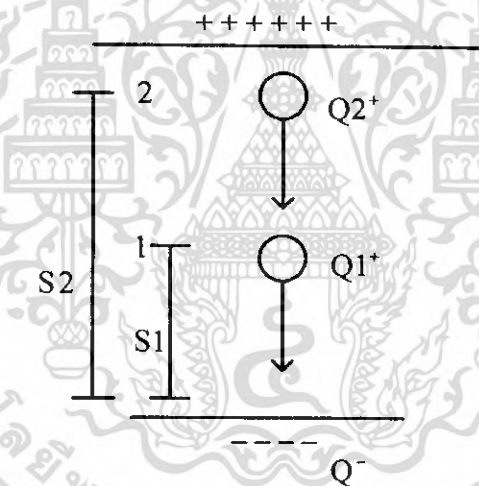
ถ้าพิจารณาที่ทรงกลมจะได้ว่า

$$D = \frac{Q}{4\pi R^2} \quad (2.7)$$

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ 2.4 แล้วจะได้ว่า

$$D = \epsilon_0 \cdot E \quad (2.8)$$

แรงดันไฟฟ้า คือ ความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุด ศักย์ไฟฟ้า (Electrical potential) ( $\phi$ )  
 ถ้าเราพิจารณาประจุในแนวสนามไฟฟ้าจะได้ว่า



รูปที่ 2.4 แสดงประจุไฟฟ้าที่ 2 ตำแหน่ง

งานในการเคลื่อนประจุคือ

$$W = \int F \cdot ds \quad (2.9)$$

เมื่อ  $W$  คือ งานในการเคลื่อนประจุ, Nm  
 $F$  คือ แรงในการเคลื่อนประจุ, N  
 $ds$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่, m

ประจุล่อยอยู่จะสะสมพลังงานศักย์ไว้ ตรงนี้จะเกิดศักย์ไฟฟ้าขึ้น ซึ่งจะได้ว่าพลังงานศักย์ไฟฟ้าคือ

$$W = \phi \cdot Q \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\phi$  คือ ศักย์ไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.4 เราพิจารณาได้ว่า งานในการเคลื่อนประจุที่ตำแหน่งที่ 1 คือ

$$W_1 = \int_0^1 F \cdot ds \tag{2.11}$$

งานในการเคลื่อนประจุที่ตำแหน่งที่ 2 คือ

$$W_2 = \int_0^2 F \cdot ds \tag{2.12}$$

งานในการเคลื่อนประจุจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งคือ

$$W_1 - W_2 = \int_1^2 F \cdot ds \tag{2.13}$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.10 และ 2.13 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q \cdot (\phi_1 - \phi_2) &= \int_1^2 Q \cdot E \cdot ds \\ \phi_1 - \phi_2 &= E \cdot (s_2 - s_1) \\ U_{12} &= E \cdot \Delta s \end{aligned} \tag{2.14}$$

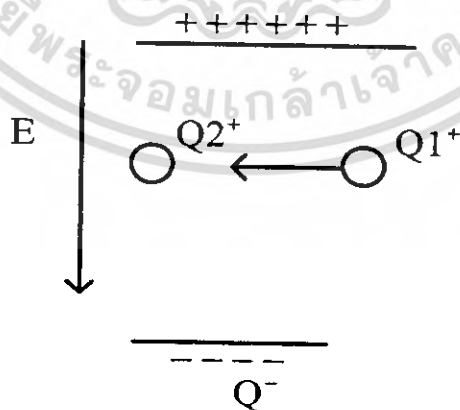
เมื่อ  $s_1$  คือ ระยะห่างระหว่างประจุที่ 1 กับพื้นผิว

$s_2$  คือ ระยะห่างระหว่างประจุที่ 2 กับพื้นผิว

$\Delta s$  คือ ผลต่างระหว่างระยะทั้งสอง

$U_{12}$  คือ ความต่างศักย์ระหว่างจุด 2 จุด เรียกว่าแรงดัน

ถ้าพิจารณาพลังงานศักย์ในแนวตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า โดยเคลื่อนประจุในแนวตั้งฉากดังที่ รูป 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงการเคลื่อนที่ประจุไฟฟ้าแนวตั้งฉาก

$$W_1 - W_2 = \int_1^2 F \cdot ds$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

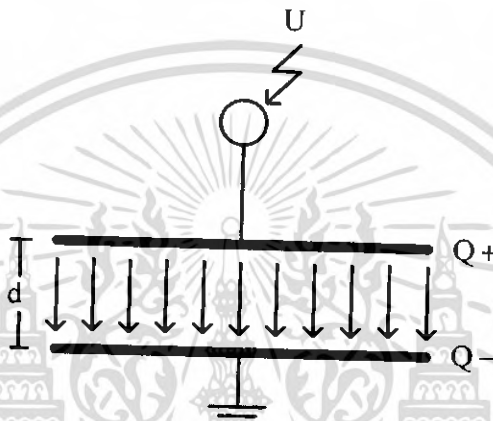
เนื่องจาก  $\oint_C \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$  ในแนวตั้งฉากแล้วได้  $= 0$  ก็จะได้ว่า

$$Q \cdot (\Phi_1 - \Phi_2) = 0$$

$$\Phi_1 = \Phi_2$$

แสดงให้เห็นว่าศักย์ไฟฟ้า 2 จุดเท่ากันในแนวตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ซึ่งเราเรียกเส้นแนวนี้ว่า Equip potential line จะเห็นได้ว่าที่แผ่นอิเล็กโทรดที่มีความต่างศักย์ที่แผ่นเท่ากันหมดนั้น สนามไฟฟ้าจะตั้งฉากกับผิวเสมอไม่ว่าจะเป็นแนวโค้งหรือแนวราบ

ถ้าพิจารณาที่แผ่นระนาบคู่ขนานจากที่พิสูจน์มาจะได้ว่า



รูปที่ 2.6 สนามไฟฟ้าในแผ่นระนาบคู่ขนาน

จากรูปที่ 2.6 เทียบจากสมการที่ 2.14 จะได้ว่า

$$U_{12} = E \cdot d \tag{2.15}$$

เมื่อ  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นระนาบ (เมตร)

### 2.3 สนาม ไฟฟ้า (Electric field) [2]

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพลังงานไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง และเมื่อมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายอยู่โดยรอบในอากาศส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นปริมาณของสนามไฟฟ้าที่กระจายออกมานั้น จะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงและระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สำหรับปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมานั้น เราสามารถหาได้จากการคำนวณและจากการวัด

การเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าสามารถสรุปได้จากกฎของคูลอมป์ (Coulomb's law) ว่าเมื่อมีวัตถุชิ้นเล็กๆ สองชิ้นวางห่างกันค่าหนึ่งในสุญญากาศโดยมีระยะห่างมากกว่าขนาดของวัตถุ โดยที่วัตถุแต่ละชิ้นมีประจุห่อหุ้มอยู่เป็นขนาด  $q_1$  และ  $q_2$  พบว่าจะเกิดแรงกระทำขึ้นระหว่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุทั้งสอง โดยแรงที่กระทำนี้จะแปรผันกับผลคูณของประจุทั้งสอง และผกผันกับระยะห่างกำลังสองของประจุทั้งสอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.16

$$F = \frac{q_1 q_2}{4 \pi \epsilon r^2} \quad (2.16)$$

เมื่อ	F	คือ	แรงที่กระทำต่อประจุทั้งสอง หน่วยนิวตัน (N)
	$q_1$	คือ	ประจุตำแหน่งที่หนึ่ง หน่วยคูลอมบ์ (C)
	$q_2$	คือ	ประจุตำแหน่งที่สอง หน่วยคูลอมบ์ (C)
	$\epsilon$	คือ	ค่าเปอร์มิตติวิตี
	r	คือ	ระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง หน่วยเมตร (m)

จากการที่ประจุทั้งสองสามารถส่งแรงกระทำระหว่างกันได้ ดังนั้นเมื่อนำประจุไฟฟ้าไปวาง ณ ตำแหน่งต่างๆ กันจะพบว่าจะมีแรงไฟฟ้ากระทำต่อประจุที่นำไปวางเสมอและเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณที่นำประจุไปวาง โดยประจุที่นำไปวางนั้นจะมีค่าเป็นบวกหนึ่งหน่วย โดยเรียกแรงที่กระทำต่อประจุว่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) มีหน่วยเป็น V/m ดังสมการที่ 2.17

$$E = \frac{q}{4 \pi \epsilon r^2} \quad (2.17)$$

เมื่อ	E	คือ	ความเข้มสนามไฟฟ้า หน่วยโวลต์ต่อเมตร (V/m)
	q	คือ	ประจุทดสอบที่นำไปวาง หน่วยคูลอมบ์ (C)
	$\epsilon$	คือ	ค่าเปอร์มิตติวิตี
	r	คือ	ระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง หน่วยเมตร (m)

ชนิดของสนามไฟฟ้าแยกตามการกระจายของความเข้มสนามไฟฟ้าได้เป็น 2 แบบ

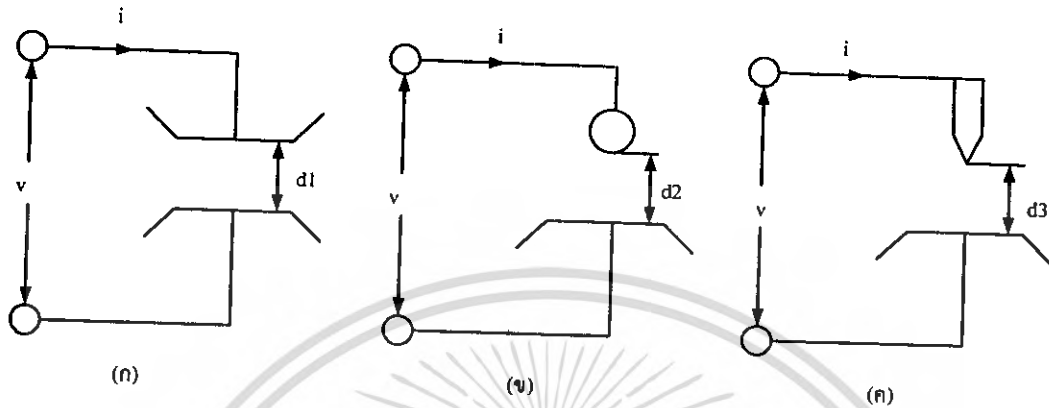
1. สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ คือ ทุกจุดจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าเท่ากันและมีทิศทางเดียวกัน เช่น สนามไฟฟ้าที่เกิดจากแผ่นระนาบคู่ขนาน
2. สนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ คือ แต่ละจุดจะมีความเข้มสนามไฟฟ้าไม่เท่ากัน เช่น สนามไฟฟ้าที่เกิดจากปลายแหลม สนามไฟฟ้าที่เกิดจากทรงกลม

#### 2.4 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (Dielectric strength) [2]

ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึงค่าความเครียดฉนวนไฟฟ้า (Electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหายหรือเกิดการเบรกดาวน์หรือทำให้การเป็นฉนวนเสื่อมสภาพ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาของฉนวน หรือระยะห่างของอิเล็กโทรดเป็นโวลต์ต่อเซนติเมตร (V/cm) หรือกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (kV/cm) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของฉนวนไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) คือเป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(plate-to-plate) ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า  $E_b$  (สนามไฟฟ้าวิกฤต) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ เช่น รูปลักษณะเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ลักษณะคุณสมบัติ ไดอิเล็กตริก (dielectric) เวลาเป็นต้น



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิดสนามไฟฟ้า

- (ก) สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (Uniform field)
- (ข) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอเล็กน้อย (Slightly nonuniform field)
- (ค) สนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอสูง (Highly nonuniform field)

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดลักษณะต่างๆ ที่วางอยู่ในอากาศดังรูปที่ 2.7 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนจะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ  $d_1$ ,  $d_2$  และ  $d_3$  ให้เท่ากันก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน สามารถวัดได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ไม่ใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ มักจะกำหนดโดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด  $E_{max}$  ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่ง ระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่มีการเบรกดาวนเริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอีกหลายประการ

**2.4.1 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ** หมายถึงอิเล็กโทรดที่มีค่าสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่วงระหว่างอิเล็กโทรดสม่ำเสมอเท่ากันตลอด เช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.7 (ก) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E_{av} = \frac{v}{d} \quad (2.18)$$

- เมื่อ  $v$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด หน่วย โวลต์หรือกิโลโวลต์  
 $d$  คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด หน่วย เซนติเมตร  
 $E_{av}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรด หน่วยโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อเซนติเมตร หรือกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร

$E_{max}$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรกดาวนทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งเท่ากันทุกจุดถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะ จะเกิดการเบรกดาวนนี้ ก็คือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

$$E_b = \frac{V_b}{d} \quad (2.19)$$

เมื่อ  $V_b$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนด้านไฟฟ้าสม่ำเสมอ

$E_b$  คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนหรือคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

**2.4.2 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ** อิเล็กโทรดแบบนี้ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดจะมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นๆ ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อย ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงเรขาคณิตของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อยเช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.7 (ข) ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลมสามารถคำนวณได้จาก

$$E_{max} = E_{av} = \frac{V}{d \cdot \eta^*} \quad (2.20)$$

เมื่อ  $\eta^*$  คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีค่า  $\leq 1$

แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า คือ ดัชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้นมีลักษณะของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด

## 2.5 สนามไฟฟ้าในวัสดุฉนวนต่างชนิดซ้อนกันหรือผสมกัน

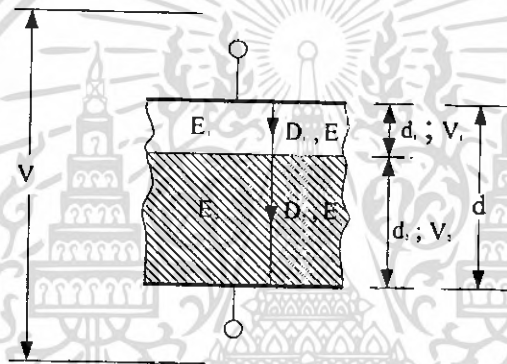
(Fields in Multidielectric Isotropic Materials)

การฉนวนทางไฟฟ้าแรงสูงในอุปกรณ์หลายชนิด เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าจะมีการใช้วัสดุฉนวนหลายชนิดประกอบกัน ซึ่งฉนวนต่างๆ ที่ใช้จะมีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกันไป การที่ต้องใช้วัสดุฉนวนต่างชนิด สาเหตุสำคัญคือ คุณสมบัติทางกลศาสตร์ เพราะฉนวนก๊าซและของเหลว จะไม่สามารถจับยึดหรือแยกตัวนำออกจากกันได้ อีกสาเหตุหนึ่งก็คือการที่ต้องการจะควบคุมค่าความเครียดสนามไฟฟ้าโดยอาศัยการจัดวางชั้นฉนวนต่างๆ ในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงปรากฏการณ์ และคุณสมบัติต่างๆ ของการฉนวนลักษณะนี้ โดยจะยกตัวอย่างเฉพาะที่สำคัญๆ เท่านั้น ส่วนการที่จะวิเคราะห์ให้ละเอียดถูกต้องจริงนั้นจะต้องใช้กรรมวิธีเชิงตัวเลขคำนวณหรือทำการทดลองเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าความคงทนต่อการเบรกดาว์ของฉนวนจะลดลงที่รอยต่อของฉนวน ดังนั้น รอยต่อของฉนวนจึงควรจัดวางในแนวตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า พิจารณาตัวเก็บประจุแบบแผ่นขนานประกอบด้วยวัสดุฉนวน 2 ชั้น ค่าเปอร์มิตติวิตีเป็น  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  ดังแสดงในรูปที่ 2.8 สมมติวัสดุที่ใช้เป็นฉนวนอย่างแท้จริง (ไม่มีกระแสรั่วไหลผ่าน) และแรงดันที่จ่ายเป็นกระแสกลับ จะถือได้ว่าค่าความนำไฟฟ้าของฉนวนน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้ และจะไม่เกิดประจุไฟฟ้าขึ้นที่รอยต่อระหว่างชั้นของฉนวน ดังนั้นค่าความหนาแน่นของศักย์ไฟฟ้า (displacement)  $D_1$  และ  $D_2$  จะเท่ากัน โดยเกิดจากประจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นระนาบเท่านั้นจาก  $D = \epsilon E$  จะได้ว่าค่าอัตราส่วนของความเครียดสนามไฟฟ้าจะเป็น

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.8 ฉนวน 2 ชนิดซ้อนกันภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

และเมื่อสนามไฟฟ้าในแต่ละชั้นฉนวนมีความสม่ำเสมอ ค่าความต่างศักย์  $V$  ระหว่างระนาบทั้งสองจะเป็น

$$V = E_1 d_1 + E_2 d_2 \quad (2.22)$$

เมื่อ  $d_1, d_2$  เป็นความหนาของวัสดุฉนวนแต่ละชั้น

จากสมการ(2.21)และ (2.22) เราสามารถหาค่า  $E_1$  และ  $E_2$  ได้เมื่อทราบค่าความต่างศักย์  $V$  ระหว่างระนาบทั้งสองดังนี้ คือ

$$E_1 = \frac{V}{\epsilon_1 \left( \frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{V}{d} \cdot \frac{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}{\frac{d_1}{d} \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \\
 &= \frac{V}{d_1 + d_2 \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)} \quad (2.23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_2 &= \frac{V}{\epsilon_2 \left( \frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} \right)} \\
 &= \frac{V}{d} \cdot \frac{1}{\frac{d_1}{d} \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 1 \right) + 1} \\
 &= \frac{V}{\left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right) d_1 + d_2} \quad (2.24)
 \end{aligned}$$

จากสมการ (2.23) และ (2.24) เราสามารถพิจารณาคุณสมบัติของระบบการฉนวนแบบเป็นชั้น (Multidielectric insulation) หรือ อาจเรียกว่าแบบ Sanwiche ได้ในกรณีต่างๆดังนี้

## 2.6 การฉนวนชั้นกันด้วยฉนวนก๊าซ และฉนวนของแข็ง

สมมติระบบฉนวนดังรูปที่ 2.8 มีฉนวนในชั้นบนเป็นก๊าซ ( $\epsilon_1 \approx 1$ ) และฉนวนชั้นล่างเป็นของแข็ง ซึ่งโดยปกติจะมีค่าเปอร์มิตติวิตีมากกว่า 2 ในที่นี้สมมติ  $\epsilon_1 = 1$  และ  $\epsilon_2 = 4$  จากสมการ (2.23) ,(2.24) และจาก

$$E_2 = \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right) E_1 \quad (\text{ในที่นี้ } E_2 = \frac{1}{4} E_1)$$

สามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของสนามไฟฟ้าในชั้นฉนวนทั้งสองกับความหนาของฉนวนก๊าซ ( $d_1$ ) ที่เพิ่มขึ้นได้ดังรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า ถ้าความหนาของวัสดุฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำกว่าเพิ่มขึ้น ( $d_1$  เพิ่ม) ซึ่งในที่นี้เป็นก๊าซ (ความหนาของฉนวนของแข็งจะลดลง) จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_1$  และ  $E_2$  ลดลง และถ้าความหนาของชั้นที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีสูงกว่าเพิ่มขึ้น ( $d_1$  ลด) จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_1$  และ  $E_2$  เพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้งานระบบฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกันมากๆ จะต้องระมัดระวังเป็นพิเศษ เพราะความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดในชั้นฉนวนอาจสูงชันได้มาก ซึ่งจะเป็นอันตราย(เกิดการเบรคดาวน์) ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาขนาดของแรงแบบบาง ๆ คั่นอยู่ในฉนวนก๊าซจะได้ว่า  $d_1 \approx d$  และ  $d_2 \rightarrow 0$  ดังนั้นจะได้ว่า

$$E_1 = \frac{V_1}{d_1} \approx \frac{V}{d}$$

และ

$$E_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} E_1 = \frac{E_1}{4}$$

จะเห็นได้ว่าการใช้ฉนวนแข็งคั่นในฉนวน ก๊าซจะไม่ช่วยเพิ่มค่าความคงทนต่อการเกิดเบรกดาวน์ของระบบฉนวนขึ้นเลย เพราะความคงทนของฉนวนจะถูกกำหนดด้วยก๊าซเท่านั้น

เมื่อพิจารณาขนาดของแข็งที่มีชั้นบางหรือฟองเล็ก ๆ ของก๊าซแทรกอยู่ อาจเกิดจากหน้าสัมผัสระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกับฉนวนของแข็งแนบกันไม่สนิทในกรณีนี้จะได้  $d_1 \rightarrow 0$

จะเห็นว่า  $E_1$  มีค่าสูงถึง 4 เท่าของ  $E_2$  ซึ่งความเครียดสนามไฟฟ้า  $E_1$  ที่เกิดในชั้นอากาศบาง ๆ นี้ อาจทำให้เกิดการดีสชาร์จในชั้นอากาศได้ หรือเรียกว่า การดีสชาร์จบางส่วน (partial discharge) ดังนั้นการใช้ฉนวนของแข็งจะต้องระมัดระวังอย่างมากในเรื่องของการมีฟองก๊าซ หรือชั้นอากาศ ในเนื้อฉนวนและบริเวณรอยต่อ

**ตัวอย่าง 2.6 - 1** อิเล็กโทรดแผ่นระนาบวางขนานกันโดยมีระยะห่าง 2 Cm และป้อนแรงดันคร่อมระหว่างขั้วอิเล็กโทรดด้วยแรงดันกระแสสลับ 35 kV ความถี่ 50 Hz ถ้าฉนวนระหว่างแผ่นระนาบเป็นอากาศ จงหาความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดระนาบทั้งสองกำหนดค่าความคงทนต่อสภาพไฟฟ้าของอากาศเป็น  $E_b = 24.22 + 6.08\sqrt{d}$  kV/cm และถ้าใช้แผ่นไมก้าหนา 0.5 Cm คั่นเข้าไประหว่างขั้วอิเล็กโทรด (โดยวางชิดกับแผ่นอิเล็กโทรดด้านหนึ่ง) ค่าความคงทนของฉนวนในระบบจะดีขึ้นหรือไม่ กำหนด  $\epsilon_r$  ของไมก้า = 4

**วิธีทำ** สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดแผ่นระนาบเป็นสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ ดังนั้น

$$\begin{aligned} E &= \frac{V}{d} \\ &= \frac{35\sqrt{2}}{2} = 24.75 \text{ kV/cm} \end{aligned}$$

และค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของอากาศเป็น

$$E_b = 24.22 + \frac{6.08}{\sqrt{2}} = 28.52 \text{ kV/cm}$$

$$E_b > E \quad ; \text{ ฉนวนอากาศนี้จะไม่เกิดเบรกดาวน์}$$

เมื่อคั่นแผ่นไมก้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d_1 = d_{\text{Air}} = 2 - 0.5 = 1.5 \text{ Cm}$$

$$d_2 = d_{\text{Micra}} = 0.5 \text{ Cm}$$

และ  $\epsilon_r = \epsilon_{r \text{ Air}} = 1$

$$= \epsilon_{r \text{ Micra}} = 4$$

∴ สนามไฟฟ้าที่คร่อมอากาศจะเป็น

$$E_1 = \frac{V}{d_1 + c_2 \left( \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \right)}$$

$$= \frac{35\sqrt{2}}{1.5 + 0.5 \left( \frac{1}{4} \right)} = 30.46 \text{ kV/cm}$$

แต่ค่าความคงทนของอากาศเป็น

$$E_b = 24.22 + \frac{6.08}{\sqrt{1.5}} = 20.18 \text{ kV/cm}$$

$$E_b < E_1 ; \text{ จะเกิดการเบรกดาวนในส่วนของอากาศ}$$

เมื่ออากาศเบรกดาวนจะทำให้แรงดันที่จ่ายคร่อมอยู่ที่แผ่นไมก้าทั้งหมดเป็น

$$E_2 = \frac{35\sqrt{2}}{0.5} = 98.99 \text{ kV/cm}$$

จะเห็นได้ว่าการใช้แผ่นไมก้าบางคั้นในฉนวนอากาศจะไม่ช่วยให้ระบบฉนวนดีขึ้น แต่ยังทำให้เกิดเบรกดาวนได้ง่ายขึ้นอีกด้วย และถ้าไม่ต้องการให้เกิดเบรกดาวนแผ่นไมก้านี้จะต้องทนความเครียดสนามไฟฟ้าได้น้อย 98.99 kV/cm (ปกติไมก้ามีค่าความคงทน 170 kV/cm )

### 2.6.1 การฉนวนโดยใช้ฉนวนแทรกผสมกัน

นอกจากการพิจารณาระบบการฉนวนแบบซ้อนกัน (ในลักษณะแซนวิช) ดังในรูปที่ 2.8 แล้วสมการ (2.23) และ (2.24) ยังสามารถใช้การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในฉนวนซ้อนกันที่เป็นลักษณะแทรกผสมกัน โดยเฉพาะการฉนวนที่ใช้วัสดุผสมกันระหว่างของแข็งกับของเหลวจะใช้มากในทางไฟฟ้าแรงสูง โดยของแข็งจะใช้ในการยึดจับตัวนำให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ และฉนวนของเหลวจะช่วยระบายความร้อนไปด้วย ตัวอย่างของการฉนวนลักษณะนี้คือ กระดาษชุบน้ำมัน หรือเรซินในหม้อแปลงไฟฟ้าและเคเบิลแรงสูง ในการวิเคราะห์ก็จะถือว่า ค่าความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (D) ในฉนวนทั้งสองชนิดเท่ากัน และเท่ากับของทั้งระบบค่าเปอร์มิตติวิตีของระบบโดยรวม (resultant permittivity)  $\epsilon_{res}$  หาได้จาก

$$D = \epsilon_{res} E \quad (2.25)$$

โดย D และ E เป็นค่าความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า และค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ยของทั้งระบบ และจะได้ว่า

$$D = \epsilon_{res} E = \epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2$$

จากสมการ (2.23) และ (2.24) แทนค่า  $E_1$  และ  $E_2$

$$\epsilon_{res} E = \frac{1}{\frac{(d1/d)}{\epsilon_1} + \frac{(d2/d)}{\epsilon_2}} \cdot \frac{V}{d}$$

ค่า  $\frac{V}{d}$  คือค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ยของทั้งระบบ หรือเท่ากับ E ดังนั้น

$$\epsilon_{res} = \frac{1}{\frac{(d1/d)}{\epsilon_1} + \frac{(d2/d)}{\epsilon_2}} \quad (2.26)$$

ค่าสัดส่วนความหนาแน่นของฉนวน  $(d1/d)$  และ  $(d2/d)$  สามารถแทนได้ด้วยค่าปริมาตรสัมพัทธ์  $V_1$  และ  $V_2$  ตามลำดับ ดังนั้นจะได้  $V_n$

$$\epsilon_{res} = \frac{1}{\frac{V_1}{\epsilon_1} + \frac{V_2}{\epsilon_2}} \quad (2.27)$$

สำหรับระบบฉนวนที่ประกอบด้วยวัสดุ n ชนิดแทรกผสมกันอยู่จะได้

$$\epsilon_{res} = \frac{1}{\frac{V_1}{\epsilon_1} + \frac{V_2}{\epsilon_2} + \dots + \frac{V_n}{\epsilon_n}}$$

โดย  $\sum_{i=1}^n v_i = 1$  หรือ 100 %

72646

**ตัวอย่าง 2.6 - 2** ในการฉนวนอุปกรณ์ไฟฟ้าแรงสูงชนิดหนึ่ง ใช้การฉนวนด้วยกระดาษชุบน้ำมัน (Oil-impregnated kraft paper) โดยในระบบการฉนวนประกอบด้วยเซลลูโลส (กระดาษ) 75 % โดยปริมาตร ส่วนที่เหลือเป็นน้ำมันฉนวน (Mineral oil) จงหาค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของระบบฉนวนนี้ กำหนด  $\epsilon$  ของเซลลูโลส =  $6 \epsilon_0$ ,  $\epsilon$  น้ำมัน =  $2.2 \epsilon_0$

วิธีทำ จากโจทย์จะได้ว่า

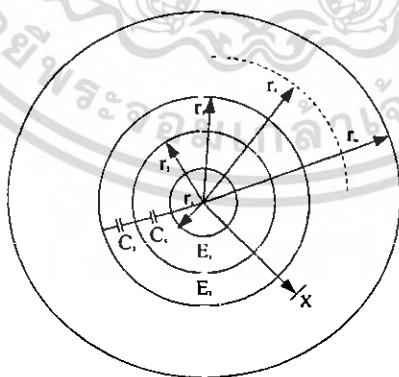
$$\epsilon_{r1} = 6 \quad ; \quad V_1 = 0.75$$

$$\epsilon_{r2} = 2.2 \quad ; \quad V_2 = 0.25$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{res} &= \frac{1}{\frac{V_1}{\epsilon_1} + \frac{V_2}{\epsilon_2}} \\ &= \frac{1}{\frac{0.75}{6 \epsilon_0} + \frac{0.25}{2.2 \epsilon_0}} = 4.19 \epsilon_0 \end{aligned}$$

### 2.6.2 การฉนวนซ้อนกันเป็นชั้นในทรงกระบอกแกนร่วม

การใช้ฉนวนซ้อนกันเป็นชั้น ๆ สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการฉนวนสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ (nonuniform field) ได้ โดยจะช่วยให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในวัสดุฉนวนแต่ละชนิดมีค่าใกล้เคียงกันขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าช่วยให้สนามไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอขึ้น การใช้ฉนวนลักษณะนี้จะใช้ในสายเคเบิลแรงดันกระแสสลับ ซึ่งจะฉนวนเป็นชั้น ๆ ในลักษณะเป็นทรงกระบอกแกนร่วม ดังแสดงในรูปที่ 2.9



**รูปที่ 2.9** หน้าตัดของสายเคเบิล Coaxial ที่มีการฉนวนซ้อนเป็นชั้นด้วยฉนวนที่มีค่าค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาตร ต่างๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 2.10 สมมติสายเคเบิลมีการฉนวน 2 ชั้นก่อนโดยใช้วัสดุฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีเป็น  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  แกนกลางเป็นตัวนำรูปทรงกระบอก ด้านนอกเป็นทรงกระบอกโลหะหุ้มและต่อลงดินที่วัสดุฉนวนจะเสมือนกับมีค่าความเก็บประจุเป็น  $C_1$  และ  $C_2$  ต่ออนุกรมกัน ดังนั้นจากสมการ (2.28) จะสามารถหาค่าความเก็บประจุได้เป็น

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.28)$$

ดังนั้นค่าความเก็บประจุต่อหน่วยความยาว ( $C'_1$  และ  $C'_2$ ) จะเป็น

$$C'_1 = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$C'_2 = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln \frac{r_3}{r_2}}$$

ค่าความเก็บประจรรวมต่อหน่วยความยาว จากแกนกลางถึง  $r_2$  จะเป็น

$$C' = \frac{C'_1 \cdot C'_2}{C'_1 + C'_2}$$

$$= \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_1} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

ประจุหนึ่งหน่วยความยาวของเคเบิล ( $Q'$ ) จะเป็น

$$\begin{aligned} Q' &= C'V \\ &= \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2 \cdot V}{\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \end{aligned} \quad (2.29)$$

พิจารณาที่ระยะทาง  $x < r_2$  ใดๆ จากแกนกลาง จะมีแรงดันเป็น

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{C'}{C_x} \cdot V \\ &= \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_2 \cdot V}{C_x (\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1})} \end{aligned} \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง  $X$  จะเป็น

$$\begin{aligned}
 E_x &= \frac{Q'}{2\pi\epsilon_x x} & (Q' = Q/l) \\
 &= \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \cdot V}{X \epsilon_x (\epsilon_1 \ln \frac{r_3}{r_2} + \epsilon_2 \ln \frac{r_2}{r_1})} \\
 &= \frac{V}{X \epsilon_x (\frac{1}{\epsilon_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\epsilon_1} \ln \frac{r_2}{r_1})} & (2.31)
 \end{aligned}$$

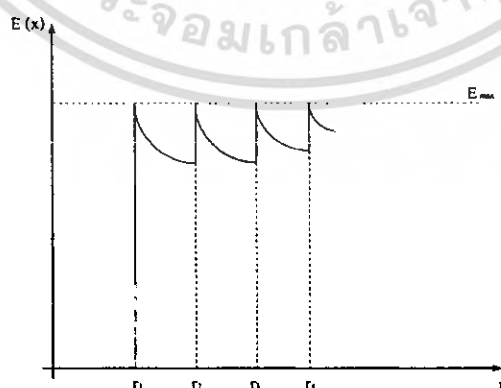
ในกรณีที่ฉนวนมี  $m$  ชั้น ดังรูปจะได้ว่า

$$E_x = \frac{V}{X \epsilon_x \sum_{n=1}^m \frac{1}{\epsilon_n} \ln \left( \frac{r_{n+1}}{r_n} \right)} \quad (2.32)$$

โดย  $V$  เป็นแรงดัน (a.c) ที่คร่อมทั้งหมด และ  $\epsilon_x$  เป็นค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนในชั้นของฉนวนที่ระยะทาง  $X$  จากแกนกลาง

จากสมการ (2.32) จะเห็นได้ว่าการฉนวนแบบทรงกระบอกซ้อนกัน ค่าสนามไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนกลับกับระยะห่างจากแกนกลาง แต่ที่จุดบริเวณรอยต่อของฉนวน ( $r_n$ ) จะมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน (ที่  $X \leq r_n$  และ  $X \geq r_n$  ค่า  $E$  จะต่างกันดังสมการ (2.32) และความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของฉนวนแต่ละชั้นจะเกิดที่แนวรัศมีที่น้อยที่สุดของแต่ละชั้น ( $X = r_n$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ถ้าต้องการให้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดในแต่ละชั้นมีค่าเท่ากัน จะสามารถทำได้โดยออกแบบให้วัสดุฉนวนมีค่า  $\epsilon_x r_n$  คงที่ ดังสมการ

$$\epsilon_1 r_1 = \epsilon_2 r_2 = \dots = \epsilon_n r_n = \text{ค่าคงที่} \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงสนามไฟฟ้ากระจายในสายเคเบิล Coaxial โดยออกแบบ

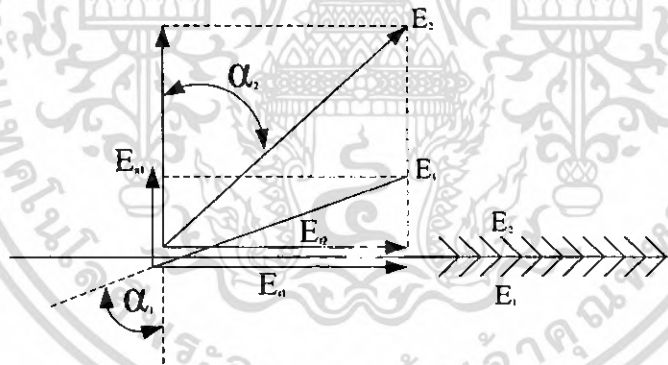
ตามสมการ (2.38)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งที่กล่าวไปแล้วว่าที่ค่า  $\epsilon_n$   $r_n$  เดียวกัน ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) ในแต่ละชั้นจะเท่ากัน จะเห็นได้ว่าการฉนวนแบบทรงกระบอกซ้อนควรจะให้วัสดุฉนวนที่หุ้มรอบนอกมีค่าเปอร์มิตติวิตีลดลงเรื่อยๆ เพื่อออกแบบให้  $\epsilon_n$   $r_n$  มีค่าคงที่ ตัวอย่างเช่น สายเคเบิลแรงสูงใช้น้ำมัน และกระดาษเซลลูโลสอัดแน่นเป็นฉนวนจึงควรใช้กระดาษเซลลูโลสเป็นฉนวนชั้นในและน้ำมันฉนวนหล่ออยู่ภายนอก

## 2.7 การหักเหของสนามไฟฟ้าในฉนวน ( Dielectric Refraction)

ในกรณีที่สนามไฟฟ้าพุ่งผ่านไปที่มีรอยต่อของฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี ( $\epsilon$ ) ต่างกัน ด้วยมุมที่ไม่เท่ากับ  $90^\circ$  ทิศทางของสนามไฟฟ้า หรือทิศทางของเวกเตอร์ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า (ค่า displacement) จะเปลี่ยนไปเมื่อผ่านไปถึงฉนวนชนิดที่ 2 โดยทั่วไปจะถือว่าไม่มีประจุอิสระ (free charges) ที่บริเวณรอยต่อ และมีเพียงประจุจากการเกิดโพลลาไรเซชัน (Polarization : การจัดเรียงทิศทางของประจุในอะตอมหรือโมเลกุลเมื่อถูกเหนี่ยวนำ) เนื่องจากสนามไฟฟ้าพุ่งผ่านรอยต่อเท่านั้น รูปที่ 2.11 แสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าที่พุ่งผ่านระหว่างฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี เป็น  $\epsilon_1$  และ  $\epsilon_2$  โดย  $\epsilon_1 > \epsilon_2$  โดยสนามไฟฟ้า  $E_1$  จะหักเหทิศทางไปเป็นแนว  $E_2$  แต่ยังมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าในแนวขนานรอยต่อเท่าเดิม ( $E_{t1} = E_{t2}$ ) และค่าความหนาแน่นฟลักซ์ หรือค่า Displacement ในแนวขนานกับเส้นปกติเท่าเดิม ( $D_{n1} = D_{n2}$ )



รูปที่ 2.11 รูปแสดงทิศทางของสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปเมื่อพุ่งผ่านรอยต่อที่มี  $\epsilon_1 > \epsilon_2$

จากเงื่อนไขที่กล่าวไปแล้วสามารถพิจารณาได้ดังนี้

$$D_{n1} = D_{n2} \quad , \quad E_{t1} = E_{t2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} &= \frac{D_{n2}/\epsilon_2}{D_{n1}/\epsilon_1} \\ &= \frac{E_{n2}}{E_{n1}} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ  $\epsilon_2(\epsilon_1 E_{t1}) = \epsilon_1(\epsilon_2 E_{t2})$

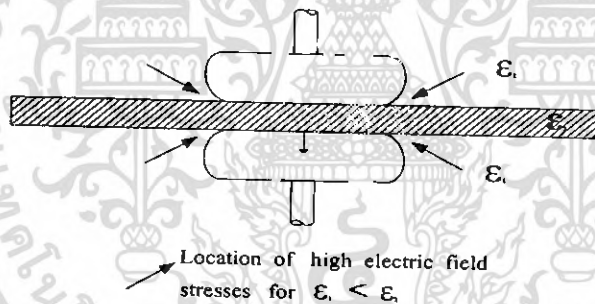
$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{D_{t1}}{D_{t2}}$$

และ  $\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} = \frac{E_{t1}/E_{n1}}{E_{t2}/E_{n2}} = \frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2}$

∴ สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{\tan \alpha_1}{\tan \alpha_2} = \frac{E_{n2}}{E_{n1}} = \frac{D_{t1}}{D_{t2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (2.34)$$

ในทางปฏิบัติจริง เมื่อแรงดันที่จ่ายคร่อมเป็นแรงดันกระแสตรง จะมีประจุอิสระสะสมขึ้นที่ผิวสัมผัส ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของค่าความนำ (Conductivity) ของวัตถุ (หรือเรียกว่าเกิด Polarization ระหว่างผิวสัมผัส) ส่วนแรงดันกระแสสลับจะสามารถใช้สมการ (2.34) ในการวิเคราะห์ได้



รูปที่ 2.12 การทดสอบค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ของแผ่นฉนวนของแข็ง ( $\epsilon_2$ ) สัญลักษณ์ลูกศรในรูปแสดงบริเวณที่มีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูง (เมื่อ  $\epsilon_2 > \epsilon_1$ )

ตัวอย่างของปรากฏการณ์นี้ก็คือ เมื่อมีการใช้งานฉนวนของแข็ง (ซึ่งค่าเปอร์มิตติวิตีสูงกว่าอากาศ จะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อของอากาศกับฉนวนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.14) เมื่อทำการทดสอบฉนวนของแข็งโดยใช้โอเล็กโทรดรูปจานกลมของโค้ง (Rogowski's profile) โดยต้องการจะทดสอบฉนวนภายใต้สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (uniform field) ถ้าการทดสอบนี้กระทำในบรรยากาศปกติ อากาศซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_1 \approx \epsilon_0$  ซึ่งน้อยกว่าค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวนของแข็ง  $\epsilon_2$  มากจะทำให้เกิดความเครียดสนามไฟฟ้าที่ของรอยต่อมีค่าสูงมาก (แสดงด้วยรูปลูกศร) ค่าแรงดันเบรกดาวนีย์ที่วัดได้จะต่ำกว่าที่เป็นจริง เพราะจะเกิดการดีสชาร์จ

ขึ้นที่บริเวณดังกล่าวก่อน และจะเป็นการดีสซาร์จไปจนเกิดเบรกดาวน์ขึ้น ซึ่งเป็นการเกิดเบรกดาวน์ภายนอกสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (นอกขอบโค้ง)

เพื่อหลีกเลี่ยงปรากฏการณ์นี้จึงมักจะมีการใช้ก๊าซอัดความดันที่มีค่าความคงทนต่อการเบรกดาวน์สูง ๆ หรืออาจใช้ฉนวนของเหลวช่วย และควรจะให้ค่าเปอร์มิตติวิตี  $\epsilon_1 > \epsilon_2$  จะเห็นได้ว่าการทดสอบฉนวนของแข็งจะค่อนข้างยุ่งยากกว่าการทดสอบฉนวนก๊าซหรือฉนวนของเหลว

อย่างไรก็ตามสมการ (2.34) ก็ยังสามารถนำไปใช้ในการพิจารณา หรือวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในระบบการฉนวนได้ เพราะในการใช้งานฉนวนโดยทั่วไปนั้นมักจะมีการใช้งานฉนวนในลักษณะผสมกันหลายชนิด โดยอาจมีทั้งก๊าซและของแข็งได้ เช่นในระบบ GIS ซึ่งจะใช้ก๊าซ SF<sub>6</sub> เป็นฉนวน แต่ก็ยังต้องมีการใช้ฉนวนของแข็งในการจับยึดอุปกรณ์หรือตัวนำ

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดเกี่ยวกับการใช้วัสดุฉนวนผสมกันพอจะสามารถสรุปได้ว่า ในการใช้ฉนวนซ้อนกัน ในสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอจะได้  $\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2$  ถ้าจัดวางฉนวน และแผ่นขั้วอิเล็กโทรดให้ขนานกัน ดังนั้นฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่างกันมาก ๆ จึงไม่ควรใช้เป็นฉนวนซ้อนกัน เพราะความเครียดสนามไฟฟ้าในฉนวนแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ยิ่งไปกว่านั้นก็คือฉนวนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่ำจะได้รับความเครียดสนามไฟฟ้าที่สูง ซึ่งทำให้ค่าความคงทนต่อการเบรกดาวน์ของระบบฉนวนนี้ลดลง ส่วนในสนามไฟฟ้าที่ไม่สม่ำเสมอ (เช่น ทรงกระบอกแกมรวม) การใช้ฉนวนซ้อนที่มีค่าเปอร์มิตติวิตีต่าง ๆ กันจะสามารถช่วยให้สนามไฟฟ้ามีความสม่ำเสมอขึ้นได้ เพราะจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าในแต่ละชั้นมีค่าใกล้เคียงกันได้

## 2.8 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้าแรงสูง [2]

การส่งกำลังไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยมีการส่งกำลังไฟฟ้าผ่านทางสายตัวนำ จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นระหว่างสายตัวนำเสมอ โดยที่สนามไฟฟ้าเกิดจากแรงดันตกคร่อมสาย เช่น ในกรณีระบบไฟฟ้ากำลังมีการส่งจ่ายแรงดันขนาด 500 kV, 230 kV, 115 kV, 69 kV จากการศึกษาพบว่าค่าของสนามไฟฟ้า จะมีค่ามากตามขนาดของแรงดันในระบบ ส่วนสนามแม่เหล็กนั้นจะเกิดกระแสที่ไหลภายในสายส่ง จากการศึกษาพบว่า ปริมาณของกระแสที่ไหลภายในสายส่งจะส่งผลต่อการเกิดของสนามแม่เหล็ก ถ้าในระบบส่งจ่ายมีกระแสภายในสายส่งมาก ก็จะทำให้ปริมาณของสนามแม่เหล็กมีค่ามาก

2.8.1 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวนำสายไฟฟ้าควบสายส่ง แรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย นิยมส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้สายควบที่เรียกว่า Bundle conductor คือ ในแต่ละเฟสจะประกอบด้วยตัวนำหลายเส้น (ตั้งแต่ 2 เส้นขึ้นไป) โดยระยะห่างระหว่างเส้นในสายที่ควบที่เหมาะสมจะประมาณ 10 - 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นย่อย ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้กำหนดระยะห่างไว้ดังนี้ สายส่งแรงสูงขนาด 500 kV จำนวนตัวนำ 4 bundle มีระยะห่าง 44 เซนติเมตร สายส่งแรงสูงขนาด 230 kV จำนวนตัวนำ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

bundle และ 4 bundle มีระยะห่าง 40 เซนติเมตร สายส่งแรงสูงขนาด 115 kV จำนวนตัวนำ 2 bundle มีระยะห่าง 20 เซนติเมตร การเดินสายด้วยวิธีนี้ จะมีข้อดีดังนี้

1. ความเข้มสนามไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลง
2. เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำรวมของสายให้น้อยลง ส่งผลให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าน้อยลง
3. เพื่อให้การระบายความร้อนในสายดีขึ้น
4. เพื่อให้ค่าความต้านทานรวมของสายลดลง

ซึ่งสามารถแสดงเป็นภาพการเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งแรงสูงที่ใช้ตัวนำไฟฟ้าครบแบบ 2 เส้น 3 เส้น 4 เส้น เปรียบเทียบกับสายไฟฟ้าเส้นเดียว

2.8.2 ผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อคนและสัตว์ ผลกระทบหรืออันตรายจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่มีต่อคนและสัตว์ โดยเฉพาะบ้านเรือนหรือที่ทำงานที่อยู่ใกล้สายส่งแรงสูง จะมีความวิตกกังวลถึงอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นว่าจะส่งผลต่อร่างกายของคนและสัตว์ โดยองค์กรที่มีชื่อว่า International Radiation Protection Association (IRPA) ได้กำหนดระดับสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่ประชาชนสัมผัสได้อย่างปลอดภัยไว้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าจำกัดสูงสุดของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก 50/60 Hz

สถานที่ที่มี E และ H	ความเข้มสนามไฟฟ้า (E)	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B)
สถานประกอบการ		
- ตลอดชั่วโมงการทำงาน	10 kV / m	5 G (0.5 mT)
- ช่วงเวลาสั้น	30 kV / m	50 G (5.0 mT)
- จำกัดเฉพาะแขนขา	-	250 G (25 mT)
สาธารณะ		
- ตลอด 24 ชั่วโมง	5 kV / m	1 G (0.1 mT)
- 2 - 3 ชั่วโมง	10 kV / m	10 G (1 mT)

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดความกว้างเขตเดินสายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต [4]

ขนาดแรงดันไฟฟ้า (kV)	ระยะจากจุดกึ่งกลางเสาออกไป ด้านละ (m)	รวมเขตเดินสายไฟฟ้า (m)
69	9	18
115	12 - 25	24 - 50
230	20 - 25	40 - 50
500	35 - 40	70 - 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีต่อคนและสัตว์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้มีการตั้งข้อกำหนด ความกว้างเขตเดินสายไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเอาไว้ เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น ดังตารางที่ 2.2

จากการศึกษาของผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศ พบว่าบุคคลที่เข้าไปอยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ปริมาณสูงเกินที่กำหนด ในระยะเวลาสั้นๆ อยู่ประจำอาจทำให้บุคคลนั้นได้รับอันตรายจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าจะเกิดโรคต่างๆ เช่นโรคมะเร็งผิวหนัง โรคต่อมไทรอยด์บวม โรคสมองเสื่อม และโรคที่เกี่ยวข้องกับเม็ดเลือด แต่ปัญหาจากอันตรายที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กก็สามารถป้องกันได้ด้วยการที่ไม่เข้าไปอยู่ในบริเวณที่มีความเข้มข้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงๆ ถ้ามีความจำเป็นต้องเข้าไปอยู่ในบริเวณดังกล่าวก็ไม่ควรที่จะอยู่นานเกินไป

## 2.9 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [5]

ประเทศต่าง ๆ บนโลกได้พยายามเปลี่ยนแปลงประเทศจากเกษตรกรรมไปเป็นอุตสาหกรรม ซึ่งก็มีทั้งผลดีและผลเสียทั้งแก่เศรษฐกิจและสังคม แต่ที่ต้องคำนึงถึงคือผลเสียต่อสุขภาพ สังคมอุตสาหกรรมจะมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ใช้ในบ้าน เช่นโทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ ตู้อบไมโครเวฟ โทรศัพท์มือถือ รวมทั้งสถานีกระจายคลื่นโทรศัพท์มือถือ มีรายงานเกี่ยวกับกลุ่มอาการซึ่งเกิดจากคลื่นแม่เหล็ก

## 2.10 คลื่นแม่เหล็กและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแตกต่างกันอย่างไร

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีสองชนิดคือ

1. **Ionizing Radiation** คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ให้รังสีออกมา ได้แก่ Gamma rays and X-rays ซึ่งหากได้รับมากเกินไปจะทำให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพ

2. **Non-ionizing radiation** ได้แก่คลื่น (Radio-frequency energy), แสง (visible light) และ (microwave) คลื่นนี้จะให้เพียงพลังความร้อนเท่านั้น

**Electromagnetic Hypersensitivity** เป็นกลุ่มของอาการที่เกิดจากการสัมผัสคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อาการดังกล่าวก็ไม่เฉพาะเจาะจงว่าเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อาการดังกล่าวได้แก่ อาการทางผิวหนังซึ่งสามารถมีอาการได้แก่ ผื่นแดง ชาหรือแสบร้อน นอกจากนั้นยังมีอาการทั่วไป เช่น อ่อนเพลีย เบื่อหน่าย มึนงง คลื่นไส้อาเจียน ใจสั่น ท้องอืดท้องเฟ้อ

### ความชุกของโรค

การหาความชุกเป็นเรื่องยาก พบได้ตั้งแต่ไม่กี่คนต่อประชากรล้านคน การรายงานขึ้นอยู่กับพื้นที่ ประเทศที่รายงานมีอุบัติการณ์มากได้แก่ สวีเดน เดนมาร์ก เยอรมัน ประเทศที่รายงานน้อยได้แก่ อังกฤษ ออสเตรเลีย ฝรั่งเศส

จากการศึกษาทดลองพบว่า

- คนไม่สามารถบอกได้อย่างแน่ชัดว่าเกิดการสัมผัสคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้น จึงพบไม่ได้ว่าอาการนั้นมีความสัมพันธ์กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- อาการต่างๆดังกล่าวน่าจะมาจากสิ่งแวดล้อม เช่น แสง ปัญหาทางสายตา การจัดโต๊ะอาหาร การระบายอากาศ และความเครียด
- บางคนเกิดจากความเครียด ความกังวลเรื่องอันตรายต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

กลุ่มอาการดังกล่าวยังไม่สามารถสรุปได้ว่าเกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ ยังไม่มีเกณฑ์การวินิจฉัยและการรักษา

## 2.11 มาตรฐานของการได้รับพลังงานจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า [5]

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าเครื่องไฟฟ้าทุกชนิดที่ใช้ในบ้านและสำนักงานจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า ซึ่งผลกระทบต่อสุขภาพในระยะยาวยังไม่ปรากฏแน่ชัด ดังนั้น การหลีกเลี่ยงหรือการลดการได้รับพลังงานดังกล่าวจึงเป็นวิธีที่ปลอดภัย อเมริกาเป็นประเทศที่เจริญแล้วและมีความห่วงใยสุขภาพของประชาชน มี 6 รัฐ ที่ออกข้อกำหนดเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าจากสายไฟฟ้าแรงสูง ค่าที่กำหนดส่วนใหญ่เป็นค่าสูงสุด บางรัฐกำหนดเฉพาะสายไฟที่ทอดข้ามถนน เนื่องจากกลัวจะเกิดไฟช็อตเมื่อรถขนาดใหญ่วิ่งผ่านไป ตารางข้างล่างเป็นค่ามาตรฐานที่แต่ละรัฐกำหนดไว้ การกำหนดขององค์กร 2 องค์กรได้กำหนดปริมาณพลังงานที่ได้รับจากเครื่องไฟฟ้า เพื่อป้องกันการช็อตจากสนามไฟฟ้าโดยเฉพาะผู้ที่ทำงานอยู่ในที่มีความกดอากาศต่ำ ซึ่งมีโอกาสจะช็อตมากกว่าคนทั่วไป 1000 เท่า

## 2.12 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีปัญหากับผู้ที่ใช้เครื่องกระตุ้นหัวใจหรืออุปกรณ์ทางการแพทย์อื่น ๆ หรือไม่

องค์การอาหารและยาของประเทศอเมริกากำลังวิจัยผลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่ออุปกรณ์ทางการแพทย์ โดยเฉพาะเครื่องกระตุ้นการเต้นของหัวใจ เครื่องมือที่อยู่ในความสนใจ ได้แก่ โทรศัพท์มือถือ, citizens band radios, คอมพิวเตอร์ไร้สาย, สัญญาณ microwave, วิทยุ, ทีวี และ paging transmitters อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ให้สนามแม่เหล็ก และ สนามไฟฟ้ามากได้แก่ อุปกรณ์เครื่องเชื่อมโลหะ สายไฟแรงสูง อุปกรณ์รถไฟฟ้า อุปกรณ์เหล่านี้จะให้พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงพอที่จะรบกวนการทำงานของอุปกรณ์ทางการแพทย์ โดยกำหนดค่ามาตรฐานไว้ว่าความถี่ไฟฟ้าที่ 60 Hz จะมีค่าพลังงานสนามแม่เหล็กน้อยกว่า 1 gauss (1,000 mG) ค่าสนามไฟฟ้าน้อยกว่า 1 kilovolt per meter (1,000 V/m) สำหรับอุปกรณ์ เช่น เหล็ก นีออน ข้อเทียมที่แพทย์โรคกระดูก หากอยู่ในเครื่องที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กมากเช่น เครื่องตรวจ magnetic resonance imaging (MRI) สำหรับอุปกรณ์จอกอมพิวเตอร์ เครื่องเล่น วีดีโอ ประเทศสวีเดนได้กำหนดไว้ว่าค่าสนามแม่เหล็กไม่เกิน 2 mG ที่ระยะทาง 30 cm (about

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติเห็นาเบไซประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 ft) จากด้านหน้าของจอและ 50 cm (about 1 ft 8 in) จากด้านข้างของจอ ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ใช้ทั่วโลก

### 2.13 ผลกระทบต่อสุขภาพของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [5]

จะมีผลกระทบต่อเนื้อเยื่อลึกประมาณ 1 เซนติเมตร ความลึกขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่น เมื่อเนื้อเยื่อได้รับคลื่นแต่ร่างกายก็มีกลไกที่จะควบคุมอุณหภูมิได้

การศึกษาผลกระทบกับสุขภาพสามารถศึกษาได้หลายวิธี

**การศึกษาทางห้องปฏิบัติการ**

การศึกษาในห้องปฏิบัติการจะเป็นการศึกษาในเซลล์และสัตว์ทดลองเพื่อดูผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อเซลล์ ซึ่งอาจจะมีผลต่อการทำงานของเซลล์ แต่อาจจะมีผลต่อสุขภาพก็ได้ ดังนั้นท่านผู้อ่านต้องมีวิจารณญาณในการอ่าน

จากการศึกษาในห้องทดลองพบว่าผลกระทบของสนามแม่เหล็กมีผลต่อการทำงานของเซลล์ ทำให้มีการผลิตฮอร์โมนเพิ่มขึ้น แต่ยังไม่กระทบต่อสุขภาพ

**ผลการศึกษาทางการแพทย์**

โดยการให้อาสาสมัครมาอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีสนามแม่เหล็กหรือไฟฟ้าสูงกว่าปกติ แล้ววัดชีพจร ความดันโลหิต คลื่นไฟฟ้าหัวใจ ระดับฮอร์โมน และอื่นๆที่สนใจว่ามีการเปลี่ยนแปลงอะไรบ้าง

**การศึกษาทางระบาด**

เป็นวิธีการที่สำคัญมาก โดยการเปรียบเทียบอัตราการเกิดโรคในกลุ่มที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า เมื่อเทียบกับอีกกลุ่มหนึ่ง หากมีอัตราการเกิดโรคต่างกันอย่างน้อยมีนัยสำคัญ แสดงว่าสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าอาจจะมีผลเสียต่อสุขภาพ นอกจากนั้นจะต้องคำนึงถึง

**Strength of Association** หมายถึงความเกี่ยวข้องหากมีความเกี่ยวข้องกันมาก เช่น การสูบบุหรี่มีผลทำให้ความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งปอดเพิ่มขึ้น 20 เท่า จากการศึกษพบว่า การสัมผัสสนามแม่เหล็กมีความเกี่ยวข้องกับมะเร็งไม่มาก

**Dose-response** หมายถึงการตอบสนองต่อความเข้มข้น หมายถึง หากสัมผัสสนามแม่เหล็กมากก็ทำให้เกิดโรคมามากขึ้น จากการศึกษพบว่า มีเพียงรายงานที่มีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสนามแม่เหล็กกับการเกิดโรค

**Consistency** หมายถึง เมื่ออยู่ในสถานการณ์ดังกล่าวก็ทำให้เกิดโรคได้เหมือนกัน การศึกษาพบว่า การอยู่ในสนามแม่เหล็กเหมือนกันแต่ทำให้เกิดโรคต่างกัน ทำให้นักวิทยาศาสตร์ไม่มั่นใจว่าโรคดังกล่าวเกิดจากสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Biological Plausibility** เนื่องจากทางระบาดวิทยายังไม่สามารถระบุความเกี่ยวพันอย่างชัดเจนของการเกิดโรคและสนามแม่เหล็กจึงต้องศึกษาทางห้องปฏิบัติการ พบว่าการทดลองทางห้องปฏิบัติการก็ไม่อธิบายถึงความสัมพันธ์ของการเกิดโรคและสนามแม่เหล็ก

**Reliability of Exposure Information** หมายถึงประวัติการสัมผัสสนามแม่เหล็กยังไม่เป็นมาตรฐานทำให้การแปลผลไม่ถูกต้อง

**Confounding** เนื่องจากการเกิดโรคอาจจะมีสาเหตุหลายประการ เช่น พันธุกรรม อาหาร และสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการเกิดโรคจากสนามแม่เหล็กอาจจะมีสาเหตุอื่นร่วมด้วย เช่น จากการศึกษาพบว่าผู้ที่ดื่มสุราจะมีอัตราการป่วยเป็นโรคมะเร็งปอดเพิ่มความจริงคนที่ดื่มสุรามักจะสูบบุหรี่ ดังนั้นการดื่มสุราอาจจะไม่ใช่สาเหตุของการเกิดมะเร็งปอด

**Statistical Significance** หมายถึง การใช้หลักสถิติจะช่วยยืนยันความสัมพันธ์ของการเกิดโรคจากสนามแม่เหล็กได้ดีขึ้น

**Meta-analysis** เป็นการนำการวิเคราะห์หลายๆการศึกษามารวมกันเพื่อประเมินความน่าจะเป็นไปได้

**Pooled Analysis** เป็นการนำข้อมูลดิบมารวมกัน แล้วนำมาวิเคราะห์ใหม่

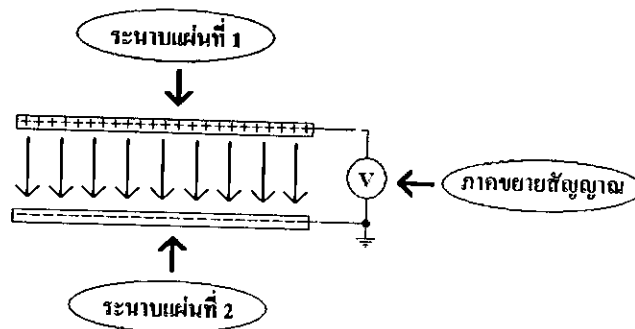
สนามไฟฟ้า สนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างมากเมื่อระยะทางที่ยาวขึ้น และมีฉนวนหุ้ม (shield) สนามแม่เหล็ก เนื่องจากยังไม่มีวัสดุใดที่สามารถกันสนามแม่เหล็กได้ ระยะทางเมื่อห่างจากแหล่งกำเนิดจะลดลงอย่างรวดเร็ว

## 2.14 หลักการของ Electric Field Meter

จากหลักการของการเกิดสนามไฟฟ้านั้น จึงได้มีการออกแบบเครื่องวัดดังนี้ โดยแบ่งเครื่องวัดเป็นส่วนใหญ่ๆได้ดังนี้

- 1.ภาครับสัญญาณ
- 2.ภาคขยายสัญญาณ
- 3.ภาคแสดงผล

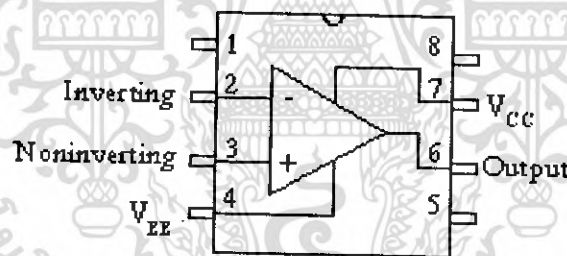
2.14.1 ภาครับสัญญาณ ได้ใช้หลักการของคาปาซิเตอร์โดยที่สนามไฟฟ้าจากสายส่งจะกระทำต่อแผ่นระนาบแผ่นที่ 1 ซึ่งจะทำให้แผ่นระนาบแผ่นที่หนึ่งมีคุณสมบัติเป็นบวกร และระนาบแผ่นที่ 1 จะกระทำต่อระนาบแผ่นที่ 2 ซึ่งจะทำให้แผ่นที่ 2 จะกลายเป็นลบ ดังนั้นเราจะวัดค่าความต่างศักย์ของระนาบทั้ง 2 แผ่นนี้ ดังรูป



รูปที่ 2.13 แสดงการวัดสัญญาณของสนามไฟฟ้า

### 2.15 วงจรออปแอมป์ (Operational – Amplifier Circuit) [3]

ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์ขยายแรงดันที่มีอัตราขยายแรงดันวงรอบเปิด (Open Loop Gain) สูงโดยมากประกอบขึ้นจากทรานซิสเตอร์ ไดโอด ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุเป็นจำนวนมากบรรจุลงในชิปตัวเดียวที่รู้จักกันในนามไอซี (Integrated Circuit, IC) ออปแอมป์ถูกผลิตขึ้นในหลายรูปแบบ แต่ที่นิยมใช้มักจะเป็นแบบ 8-pin Dual-in-line Package ที่เรียกว่า minidip ดังรูปที่ 2.14

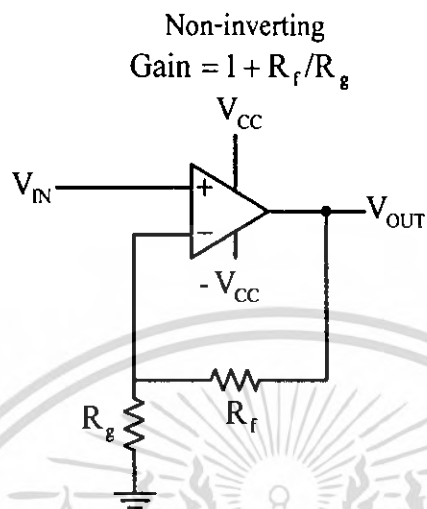


รูปที่ 2.14 ออปแอมป์ 8-pin Dual-in-line Package

ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติดังนี้คือ มีค่าความต้านทานอินพุต (Input Resistance,  $R_i$ ) สูงประมาณ  $10^5 - 10^{15}$  โอห์ม ส่วนค่าความต้านทานเอาต์พุต (Output Resistance,  $R_o$ ) มีค่าต่ำประมาณ 1 – 1000 โอห์ม และมีอัตราขยายผลต่างของแรงดันที่อินพุตสูงมาก คือประมาณ  $10^4 - 10^7$  เท่า โดยขาที่จำเป็นต่อการใช้งานมีอยู่ด้วยกัน 5 ขา คือ ขาไฟเลี้ยง 2 ขา ขาอินพุต 2 ขา และขาเอาต์พุต 1 ขา

ขาไฟเลี้ยง 2 ขา ได้แก่ ขาที่ใช้สำหรับไฟเลี้ยงบวก  $V_{CC}$  และขาไฟเลี้ยงลบ  $V_{EE}$  ที่ใช้สำหรับจ่ายกำลังแก่วงจร

2.15.1 วงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเครื่องหมาย (Non-inverting Amplifier) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายแรงดันแบบไม่กลับเครื่องหมาย วงจรดังรูปที่ 2.15

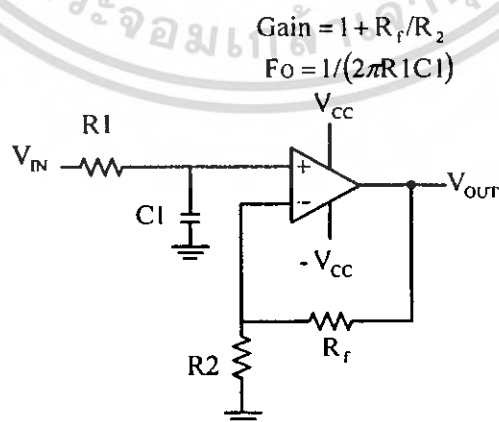


รูปที่ 2.15 วงจร Non-inverting Amplifier

โดย Gain ในการขยายคือ

$$\text{Gain} = 1 + \frac{R_f}{R_g} \quad (2.35)$$

2.15.2 วงจรขยายสัญญาณและกรองความถี่ต่ำผ่านได้ (Current Feedback Amplifier Low-Pass Filter) ทำหน้าที่กรองความถี่ต่ำให้ออกไปได้ สามารถขยายสัญญาณและมีการป้อนกลับของสัญญาณได้ด้วยดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 Current Feedback Amplifier Low-Pass Filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

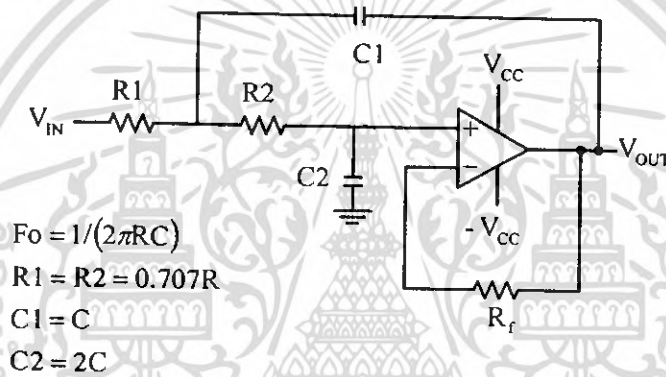
โดย Gain ในการขยายคือ

$$\text{Gain} = 1 + \frac{R_f}{R_2} \quad (2.36)$$

และจะกรองความถี่ที่น้อยกว่า ความถี่  $F_0$  จะกรองให้ผ่านไปได้อคือ

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \quad (2.37)$$

2.15.3 วงจรกรองสัญญาณทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูง (Band - Pass Filter) จะประกอบด้วยวงจรที่ให้ทั้งความถี่ผ่าน (Low - Pass Filter) และวงจรที่ให้ความถี่สูงผ่าน (High-Pass Filter) และจะทำการป้อนดังรูปที่ 2.17 และ รูปที่ 2.18



รูปที่ 2.17 Current Feedback Sallen - Key Low - Pass Filter

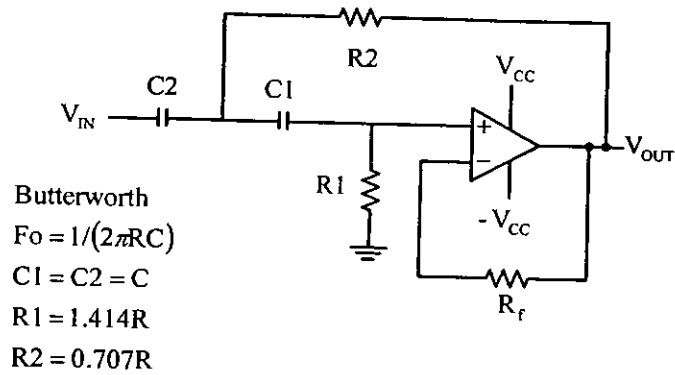
โดยค่าที่ต้องนำมาใช้ในวงจร ต้องกำหนดค่าความถี่ที่ต้องการจะกรองให้ผ่าน และกำหนดค่าความต้านทาน (R) ค่าตัวเก็บประจุ (C) ขึ้นมาเองก่อนแล้วจึงจะหาค่าต่างๆได้ดังนี้

$$F_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.38)$$

$$R_1 = R_2 = 0.707R \quad (2.39)$$

$$C_1 = C \quad (2.40)$$

$$C_2 = 2C \quad (2.41)$$



รูปที่ 2.18 Current Feedback Sallen – Key High – Pass Filter

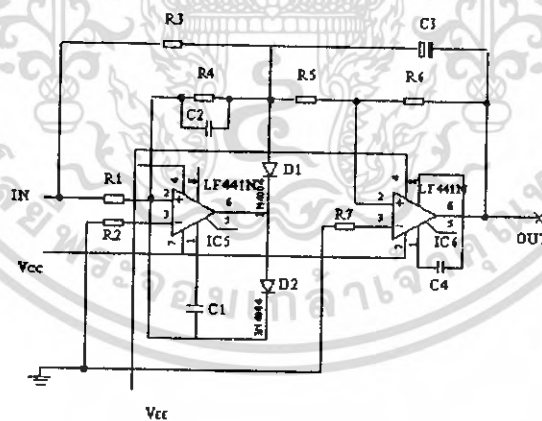
การคำนวณหาค่าต่างๆ จากรูปที่ 2.18 มีดังนี้

$$F_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.42)$$

$$C_1 = C_2 = C \quad (2.43)$$

$$R_2 = 0.707R \quad (2.44)$$

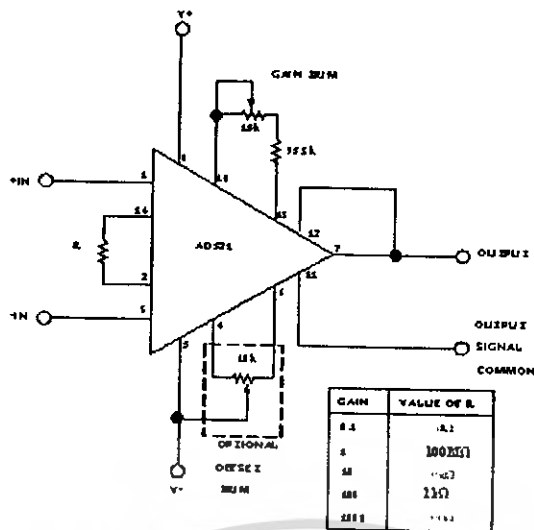
2.15.4 วงจรแปลงสัญญาณจาก AC เป็น DC (AC to DC converter) จะทำการเปลี่ยนสัญญาณจาก AC เป็น DC โดยมีอัตราขยายเป็น 1 ต่อ 1 ดังรูปที่ 2.19



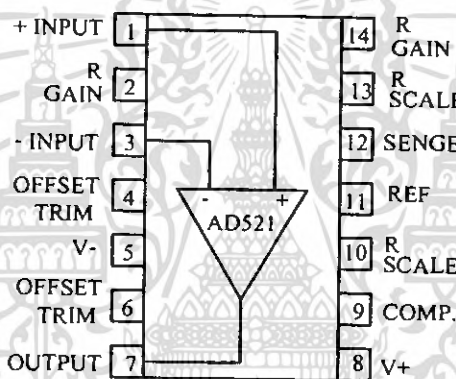
รูปที่ 2.19 AC to DC converter

2.15.5 AD521 (ANALOG DEVICES) (Instrumentation Amplifier) เป็น IC ที่มีลักษณะพิเศษมีคุณสมบัติในตัวมันเองหลายอย่าง คือ เป็น Buffer ซึ่งมี input impedance สูง และทำหน้าที่เป็น Differential Amplifier ขยายผลต่างของสัญญาณ คือรวมผลต่างของลูกคลื่นสัญญาณ และกำจัดสัญญาณรบกวนได้ด้วย ลักษณะวงจรดังรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 AD521 (Instrumentation Amplifier)



รูปที่ 2.21 ขาของ IC AD521

จากรูปที่ 2.21 สามารถเลือก Gain ในการขยายได้จาก 0.1 ถึง 1000 เท่า จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของ IC ตัวนี้มีมากและเหมาะแก่การนำมาใช้งาน

2.16 สรุป

จากที่ได้ศึกษาถึงทฤษฎีการเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กและผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีต่อมนุษย์และอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ และได้วิเคราะห์ถึงหลักการการออกแบบเครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้าโดยในส่วนของตัวเครื่องวัดจะแบ่งเป็น 3 ภาคได้แก่ภาครับสัญญาณ ภาคขยายสัญญาณและภาคแสดงผลเพราะค่าความเข้มของสนามไฟฟ้ามีสัญญาณขนาดเล็กมากจึงได้วิเคราะห์วงจรเพื่อขยายสัญญาณให้แสดงผลออกมาเป็นค่าที่สามารถอ่านได้

### บทที่ 3

## การออกแบบเครื่องวัดสนามไฟฟ้า

### 3.1 แนวคิดในการออกแบบเครื่องวัดสนามไฟฟ้า [7]

จากแนวคิดที่จะออกแบบสร้างเครื่องวัดสนามไฟฟ้า ได้มีการนำเอาวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาทำงานร่วมกัน โดยมีภาคการทำงานของเครื่องวัดทั้งหมด 5 ส่วนการทำงานด้วยกัน ได้แก่ ภาครับสัญญาณ ภาคขยายสัญญาณ ภาคเรกติไฟร์ ภาคแสดงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล และภาคแสดงผล ซึ่งทั้ง 5 ส่วนการทำงานนี้จะต้องทำงานสัมพันธ์กันโดยมีหน้าที่ในแต่ละส่วนการทำงานดังนี้



(ก) แนวคิดในการออกแบบเครื่องวัดสนามไฟฟ้า

(ข) เครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

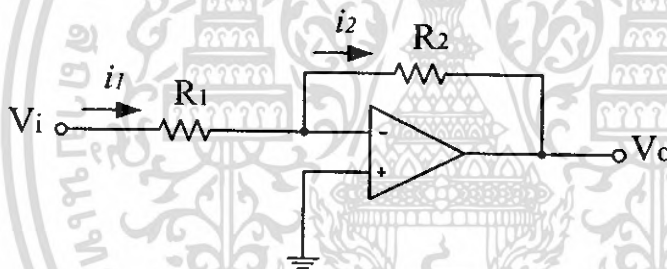
### รูปที่ 3.1 รูป (ก) แนวคิดในการออกแบบ และ รูป (ข) เครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ภาครับสัญญาณ สำหรับการทำงานของเครื่องวัดสนามไฟฟ้า ในส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณ เส้นแรงสนามไฟฟ้าที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเข้ามา โดยในการออกแบบจะใช้แผ่นเพลตทองแดง ทำหน้าที่เป็นภาครับสัญญาณ โดยอาศัยหลักการของสนามไฟฟ้า คือจะนำเครื่องมือวัดไปวางในสนามไฟฟ้าที่ต้องการวัดของอุปกรณ์ที่ต้องการวัด โดยใช้แผ่นเพลตแผ่นที่ 1 รับค่าสนามไฟฟ้าและแผ่นที่ 2 เป็นตัวรับค่าสนามไฟฟ้าที่แผ่นที่ 1 กระทบกับแผ่นที่ 2 แล้ววัดค่าหาผลต่างระหว่างแผ่นเพลตทั้ง 2

3.1.2 ภาคขยายสัญญาณ สำหรับภาครับสัญญาณและขยายสัญญาณนั้น จะมีการทำงานที่สัมพันธ์กันคือ หลังจากที่แผ่นเพลตรับสัญญาณสนามไฟฟ้า จากแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าเข้ามา สนามไฟฟ้าจะมีค่าน้อย จึงต้องมีการขยายสัญญาณที่ได้รับมาให้สูงขึ้นโดยภาคขยายสัญญาณนี้ จะใช้คุณสมบัติของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ Operational Amplifier (Op-Amp) ใช้ในการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณให้สูงขึ้น

1. Inverter Amplifier เป็นการต่อวงจรภายนอกให้ออปแอมป์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแบบกลับเฟสแรงดันกระแสตรงหรือกระแสสลับ โดยได้สัญญาณเอาต์พุตตรงข้ามกับสัญญาณอินพุต ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 Inverting Amplifier

จากวงจร เราพบว่ากระแส  $i_1$  มีค่าเท่ากับกระแส  $i_2$  ซึ่งจากวงจร เราสามารถหาอัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตกับอินพุต ได้ดังต่อไปนี้

$$i_1 = i_2 \quad (3.1)$$

จากสมการที่ 3.1 เมื่อ  $i_1 = i_2$  ดังนั้น จากกฎของ node จะทำให้ได้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{V_i - 0}{R_1} = \frac{0 - V_o}{R_2} \quad (3.2)$$

$$\frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_o}{R_2} \quad (3.3)$$

ดังนั้น จากสมการที่ 3.3 จะได้อัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตได้ดังนี้

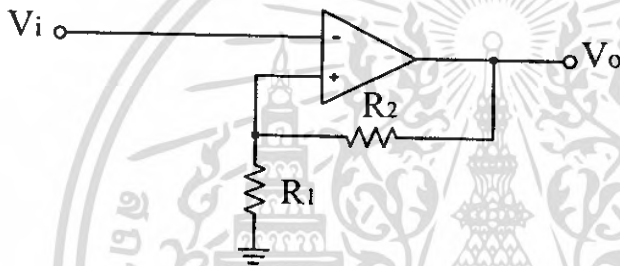
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.4)$$

$$V_o = V_i \left[ -\frac{R_2}{R_1} \right] \quad (3.5)$$

เครื่องหมายลบในสมการแสดงว่า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นบวก จะทำให้แรงดันเอาต์พุตเป็นลบหรือเมื่อแรงดันอินพุตเป็นลบจะทำให้แรงดันเอาต์พุตเป็นบวก

2. Non- Inverter Amplifier เป็นการต่อวงจรภายนอกให้ออปแอมป์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส โดยอัตราขยายสัญญาณจะขึ้นอยู่กับการต่อวงจรภายนอก โดยได้สัญญาณเอาต์พุตเหมือนกับสัญญาณอินพุตดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Non- Inverter Amplifier

จากวงจรเราสามารถหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอินพุตได้ดังนี้

$$\frac{V_i}{R_1} = \frac{V_o - V_i}{R_2} \quad (3.6)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.6 เราจะได้อัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอินพุตได้ดังนี้

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} \quad (3.7)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.8)$$

$$V_o = V_i \left[ 1 + \frac{R_2}{R_1} \right] \quad (3.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ภาคเรกติไฟร์ สำหรับภาคเรกติไฟร์ หลังจากที่ได้รับสัญญาณสนามไฟฟ้าผ่านภาคขยาย แล้ว ภาคเรกติไฟร์จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟสลับ (AC) ให้ได้สัญญาณไฟตรง (DC) เพื่อส่งไปยังภาคแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอลต่อไป

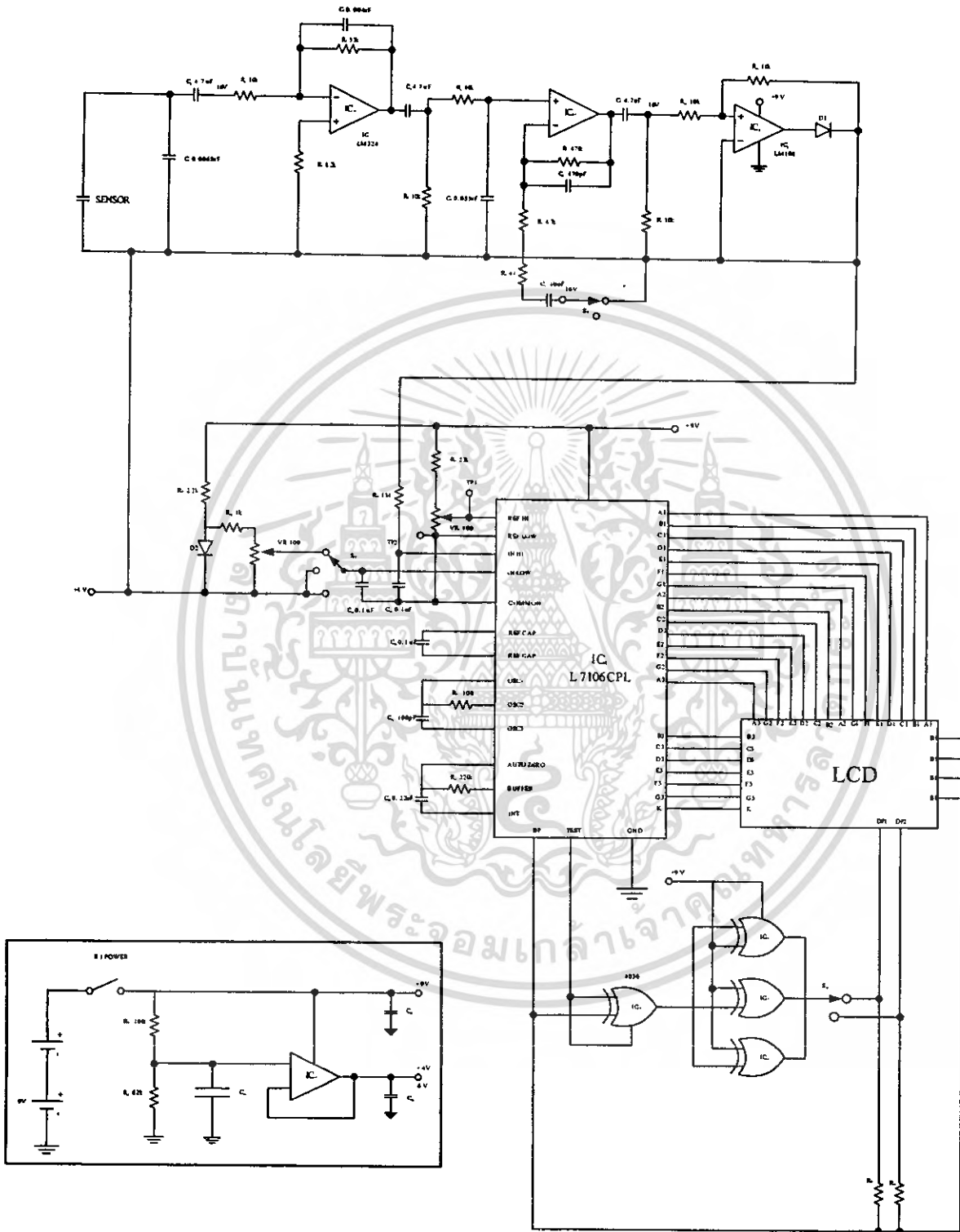
3.1.4 ภาคแสดงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D) เป็นภาคที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ โดยสัญญาณที่ผ่านภาคเรกติไฟร์เข้ามาจะเป็นสัญญาณอนาล็อก ภาคแปลงสัญญาณนี้จะแปลงสัญญาณที่เข้ามาให้เป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อควบคุมการทำงานของภาคแสดงผลต่อไป

3.1.5 ภาคแสดงผล เป็นภาคสุดท้ายของการทำงานซึ่งแสดงผลเป็นตัวเลขดิจิตอล จะใช้ในการแสดงผลค่าของสนามไฟฟ้าที่วัดได้จากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น มอเตอร์ เจนเนอเรเตอร์ เป็นต้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

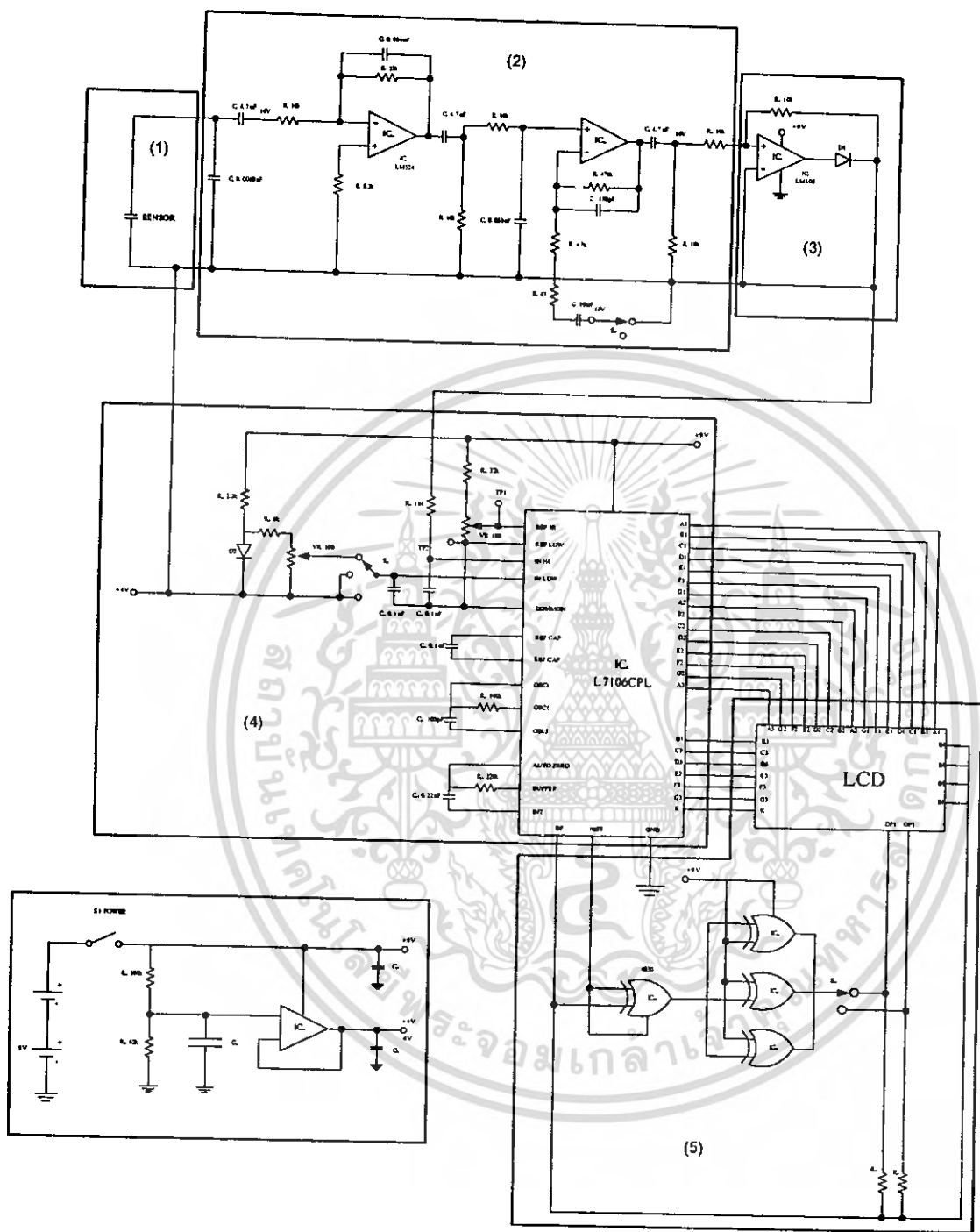
### 3.2 วงจรเครื่องวัดสนามไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 วงจรเครื่องวัดสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วงจรเครื่องวัดสนามไฟฟ้าที่แสดงการทำงานในแต่ละภาค



- หมายเลข (1) ภาครับสัญญาณ (2) ภาคขยายสัญญาณ (3) ภาคเรกติไฟฟ์  
 (4) ภาคแสดงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล (5) ภาคแสดงผล

รูปที่ 3.5 วงจรเครื่องวัดสนามไฟฟ้าที่แสดงการทำงานในแต่ละภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 สรุป

ในโครงการได้นำเสนอการออกแบบการสร้างเครื่องวัดสนามไฟฟ้าโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์มาทำงานร่วมกันโดยสามารถแบ่งการทำงานของการทำงานของเครื่องวัดทั้งหมดเป็นส่วนส่วนการทำงานคือ ภาครับสัญญาณ ภาคขยายสัญญาณ ภาคเรกติไฟร์ ภาคแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล และ ภาคแสดงผล ในการทำงานของวงจรทั้งหมด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองใช้โปรแกรม TLW ในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอการทดลองการใช้โปรแกรม TLW ซึ่งเป็นการทดลองวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงโดยการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้กับโปรแกรมโดยทำการกำหนดค่าแรงดัน, กระแส, ระยะเวลา Sag และเฟสที่เปลี่ยนแปลงโดยจะนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องวัดสนามไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ และเครื่องวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นและการวางเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อศึกษาหาความแตกต่างของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยเมื่อขนาดแรงดันและกระแสระยะ Sag เกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยดูผลของความถูกต้องของค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่

#### 4.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1. เพื่อให้เห็นผลของแรงดันและกระแสที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้มีผลต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
2. เพื่อให้เห็นถึงผลของการเปลี่ยน Phase Sequence ที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
3. เพื่อให้เห็นผลของระยะ Sag ที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้มีผลต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

#### 4.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

1. คอมพิวเตอร์ที่ลง โปรแกรม TLW
2. เอกสารคู่มือรายละเอียดของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค [8], [9]

#### 4.4 วิธีการทดลอง

1. ทำการป้อนพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น แรงดัน กระแส มุมเฟส และระยะ Sag ลงไปในโปรแกรม TLW
2. ทำการทดลองที่แรงดัน 22 kV เป็น 33 kV โดยมีกระแสที่ไหลในสายส่งมีค่า 400 A ทำการรันโปรแกรมสังเกตค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้
3. ทำการทดลองที่แรงดัน 115 kV โดยมีกระแสที่ไหลในสายส่งมีค่า 1300 A ทำการรันโปรแกรมสังเกตค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้
4. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองจากการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ทั้ง 3 อย่าง ว่าส่งผลอย่างไรต่อค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 แผนผังการทดลอง

การทดลองที่	เฟส	แรงดัน (v)	กระแส (A)	ระยะSAG (m)
1	ABC ขนาน ABC	22	400	0.70
2	ABC ขนาน ACB	22	400	0.70
3	ABC ขนานBCA	22	400	0.70
4	ABC ขนาน CBA	22	400	0.70
5	ABC ขนาน ABC	33	400	0.70
6	ABC ขนาน ACB	33	400	0.70
7	ABC ขนาน BAC	33	400	0.70
8	ABC ขนาน CBA	33	400	0.70
9	ABC ขนาน ABC	115	1300	0.80
10	ABC ขนาน ACB	115	1300	0.80
11	ABC ขนาน BAC	115	1300	0.80
12	ABC ขนาน CBA	115	1300	0.80

## 4.6 การทดลอง

4.6.1 การทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m การเรียงเฟสแบบเฟส ABC ขนาน กับเฟส ABC

```

*****
| BNDL | CIRC | VOLTAGE | ANGLE | CURRENT | # | BUNDLE COORDINATES | PH |
| #    | #    | (kV)   | (DEG) | (A)     | (DEG) | COND | X (m) | Y (m) | SAG (m) |
*****
| 1    | 1    | 22.0   | 0     | 400     | 0     | 1    | 1.00  | 9.85  | .70    | A
| 2    | 1    | 22.0   | 240  | 400     | 240  | 1    | .40   | 9.85  | .70    | B
| 3    | 1    | 22.0   | 120  | 400     | 120  | 1    | -1.00 | 9.85  | .70    | C
| 4    | 2    | 22.0   | 0     | 400     | 0     | 1    | 1.00  | 11.85 | .70    | A
| 5    | 2    | 22.0   | 240  | 400     | 240  | 1    | .40   | 11.85 | .70    | B
| 6    | 2    | 22.0   | 120  | 400     | 120  | 1    | -1.00 | 11.85 | .70    | C
| 7    | 1    | 0.0    | 0     | 0.0     | 0     | 1    | .00   | 13.85 | .85    | GND
*****
* MINIMUM GROUND CLEARANCE = 9.15 meter *
* POWER SYSTEM FREQUENCY = 50. Hz *
* SOIL RESISTIVITY = 100 ohm meter *
*****

```

```

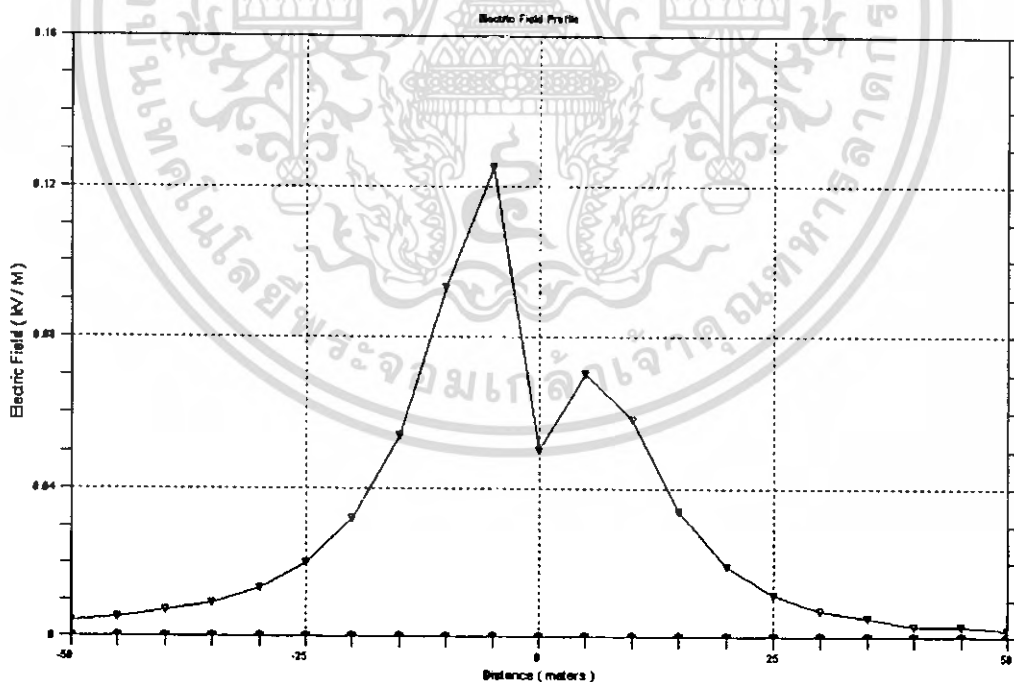
*****
* SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES
*****
| BNDL | CONDUCTOR | DIAMETER | SPACING | DC RESIST | AC RESIST | AC REACT |
| #    | NAME      | (cm)     | (cm)    | (ohm/km) | (ohm/km) | (ohm/km) |
*****
| 1    | RATCH    | 1.540    | .000    | .2350    | .2350    | .2980    |
| 2    | RATCH    | 1.540    | .000    | .2350    | .2350    | .2980    |
| 3    | RATCH    | 1.540    | .000    | .2350    | .2350    | .2980    |
| 4    | RATCH    | 1.540    | .000    | .2350    | .2350    | .2980    |
| 5    | RATCH    | 1.540    | .000    | .2350    | .2350    | .2980    |
| 6    | RATCH    | 1.540    | .000    | .2350    | .2350    | .2980    |
| 7    | 1/2HS    | 1.260    | .000    | 2.1380   | 2.2190   | .7710    |
*****

```

รูปที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวนโวลตาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตเห็นชอบใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)	MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.004	.004	.000	.004
-147.6	-45.00	.005	.005	.000	.005
-131.2	-40.00	.007	.005	.000	.007
-114.8	-35.00	.009	.005	.001	.009
-98.4	-30.00	.013	.005	.001	.013
-82.0	-25.00	.020	.005	.002	.020
-65.6	-20.00	.032	.005	.003	.032
-49.2	-15.00	.055	.004	.006	.055
-32.8	-10.00	.093	.002	.009	.093
-16.4	-5.00	.125	.012	.002	.123
.0	.00	.054	.316	.050	.050
16.4	5.00	.070	.054	.006	.069
32.8	10.00	.058	.002	.005	.058
49.2	15.00	.034	.011	.004	.034
65.6	20.00	.019	.015	.002	.019
82.0	25.00	.011	.017	.001	.011
98.4	30.00	.007	.019	.001	.007
114.8	35.00	.005	.019	.000	.005
131.2	40.00	.003	.019	.000	.003
147.6	45.00	.003	.019	.000	.003
164.0	50.00	.002	.018	.000	.002

รูปที่ 4.2 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

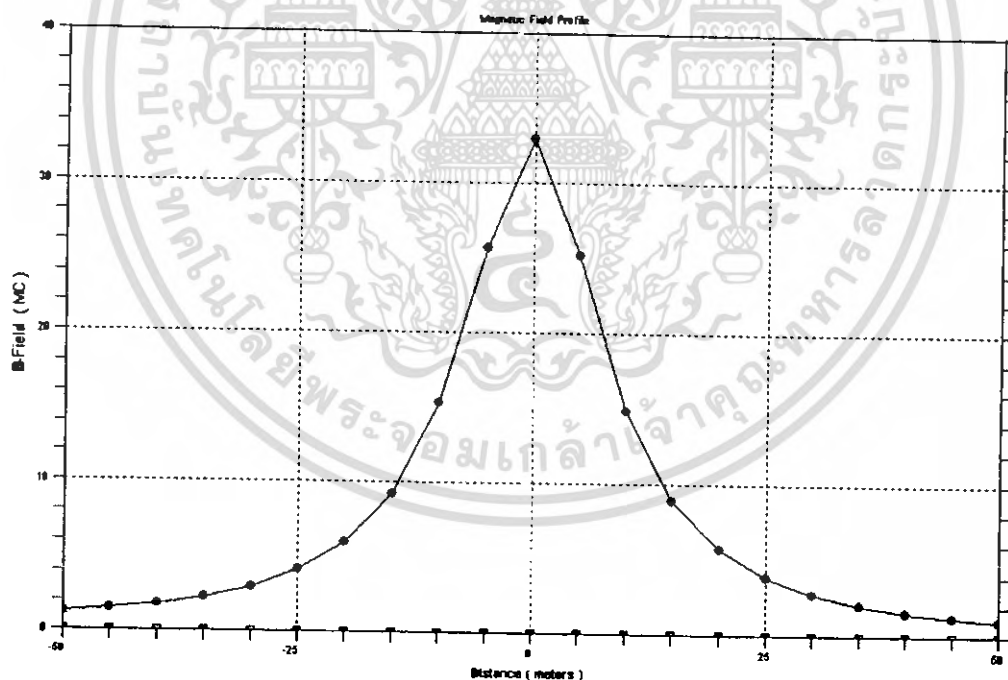


รูปที่ 4.3 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE (meters) (feet)		AC MAGNETIC FIELD				
		MAJOR AXIS (uT)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (uT)	HORIZONTAL COMP (uT)	RMS RESULTANT (uT)
-164.0	-50.00	1.15	.000	1.07	.42	1.15
-147.6	-45.00	1.40	.000	1.29	.56	1.40
-131.2	-40.00	1.75	.000	1.57	.77	1.75
-114.8	-35.00	2.24	.001	1.94	1.11	2.24
-98.4	-30.00	2.96	.002	2.44	1.68	2.96
-82.0	-25.00	4.09	.004	3.09	2.68	4.09
-65.6	-20.00	5.94	.006	3.82	4.55	5.94
-49.2	-15.00	9.23	.011	4.10	8.27	9.23
-32.8	-10.00	15.33	.019	1.16	15.28	15.33
-16.4	-5.00	25.60	.034	14.08	21.40	25.62
0	0	32.93	.048	32.93	1.59	32.96
16.4	5.00	25.12	.038	13.72	21.06	25.14
32.8	10.00	14.88	.021	1.10	14.84	14.88
49.2	15.00	8.88	.011	3.90	7.98	8.88
65.6	20.00	5.68	.006	3.62	4.37	5.68
82.0	25.00	3.87	.003	2.91	2.56	3.87
98.4	30.00	2.78	.001	2.28	1.60	2.78
114.8	35.00	2.09	.001	1.80	1.05	2.09
131.2	40.00	1.62	.002	1.44	.72	1.62
147.6	45.00	1.29	.003	1.18	.52	1.29
164.0	50.00	1.04	.004	.97	.38	1.04

รูปที่ 4.4 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m



รูปที่ 4.5 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

จากการทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส ABC พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 0.125 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 32.96  $\mu$ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.2 การทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส ACB

BNDL #	CIRC #	VOLTAGE		CURRENT		# OF COND	BUNDLE COORDINATES			PH
		(kV)	ANGLE (DEG)	LOAD (A)	ANGLE (DEG)		X (m)	Y (m)	SAG (m)	
1	1	22.0	0	400	0	1	1.00	9.85	70	A
2	1	22.0	240	400	240	1	.40	9.85	.70	B
3	1	22.0	120	400	120	1	-1.00	9.85	.70	C
4	2	22.0	0	400	0	1	1.00	11.85	70	A
5	2	22.0	120	400	120	1	.40	11.85	.70	B
6	2	22.0	240	400	240	1	-1.00	11.85	.70	C
7	1	.0	0	0	0	1	.00	13.85	.85	GND

MINIMUM GROUND CLEARANCE = 9.15 meter  
 POWER SYSTEM FREQUENCY = 50. Hz  
 SOIL RESISTIVITY = 100. ohm meter

SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES

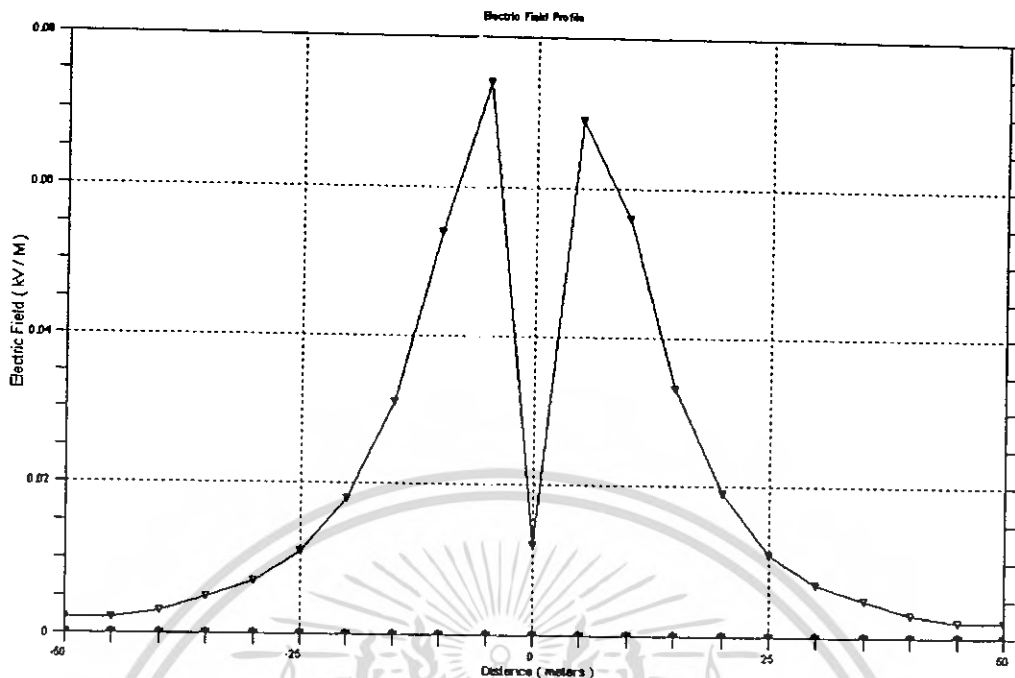
BNDL #	CONDUCTOR NAME	DIAMETER (cm)	SPACING (cm)	DC RESIST (ohm/km)	AC RESIST (ohm/km)	AC REACT (ohm/km)
1	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
2	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
3	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
4	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
5	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
6	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
7	1/2HS	1.260	.000	2.1380	2.2190	.7710

รูปที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)	MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.002	.005	.002	.002
-147.6	-45.00	.002	.005	.002	.002
-131.2	-40.00	.003	.006	.003	.003
-114.8	-35.00	.005	.006	.005	.005
-98.4	-30.00	.007	.007	.007	.007
-82.0	-25.00	.011	.009	.011	.011
-65.6	-20.00	.018	.012	.018	.018
-49.2	-15.00	.031	.019	.031	.031
-32.8	-10.00	.054	.028	.054	.054
-16.4	-5.00	.074	.034	.074	.073
.0	.00	.024	.300	.012	.022
16.4	5.00	.069	.003	.069	.068
32.8	10.00	.056	.008	.056	.056
49.2	15.00	.033	.003	.033	.033
65.6	20.00	.019	.000	.019	.019
82.0	25.00	.011	.001	.011	.011
98.4	30.00	.007	.002	.007	.007
114.8	35.00	.005	.003	.005	.005
131.2	40.00	.003	.003	.003	.003
147.6	45.00	.002	.003	.002	.002
164.0	50.00	.002	.003	.002	.002

รูปที่ 4.7 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

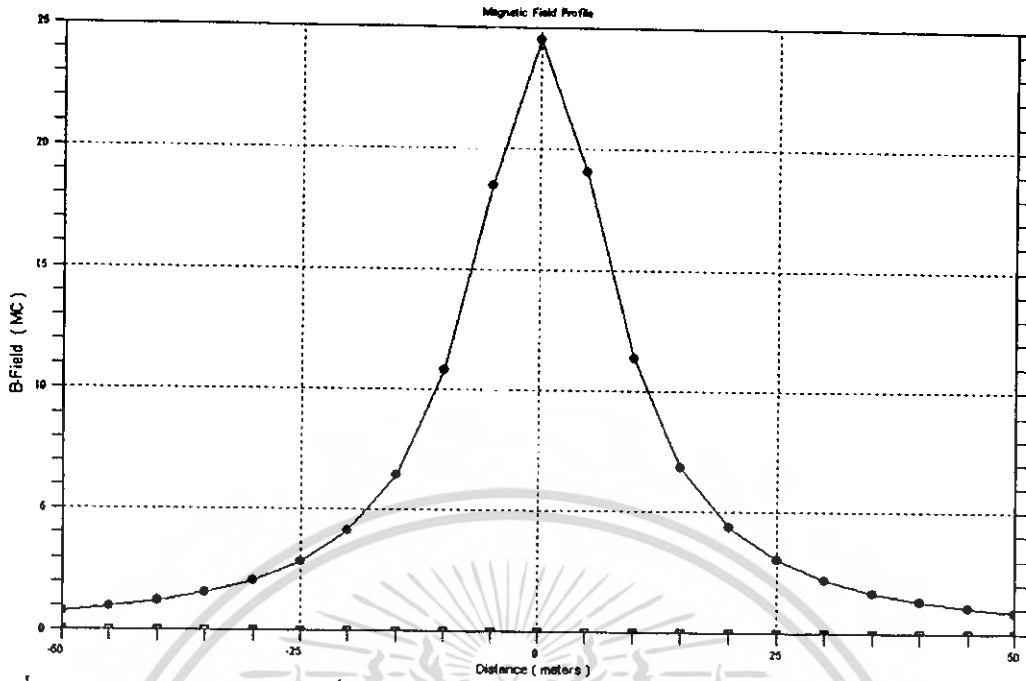


รูปที่ 4.8 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

LATERAL DISTANCE		AC MAGNETIC FIELD					RMS RESULTANT
(meters)	(feet)	MAJOR AXIS (uT)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (uT)	HORIZONTAL COMP (uT)		
-164.0	-50.00	.76	.036	.71	.28	.76	
-147.6	-45.00	.93	.040	.86	.38	.94	
-131.2	-40.00	1.17	.046	1.05	.53	1.18	
-114.8	-35.00	1.52	.052	1.31	.76	1.52	
-98.4	-30.00	2.02	.060	1.66	1.16	2.03	
-82.0	-25.00	2.81	.069	2.12	1.85	2.82	
-65.6	-20.00	4.12	.081	2.66	3.16	4.13	
-49.2	-15.00	6.44	.094	2.95	5.76	6.47	
-32.8	-10.00	10.81	.100	1.47	10.76	10.86	
-16.4	-5.00	18.44	.069	9.65	15.76	18.48	
.0	.00	24.49	.022	24.48	.81	24.50	
16.4	5.00	19.07	.086	10.66	15.90	19.14	
32.8	10.00	11.37	.094	1.33	11.34	11.42	
49.2	15.00	6.82	.083	3.06	6.13	6.85	
65.6	20.00	4.39	.070	2.83	3.37	4.40	
82.0	25.00	3.01	.060	2.28	1.98	3.02	
98.4	30.00	2.18	.052	1.80	1.24	2.18	
114.8	35.00	1.65	.046	1.43	.82	1.65	
131.2	40.00	1.29	.041	1.15	.57	1.29	
147.6	45.00	1.03	.037	.95	.41	1.03	
164.0	50.00	.85	.034	.79	.31	.85	

รูปที่ 4.9 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

จากการทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส ACB พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 0.69 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 24.50  $\mu$ T

4.6.3 การทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส BAC

BNDL #	CIRC #	VOLTAGE (kV)	ANGLE (DEG)	CURRENT LOAD (A)	ANGLE (DEG)	# OF COND	X (m)	Y (m)	SAG (m)	PH
1	1	22.0	0.	400.	0.	1	1.00	9.85	.70	A
2	1	22.0	240.	400.	240.	1	.40	9.85	.70	B
3	1	22.0	120.	400.	120.	1	-1.00	9.85	.70	C
4	2	22.0	240.	400.	240.	1	1.00	11.85	.70	B
5	2	22.0	0.	400.	0.	1	.40	11.85	.70	A
6	2	22.0	120.	400.	120.	1	-1.00	11.85	.70	C
7	1	0.	0.	0.	0.	1	.00	13.85	.85	GND

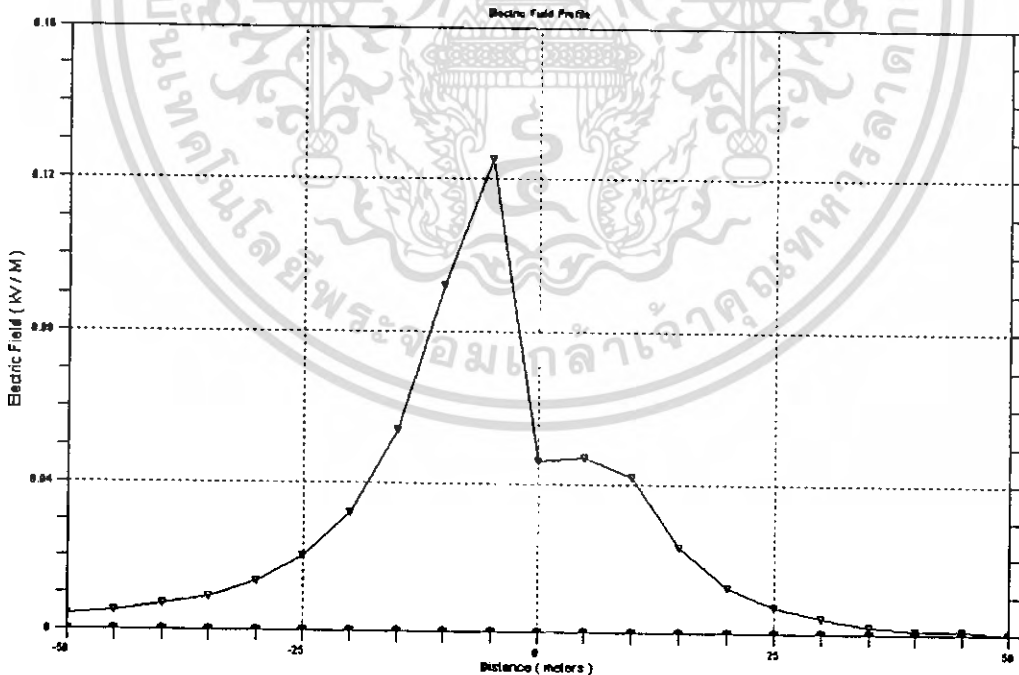
\*\*\*\*\*  
 \* MINIMUM GROUND CLEARANCE = 9.15 meter \*  
 \* POWER SYSTEM FREQUENCY = 50. Hz \*  
 \* SOIL RESISTIVITY = 100. ohm meter \*  
 \*\*\*\*\*

SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES						
BNDL #	CONDUCTOR NAME	DIAMETER (cm)	SPACING (cm)	DC RESIST (ohm/km)	AC RESIST (ohm/km)	AC REACT (ohm/km)
1	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
2	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
3	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
4	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
5	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
6	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
7	1/2HS	1.260	.000	2.1380	2.2190	.7710

รูปที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้มาใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE (feet)	LATERAL DISTANCE (meters)	MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.004	.001	.004	.000	.004
-147.6	-45.00	.005	.001	.005	.000	.005
-131.2	-40.00	.007	.001	.007	.000	.007
-114.8	-35.00	.009	.001	.009	.001	.009
-98.4	-30.00	.013	.001	.013	.001	.013
-82.0	-25.00	.020	.000	.020	.002	.020
-65.6	-20.00	.032	.000	.032	.003	.032
-49.2	-15.00	.055	.001	.054	.006	.055
-32.8	-10.00	.093	.003	.092	.009	.092
-16.4	-5.00	.125	.003	.125	.011	.123
0.0	0.00	.053	.053	.046	.026	.046
16.4	5.00	.048	.034	.047	.006	.046
32.8	10.00	.042	.018	.042	.004	.042
49.2	15.00	.023	.013	.023	.003	.023
65.6	20.00	.012	.011	.012	.002	.012
82.0	25.00	.007	.011	.007	.001	.007
98.4	30.00	.004	.012	.004	.000	.004
114.8	35.00	.002	.017	.002	.000	.002
131.2	40.00	.001	.024	.001	.000	.001
147.6	45.00	.001	.039	.001	.000	.001
164.0	50.00	.000	.066	.000	.000	.000

รูปที่ 4.12 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

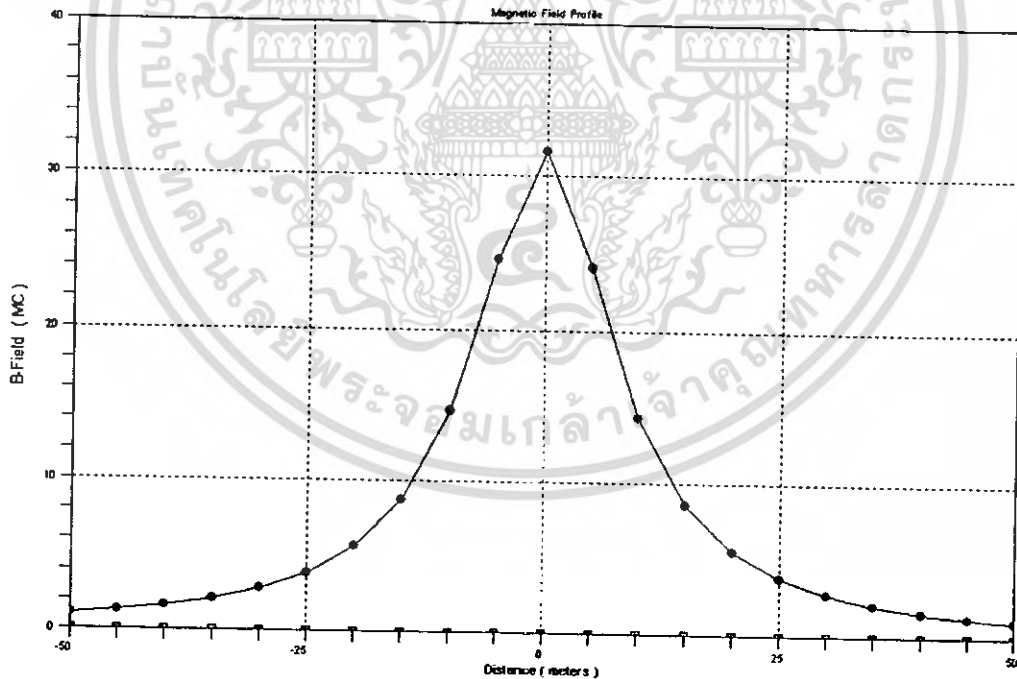


รูปที่ 4.13 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE (meters) (feet)		AC MAGNETIC FIELD				
		MAJOR AXIS (uT)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (uT)	HORIZONTAL COMP (uT)	RMS RESULTANT (uT)
-164.0	-50.00	1.05	.016	.98	.38	1.05
-147.6	-45.00	1.28	.018	1.18	.51	1.28
-131.2	-40.00	1.61	.019	1.44	.72	1.61
-114.8	-35.00	2.07	.021	1.79	1.04	2.07
-98.4	-30.00	2.76	.023	2.26	1.58	2.76
-82.0	-25.00	3.82	.025	2.87	2.52	3.83
-65.6	-20.00	5.60	.028	3.57	4.31	5.60
-49.2	-15.00	8.74	.032	3.81	7.87	8.75
-32.8	-10.00	14.61	.037	1.04	14.58	14.62
-16.4	-5.00	24.54	.037	13.83	20.29	24.56
0	0.00	31.58	.021	31.57	1.08	31.59
16.4	5.00	24.04	.013	12.68	20.43	24.04
32.8	10.00	14.27	.028	1.30	14.22	14.28
49.2	15.00	8.57	.027	3.86	7.66	8.58
65.6	20.00	5.52	.023	3.56	4.22	5.52
82.0	25.00	3.79	.019	2.86	2.48	3.79
98.4	30.00	2.74	.016	2.26	1.56	2.74
114.8	35.00	2.07	.014	1.79	1.03	2.07
131.2	40.00	1.61	.012	1.44	.72	1.61
147.6	45.00	1.29	.011	1.18	.52	1.29
164.0	50.00	1.05	.010	.98	.38	1.05

รูปที่ 4.14 ค่าสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m



รูปที่ 4.15 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

จากการทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส BAC พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 0.125 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 31.59  $\mu$ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.4 การทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ  
เฟส ABC ขนาน กับเฟส CBA

BNDL #	CIRC #	VOLTAGE (kV)	ANGLE (DEG)	CURRENT LOAD (A)	ANGLE (DEG)	# OF COND	BUNDLE COORDINATES X (m)	Y (m)	SAG (m)	PH
1	1	22.0	0	400	0	1	1.00	9.85	.70	A
2	1	22.0	240	400	240	1	.40	9.85	.70	B
3	1	22.0	120	400	120	1	-1.00	9.85	.70	C
4	2	22.0	120	400	120	1	1.00	11.85	.70	C
5	2	22.0	240	400	240	1	.40	11.85	.70	B
6	2	22.0	0	400	0	1	-1.00	11.85	.70	A
7	1	0	0	0	0	1	.00	13.85	.70	GND

MINIMUM GROUND CLEARANCE = 9.15 meter  
POWER SYSTEM FREQUENCY = 50 Hz  
SOIL RESISTIVITY = 100 ohm meter

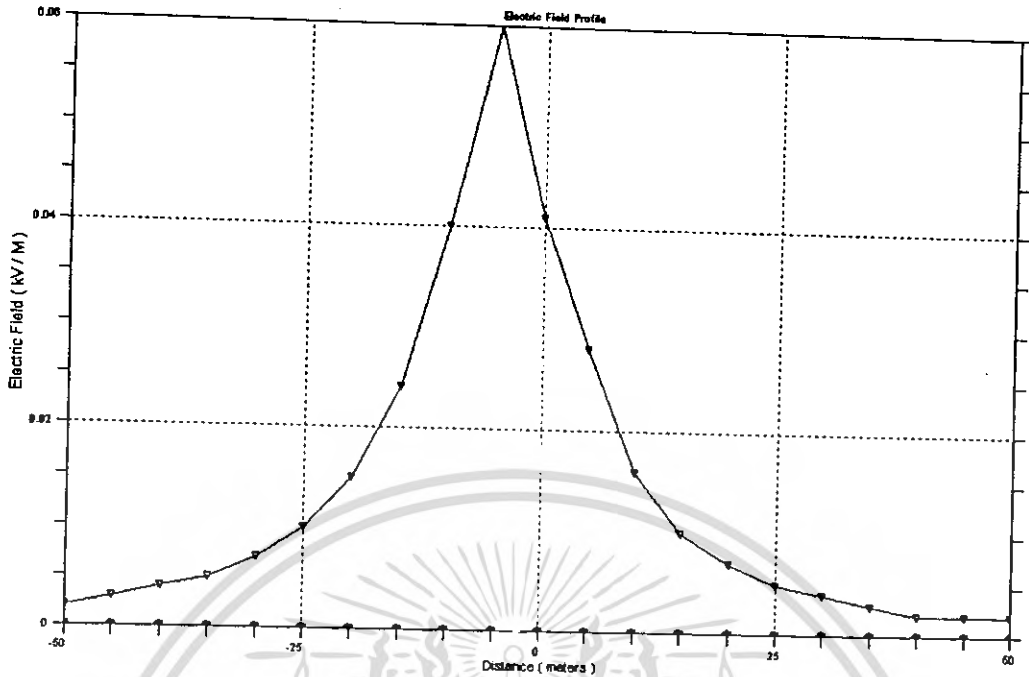
BNDL #	CONDUCTOR NAME	DIAMETER (cm)	SPACING (cm)	DC RESIST (ohm/km)	AC RESIST (ohm/km)	AC REACT (ohm/km)
1	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
2	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
3	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
4	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
5	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
6	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
7	1/2HS	1.260	.000	2.1380	2.2190	.7710

รูปที่ 4.16 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

LATERAL DISTANCE (feet)	LATERAL DISTANCE (meters)	MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.002	.000	.002	.000	.002
-147.6	-45.00	.003	.000	.003	.000	.003
-131.2	-40.00	.004	.001	.004	.000	.004
-114.8	-35.00	.005	.002	.005	.000	.005
-98.4	-30.00	.007	.004	.007	.000	.007
-82.0	-25.00	.010	.007	.010	.001	.010
-65.6	-20.00	.015	.014	.015	.001	.015
-49.2	-15.00	.024	.027	.024	.003	.024
-32.8	-10.00	.040	.045	.040	.005	.040
-16.4	-5.00	.060	.029	.060	.003	.060
0	.00	.041	.176	.041	.010	.041
16.4	5.00	.028	.037	.028	.002	.027
32.8	10.00	.016	.071	.016	.002	.016
49.2	15.00	.010	.047	.010	.001	.010
65.6	20.00	.007	.018	.007	.000	.007
82.0	25.00	.005	.005	.005	.000	.005
98.4	30.00	.004	.000	.004	.000	.004
114.8	35.00	.003	.002	.003	.000	.003
131.2	40.00	.002	.002	.002	.000	.002
147.6	45.00	.002	.002	.002	.000	.002
164.0	50.00	.002	.002	.002	.000	.002

รูปที่ 4.17 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

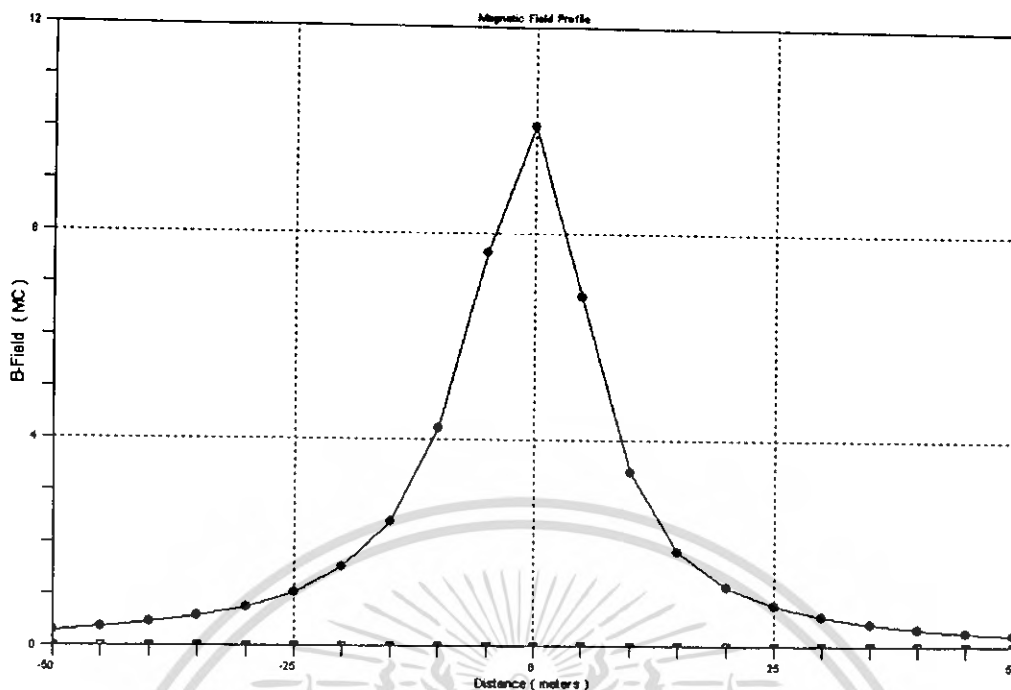


รูปที่ 4.18 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

LATERAL DISTANCE (meters) (feet)		AC MAGNETIC FIELD					RMS RESULTANT (uT)
		MAJOR AXIS (uT)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (uT)	HORIZONTAL COMP (uT)		
-164.0	-50.00	.29	.147	.28	.10	.30	
-147.6	-45.00	.35	.165	.33	.14	.36	
-131.2	-40.00	.44	.186	.40	.20	.45	
-114.8	-35.00	.56	.212	.50	.28	.58	
-98.4	-30.00	.75	.242	.64	.43	.77	
-82.0	-25.00	1.03	.279	.83	.68	1.07	
-65.6	-20.00	1.52	.322	1.09	1.16	1.59	
-49.2	-15.00	2.41	.366	1.44	2.12	2.56	
-32.8	-10.00	4.20	.382	1.74	4.14	4.49	
-16.4	-5.00	7.62	.307	4.22	6.77	7.97	
.0	.00	10.07	.118	10.02	1.59	10.14	
16.4	5.00	6.76	.136	2.08	6.50	6.82	
32.8	10.00	3.37	.340	1.64	3.16	3.56	
49.2	15.00	1.83	.404	1.25	1.53	1.98	
65.6	20.00	1.14	.375	.86	.87	1.22	
82.0	25.00	.78	.326	.62	.53	.82	
98.4	30.00	.56	.283	.47	.35	.58	
114.8	35.00	.42	.247	.36	.24	.43	
131.2	40.00	.33	.220	.29	.17	.33	
147.6	45.00	.26	.198	.23	.12	.26	
164.0	50.00	.21	.180	.19	.09	.21	

รูปที่ 4.19 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

จากการทดลองที่แรงดัน = 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส CBA พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 0.06 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 10.14  $\mu$ T

4.6.5 การทดลองที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส ABC

BNDL #	CIRC #	VOLTAGE (kV)	ANGLE (DEG)	CURRENT (A)	ANGLE (DEG)	# OF COND	X (m)	Y (m)	SAG (m)	PH
1	1	33.0	0	400	0	1	1.00	9.85	.70	A
2	1	33.0	240	400	240	1	.40	9.85	.70	B
3	1	33.0	120	400	120	1	-1.00	9.85	.70	C
4	2	33.0	0	400	0	1	1.00	11.85	.70	A
5	2	33.0	240	400	240	1	.40	11.85	.70	B
6	2	33.0	120	400	120	1	-1.00	11.85	.70	C
7	1	0	0	0	0	1	.00	13.85	.85	GND

\* MINIMUM GROUND CLEARANCE = 9.15 meter \*  
 \* POWER SYSTEM FREQUENCY = 50 Hz \*  
 \* SOIL RESISTIVITY = 100 ohm meter \*

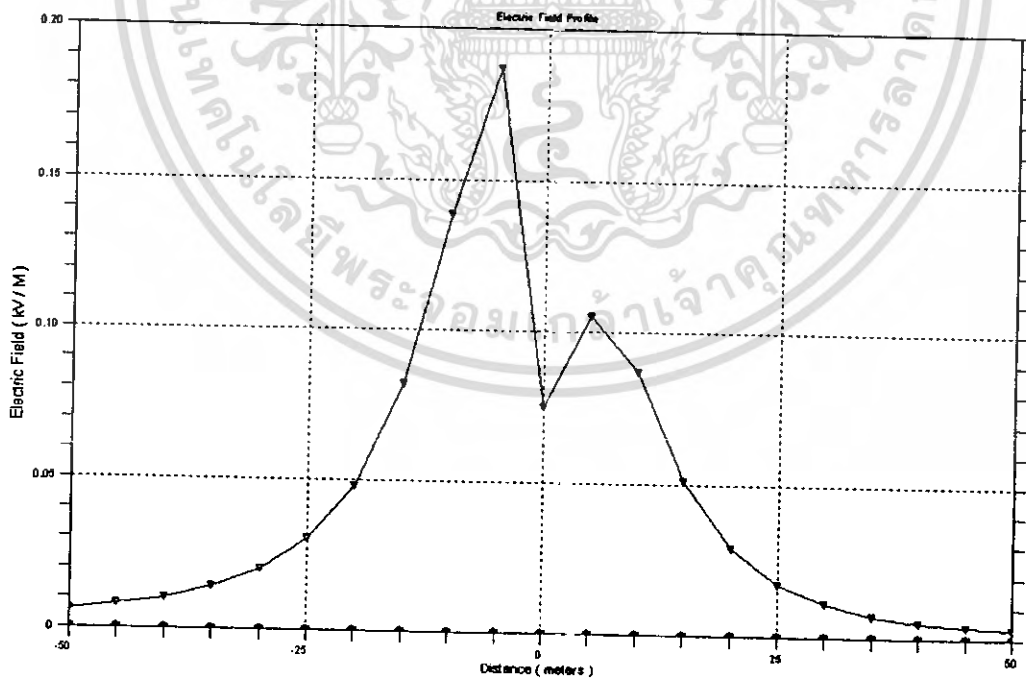
SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES						
BNDL #	CONDUCTOR NAME	DIAMETER (cm)	SPACING (cm)	DC RESIST (ohm/km)	AC RESIST (ohm/km)	AC REACT (ohm/km)
1	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
2	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
3	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
4	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
5	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
6	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
7	1/2HS	1.260	.000	2.1380	2.2190	.7710

รูปที่ 4.21 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE (feet)	LATERAL DISTANCE (meters)	MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.006	.004	.006	.000	.006
-147.6	-45.00	.008	.005	.008	.000	.008
-131.2	-40.00	.010	.005	.010	.001	.010
-114.8	-35.00	.014	.005	.014	.001	.014
-98.4	-30.00	.020	.005	.020	.002	.020
-82.0	-25.00	.030	.005	.030	.003	.030
-65.6	-20.00	.049	.005	.048	.005	.049
-49.2	-15.00	.082	.004	.082	.009	.082
-32.8	-10.00	.140	.002	.139	.013	.139
-16.4	-5.00	.187	.012	.187	.003	.185
.0	.00	.081	.316	.075	.042	.074
16.4	5.00	.105	.054	.105	.009	.103
32.8	10.00	.088	.002	.087	.008	.087
49.2	15.00	.051	.011	.051	.006	.051
65.6	20.00	.029	.015	.029	.003	.029
82.0	25.00	.017	.017	.017	.002	.017
98.4	30.00	.011	.019	.011	.001	.011
114.8	35.00	.007	.019	.007	.001	.007
131.2	40.00	.005	.019	.005	.000	.005
147.6	45.00	.004	.019	.004	.000	.004
164.0	50.00	.003	.018	.003	.000	.003

รูปที่ 4.22 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

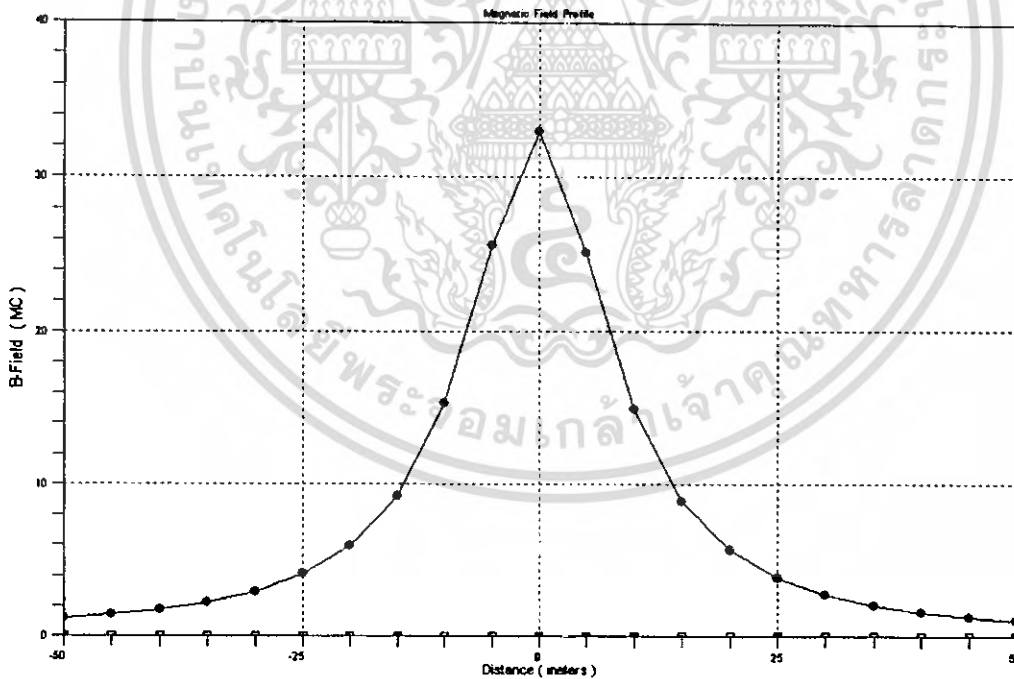


รูปที่ 4.23 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE (meters) (feet)		AC MAGNETIC FIELD				
		MAJOR AXIS ( $\mu\text{T}$ )	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP ( $\mu\text{T}$ )	HORIZONTAL COMP ( $\mu\text{T}$ )	RMS RESULTANT ( $\mu\text{T}$ )
-164.0	-50.00	1.15	.000	1.07	.42	1.15
-147.6	-45.00	1.40	.000	1.29	.56	1.40
-131.2	-40.00	1.75	.000	1.57	.77	1.75
-114.8	-35.00	2.24	.001	1.94	1.11	2.24
-98.4	-30.00	2.96	.002	2.44	1.68	2.96
-82.0	-25.00	4.09	.004	3.09	2.68	4.09
-65.6	-20.00	5.94	.006	3.82	4.55	5.94
-49.2	-15.00	9.23	.011	4.10	8.27	9.23
-32.8	-10.00	15.33	.019	1.16	15.28	15.33
-16.4	-5.00	25.60	.034	14.08	21.40	25.62
0	0.00	32.93	.048	32.93	1.59	32.96
16.4	5.00	25.12	.038	13.72	21.06	25.14
32.8	10.00	14.88	.021	1.10	14.84	14.88
49.2	15.00	8.88	.011	3.90	7.98	8.88
65.6	20.00	5.68	.006	3.62	4.37	5.68
82.0	25.00	3.87	.003	2.91	2.56	3.87
98.4	30.00	2.78	.001	2.28	1.60	2.78
114.8	35.00	2.09	.001	1.80	1.05	2.09
131.2	40.00	1.62	.002	1.44	.72	1.62
147.6	45.00	1.29	.003	1.18	.52	1.29
164.0	50.00	1.04	.004	.97	.38	1.04

รูปที่ 4.24 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m



รูปที่ 4.25 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

จากการทดลองที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส ABC พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 0.185 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 32.96  $\mu\text{T}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.6 การทดลองที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบเฟส ABC ขนาน กับเฟส ACB

BNDL #	CIRC #	VOLTAGE (kV)	ANGLE (DEG)	CURRENT (A)	LOAD ANGLE (DEG)	# OF COND	BUNDLE K (m)	COORDINATES Y (m)	SAG (m)	PH
1	1	33.0	0	400	0	1	1.00	9.85	.70	A
2	1	33.0	240	400	240	1	.40	9.85	.70	B
3	1	33.0	120	400	120	1	-1.00	9.85	.70	C
4	2	33.0	0	400	0	1	1.00	11.85	.70	A
5	2	33.0	120	400	120	1	.40	11.85	.70	C
6	2	33.0	240	400	240	1	-1.00	11.85	.70	B
7	1	0	0	0	0	1	0.00	13.85	.85	GND

\* MINIMUM GROUND CLEARANCE = 9.15 meter \*  
 \* POWER SYSTEM FREQUENCY = 50 Hz \*  
 \* SOIL RESISTIVITY = 100 ohm meter \*

SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES

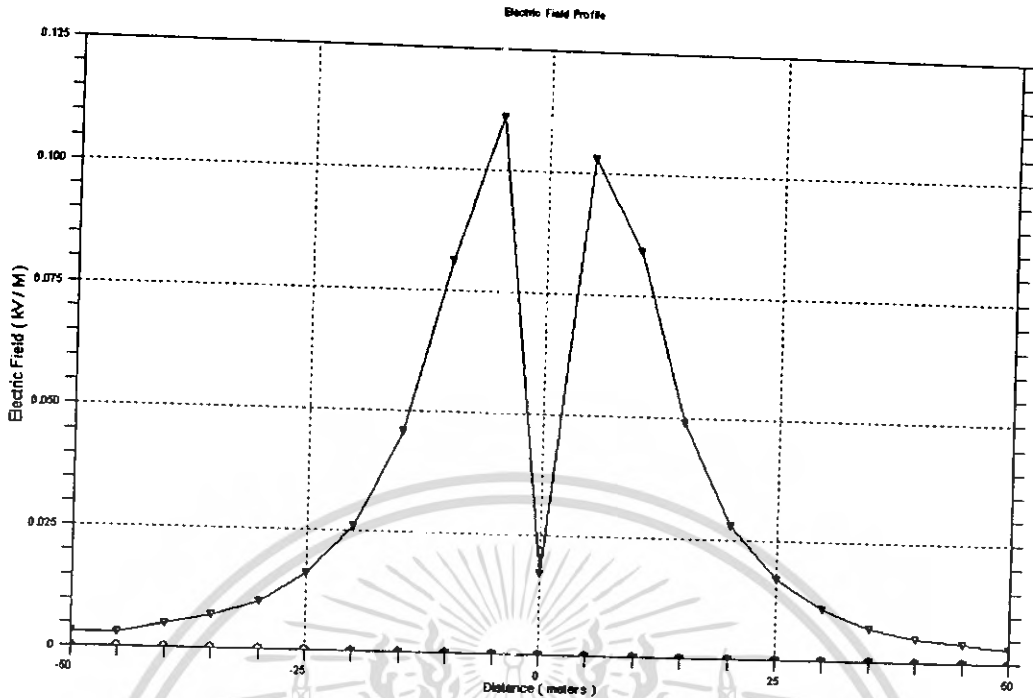
BNDL #	CONDUCTOR NAME	DIAMETER (cm)	SPACING (cm)	DC RESIST (ohm/km)	AC RESIST (ohm/km)	AC REACT (ohm/km)
1	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
2	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
3	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
4	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
5	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
6	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
7	1/2HS	1.260	.000	2.1380	2.2190	.7710

รูปที่ 4.26 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

LATERAL DISTANCE (feet)	LATERAL DISTANCE (meters)	MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.003	.005	.003	.000	.003
-147.6	-45.00	.003	.005	.003	.000	.003
-131.2	-40.00	.005	.006	.005	.000	.005
-114.8	-35.00	.007	.006	.007	.001	.007
-98.4	-30.00	.010	.007	.010	.001	.010
-82.0	-25.00	.016	.009	.016	.002	.016
-65.6	-20.00	.026	.012	.026	.003	.026
-49.2	-15.00	.046	.019	.046	.005	.046
-32.8	-10.00	.081	.028	.081	.009	.081
-16.4	-5.00	.111	.034	.111	.004	.109
.0	.00	.036	.300	.017	.033	.017
16.4	5.00	.104	.003	.103	.006	.101
32.8	10.00	.085	.008	.084	.008	.084
49.2	15.00	.050	.003	.049	.006	.049
65.6	20.00	.028	.000	.028	.003	.028
82.0	25.00	.017	.001	.017	.002	.017
98.4	30.00	.011	.002	.011	.001	.011
114.8	35.00	.007	.003	.007	.001	.007
131.2	40.00	.005	.003	.005	.000	.005
147.6	45.00	.004	.003	.004	.000	.004
164.0	50.00	.003	.003	.003	.000	.003

รูปที่ 4.27 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

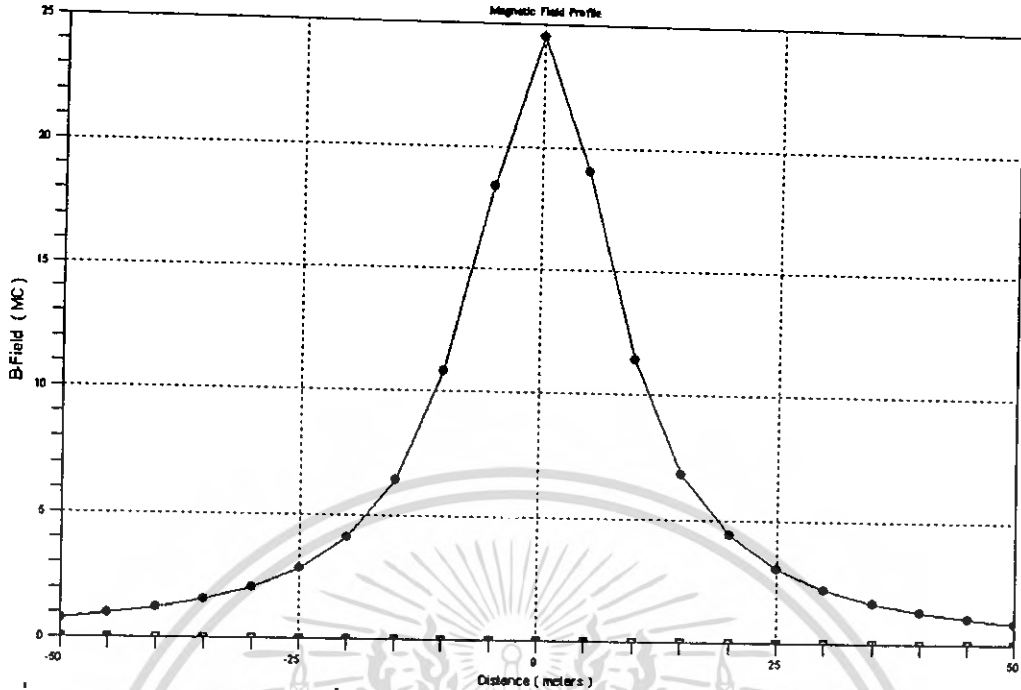


รูปที่ 4.28 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

LATERAL DISTANCE		AC MAGNETIC FIELD				
(meters)	(feet)	MAJOR AXIS (uT)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (uT)	HORIZONTAL COMP (uT)	RMS RESULTANT (uT)
-164.0	-50.00	.76	.036	.71	.28	.76
-147.6	-45.00	.93	.040	.86	.38	.94
-131.2	-40.00	1.17	.046	1.05	.53	1.18
-114.8	-35.00	1.52	.052	1.31	.76	1.52
-98.4	-30.00	2.02	.060	1.66	1.16	2.03
-82.0	-25.00	2.81	.069	2.12	1.85	2.82
-65.6	-20.00	4.12	.081	2.66	3.16	4.13
-49.2	-15.00	6.44	.094	2.95	5.76	6.47
-32.8	-10.00	10.81	.100	1.47	10.76	10.86
-16.4	-5.00	18.44	.069	9.65	15.76	18.48
.0	.00	24.49	.022	24.48	.81	24.50
16.4	5.00	19.07	.086	10.66	15.90	19.14
32.8	10.00	11.37	.094	1.33	11.34	11.42
49.2	15.00	6.82	.083	3.06	6.13	6.85
65.6	20.00	4.39	.070	2.83	3.37	4.40
82.0	25.00	3.01	.060	2.28	1.98	3.02
98.4	30.00	2.18	.052	1.80	1.24	2.18
114.8	35.00	1.65	.046	1.43	.82	1.65
131.2	40.00	1.29	.041	1.15	.57	1.29
147.6	45.00	1.03	.037	.95	.41	1.03
164.0	50.00	.85	.034	.79	.31	.85

รูปที่ 4.29 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

จากการทดลองที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส ACB พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 0.111 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 24.50  $\mu$ T

4.6.7 การทดลองที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส BAC

```

*****
|BNDL|CIRC| VOLTAGE | CURRENT | # | BUNDLE COORDINATES |
| # | # | (KV) | (DEG) | (A) | (DEG) | COND | X | Y | SAG | PH |
*****
| 1 | 1 | 33.0 | 0 | 400. | 0 | 1 | 1.00 | 9.85 | .70 | A |
| 2 | 1 | 33.0 | 240 | 400. | 240 | 1 | .40 | 9.85 | .70 | B |
| 3 | 1 | 33.0 | 120 | 400. | 120 | 1 | -1.00 | 9.85 | .70 | C |
| 4 | 2 | 33.0 | 240 | 400. | 240 | 1 | 1.00 | 11.85 | .70 | B |
| 5 | 2 | 33.0 | 0 | 400. | 0 | 1 | .40 | 11.85 | .70 | A |
| 6 | 2 | 33.0 | 120 | 400. | 120 | 1 | -1.00 | 11.85 | .70 | C |
| 7 | 1 | .0 | 0 | 0. | 0 | 1 | .00 | 13.85 | .85 | GND |
*****
# MINIMUM GROUND CLEARANCE = 9.15 meter #
# POWER SYSTEM FREQUENCY = 50 Hz #
# SOIL RESISTIVITY = 100. ohm meter #
*****

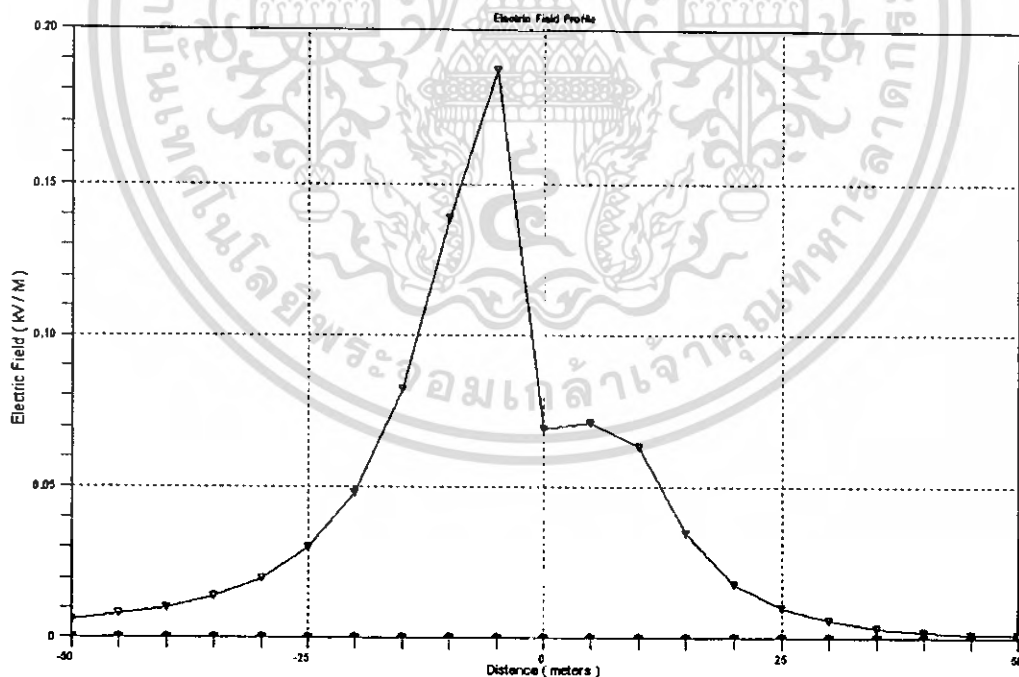
*****
# SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES #
*****
|BNDL| CONDUCTOR | DIAMETER | SPACING | DC RESIST | AC RESIST | AC REACT |
| # | NAME | (cm) | (cm) | (ohm/km) | (ohm/km) | (ohm/km) |
*****
| 1 | RATCH | 1.540 | .000 | .2350 | .2350 | .2980 |
| 2 | RATCH | 1.540 | .000 | .2350 | .2350 | .2980 |
| 3 | RATCH | 1.540 | .000 | .2350 | .2350 | .2980 |
| 4 | RATCH | 1.540 | .000 | .2350 | .2350 | .2980 |
| 5 | RATCH | 1.540 | .000 | .2350 | .2350 | .2980 |
| 6 | RATCH | 1.540 | .000 | .2350 | .2350 | .2980 |
| 7 | 1/2HS | 1.260 | .000 | 2.1380 | 2.2190 | .7710 |
*****
    
```

รูปที่ 4.31 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)	MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.006	.001	.006	.000
-147.6	-45.00	.008	.001	.008	.000
-131.2	-40.00	.010	.001	.010	.001
-114.8	-35.00	.014	.001	.014	.001
-98.4	-30.00	.020	.001	.020	.002
-82.0	-25.00	.030	.000	.030	.003
-65.6	-20.00	.049	.000	.048	.005
-49.2	-15.00	.082	.001	.082	.009
-32.8	-10.00	.139	.003	.139	.013
-16.4	-5.00	.187	.003	.187	.013
.0	.00	.079	.053	.069	.002
16.4	5.00	.072	.034	.071	.039
32.8	10.00	.063	.018	.063	.009
49.2	15.00	.035	.013	.035	.006
65.6	20.00	.019	.011	.018	.004
82.0	25.00	.010	.011	.010	.002
98.4	30.00	.006	.012	.006	.001
114.8	35.00	.003	.016	.003	.001
131.2	40.00	.002	.024	.002	.000
147.6	45.00	.001	.039	.001	.000
164.0	50.00	.001	.066	.001	.000

รูปที่ 4.32 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

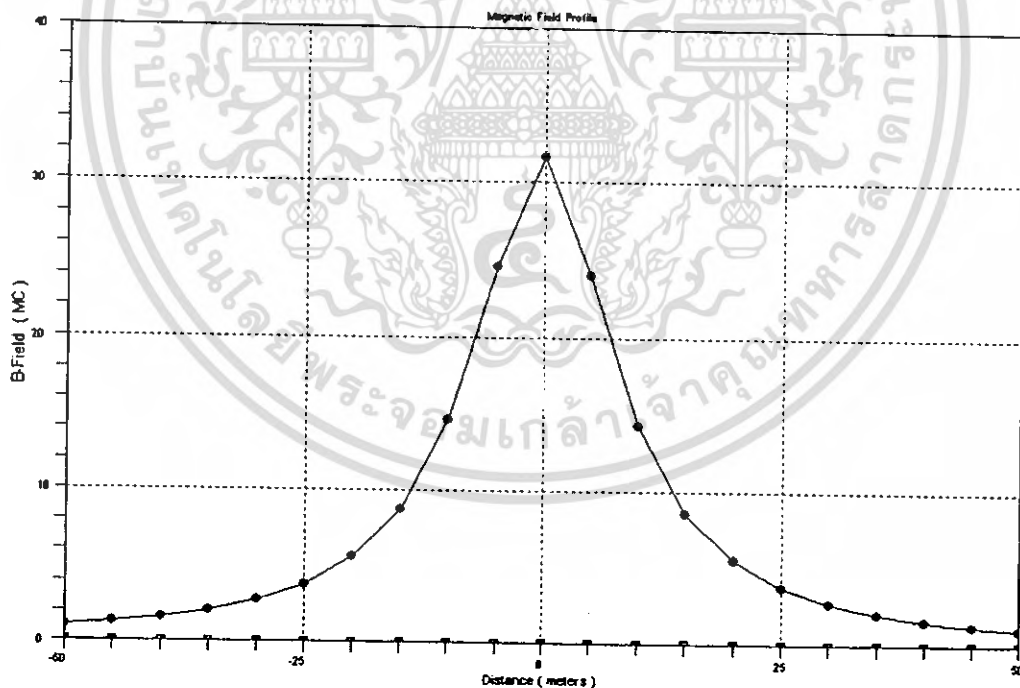


รูปที่ 4.33 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE (meters) (feet)		AC MAGNETIC FIELD				RMS RESULTANT (uT)
MAJOR AXIS (uT)	MINOR MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (uT)	HORIZONTAL COMP (uT)			
-164.0	-50.00	1.05	.016	.98	.38	1.05
-147.6	-45.00	1.28	.018	1.18	.51	1.28
-131.2	-40.00	1.61	.019	1.44	.72	1.61
-114.8	-35.00	2.07	.021	1.79	1.04	2.07
-98.4	-30.00	2.76	.023	2.26	1.58	2.76
-82.0	-25.00	3.82	.025	2.87	2.52	3.82
-65.6	-20.00	5.60	.028	3.57	4.31	5.60
-49.2	-15.00	8.74	.032	3.81	7.87	8.74
-32.8	-10.00	14.61	.037	1.04	14.58	14.61
-16.4	-5.00	24.54	.037	13.83	20.29	24.54
0	0.00	31.58	.021	31.57	1.08	31.59
16.4	5.00	24.04	.013	12.68	20.43	24.04
32.8	10.00	14.27	.028	1.30	14.22	14.28
49.2	15.00	8.57	.027	3.86	7.66	8.58
65.6	20.00	5.52	.023	3.56	4.22	5.52
82.0	25.00	3.79	.019	2.86	2.48	3.79
98.4	30.00	2.74	.016	2.26	1.56	2.74
114.8	35.00	2.07	.014	1.79	1.03	2.07
131.2	40.00	1.61	.012	1.44	.72	1.61
147.6	45.00	1.29	.011	1.18	.52	1.29
164.0	50.00	1.05	.010	.98	.38	1.05

รูปที่ 4.34 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m



รูปที่ 4.35 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน= 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

จากการทดลองที่แรงดัน= 22 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส BAC พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 0.187 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 31.59  $\mu$ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.8 การทดลองที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ  
เฟส ABC ขนาน กับเฟส CBA

BNDL #	CIRC #	VOLTAGE		CURRENT		# OF COND	BUNDLE COORDINATES			
		(kV)	(DEG)	LOAD (A)	ANGLE (DEG)		X (m)	Y (m)	SAG (m)	PH
1	1	33.0	0.	400.	0.	1	1.00	9.85	.70	A
2	1	33.0	240.	400.	240.	1	.40	9.85	.70	B
3	1	33.0	120.	400.	120.	1	-1.00	9.85	.70	C
4	2	33.0	120.	400.	120.	1	1.00	11.85	.70	C
5	2	33.0	240.	400.	240.	1	.40	11.85	.70	B
6	2	33.0	0.	400.	0.	1	-1.00	11.85	.70	A
7	1	0.	0.	0.	0.	1	.00	13.85	.85	GND

MINIMUM GROUND CLEARANCE = 9.15 meter  
POWER SYSTEM FREQUENCY = 50. Hz  
SOIL RESISTIVITY = 100. ohm meter

SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES

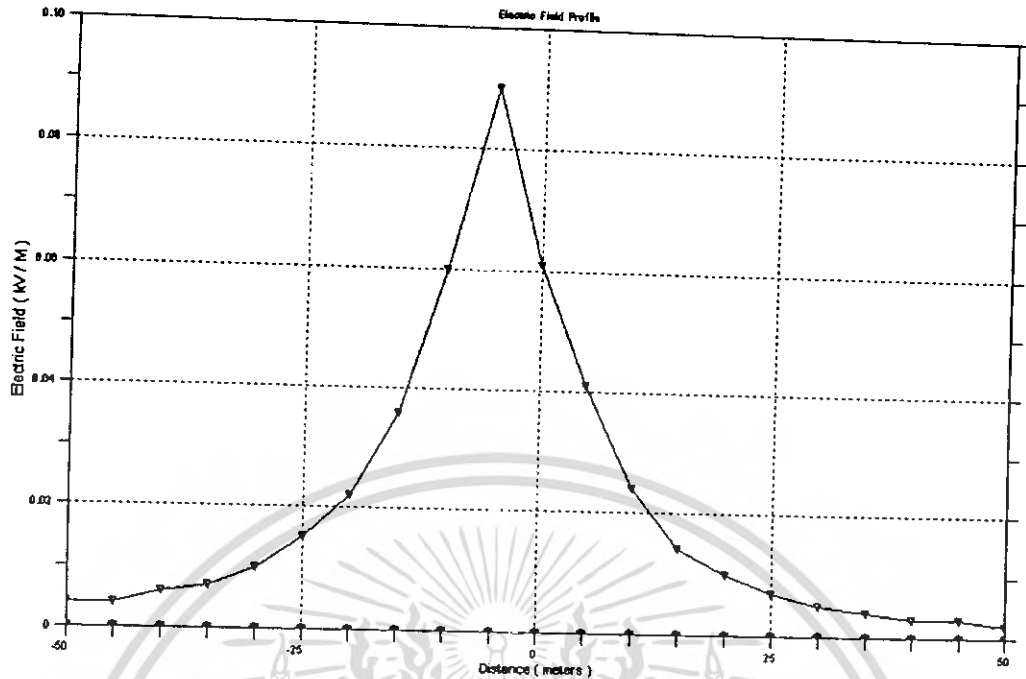
BNDL #	CONDUCTOR NAME	DIAMETER (cm)	SPACING (cm)	DC RESIST (ohm/km)	AC RESIST (ohm/km)	AC REACT (ohm/km)
1	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
2	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
3	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
4	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
5	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
6	RATCH	1.540	.000	.2350	.2350	.2980
7	1/2HS	1.260	.000	2.1360	2.2190	.7710

รูปที่ 4.36 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

LATERAL DISTANCE (feet)	LATERAL DISTANCE (meters)	MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.004	.000	.004	.000	.004
-147.6	-45.00	.004	.000	.004	.000	.004
-131.2	-40.00	.006	.001	.006	.000	.006
-114.8	-35.00	.007	.002	.007	.000	.007
-98.4	-30.00	.010	.004	.010	.001	.010
-82.0	-25.00	.015	.007	.015	.001	.015
-65.6	-20.00	.022	.014	.022	.002	.022
-49.2	-15.00	.036	.027	.036	.004	.036
-32.8	-10.00	.060	.045	.060	.007	.060
-16.4	-5.00	.090	.029	.090	.004	.089
.0	.00	.062	.176	.061	.015	.061
16.4	5.00	.041	.037	.041	.003	.041
32.8	10.00	.024	.071	.024	.003	.024
49.2	15.00	.014	.047	.014	.001	.014
65.6	20.00	.010	.018	.010	.001	.010
82.0	25.00	.007	.005	.007	.000	.007
98.4	30.00	.005	.000	.005	.000	.005
114.8	35.00	.004	.002	.004	.000	.004
131.2	40.00	.003	.002	.003	.000	.003
147.6	45.00	.003	.002	.003	.000	.003
164.0	50.00	.002	.002	.002	.000	.002

รูปที่ 4.37 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

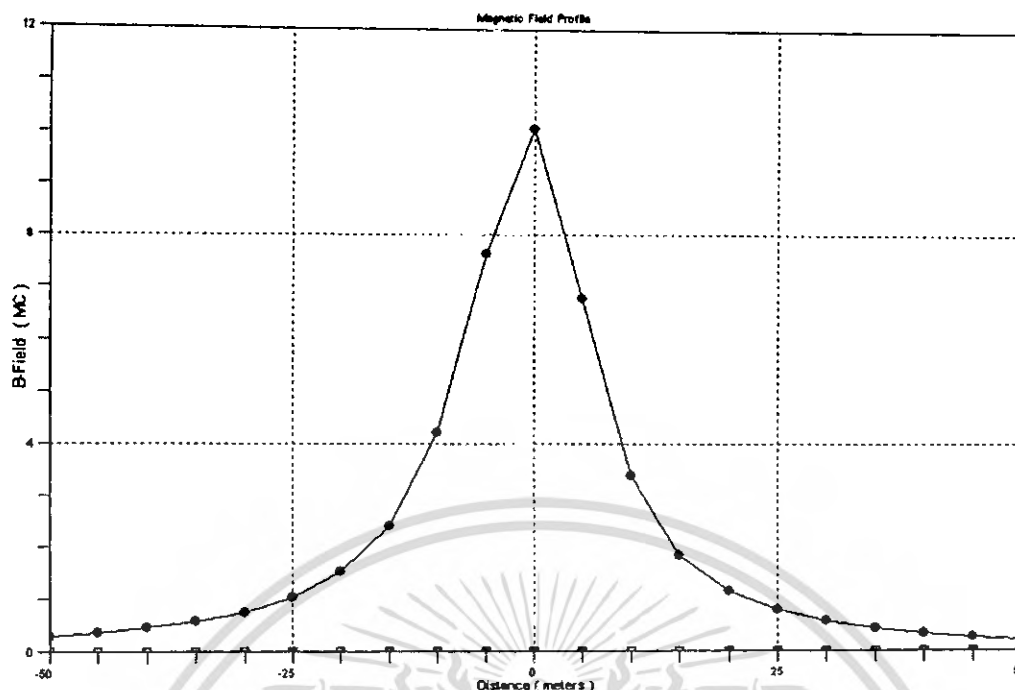


รูปที่ 4.38 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

LATERAL DISTANCE		AC MAGNETIC FIELD					RMS RESULTANT (uT)
(meters)	(feet)	MAJOR AXIS (uT)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (uT)	HORIZONTAL COMP (uT)		
-164.0	-50.00	.29	.147	.28	.10	.30	
-147.6	-45.00	.35	.165	.33	.14	.36	
-131.2	-40.00	.44	.186	.40	.20	.45	
-114.8	-35.00	.56	.212	.50	.28	.58	
-98.4	-30.00	.75	.242	.64	.43	.77	
-82.0	-25.00	1.03	.279	.83	.68	1.07	
-65.6	-20.00	1.52	.322	1.09	1.16	1.59	
-49.2	-15.00	2.41	.366	1.44	2.12	2.56	
-32.8	-10.00	4.20	.382	1.74	4.14	4.49	
-16.4	-5.00	7.62	.307	4.22	6.77	7.97	
.0	.00	10.07	.118	10.02	1.59	10.14	
16.4	5.00	6.76	.136	2.08	6.50	6.82	
32.8	10.00	3.37	.340	1.64	3.16	3.56	
49.2	15.00	1.83	.404	1.25	1.53	1.98	
65.6	20.00	1.14	.375	.86	.87	1.22	
82.0	25.00	.78	.326	.62	.53	.82	
98.4	30.00	.56	.283	.47	.35	.58	
114.8	35.00	.42	.247	.36	.24	.43	
131.2	40.00	.33	.220	.29	.17	.33	
147.6	45.00	.26	.198	.23	.12	.26	
164.0	50.00	.21	.180	.19	.09	.21	

รูปที่ 4.39 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m

จากการทดลองที่แรงดัน = 33 kV, กระแส = 400 A, ระยะ Sag = 0.70 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส CBA พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 0.09 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 10.14  $\mu$ T

4.6.9 การทดลองที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส ABC

BNDL #	CIRC #	VOLTAGE (kV)	ANGLE (DEG)	CURRENT (A)	ANGLE (DEG)	# OF COND	X (m)	Y (m)	SAG (m)	PH
1	1	115.0	0.	1300.	0.	2	2.25	17.80	.80	A
2	1	115.0	240.	1300.	240.	2	2.25	15.30	.80	B
3	1	115.0	120.	1300.	120.	2	2.25	12.80	.80	C
4	2	115.0	0.	1300.	0.	2	-2.25	17.80	.80	A
5	2	115.0	240.	1300.	240.	2	-2.25	15.30	.80	B
6	2	115.0	120.	1300.	120.	2	-2.25	12.80	.80	C
7	1	0.	0.	0.	0.	1	.00	22.00	.30	GND

\*\*\*\*\*

MINIMUM GROUND CLEARANCE = 12.00 meter \*

POWER SYSTEM FREQUENCY = 50. Hz \*

SOIL RESISTIVITY = 100. ohm meter \*

\*\*\*\*\*

SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES

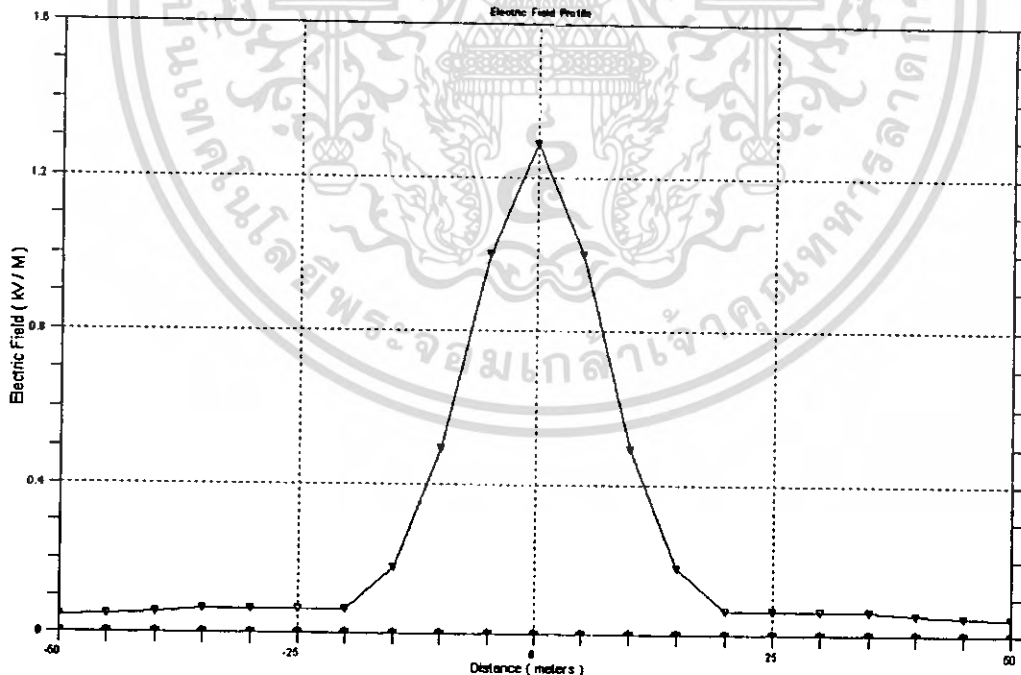
BNDL #	CONDUCTOR NAME	DIAMETER (cm)	SPACING (cm)	DC RESIST (ohm/km)	AC RESIST (ohm/km)	AC REACT (ohm/km)
1	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
2	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
3	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
4	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
5	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
6	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
7	1/2HS	1.260	.000	2.1380	2.2190	.7710

\*\*\*\*\*

รูปที่ 4.41 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)		MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.043	003	.043		
-147.6	-45.00	.049	004	.049	.001	.043
-131.2	-40.00	.055	.007	.055	.001	.049
-114.8	-35.00	.062	.014	.062	.001	.055
-98.4	-30.00	.065	.031	.065	.001	.061
-82.0	-25.00	.062	.094	.065	.002	.065
-65.6	-20.00	.065	.238	.062	.006	.061
-49.2	-15.00	.183	.080	.178	.017	.065
-32.8	-10.00	.503	.018	.495	.044	.181
-16.4	-5.00	1.004	.003	.999	.087	.498
.0	.00	1.288	.000	1.288	.098	.996
16.4	5.00	1.004	.003	.999	.000	1.279
32.8	10.00	.503	.018	.495	.098	.996
49.2	15.00	.183	.080	.178	.087	.498
65.6	20.00	.065	.238	.065	.044	.181
82.0	25.00	.062	.094	.062	.017	.065
98.4	30.00	.065	.031	.062	.006	.061
114.8	35.00	.062	.014	.062	.002	.065
131.2	40.00	.055	.007	.055	.001	.061
147.6	45.00	.049	.004	.049	.001	.055
164.0	50.00	.043	.003	.043	.001	.049

รูปที่ 4.42 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

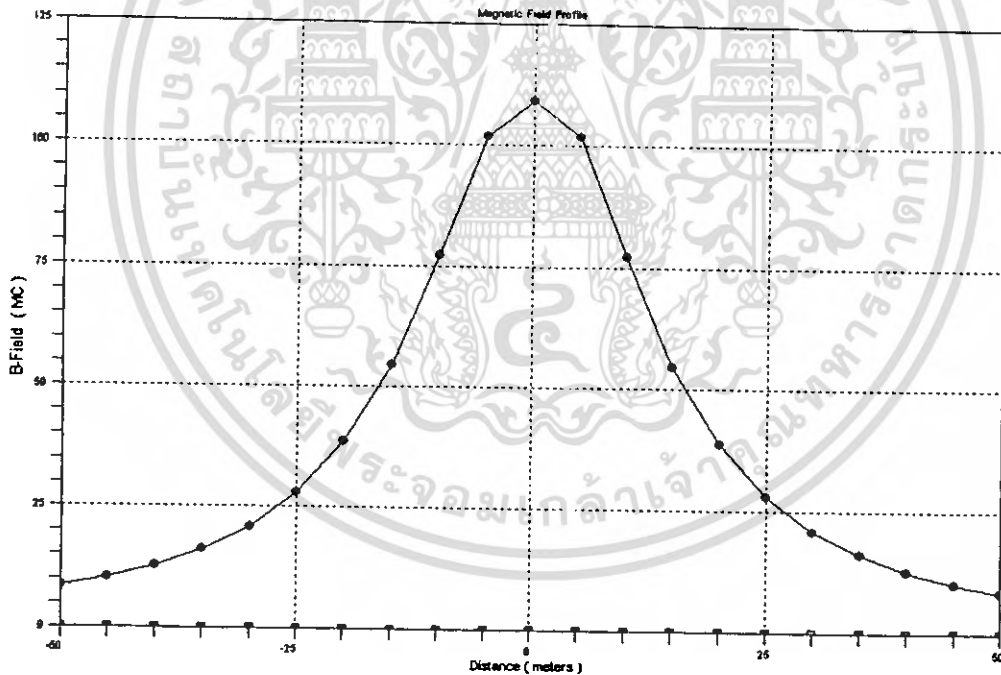


รูปที่ 4.43 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE (meters) (feet)		AC MAGNETIC FIELD				
		MAJOR AXIS (uT)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (uT)	HORIZONTAL COMP (uT)	RMS RESULTANT (uT)
-164.0	-50.00	8.42	.185	5.15	6.84	8.56
-147.6	-45.00	10.23	.171	6.59	8.01	10.38
-131.2	-40.00	12.66	.158	8.69	9.43	12.82
-114.8	-35.00	16.03	.145	11.84	11.06	16.20
-98.4	-30.00	20.83	.133	16.71	12.75	21.02
-82.0	-25.00	27.88	.121	24.42	13.86	28.08
-65.6	-20.00	38.51	.109	36.65	12.52	38.73
-49.2	-15.00	54.58	.094	54.54	5.52	54.82
-32.8	-10.00	77.26	.074	72.25	27.95	77.47
-16.4	-5.00	101.64	.041	62.19	80.50	101.73
0	0.00	109.22	.000	0.00	112.77	112.77
16.4	5.00	101.64	.041	62.19	80.50	101.73
32.8	10.00	77.26	.074	72.25	27.95	77.47
49.2	15.00	54.58	.094	54.54	5.52	54.82
65.6	20.00	38.51	.109	36.65	12.52	38.73
82.0	25.00	27.88	.121	24.42	13.86	28.08
98.4	30.00	20.83	.133	16.71	12.75	21.02
114.8	35.00	16.03	.145	11.84	11.06	16.20
131.2	40.00	12.66	.158	8.69	9.43	12.82
147.6	45.00	10.23	.171	6.59	8.01	10.38
164.0	50.00	8.42	.185	5.15	6.84	8.56

รูปที่ 4.44 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m



รูปที่ 4.45 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

จากการทดลองที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส ACB พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 1.288 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 112.77  $\mu$ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.10 การทดลองที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส ACB

BNDL #	CIRC #	VOLTAGE		CURRENT		# OF COND	BUNDLE COORDINATES			PH
		VOLTAGE (kV)	ANGLE (DEG)	LOAD (A)	ANGLE (DEG)		X (m)	Y (m)	SAG (m)	
1	1	115.0	0.	1300.	0	2	2.25	17.80	.80	A
2	1	115.0	240.	1300.	240	2	2.25	15.30	.80	B
3	1	115.0	120.	1300.	120	2	2.25	12.80	.80	C
4	2	115.0	0.	1300.	0.	2	-2.25	17.80	.80	A
5	2	115.0	120.	1300.	120	2	-2.25	15.30	.80	C
6	2	115.0	240.	1300.	240	2	-2.25	12.80	.80	B
7	1	0.	0.	0.	0.	1	.00	22.00	.30	GND

\* MINIMUM GROUND CLEARANCE = 12.00 meter \*  
 \* POWER SYSTEM FREQUENCY = 50. Hz \*  
 \* SOIL RESISTIVITY = 100. ohm meter \*

SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES

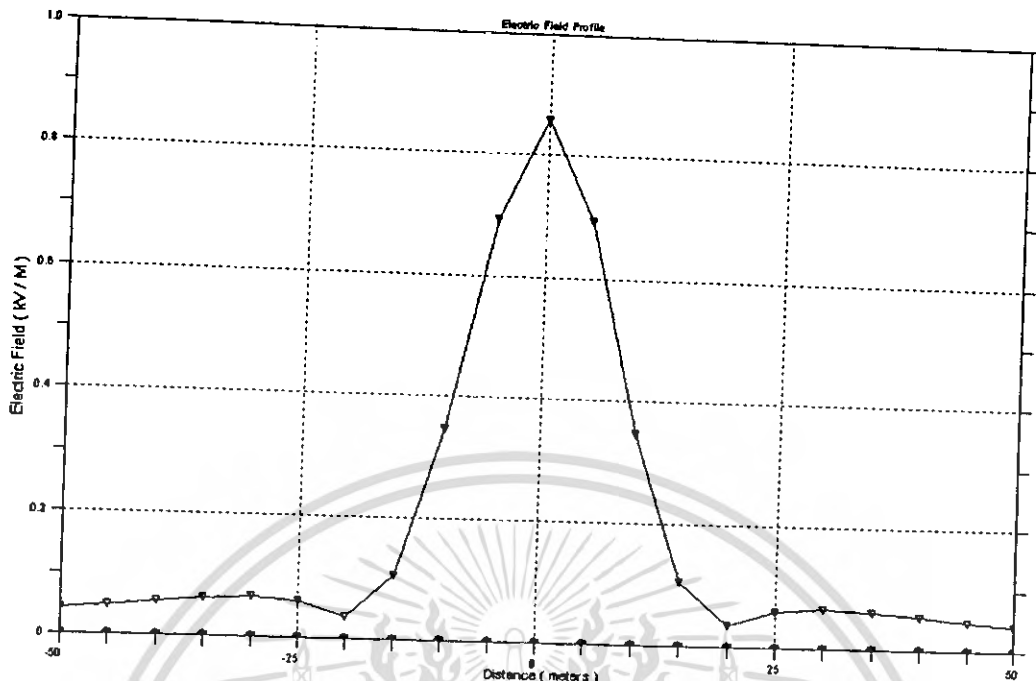
BNDL #	CONDUCTOR NAME	DIAMETER (cm)	SPACING (cm)	DC RESIST (ohm/km)	AC RESIST (ohm/km)	AC REACT (ohm/km)
1	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
2	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
3	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
4	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
5	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
6	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
7	1/2HS	1.260	.000	2.1300	2.2190	.7710

รูปที่ 4.46 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

LATERAL DISTANCE (feet)	LATERAL DISTANCE (meters)	MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.042	.000	.042	.001	.042
-147.6	-45.00	.048	.001	.048	.001	.048
-131.2	-40.00	.055	.002	.055	.001	.055
-114.8	-35.00	.061	.005	.061	.001	.061
-98.4	-30.00	.065	.012	.065	.001	.065
-82.0	-25.00	.059	.044	.059	.004	.058
-65.6	-20.00	.036	.349	.035	.013	.035
-49.2	-15.00	.110	.099	.105	.034	.107
-32.8	-10.00	.353	.029	.347	.065	.348
-16.4	-5.00	.694	.043	.692	.068	.689
.0	.00	.857	.290	.857	.058	.851
16.4	5.00	.694	.043	.692	.068	.689
32.8	10.00	.353	.029	.347	.065	.348
49.2	15.00	.110	.099	.105	.034	.107
65.6	20.00	.036	.349	.035	.013	.035
82.0	25.00	.059	.044	.059	.004	.058
98.4	30.00	.065	.012	.065	.001	.065
114.8	35.00	.061	.005	.061	.001	.061
131.2	40.00	.055	.002	.055	.001	.055
147.6	45.00	.048	.001	.048	.001	.048
164.0	50.00	.042	.000	.042	.001	.042

รูปที่ 4.47 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

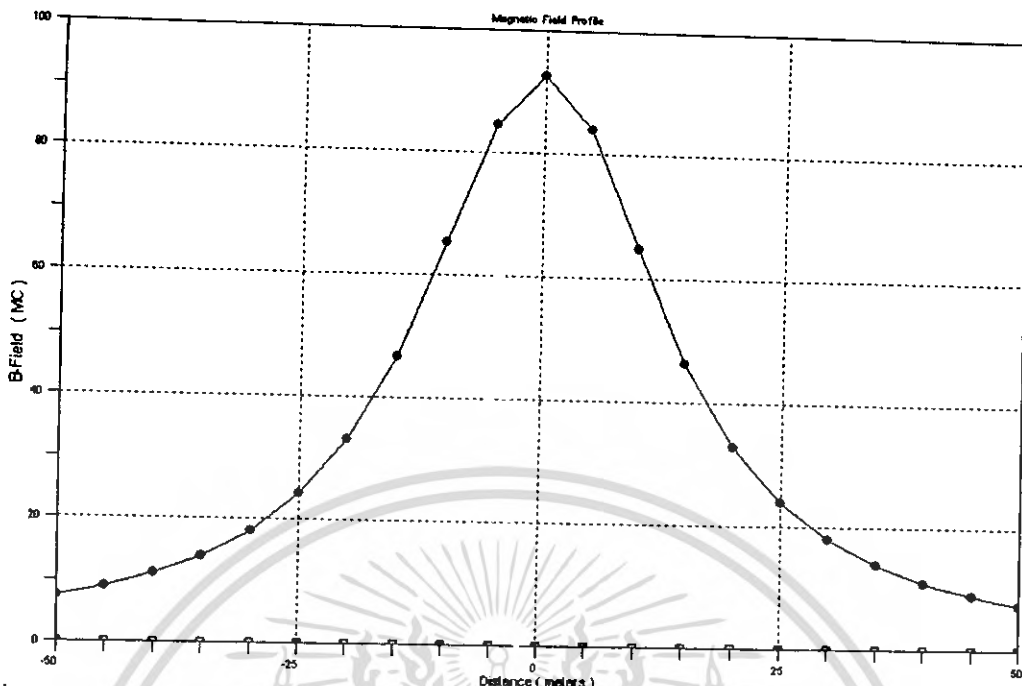


รูปที่ 4.48 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

LATERAL DISTANCE		AC MAGNETIC FIELD				
(meters)	(feet)	MAJOR AXIS (uT)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (uT)	HORIZONTAL COMP (uT)	RMS RESULTANT (uT)
-164.0	-50.00	7.32	.160	4.67	5.75	7.41
-147.6	-45.00	8.89	.146	5.97	6.71	8.98
-131.2	-40.00	11.00	.132	7.84	7.85	11.09
-114.8	-35.00	13.91	.120	10.62	9.13	14.01
-98.4	-30.00	18.04	.110	14.90	10.36	18.15
-82.0	-25.00	24.09	.104	21.60	10.95	24.22
-65.6	-20.00	33.14	.104	32.01	9.25	33.32
-49.2	-15.00	46.69	.116	46.68	5.49	47.00
-32.8	-10.00	65.41	.152	59.81	28.30	66.16
-16.4	-5.00	84.65	.218	50.50	70.40	86.64
0	0.00	92.60	.259	24.01	92.59	95.65
16.4	5.00	84.05	.194	50.74	68.95	85.61
32.8	10.00	64.85	.098	59.62	26.30	65.16
49.2	15.00	46.34	.031	46.34	1.43	46.36
65.6	20.00	32.93	.014	31.66	9.08	32.94
82.0	25.00	23.96	.046	21.29	11.04	23.98
98.4	30.00	17.96	.072	14.64	10.47	18.00
114.8	35.00	13.85	.095	10.41	9.22	13.91
131.2	40.00	10.95	.115	7.67	7.93	11.03
147.6	45.00	8.86	.134	5.83	6.77	8.94
164.0	50.00	7.29	.153	4.56	5.80	7.38

รูปที่ 4.49 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.50 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

จากการทดลองที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส ACB พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 0.875 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 95.65  $\mu$ T

4.6.11 การทดลองที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส BAC

BNDL #	CIRC #	VOLTAGE (kV)	ANGLE (DEG)	CURRENT LOAD (A)	ANGLE (DEG)	# OF COND	X (m)	Y (m)	SAG (m)	PH
1	1	115.0	0	1300	0	2	2.25	17.80	.80	A
2	1	115.0	240	1300	240	2	2.25	15.30	.80	B
3	1	115.0	120	1300	120	2	2.25	12.80	.80	C
4	2	115.0	240	1300	240	2	-2.25	17.80	.80	B
5	2	115.0	0	1300	0	2	-2.25	15.30	.80	A
6	2	115.0	120	1300	120	2	-2.25	12.80	.80	C
7	1	.0	0	0	0	1	.00	22.00	.30	GND

\* MINIMUM GROUND CLEARANCE = 12.00 meter \*  
 \* POWER SYSTEM FREQUENCY = 50 Hz \*  
 \* SOIL RESISTIVITY = 100. ohm meter \*

SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES

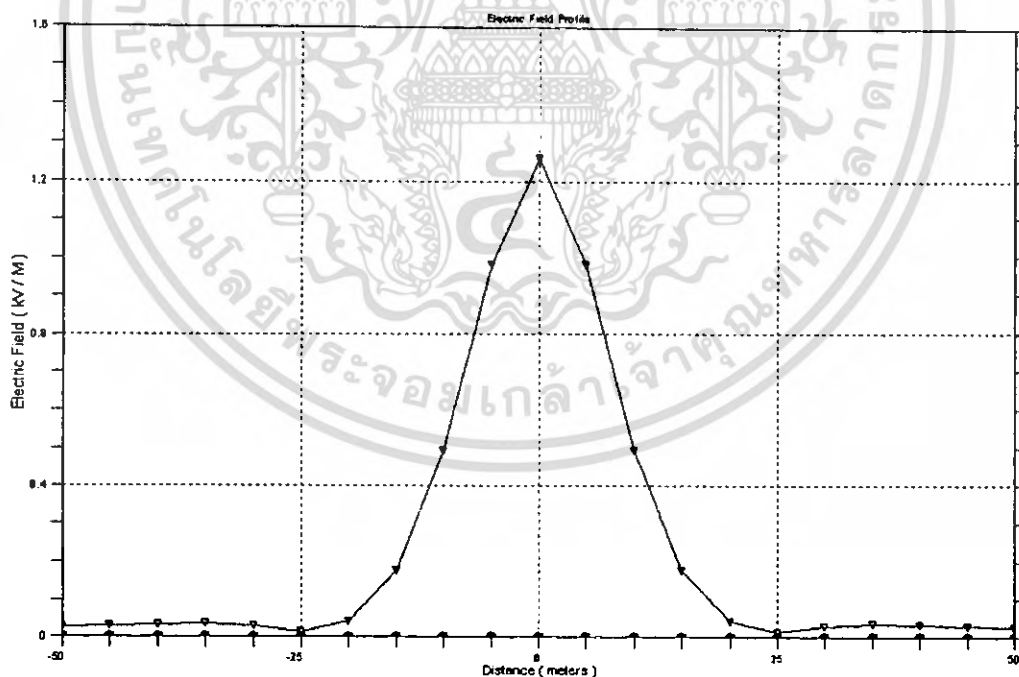
BNDL #	CONDUCTOR NAME	DIAMETER (cm)	SPACING (cm)	DC RESIST (ohm/km)	AC RESIST (ohm/km)	AC REACT (ohm/km)
1	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
2	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
3	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
4	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
5	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
6	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
7	1/2HS	1.260	.000	2.1380	2.2190	.7710

รูปที่ 4.51 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)		MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.026	.003	.026	.001	.026
-147.6	-45.00	.030	.004	.030	.001	.030
-131.2	-40.00	.032	.005	.032	.000	.032
-114.8	-35.00	.034	.007	.034	.000	.034
-98.4	-30.00	.030	.015	.030	.002	.030
-82.0	-25.00	.014	.156	.013	.006	.013
-65.6	-20.00	.044	.047	.041	.017	.042
-49.2	-15.00	.184	.004	.179	.042	.182
-32.8	-10.00	.500	.006	.492	.085	.495
-16.4	-5.00	.986	.012	.981	.095	.978
0	0.00	1.261	.213	1.261	.017	1.252
16.4	5.00	.986	.012	.981	.095	.978
32.8	10.00	.500	.006	.492	.085	.495
49.2	15.00	.184	.004	.179	.042	.182
65.6	20.00	.044	.047	.041	.017	.042
82.0	25.00	.014	.157	.013	.006	.013
98.4	30.00	.030	.015	.030	.002	.030
114.8	35.00	.034	.007	.034	.000	.034
131.2	40.00	.032	.005	.032	.000	.032
147.6	45.00	.030	.004	.030	.001	.030
164.0	50.00	.026	.003	.026	.001	.026

รูปที่ 4.52 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

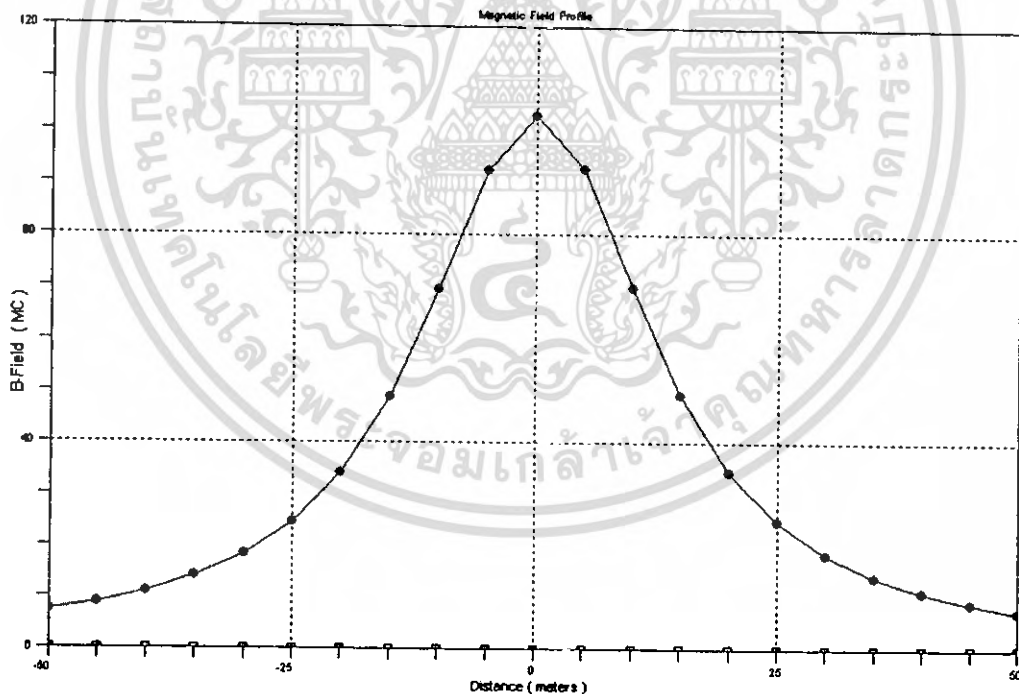


รูปที่ 4.53 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LATERAL DISTANCE		AC MAGNETIC FIELD				
(meters)	(feet)	MAJOR AXIS (uT)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (uT)	HORIZONTAL COMP (uT)	RMS RESULTANT (uT)
-164.0	-50.00	7.31	.131	4.32	5.98	7.38
-147.6	-45.00	8.90	.112	5.55	7.03	8.96
-131.2	-40.00	11.04	.093	7.35	8.30	11.09
-114.8	-35.00	14.01	.072	10.08	9.78	14.04
-98.4	-30.00	18.25	.049	14.33	11.34	18.27
-82.0	-25.00	24.53	.022	21.16	12.42	24.53
-65.6	-20.00	34.07	.008	32.16	11.26	34.07
-49.2	-15.00	48.68	.042	48.60	3.52	48.73
-32.8	-10.00	69.62	.080	65.55	24.11	69.84
-16.4	-5.00	92.41	.115	57.87	72.84	93.03
0.0	0.00	102.92	.138	14.20	102.91	103.89
16.4	5.00	92.59	.139	57.72	73.54	93.49
32.8	10.00	69.83	.130	65.59	25.62	70.42
49.2	15.00	48.85	.120	48.79	6.35	49.20
65.6	20.00	34.18	.115	32.40	11.57	34.41
82.0	25.00	24.60	.114	21.41	12.44	24.76
98.4	30.00	18.30	.117	14.56	11.30	18.43
114.8	35.00	14.04	.124	10.28	9.73	14.15
131.2	40.00	11.07	.133	7.52	8.25	11.16
147.6	45.00	8.92	.143	5.69	6.99	9.01
164.0	50.00	7.33	.155	4.44	5.94	7.42

รูปที่ 4.54 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m



รูปที่ 4.55 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

จากการทดลองที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส BAC พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด  $-1.261 \text{ kV/m}$  และสนามแม่เหล็กสูงสุด =  $103.89 \text{ uT}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.12 การทดลองที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m ที่การเรียงเฟสแบบเฟส ABC ขนาน กับเฟส CBA

BNDL #	CIRC #	VOLTAGE (kV)	ANGLE (DEG)	CURRENT LOAD (A)	ANGLE (DEG)	# OF COND	BUNDLE COORDINATES X (m)	Y (m)	SAG (m)	PH
1	1	115.0	0.	1300	0.	2	2.25	17.80	.80	A
2	1	115.0	240.	1300	240	2	2.25	15.30	.80	B
3	1	115.0	120.	1300	120	2	2.25	12.80	.80	C
4	2	115.0	120.	1300	120	2	-2.25	17.80	.80	C
5	2	115.0	240.	1300	240	2	-2.25	15.30	.80	B
6	2	115.0	0.	1300	0.	2	-2.25	12.80	.80	A
7	1	0	0	0	0	1	.00	22.00	.30	GND

\* MINIMUM GROUND CLEARANCE = 12.00 meter \*  
 \* POWER SYSTEM FREQUENCY = 50 Hz \*  
 \* SOIL RESISTIVITY = 100 ohm meter \*

\*\*\*\*\* SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES \*\*\*\*\*

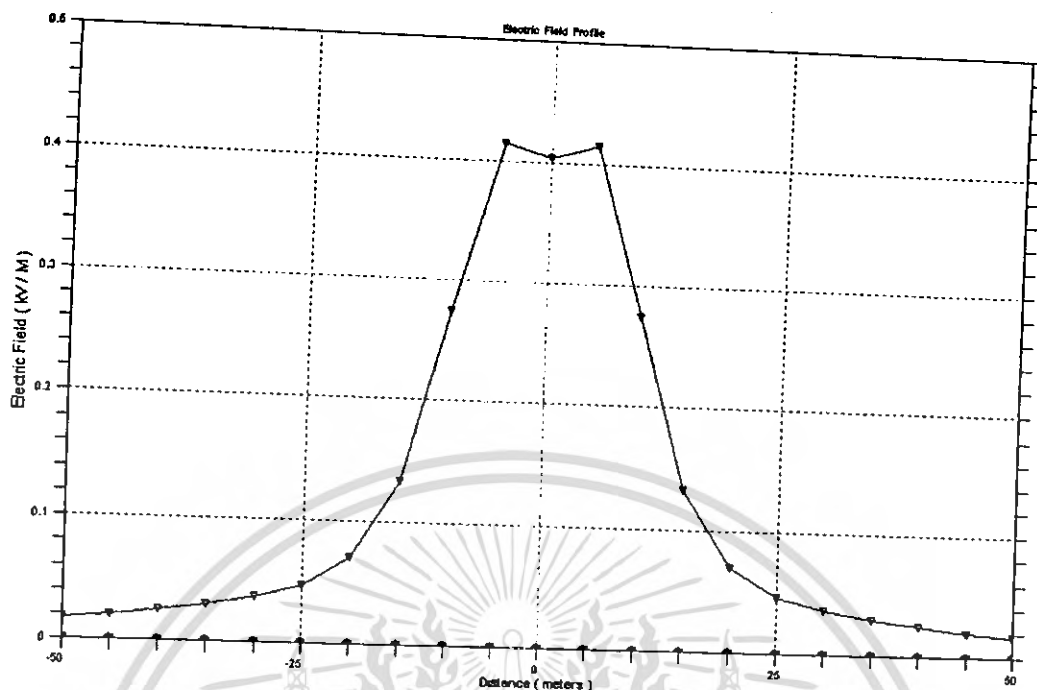
BNDL #	CONDUCTOR NAME	DIAMETER (cm)	SPACING (cm)	DC RESIST (ohm/km)	AC RESIST (ohm/km)	AC REACT (ohm/km)
1	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
2	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
3	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
4	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
5	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
6	GREBE	2.560	20.000	.0810	.0820	.2570
7	1/2HS	1.260	.000	2.1380	2.2190	.7710

รูปที่ 4.56 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ป้อนที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

LATERAL DISTANCE (feet)	LATERAL DISTANCE (meters)	MAXIMUM FIELD (kV/m)	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES (ratio)	VERTICAL (kV/m)	HORIZONTAL (kV/m)	SPACE POTENTIAL (kV)
-164.0	-50.00	.017	.000	.017	.001	.017
-147.6	-45.00	.020	.002	.020	.001	.020
-131.2	-40.00	.025	.006	.025	.001	.025
-114.8	-35.00	.030	.014	.030	.001	.030
-98.4	-30.00	.037	.030	.037	.002	.037
-82.0	-25.00	.047	.057	.047	.004	.047
-65.6	-20.00	.070	.077	.070	.009	.070
-49.2	-15.00	.136	.048	.134	.021	.135
-32.8	-10.00	.276	.002	.274	.034	.275
-16.4	-5.00	.415	.074	.415	.033	.411
.0	.00	.404	.188	.404	.075	.402
16.4	5.00	.415	.074	.415	.033	.411
32.8	10.00	.276	.002	.274	.034	.275
49.2	15.00	.136	.048	.134	.021	.135
65.6	20.00	.070	.077	.070	.009	.070
82.0	25.00	.047	.057	.047	.004	.047
98.4	30.00	.037	.030	.037	.002	.037
114.8	35.00	.030	.014	.030	.001	.030
131.2	40.00	.025	.006	.025	.001	.025
147.6	45.00	.020	.002	.020	.001	.020
164.0	50.00	.017	.000	.017	.001	.017

รูปที่ 4.57 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

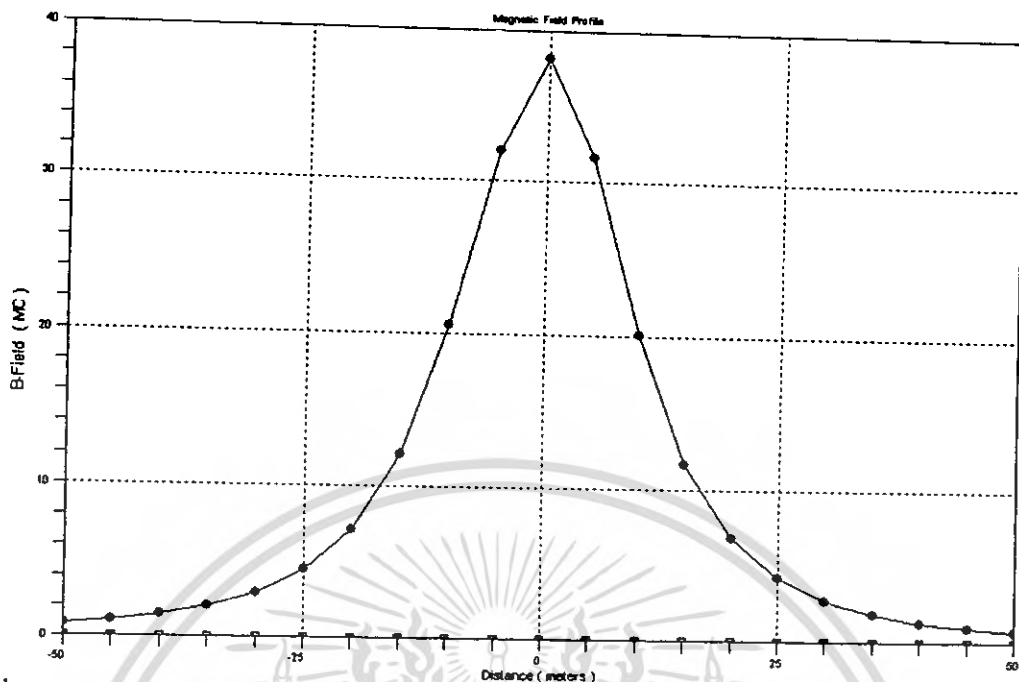


รูปที่ 4.58 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

LATERAL DISTANCE (meters) (feet)		AC MAGNETIC FIELD				
		MAJOR AXIS (uT)	MINOR/ MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (uT)	HORIZONTAL COMP (uT)	RMS RESULTANT (uT)
-164.0	-50.00	.76	.372	.65	.49	.82
-147.6	-45.00	1.01	.363	.89	.61	1.08
-131.2	-40.00	1.39	.353	1.26	.76	1.47
-114.8	-35.00	1.96	.345	1.85	.94	2.07
-98.4	-30.00	2.88	.337	2.82	1.14	3.04
-82.0	-25.00	4.43	.331	4.43	1.47	4.66
-65.6	-20.00	7.14	.325	6.93	2.89	7.51
-49.2	-15.00	12.03	.317	9.77	7.99	12.62
-32.8	-10.00	20.51	.303	8.76	19.56	21.43
-16.4	-5.00	31.97	.282	17.58	28.18	33.22
0	0.00	38.21	.270	38.21	10.34	39.58
16.4	5.00	31.57	.286	17.69	27.67	32.84
32.8	10.00	20.01	.311	8.61	19.11	20.96
49.2	15.00	11.61	.328	9.53	7.65	12.22
65.6	20.00	6.81	.340	6.66	2.72	7.19
82.0	25.00	4.18	.351	4.16	1.51	4.43
98.4	30.00	2.69	.363	2.57	1.26	2.86
114.8	35.00	1.81	.376	1.62	1.07	1.94
131.2	40.00	1.27	.391	1.05	.88	1.37
147.6	45.00	.92	.407	.70	.71	1.00
164.0	50.00	.69	.425	.48	.58	.75

รูปที่ 4.59 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.60 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 115 kV, กระแส = 1300 A, ระยะ Sag = 0.80 m

จากการทดลองที่แรงดัน=115 kV, กระแส = 1300A, ระยะ Sag = 0.80 m ที่การเรียงเฟสแบบ เฟส ABC ขนาน กับเฟส CBA พบว่าค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 0.415 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 39.58  $\mu$ T

#### 4.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง

กำหนดให้เฟส ABC ขนานกับเฟส ABC ทำการทดลองที่แรงดัน 22 kV และ 33 kV กระแส 400 A ระยะ SAG 0.70 m

กำหนดแรงดัน 22 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 0.125 kV/m
กำหนดแรงดัน 33 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 0.187 kV/m
กำหนดแรงดัน 22 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 32.96 $\mu$ T
กำหนดแรงดัน 33 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 32.96 $\mu$ T

กำหนดให้เฟส ABC ขนานกับ ACB ทำการทดลองที่แรงดัน 22 kV และ 33 kV กระแส 400 A ระยะ SAG 0.70 m

กำหนดแรงดัน 22 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 0.690 kV/m
กำหนดแรงดัน 33 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 0.111 kV/m
กำหนดแรงดัน 22 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 24.50 $\mu$ T
กำหนดแรงดัน 33 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 24.50 $\mu$ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้เฟส ABC ขนานกับเฟส BAC ทำการทดลองที่แรงดัน 22 kV และ 33 kV กระแส 400 A ระยะ SAG 0.70 m

กำหนดแรงดัน 22 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 0.125 kV/m
กำหนดแรงดัน 33 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 0.187 kV/m
กำหนดแรงดัน 22 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 31.59 $\mu$ T
กำหนดแรงดัน 33 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 31.59 $\mu$ T

กำหนดให้เฟส ABC ขนานกับเฟส CBA ทำการทดลองที่แรงดัน 22 kV และ 33 kV กระแส 400 A ระยะ SAG 0.70 m

กำหนดแรงดัน 22 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 0.600 kV/m
กำหนดแรงดัน 33 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 0.900 kV/m
กำหนดแรงดัน 22 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 10.14 $\mu$ T
กำหนดแรงดัน 33 kV	กระแส 400 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 10.14 $\mu$ T

กำหนดให้เฟส ABC ขนานกับเฟส ABC ทำการทดลองที่แรงดัน 115 kV กระแส 1300 A ระยะ SAG 0.80 m

กำหนดแรงดัน 115 kV	กระแส 1300 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 1.280 kV/m
กำหนดแรงดัน 115 kV	กระแส 1300 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 112.77 $\mu$ T

กำหนดให้เฟส ABC ขนานกับเฟส ACB ทำการทดลองที่แรงดัน 115 kV กระแส 1300 A ระยะ SAG 0.80 m

กำหนดแรงดัน 115 kV	กระแส 1300 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 0.857 kV/m
กำหนดแรงดัน 115 kV	กระแส 1300 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 95.65 $\mu$ T

กำหนดให้เฟส ABC ขนานกับเฟส BAC ทำการทดลองที่แรงดัน 115 kV กระแส 1300 A ระยะ SAG 0.80 m

กำหนดแรงดัน 115 kV	กระแส 1300 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 1.261 kV/m
กำหนดแรงดัน 115 kV	กระแส 1300 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 103.89 $\mu$ T

กำหนดให้เฟส ABC ขนานกับเฟส CBA ทำการทดลองที่แรงดัน 115 kV กระแส 1300 A ระยะ SAG 0.80 m

กำหนดแรงดัน 115 kV	กระแส 1300 A	ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด	= 0.415 kV/m
กำหนดแรงดัน 115 kV	กระแส 1300 A	ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด	= 39.58 $\mu$ T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.8 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าแรงดันในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะส่งผลกระทบต่อค่าสนามไฟฟ้า โดยที่ถ้าค่าของแรงดันมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และถ้าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงก็จะทำให้ค่าของสนามไฟฟ้ามีค่าลดลงตามไปด้วย ซึ่งกล่าวได้ว่าค่าของสนามไฟฟ้าที่เกิดในสายส่งจะมีการแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายส่ง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อสนามแม่เหล็กถ้ากระแสมีค่าสูง จะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น และเมื่อกระแสมีค่าลดลงก็จะทำให้ค่าของสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงตามไปด้วย จึงกล่าวได้ว่า ค่าสนามแม่เหล็กจะแปรผันตรงกับค่าของกระแสไฟฟ้าภายในระบบสายส่งไฟฟ้า

จากการทดลองการสลับเฟสของระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีวงจรขนานกัน เมื่อทำการออกแบบให้มีการสลับเฟสกันแล้วจะทำให้สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยการออกแบบสลับเฟสเป็นลักษณะวงจร ABC ขนานกับวงจร CBA จะทำให้ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นสนามแม่เหล็กลดลง ต่างจากการเรียงวงจรแบบอื่นๆ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมจากสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก

## บทที่ 5

### การทดสอบวัดค่าสนามไฟฟ้าจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับแรงดัน 22 kV และ 115 kV

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกทำการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าจากสถานที่จริงที่ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับแรงดัน 22 kV และ 115 kV สถานที่คือ บริเวณโรงไฟฟ้าบางปะอิน 3 อ.บางปะอิน จ.พระนครศรีอยุธยา โดยทำการนำเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (AC Electric Field Meter) และเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น ทำการวัดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงดังกล่าว และที่ระยะความสูงของเสาที่ตำแหน่งของเฟส A เฟส B และเฟส C ตามลำดับ ซึ่งจากการวัดสามารถจะบอกได้ว่า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณดังกล่าวของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงมีค่าน้อยเพียงใด

#### 5.2 วัตถุประสงค์ในการทดสอบ

1. เพื่อวัดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจากเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (AC Electric Field Meter) และเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น
2. เพื่อทำการเปรียบเทียบสนามไฟฟ้า จากเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าพาณิชย์ (AC Electric Field Meter) และเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นกับโปรแกรม TLW ว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่
3. เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงไปวิเคราะห์หาความถูกต้อง

#### 5.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (AC Electric Field Meter)
2. เครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น
3. โปรแกรม TLW

#### 5.4 วิธีการทดสอบ

1. ทำการเลือกบริเวณที่ตั้งเสาระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 22 kV และ 115 kV
2. ทำการเลือกจุดบริเวณที่จะทำการวัดสนามไฟฟ้าจากนั้นทำการเลือกบริเวณจุดกึ่งกลางระหว่างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นบริเวณที่เรียกกันว่าบริเวณท้องช้าง หรือระยะ height min ซึ่งจะวัดตามแนวขวางกับสายส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (AC Electric Field Meter) วัดตามระยะห่างที่ระยะ 5, 10, 15, 20, 25 เมตร และที่ระยะ -5,-10,-15,-20,-25 เมตร บริเวณใต้เสาส่ง โดยเริ่มวัดจากจุดท่อกข้างของสายไปในแนวตามขวางกับแนวเดินสายที่ระยะห่างตามที่กำหนด

4. นำเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น วัดตามระยะห่างที่ระยะ 5, 10, 15, 20, 25 เมตร และที่ระยะ -5,-10,-15,-20,-25 เมตร บริเวณใต้เสาส่ง โดยเริ่มวัดจากจุดท่อกข้างของสายไปในแนวตามขวางกับแนวเดินสายที่ระยะห่างตามที่กำหนด

5. นำเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (AC Electric Field Meter) วัดตามระยะห่างที่ระยะ 0.5, 1, 2, 3 เมตร บริเวณด้านข้างของสายส่ง

6. นำเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น วัดตามระยะห่างที่ระยะ 0.5, 1, 2, 3 เมตร บริเวณด้านข้างของสายส่ง

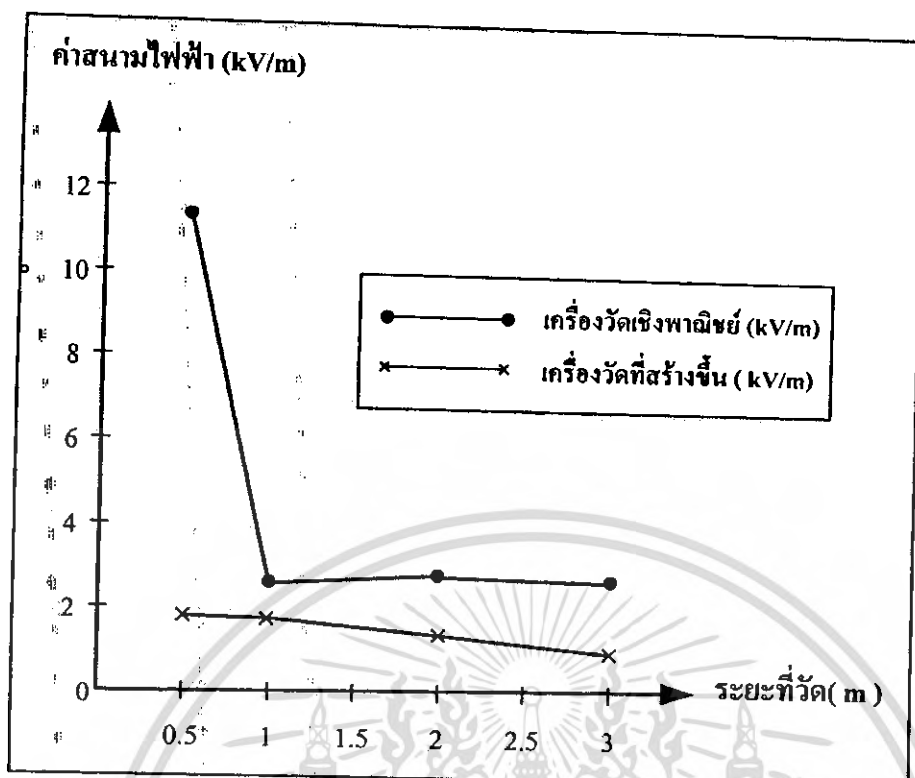
7. ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบวัดจากสถานที่จริงว่าสนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นไปในลักษณะเดียวกับการประมวลผลด้วยโปรแกรมหรือไม่

## 5.5 ผลที่ได้จากการทดสอบ

5.5.1 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าจากสถานที่จริงที่แรงดัน 22 kV กระแส 400 A และ 115 kV กระแส 1300 A ตามลำดับ โดยลักษณะการวัดที่ด้านข้างของสายส่งไฟฟ้า

ตารางที่ 5.1 ผลการทดสอบวัดไฟฟ้าที่แรงดัน 22 kV

ระยะที่วัด (m)	เครื่องวัดที่สร้างขึ้น (kV/m)	เครื่องวัดเชิงพาณิชย์ (kV/m)
0.5	1.83	11.40
1	1.78	2.69
2	1.46	2.80
3	1.13	2.70



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า ที่วัดจากเครื่องวัดเชิงพาณิชย์ กับ เครื่องวัดที่สร้างขึ้นที่แรงดัน 22 kV

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 115 kV ที่เฟส A

ระยะที่วัด (m)	เครื่องวัดเชิงพาณิชย์ (kV/m)	เครื่องวัดที่สร้างขึ้น (kV/m)
0.5	Over Range	Over Range
1	Over Range	12.75
2	15.72	7.31
3	7.08	3.05

ตารางที่ 5.3 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 115 kV ที่เฟส B

ระยะที่วัด (m)	เครื่องวัดเชิงพาณิชย์ (kV/m)	เครื่องวัดที่สร้างขึ้น (kV/m)
0.5	Over Range	Over Range
1	Over Range	4.88
2	10.21	2.86
3	4.25	2.21

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 115 kV ที่เฟส C

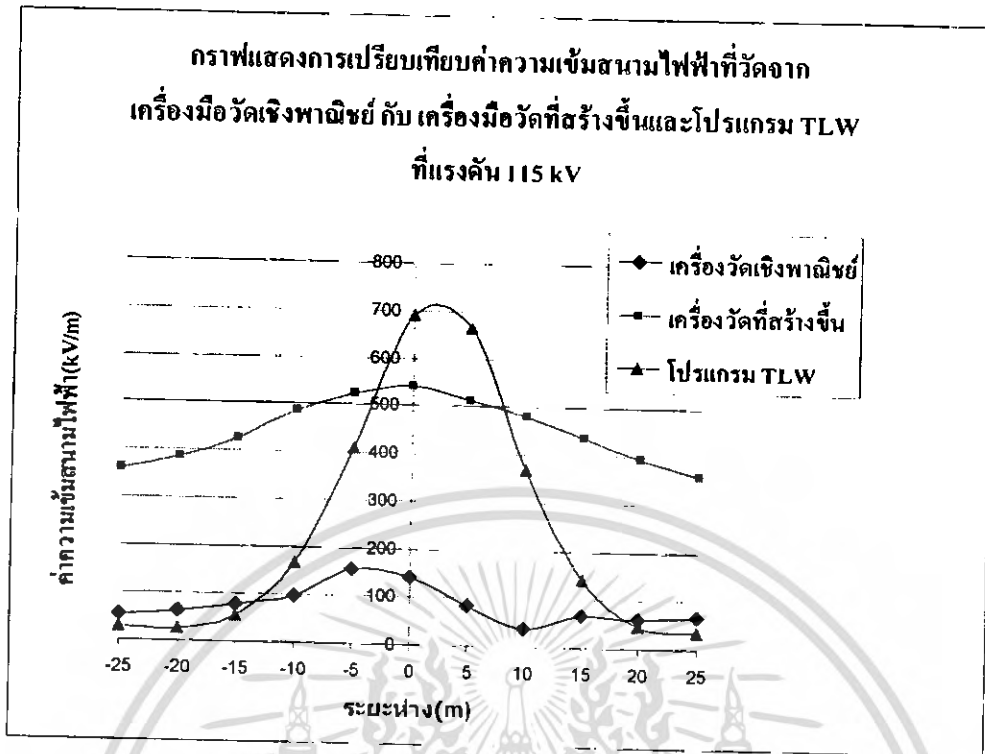
ระยะที่วัด ( m )	เครื่องวัดเชิงพาณิชย์ (kV/m)	เครื่องวัดที่สร้างขึ้น ( kV/m)
0.5	Over Range	15.27
1	Over Range	3.20
2	11.75	4.58
3	4.29	1.27

5.5.2 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าจากสถานีจริงที่แรงดัน 115 kV และ 22 kV โดยลักษณะการวัดที่ได้แสงไฟฟ้า

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบวัดสนามไฟฟ้าที่แรงดัน 115 kV และ 22 kV โดยลักษณะการวัดที่ได้แสงไฟฟ้า

ระยะได้เสา ( m )	ค่าสนามไฟฟ้าจากเครื่องวัดเชิงพาณิชย์ (V/m)	ค่าสนามไฟฟ้าจากเครื่องวัดที่สร้างขึ้น (V/m)	ค่าสนามไฟฟ้าจากโปรแกรม TLW (V/m)
-25	54	470	30
-20	63	490	27
-15	78	510	54
-10	99	520	168
-5	154	530	409
0	140	540	690
5	84	520	665
10	36	500	369
15	66	510	141
20	60	500	45
25	67	470	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 5.2** กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสนามไฟฟ้า ที่วัดจากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ กับ เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นและโปรแกรม TLW ที่แรงดัน 115 kV

### 5.6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองวัดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 22 kV และ 115 kV พบว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ และเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นจะมีค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงบริเวณจุดต่ำสุดของสายหรือที่เรียกว่าจุด ท้องช้าง และเมื่อทำการวัดโดยเคลื่อนที่ออกไกลจากสายพบว่าสนามไฟฟ้าที่อ่านได้มีค่าลดลง และจากการทดสอบวัดพื้นที่บางจุดภายใต้แนวสายส่ง ค่าที่อ่านได้จะมีค่าสูงสาเหตุเพราะระดับในพื้นที่มีระดับที่แตกต่างกันและเกิดจากการเบี่ยงเบนของสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากบุคคลที่ทำการวัด และสภาพแวดล้อมที่อยู่ ณ บริเวณที่ทำการทดสอบวัด ดังนั้นในการทดสอบจึงควรเลือกบริเวณใต้สายส่งที่มีพื้นที่ที่มีความสม่ำเสมอและ สภาพแวดล้อมที่เป็นที่โล่งแจ้งเพื่อให้ค่าที่วัดได้มีความถูกต้องที่สุด

เมื่อได้สนามไฟฟ้าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดทั้งสองเครื่อง มาเปรียบเทียบกันปรากฏว่าค่าสนามไฟฟ้าที่วัดได้มีผลไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งสายส่งขนาด 22 kV และ 115 kV จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม ในส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะต้องป้อนในโปรแกรม ข้อมูลที่ได้มาจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ข้อมูลที่ได้มานั้นมีตั้งแต่ ข้อมูลของเสาทั้ง 22 kV และ 115 kV ขนาดกระแสที่ไหลภายในสายส่ง ลักษณะการจัดลำดับเฟส ระยะ SAG และ ระยะห่างระหว่างเสา เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดลอง เมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ได้ ป้อนลงในโปรแกรมแล้วทำการรันโปรแกรม ปรากฏว่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากโปรแกรม เป็นไปในลักษณะเดียวกันกับค่าที่วัดจากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ และค่าที่ได้จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ทำให้ทราบว่า การเกิดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนั้น จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิดรวมถึงระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง จากการทดลองพบว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามค่าของแรงดันที่จ่ายไปยังโหลด การเพิ่มขึ้นของแรงดัน จะส่งผลทำให้มีสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งทราบได้จากการวัดในการทดลองพบว่า สนามไฟฟ้าจะมีความเข้มข้นสูงบริเวณใกล้แหล่งกำเนิด และจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกับระยะที่วัดมีค่ามากขึ้น

จากการทดลองโปรแกรม TLW สามารถสรุปได้ว่า แรงดันจะส่งผลต่อสนามไฟฟ้า โดยเมื่อค่าแรงดันในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจะทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งกล่าวได้ว่า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง จะแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายส่งแรงสูง ในส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งนั้น จะส่งผลต่อสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เมื่อในระบบส่งจ่ายมีกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น พบว่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าของกระแส ซึ่งกล่าวได้ว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง จะแปรผันตรงกับขนาดของกระแสที่ไหลในสายส่ง

จากการทดลอง การสลับเฟสของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการส่งจ่ายแบบวงจรขนาน เมื่อมีการสลับเฟสกัน ทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง ซึ่งจากการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังแบบวงจรขนาน ควรออกแบบการเรียงเฟสที่เป็นลักษณะวงจร ABC ขนานกับวงจร CBA จะทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยที่สุด

จากการทดลองวัดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 22 kV และ 115 kV จากสถานที่จริงของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค โดยในการทดลองนำเครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าเชิงพาณิชย์และเครื่องวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นเอง นำไปวัดค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่แรงดัน 22 kV และ 115 kV และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการประมวลผลสนามไฟฟ้าจากโปรแกรม TLW ปรากฏว่าสนามไฟฟ้าที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาเกี่ยวกับการเกิดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เป็นสิ่งที่เป็นประโยชน์ ต่อการค้นคว้าทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า เกี่ยวกับการเกิดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่เกิดในระบบไฟฟ้ากำลัง จากข้อมูลที่ได้จากการศึกษาและทดลองปฏิบัติ ทำให้ทราบว่าค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มีค่าลดลงมากที่สุดเมื่อทำการเรียงเฟส ซีเควนซ์แบบ เฟส ABC ขนานกับ เฟส CBA ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบขนาน และข้อมูลที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าทั้งหมดนี้ จะเป็นแนวทางที่ดีในการออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ให้มีความปลอดภัยจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

### 6.3 งานที่ควรดำเนินการต่อไป

จากการที่ได้ศึกษาโปรแกรม TLW ในส่วนของ ACDC Line แล้วจะทำการศึกษาในของ Radio Noise และ Corridor เพิ่มเติม และทดลองเก็บค่าความเข้มสนามไฟฟ้าในสภาพแวดล้อมและสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกันออกไปและพัฒนาเครื่องวัดความเข้มสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Kraus J.D., **Electromagnetic**, McGrawHill International Edition, 1992.
- [2] **Transmission Line Reference Book** , 345 kV ,Second Edition , New York.
- [3] ชัยวุฒิ ฉัตรอุทัย, **Electrical Machine**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, เอกสารประกอบการสอน, ปีการศึกษา 2548
- [4] วีระเชษฐ ชันเงิน, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ: วิ.เจ.พรินต์ติ้ง.2548.
- [5] ส้ารววย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**, กรุงเทพฯ: 2547.
- [6] เอกสาร, **การออกแบบระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV และ 500 kV**, การไฟฟ้า ฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
- [7] นรเศรษฐ พัฒนเดช, **วัสดุทางวิศวกรรมไฟฟ้า (Electrical Engineering Material)**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, เอกสารประกอบการ สอน, ปีการศึกษา 2548
- [8] สมชาติ จีร์วิภากร, **ชุดคู่มือบรรยายการปฏิบัติ Transmission Line Workstation**, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2550
- [9] เอกสาร, **คู่มือรายละเอียดของเสาส่งไฟฟ้าแรงสูง 22 kV, 33 kV และ 115 kV**, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค
- [10] ชันเหลียน สิทธิฐานวัฒน์ และ คณะ, **"การศึกษาโปรแกรม TLW"**, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมไฟฟ้า, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปีการศึกษา 2548



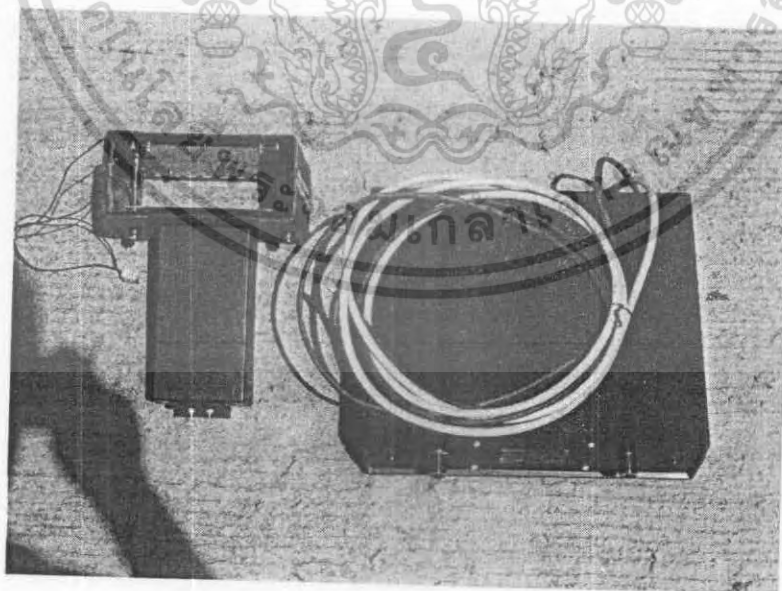
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## เครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าและภาพการทดลอง

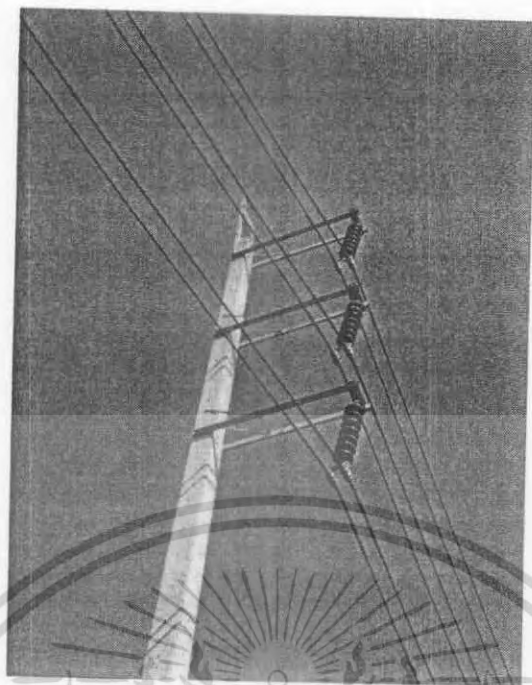


รูปที่ ก.1 เครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ (Electric field radiation tester)



รูปที่ ก.2 เครื่องมือวัดสนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

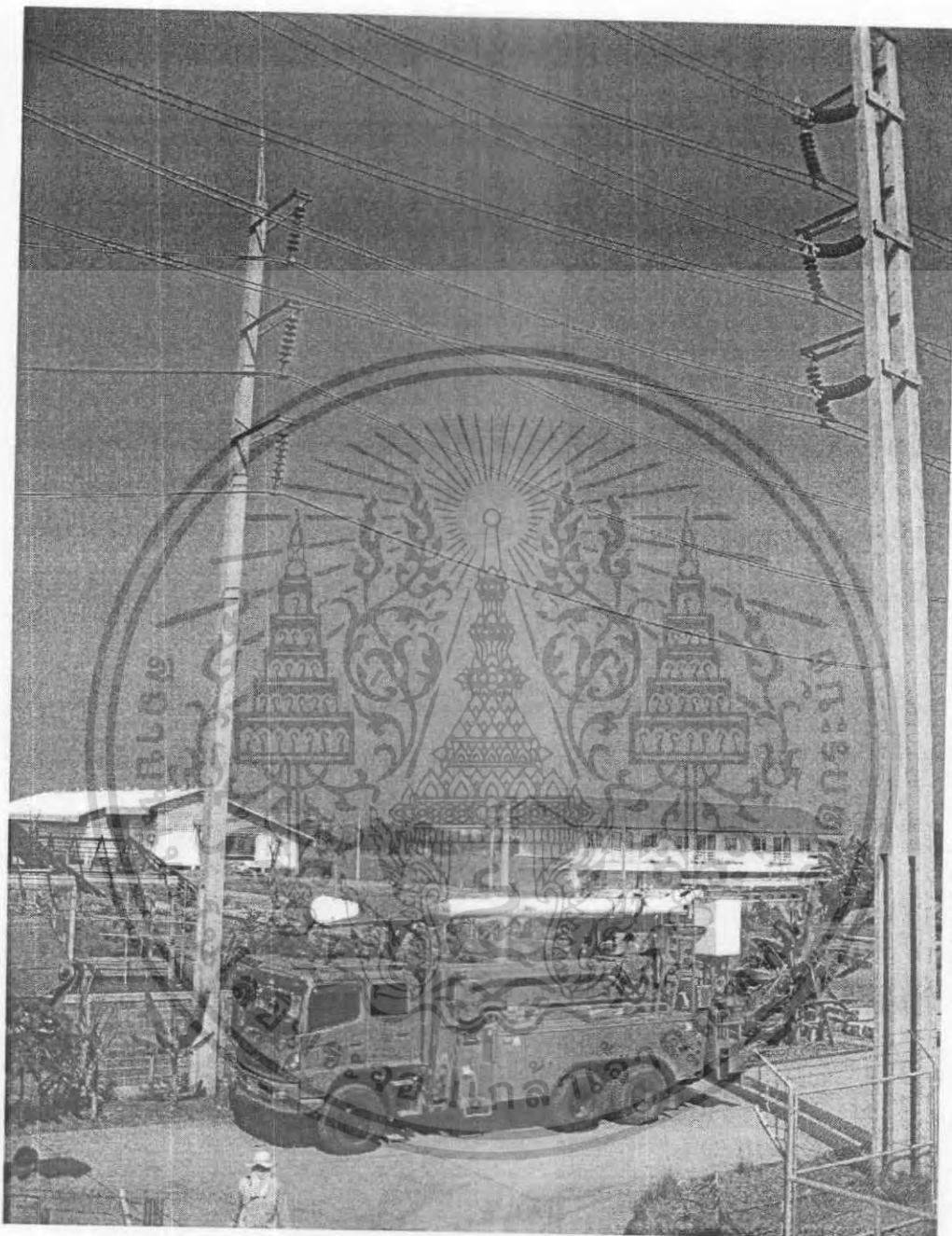


รูปที่ ก.3 สายส่งไฟฟ้าขนาดแรงดัน 115 Kv (วงจรเดี่ยว)



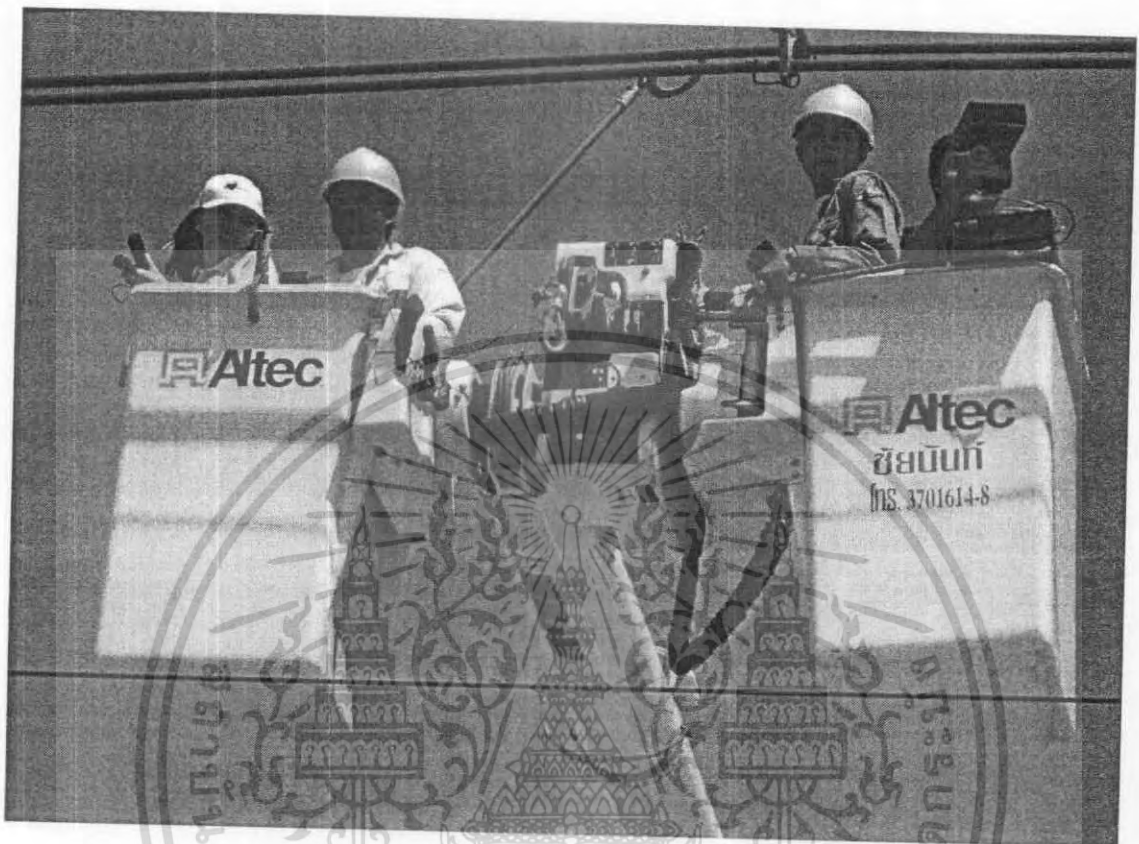
รูปที่ ก.4 สายส่งไฟฟ้าขนาดแรงดัน 115 Kv (วงจรคู่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 รถ Hot Line ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

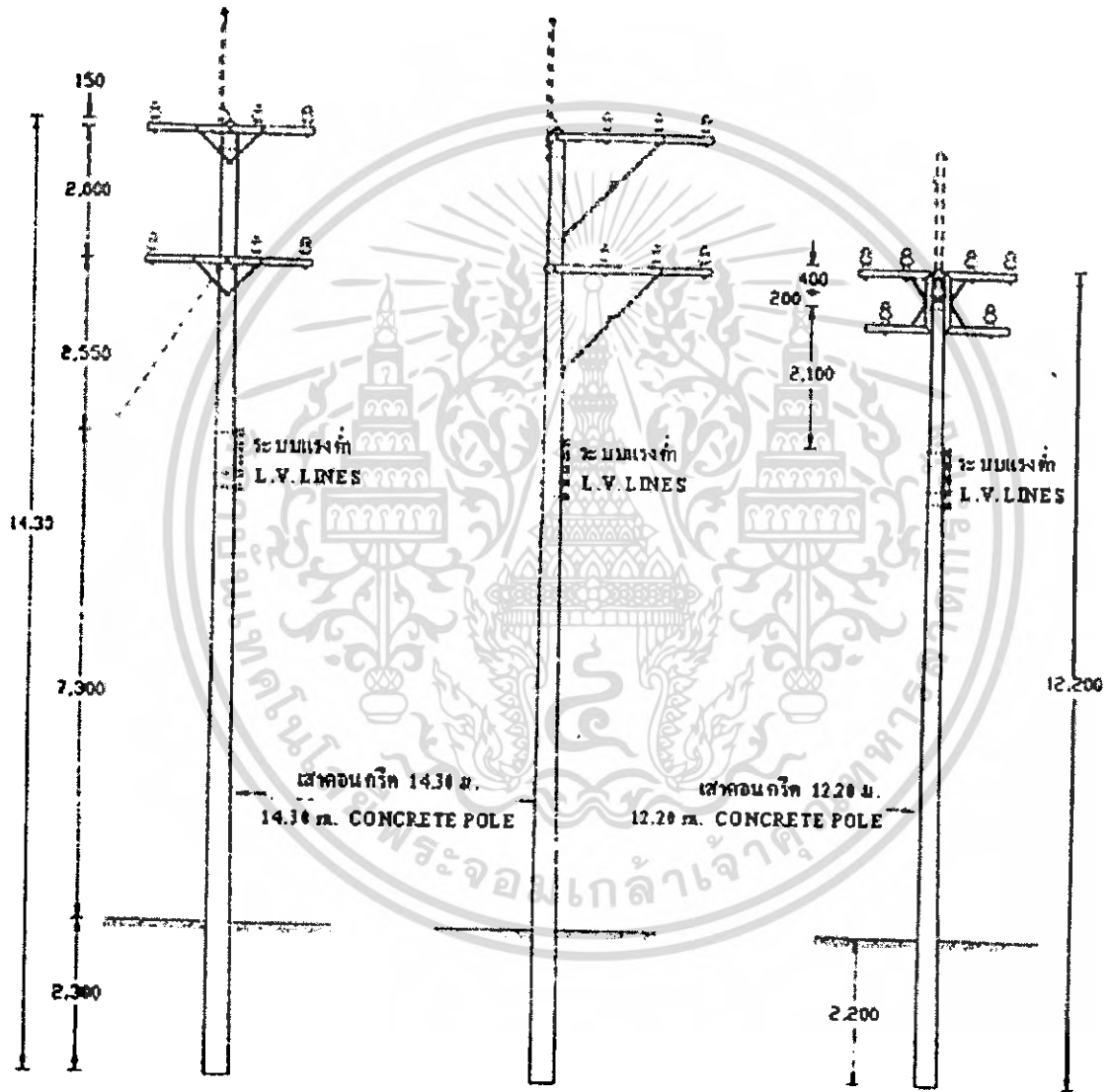


รูปที่ ก.6 ลักษณะการวัดสนามไฟฟ้าจากสายส่งไฟฟ้าที่ตำแหน่งของแต่ละเฟสขนาดแรงดัน 115 kV ในกระเช้า ของรถ Hot Line ของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
ข้อมูลที่ใช้กับโปรแกรม TLW

ตัวอย่าง เสาระบบ 22 kV, 33kV



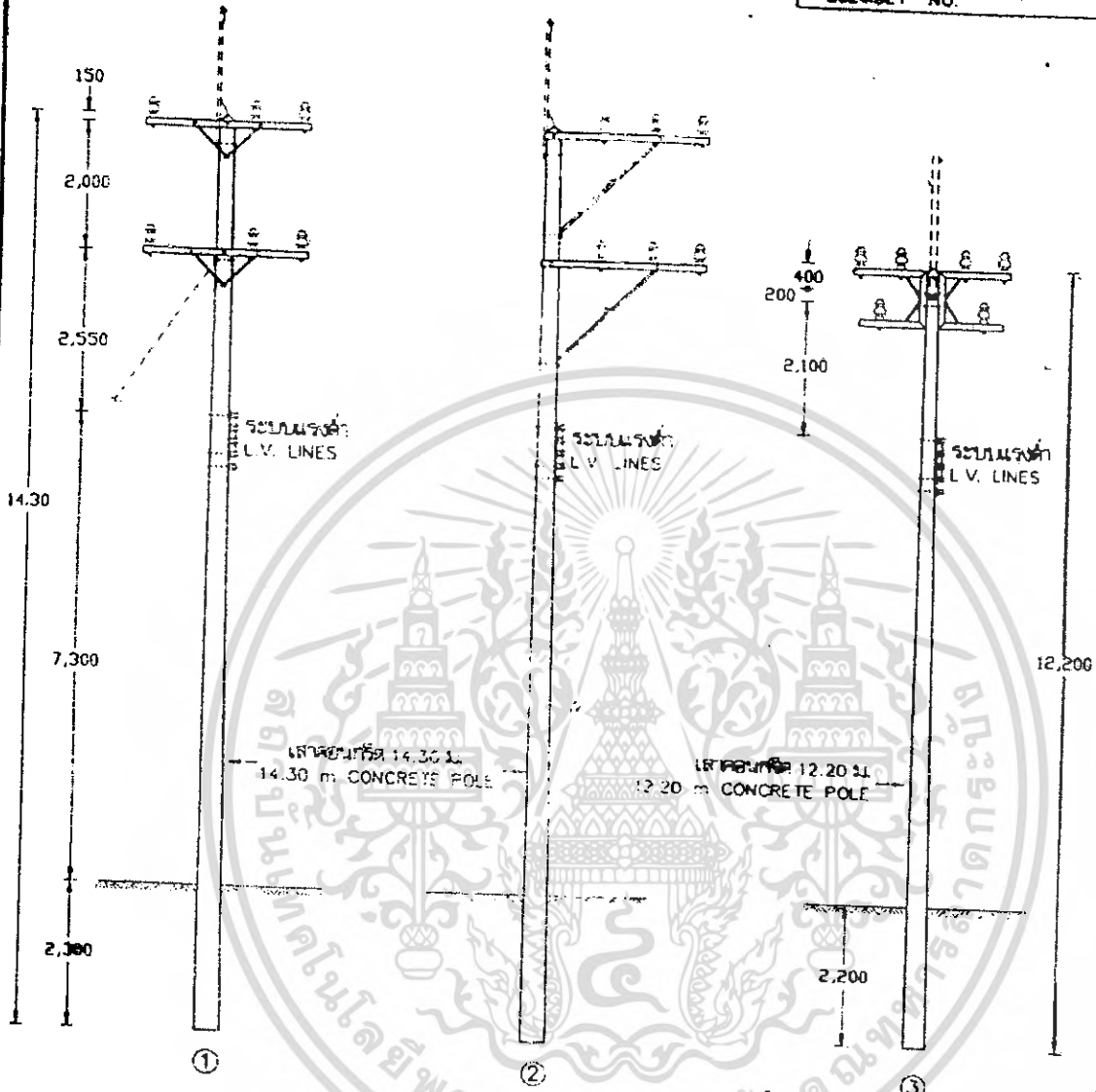
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ 22 kv, 33 kv  
22 kv, 33 kv SYSTEM

การประกอบโครง  
ASSEMBLY NO. 8256



① สำหรับประกอบแขนขบวน  
FOR CROSSARM ASSEMBLY

② สำหรับประกอบแขนขบวน  
FOR ALLEY ARM ASSEMBLY

③ สำหรับประกอบโครงค้ำสาย  
FOR AERIAL CABLE CORNER SUPPORT BRACKET

หมายเหตุ เสาต้นขบวนสายที่ผูกด้วยไฟฟ้าของกิตติมโธเสนา  
พิก 1 ม. ขาของเสาเข็ม ขนาด 1x1 ม.

NOTE DEADEND POLE FOOT SHALL BE COVERED  
WITH CONCRETE. SECTION 1x1 m, 1 m  
DEPTH FROM GROUND LEVEL.

**COPY**

กองช่างระบบไฟฟ้า สำนักงานเขตบางพลี	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	รูปแบบ ฐานเสาเข็ม
ผู้ควบคุมงาน	ผู้ควบคุมงาน (พิมพ์)	แบบที่ 20 พ.ร. 2547
โครงการสร้างระบบจำหน่าย 22-33 kv, 2 วงจร	สำหรับพylon (SAC) บนสายส่งหรือเสาเข็มค้ำสาย	ขนาดเสาเข็ม ขนาดฐาน 1:100
22-33 kv, 2 CIRCUIT DISTRIBUTION POLE STRUCTURE FOR SPACE AERIAL CABLE (SAC) STRUNG ON LINE-POST OR PIN-POST INSULATORS	งานพิมพ์	แบบที่ SA2-015/47002

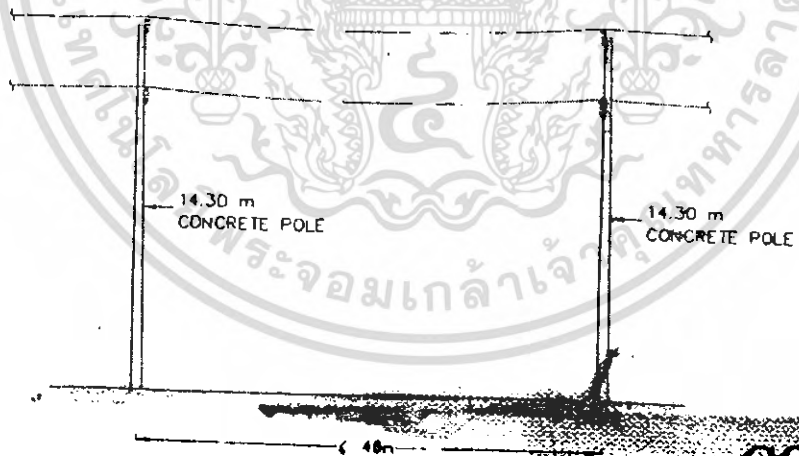
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

ASSEMBLY NO. 8256

REGULATIONS

- 1 ขนาดสายส่ง :-  
 สายต่อท่า : ลวดเหล็กเกลียว 25 มม.  
 ระบบ 22 KV และ 33 KV : SAC 185 มม.  
 ระบบแรงต่ำ : สายออร์แกนิกเส้นผ่าศูนย์กลาง 95 มม.
- 2 ระยะห่างระหว่างเสา และระยะหย่อนยานของสายทุกเส้น สำหรับโครงสร้างสายอากาศแบบทุก ๆ กั้นหน้าไว้ในตารางที่ 1
- 3 ให้ไฟฟ้าโครงสร้างสายอากาศสายสองข้าง ที่มีการยึดโยงตามแนวสาย ก่อนช่วงเสาทางโค้ง
- 4 เสาทุกต้น ไม่ต้องใช้ทาสายยึดโยง ยกเว้น เสาต้นรับสายสาย และเสาต้นทางโค้ง ที่มีการยึดโยงเสาต้นข้างของโครงสร้างเสา คอแบบธรรมดา
- 5 ใช้ลวดเหล็กเกลียว ขนาด 95 มม เป็นสายยึดโยง
- 6 เสาทุกต้น ไม่ต้องทาสีทอกรีดโคสน้ำ ยกเว้น เสาต้นรับสายสาย
- 7 ใช้สำหรับการก่อสร้างในบริเวณที่สภาพดิน เป็นดินแข็ง ปานกลาง ( ดินท้องนาทั่วไป และดินเหนียวปนทราย ) ในการก่อสร้าง ณ บริเวณที่มีสภาพดินอ่อนโยน ให้พิจารณาความแข็งแรงของฐานราก ตามสภาพดิน เป็นแห่งๆไป

- 1 MAXIMUM CONDUCTOR SIZE :-  
 OHGW : STEEL STRANDED WIRE 25 mm<sup>2</sup>  
 22 KV AND 33 KV SYSTEM : SAC 185 mm<sup>2</sup>  
 LV SYSTEM : INSULATED AI CABLE 95 mm<sup>2</sup>.
- 2 SPAN LENGTH AND SAG OF ALL CONDUCTORS, FOR TYPICAL STRUCTURES, SPECIFIED IN TABLE 1
- 3 THE DOUBLE DEADEND STRUCTURE WITH LINE GUY SHALL BE CONSTRUCTED BEFORE THE ANGLE STRUCTURE SECTION .
- 4 ALL POLES SHALL NOT BE GUYED, EXCEPT DEADEND POLES AND CROSSARM ANGLE STRUCTURE WITH GUY
- 5 USE 95 mm<sup>2</sup> STEEL STRANDED WIRE AS GUY WIRES .
- 6 ALL POLE FOOT SHALL NOT BE COVERED WITH CONCRETE EXCEPT DEADEND POLE FOOT
- 7 USE FOR CONSTRUCTION AT NORMAL SOIL ( MARCHY SOL, CLAY AND SANDY SOL ) AREA . FOR CONSTRUCTION IN OTHER AREAS, POLE FOUNDATION SHALL BE CONSIDERED ACCORDING TO SOIL CONDITION



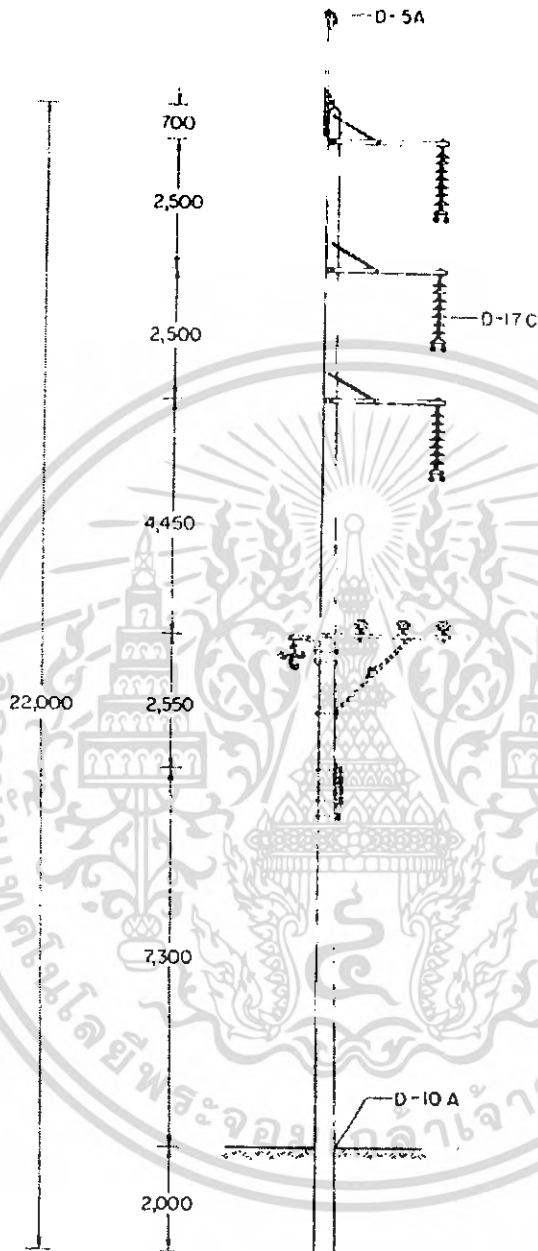
COPY

<p>โครงการพัฒนาระบบไฟฟ้า                  การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค</p>	<p>การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค</p>	<p>ใช้ตามแบบ                  ฐานเสาโคสน้ำแบบ                  20 พ.ร. 2547</p>
<p>พื้นที่                  20 พ.ร. 2547</p>	<p>โครงการ                  20 พ.ร. 2547</p>	<p>วันที่                  20 พ.ร. 2547</p>
<p>โครงการ                  20 พ.ร. 2547</p>	<p>โครงการสายอากาศขนาด 22-33 KV, 2 วงจร                  สำหรับสายอากาศแบบ (SAC) สายอากาศแบบ หรือสายอากาศแบบ</p>	<p>วันที่                  20 พ.ร. 2547</p>
<p>โครงการ                  20 พ.ร. 2547</p>	<p>22-33 KV, 2 CIRCUIT DISTRIBUTION POLE STRUCTURE                  FOR SPACE AERIAL CABLE (SAC) STRINGING ON LINE-POST                  OR PIN-POST INSULATORS</p>	<p>ใช้ตามแบบ SA2-DTS/47002                  วันที่ 2 พ.ร. 2547</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะโครงการเท่านั้น ไม่ควรนำออกใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
 ไม่ควรแก้ไข หรือคัดลอกเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การประกอบเครื่อง  
ASSEMBLY NO 5 2 6 4



ก่อสร้างหรือไฟฟ้าแรงดันสูง สายส่งแรงดัน	<b>การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค</b>	9/1/2564
ผู้เขียน: <i>[Signature]</i> ผู้ตรวจ: <i>[Signature]</i> วิศวกร: <i>[Signature]</i> หัวหน้าแผนก: <i>[Signature]</i> ผู้อำนวยการกอง: <i>[Signature]</i> ผู้อำนวยการฝ่าย: <i>[Signature]</i>	วิศวกร: <i>[Signature]</i> 115 KV ทรานซิม สายไฟฟ้าคู่ เสาตั้งแบบทังเจน HCU SD - TG - 3	อกเกณฑ์ออกแบบ เงื่อนไขโครงการ: 4 ม.ค. 33 แก้ไขครั้งที่: 27 ก.ย. 38 ผลิตเป็น: ผลิตพิเศษ มาตรฐาน: 1.125
รองผู้อำนวยการสายเทคนิค	115 KV SINGLE CIRCUIT DOUBLE CONDUCTOR TANGENT STRUCTURE TYPE SD - TG - 3	แบบครั้งที่.SA1-015/330Q2 แผ่นที่: 1...ของจำนวน...3...แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือนำไปใช้ในการค้า  
 ไม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

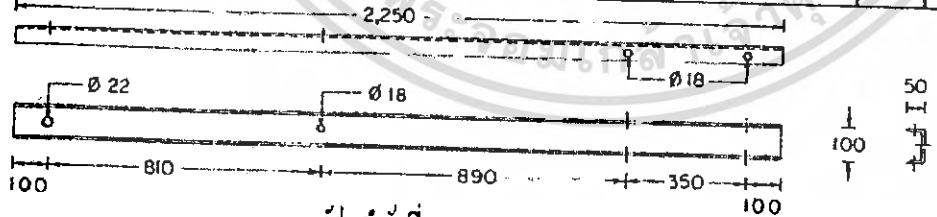
การประกอบโครง  
ASSEMBLY NO. 5264

บัญชีวัสดุ  
BILL OF MATERIAL

ลำดับ ITEM	รายละเอียด DESCRIPTION	จำนวน REQ'D	รหัสวัสดุ MAT. NO.
1	เสาปูนกรง 22 ม POLE, CONCRETE, 22 m LONG	1	00010011 (0041)
2	คานเหล็กแขนขาโครง ทรงแทง C 100 X 50 X 5 มม. ยาว 2.25 ม. นอก. 116 STEEL ALLEY ARM, C 100 X 50 X 5 mm, 2.25 m LONG, TIS 116	3	01000100 (6015)
3	เหล็กประกบคาน ทรงแทง 40 X 6 X 1,000 มม. BRACE, FLAT FOR CROSSARM, 40 X 6 X 1,000 mm	3	01200002 (0121)
4	สลักเกลียว M 16 X 75 มม. พร้อมแหวนรอง 2 อัน BOLT, MACHINE, M 16 X 75 mm, COMPLETE WITH 2 ROUND WASHER	3	01104000 (0236)
5	สลักเกลียว M 16 X 300 มม. BOLT, MACHINE, M 16 X 300 mm	3	0110204 (0224)
6	สลักเกลียว M 16 X 350 มม. BOLT, MACHINE, M 16 X 350 mm	2	01110205 (0225)
7	สลักเกลียว M 20 X 350 มม. BOLT, MACHINE, M 20 X 350 mm	3	01110300 (0233)
8	สลักหัวไข่แมว M 16 X 150 มม. BOLT, OVAL EYE, M 16 X 150 mm	3	01150000 (0257)
9	แหวนสี่เหลี่ยมแบน 52 X 52 X 4.5 มม. 1Ø 18 มม. นอก. 258 WASHER, SQUARE, FLAT 52 X 52 X 4.5 mm, HOLE Ø 18 mm, TIS 258	11	01180100 (0356)
10	แหวนสี่เหลี่ยมแบน 62 X 62 X 6 มม. 1Ø 22 มม. นอก. 258 WASHER, SQUARE, FLAT 62 X 62 X 6 mm, HOLE Ø 22 mm, TIS 258	3	01180101 (0356)
11	แหวนสปริง M 16 นอก. 259 WASHER, LOCK, M 16, TIS 259	3	01180301 (0365)
12	เหล็กทาบสายคองไฟฟ้า ขนาด 65 X 65 X 6 มม. ยาว 2,500 มม. นอก. 116 OVERHEAD GROUND WIRE BAYONET, 65 X 65 X 6 mm, 2,500 mm LONG, TIS 116	1	01010004 (0135)

รายละเอียด  
DESCRIPTION

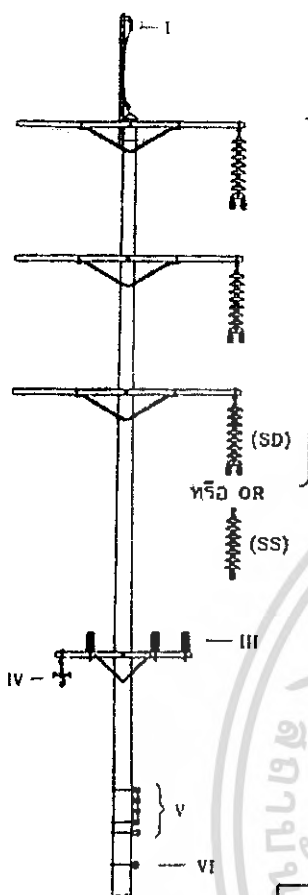
D-17C	การประกอบคกวางแขวน SUSPENSION INSULATOR ASSEMBLY	3	
D-5A	การทาบสายคองไฟฟ้า OVERHEAD GROUND WIRE CONNECTION	1	
D-10A	ฐานรากเสา POLE FOUNDATION	1	



วัสดุลำดับที่  
MATERIAL ITEM ②

ชนิดการเดินไฟฟ้าและบริเวณ สายไฟฟ้าบริเวณ	การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	ชื่อ พื้นที่ถนน
ผู้เดิน ผู้สำรวจ หัวหน้าแผนก ผู้ควบคุมการก่อสร้าง ผู้ตรวจการก่อสร้าง	ผู้ทำการ 11/12/20 33	ประเภทถนน ถนนลาดยาง จำนวนเสาเริ่มต้น 4 นศ. 33 แก้ไขวันที่ 27 กย. 38 ชนิดดิน ผลิตพิเศษ ขนาดคาน 1.20
ชื่อผู้ทำการขออนุญาต	115 KV ทรงแทงเดี่ยว สายไฟฟ้าคู่ เดี่าสีทึบทางตรง แบบ SD - TG - 3	แบบเลขที่ SAI-015/33002 อนุญาตเห็นชอบ แผนก 3 ของจำนวน 3 แผ่น

การประเมินเลขที่ ASSEMBLY NO. 5 1 5 1



ก. โครงสร้างสายส่ง 115 kv วงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าเดี่ยว และ วงจรเดี่ยว สายไฟฟ้าคู่

A 115 kV SINGLE CIRCUIT SINGLE CONDUCTOR AND SINGLE CIRCUIT DOUBLE CONDUCTOR

ลำดับที่ ITEM	วงจรไฟฟ้า SYSTEM CIRCUIT	ขนาดสายลึงสุด (ค.ม.ม.) MAX.COND.SIZE (mm <sup>2</sup> )	จำนวน (เส้น) QUANTITY (WIRE)
I	สายลึงฟ้า OHGW	35	1
II	สายเบิลอย 115 kv 115 kV AI CONDUCTOR	400	3 (SS) 6 (SD)
III	22.33 kv สายเบิลอย หรือ เคเบิลอากาศ 22.33 kV AI COND. OR AERIAL CABLE	185	3
IV	22.33 kv เคเบิลอากาศ 22.33 kV AERIAL CABLE	185	3
V	สายแรงต่ำ L.T. CONDUCTOR	95	5
VI	สายสื่อสารโทรคมนาคม TELECOMMUNICATION CABLE	≤ 55 mm (TOTAL OUTSIDE DIA.)	1

1 โครงสร้างทางตรง TANGENT STRUCTURE ( 0° - 2° )

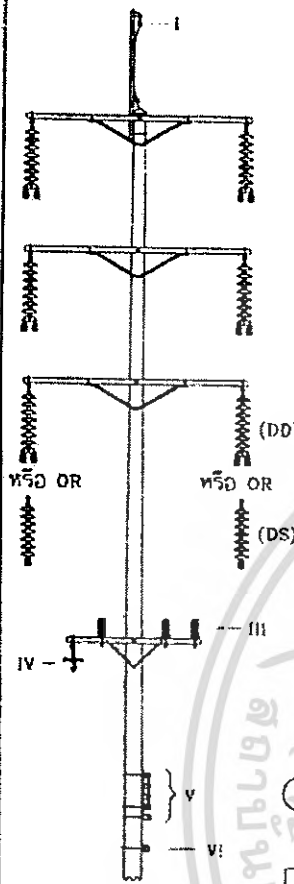
วงจรไฟฟ้า SYSTEM CIRCUIT	ระยะช่วงเสาสูงสุด (ม.) MAX. SPAN (m)	หมายเหตุ NOTE
วงจรระบบ 115 kv 115 kV CIRCUIT (I+II)	80	ดูแผนผังที่ 1
วงจรระบบ 22.33 kv 22.33 kV CIRCUIT (III+IV)	40	ใบแบบแผนผังที่ 5
วงจรแรงต่ำและระบบสื่อสาร L.T. & TELECOMMUNICATION CIRCUIT (V+VI)	40	SCE PLAN NO. 1 ON. PAGE 5

กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย  
 ผู้เขียน สมชาย  
 ผู้สำรวจ  
 วิศวกร  
 หัวหน้าแผนก  
 ผู้อำนวยการกอง  
 ผู้อำนวยการฝ่าย  
 รองผู้อำนวยการฝ่ายวางแผนและพัฒนาระบบไฟฟ้า

**การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค**  
 ผู้ว่าการ  
 ระยะทางระหว่างช่วงเสาของโครงสร้างสายส่ง 115 kv (กรณีทีก่อสร้างระบบจำหน่าย 22.33 kv โด่แนวสายส่ง 115 kv) โครงสร้างเสา สำหรับทางตรง และทางโค้ง  
 SPAN LENGTHS FOR 115 kV CONSTRUCTION STRUCTURE (IN CASE THE 22.33 kV LINE IS CONSTRUCTED UNDER 115 kV LINE) TANGENT AND ANGLE STRUCTURE

ใช้แทนแบบ IB1-015/24008  
 IB1-015/36038  
 ถูกแทนโดยแบบ  
 เขียนเสร็จวันที่ 3 ม.ค. 2548  
 แก๊บนววันที่  
 มิติเป็น เมตร  
 มาตรฐาน  
 แบบเลขที่ SAI-015/48001  
 แผ่นที่ 1 ของจำนวน 8 แผ่น

การประกอบเลขที่ 5 1 5 1  
ASSEMBLY NO.



- ๗. โครงสร้างสายส่ง 115 kv วงจรคู่ สายไฟฟ้าเดี่ยว และ วงจรคู่ สายไฟฟ้าคู่
- ๘. 115 kv DOUBLE CIRCUIT SINGLE CONDUCTOR AND DOUBLE CIRCUIT DOUBLE CONDUCTOR

ลำดับที่ ITEM	วงจรไฟฟ้า SYSTEM CIRCUIT	ขนาดสายส่งสุด (ค.ม.ม.) MAX COND SIZE (mm <sup>2</sup> )	จำนวน (เส้น) QUANTITY (WIRE)
I	สายล่อฟ้า OHGW	35	1
II	สายนำลิ้น 115 kv 115 kv AI CONDUCTOR	400	8 (DS) 12 (DD)
III	22.33 kv สายเบรช หรือ เคเบิลอากาศ 22.33 kv AI COND OR AERIAL CABLE	185	3
IV	22.33 kv เคเบิลอากาศ 22.33 kv AERIAL CABLE	185	3
V	สายแรงต่ำ L.T. CONDUCTOR	95	5
VI	สายสื่อสารโทรคมนาคม TELECOMMUNICATION CABLE	≤ 55 mm (TOTAL OUTSIDE DIA.)	1

๑ โครงสร้างทางตรง ( 0 - 2 )  
TANGENT STRUCTURE ( 0 - 2 )

วงจรไฟฟ้า SYSTEM CIRCUIT	ระยะช่วงเสาสูงสุด (ม.) MAX SPAN (m)	หมายเหตุ NOTE
วงจรระบบ 115 kv 115 kv CIRCUIT (I+II)	40	ดูแผนผังที่ 2 ใบแนบแผ่นที่ 5 SEE PLAN NO. 2 ON. PAGE 5
วงจรระบบ 22.33 kv 22.33 kv CIRCUIT (III+IV)		
วงจรแรงต่ำและระบบสื่อสาร L.T. & TELECOMMUNICATION CIRCUIT (V+VI)		

กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า ฝ่ายมาตรฐานและความปลอดภัย	<b>การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค</b>	ใช้แทนแบบ IB1-015/24009 IB1-015/36038 ถูกแทนโดยแบบ .....
ผู้เขียน..... ส.ม.ช.น. ผู้สำรวจ..... วิศวกร..... หัวหน้าแผนก..... ผู้อำนวยการกอง..... ผู้อำนวยการฝ่าย.....	ผู้ว่าการ..... ระยะห่างระหว่างเสาของโครงสร้างสายส่ง 115 kv (กรณีทีก่อสร้างระบบจำหน่าย 22.33 kv ใต้แนวสายส่ง 115 kv) โครงสร้างเสา สำหรับทางตรง และ ทางโค้ง	เขียนเสร็จวันที่ ๓. ม.ค. 25๕๐ แก้มบวันที..... มิติเป็น..... เมตร มาตรฐาน.....
รองผู้จัดการฝ่ายเทคนิคและ ทีมระบบไฟฟ้า	SPAN LENGTHS FOR 115 kv CONSTRUCTION STRUCTURE (IN CASE THE 22.33 kv LINE IS CONSTRUCTED UNDER 115 kv LINE) TANGENT AND ANGLE STRUCTURE	แบบเลขที่ SAI-015/48001 แผ่นที่ ๑ ของจำนวน ๑ แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นชอบหรือมีข้อสงสัยในการดำเนินการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# LM108/LM208/LM308 Operational Amplifiers

## General Description

The LM108 series are precision operational amplifiers having specifications a factor of ten better than FET amplifiers over a -55°C to +125°C temperature range.

The devices operate with supply voltages from ±2V to ±20V and have sufficient supply rejection to use unregulated supplies. Although the circuit is interchangeable with and uses the same compensation as the LM101A, an alternate compensation scheme can be used to make it particularly insensitive to power supply noise and to make supply bypass capacitors unnecessary.

The low current error of the LM108 series makes possible many designs that are not practical with conventional amplifiers. In fact, it operates from 10 MΩ source resistances,

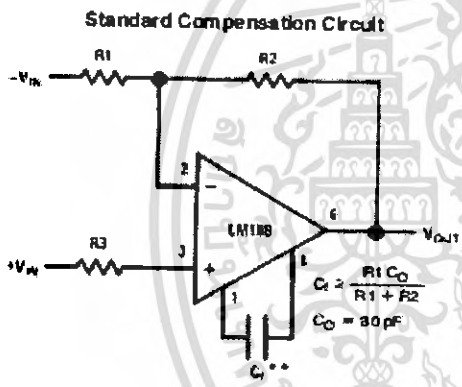
introducing less error than devices like the 709 with 10 kΩ sources. Integrators with drifts less than 500 μV/sec and analog time delays in excess of one hour can be made using capacitors no larger than 1 μF.

The LM108 is guaranteed from -55°C to +125°C, the LM208 from -25°C to +85°C, and the LM308 from 0°C to +70°C.

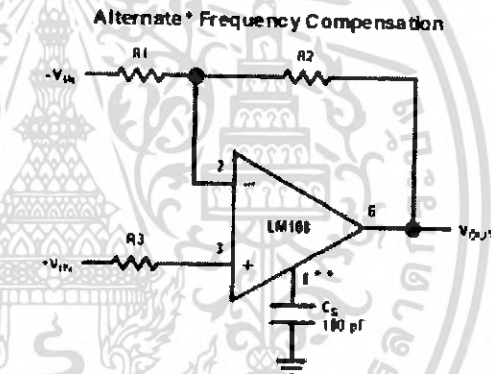
## Features

- Maximum input bias current of 3.0 nA over temperature
- Offset current less than 400 pA over temperature
- Supply current of only 300 μA, even in saturation
- Guaranteed drift characteristics

## Compensation Circuits



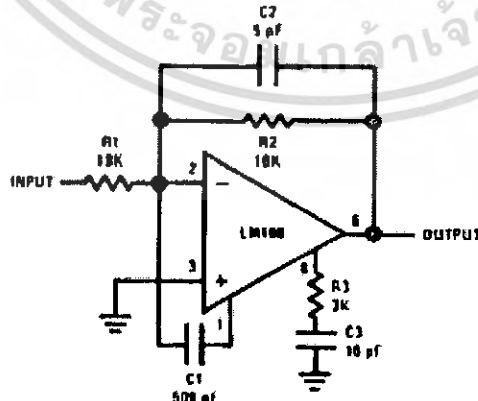
\*Bandwidth and slew rate are proportional to  $1/C_c$



\*Improves rejection of power supply noise by a factor of ten.

\*Bandwidth and slew rate are proportional to  $1/C_c$

## Feedforward Compensation



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office / Distributors for availability and specifications. (Note 5)

	LM108/LM208	LM308
Supply Voltage	$\pm 20V$	$\pm 18V$
Power Dissipation (Note 1)	500 mW	500 mW
Differential Input Current (Note 2)	$\pm 10 \text{ mA}$	$\pm 10 \text{ mA}$
Input Voltage (Note 3)	$\pm 15V$	$\pm 15V$
Output Short-Circuit Duration	Continuous	Continuous
Operating Temperature Range (LM108) (LM208)	$-65^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C}$ to $+70^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$-25^\circ\text{C}$ to $+85^\circ\text{C}$	
Lead Temperature (Soldering, 10 sec) DIP	$-65^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$	$-65^\circ\text{C}$ to $+150^\circ\text{C}$
H Package Lead Temp (Soldering 10 seconds)	$260^\circ\text{C}$	$260^\circ\text{C}$
Soldering Information	$300^\circ\text{C}$	$300^\circ\text{C}$
Dual-In-Line Package		
Soldering (10 seconds)	$260^\circ\text{C}$	
Small Outline Package		
Vapor Phase (60 seconds)	$215^\circ\text{C}$	
Infrared (15 seconds)	$220^\circ\text{C}$	
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.		
ESD Tolerance (Note 6)	2000V	

## Electrical Characteristics (Note 4)

Parameter	Condition	LM108/LM208			LM308			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.7	2.0		2.0	7.5	mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.05	0.2		0.2	1	nA
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.8	2.0		1.5	7	nA
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}$	30	70		10	40		M $\Omega$
Supply Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		0.3	0.8		0.3	0.8	mA
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 15V$ $V_{OUT} = \pm 10V, R_L \geq 10 \text{ k}\Omega$	50	300		25	300		V/mV
Input Offset Voltage				3.0			10	mV
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage			3.0	15		6.0	30	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current				0.4			1.5	nA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current			0.5	2.5		2.0	10	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current				3.0			10	nA
Supply Current	$T_A = +125^\circ\text{C}$		0.15	0.4				mA
Large Signal Voltage Gain	$V_S = \pm 15V, V_{OUT} = \pm 10V$ $R_L \geq 10 \text{ k}\Omega$	25			15			V/mV
Output Voltage Swing	$V_S = \pm 15V, R_L = 10 \text{ k}\Omega$	$\pm 13$	$\pm 14$		$\pm 13$	$\pm 14$		V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Electrical Characteristics (Note 4) (Continued)

Parameter	Condition	LM108/LM208			LM308			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Voltage Range	$V_S = \pm 15V$	$\pm 13.5$			$\pm 14$			V
Common Mode Rejection Ratio		85	100		80	100		dB
Supply Voltage Rejection Ratio		80	96		80	96		dB

Note 1: The maximum junction temperature of the LM108 is 150°C, for the LM208, 100°C and for the LM308, 85°C. For operating at elevated temperatures, devices in the HD8 package must be derated based on a thermal resistance of 180°C/W, junction to ambient, or 20°C/W, junction to case. The thermal resistance of the dual-in-line package is 100°C/W, junction to ambient.

Note 2: The inputs are shunted with back-to-back diodes for overvoltage protection. Therefore, excessive current will flow if a differential input voltage in excess of 1V is applied between the inputs unless some limiting resistance is used.

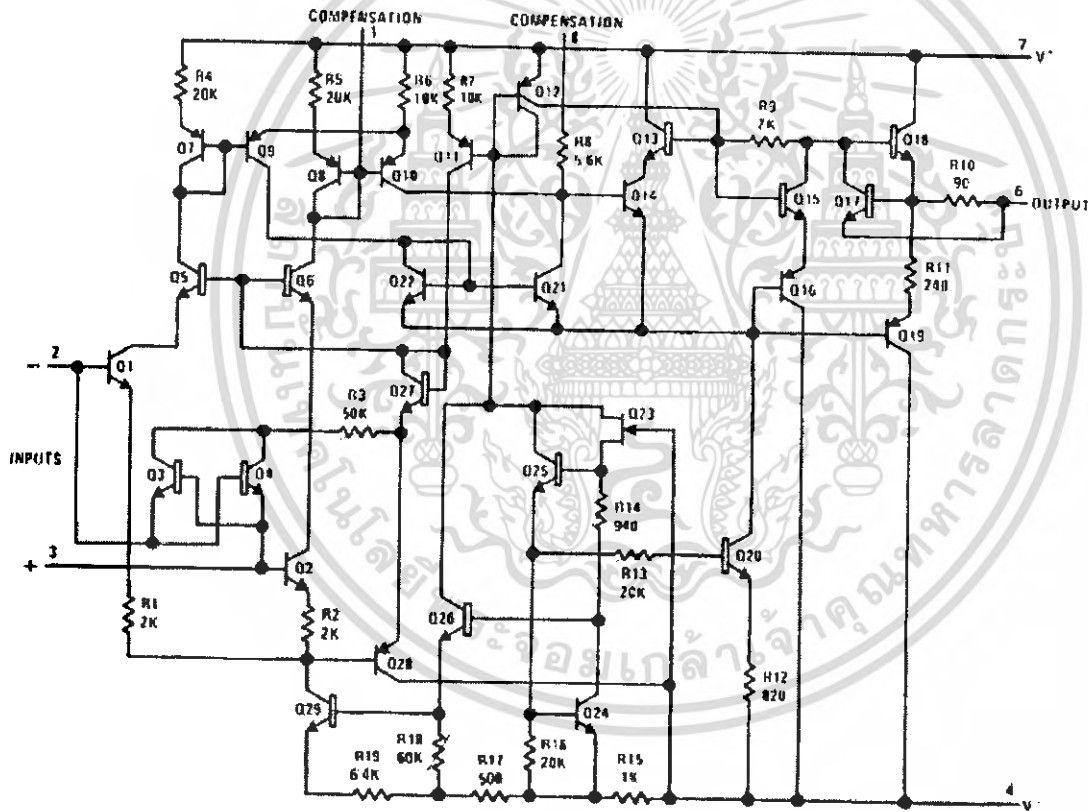
Note 3: For supply voltages less than  $\pm 15V$ , the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

Note 4: These specifications apply for  $\pm 5V \leq V_S \leq \pm 20V$  and  $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$ , unless otherwise specified. With the LM208, however, all temperature specifications are limited to  $-25^\circ C \leq T_A \leq 85^\circ C$ , and for the LM308 they are limited to  $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$ .

Note 5: Refer to RETS106X for LM108 military specifications and RETs 106AX for LM108A military specifications.

Note 6: Human body model, 1.5 k $\Omega$  in series with 100 pF.

### Schematic Diagram

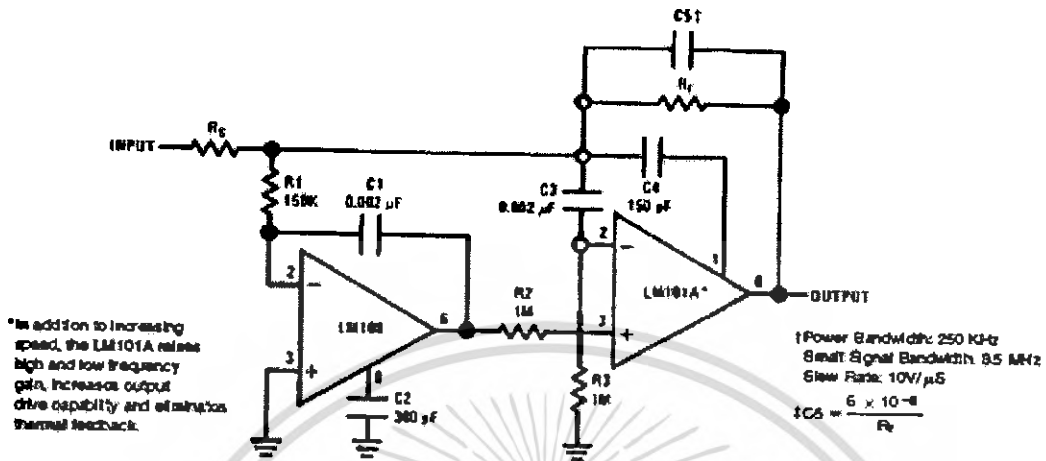


TLH/7758-8

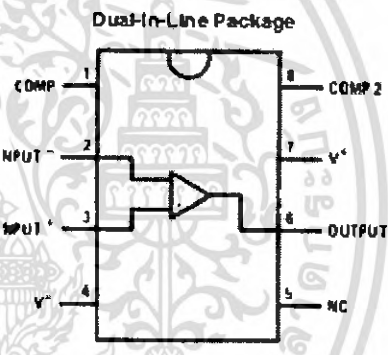
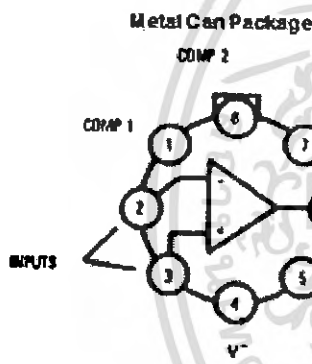
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Applications (Continued)

Fast Summing Amplifier

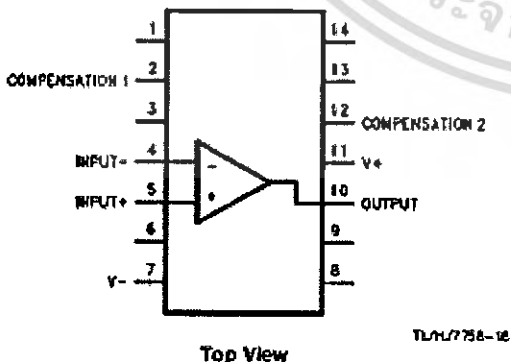


Connection Diagrams



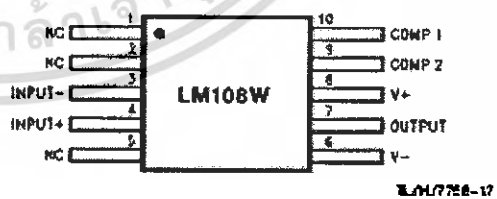
\*Package is connected to Pin 4 (V<sup>-</sup>)  
 \*\*Unused pin (no internal connection) to allow for input and leakage guarding on pinned circuit board layout.

Order Number LM108H, LM108H/883,  
 LM308AH or LM308H  
 See NS Package Number H08C



Order Number LM108J/883  
 See NS Package Number J14A

Order Number LM108J-8/883, LM308M or LM308N  
 See NS Package Number J08A, M08A or N08E



Order Number LM108W/883  
 See NS Package Number W10A

[Also available per JMC6510/10104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**LM124  
LM224 - LM324**

**LOW POWER QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS**

- WIDE GAIN BANDWIDTH : 1.3MHz
- INPUT COMMON-MODE VOLTAGE RANGE INCLUDES GROUND
- LARGE VOLTAGE GAIN : 100dB
- VERY LOW SUPPLY CURRENT/AMPLI : 375µA
- LOW INPUT BIAS CURRENT : 20nA
- LOW INPUT OFFSET VOLTAGE : 5mV max. (for more accurate applications, use the equivalent parts LM124A-LM224A-LM324A which feature 3mV max.)
- LOW INPUT OFFSET CURRENT : 2nA
- WIDE POWER SUPPLY RANGE :  
SINGLE SUPPLY : +3V TO +30V  
DUAL SUPPLIES : ±1.5V TO ±15V

**DESCRIPTION**

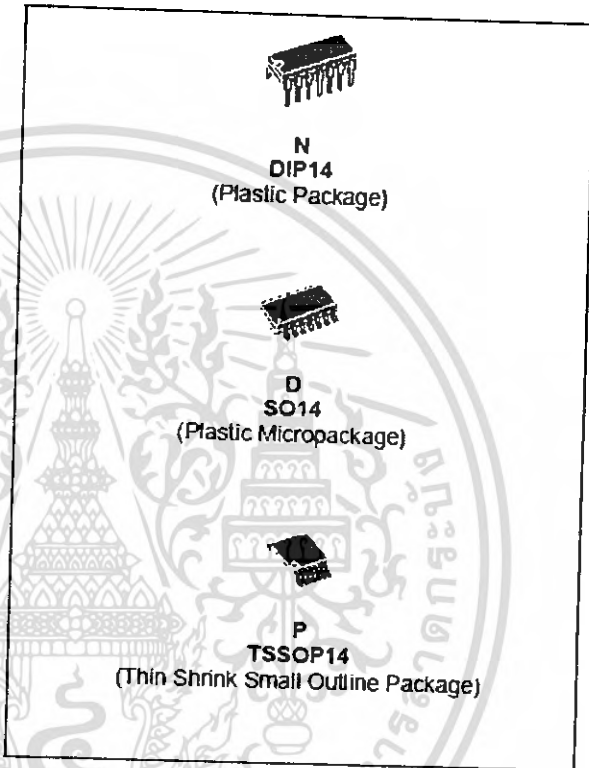
These circuits consist of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers. They operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

**ORDER CODE**

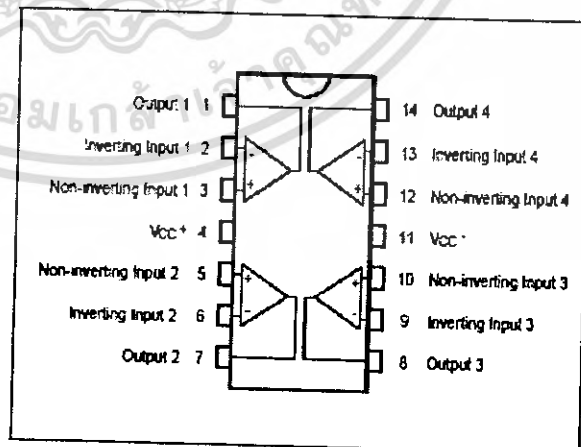
Part Number	Temperature Range	Package		
		N	D	P
LM124	-55°C, +125°C	•	•	•
LM224	-40°C, +105°C	•	•	•
LM324	0°C, +70°C	•	•	•

Example : LM224N

N = Dual in Line Package (DIP)  
 D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)  
 P = Thin Shrink Small Outline Package (TSSOP) - only available in Tape & Reel (PT)

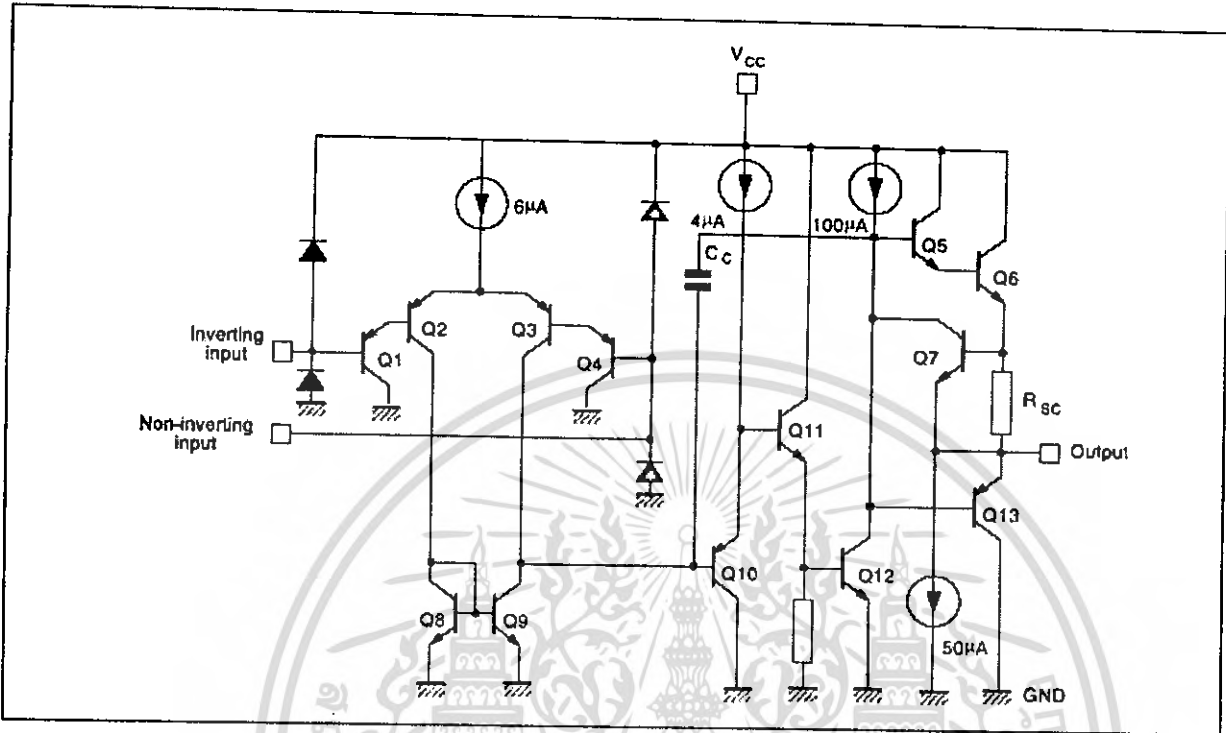


**PIN CONNECTIONS (top view)**



LM124-LM224-LM324

**SCHEMATIC DIAGRAM (1/4 LM124)**



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Symbol	Parameter	LM124	LM224	LM324	Unit
$V_{CC}$	Supply voltage		±16 or 32		V
$V_i$	Input Voltage		-0.3 to +32		V
$V_{id}$	Differential Input Voltage <sup>1)</sup>		+32		V
$P_{tot}$	Power Dissipation	N Suffix	500	500	mW
		D Suffix		400	400
	Output Short-circuit Duration <sup>2)</sup>		Infinite		
$I_{in}$	Input Current <sup>3)</sup>	50	50	50	mA
$T_{oper}$	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
$T_{stg}$	Storage Temperature Range		-65 to +150		°C

1. Either or both input voltages must not exceed the magnitude of  $V_{CC}^+$  or  $V_{CC}^-$ .
2. Short-circuits from the output to  $V_{CC}$  can cause excessive heating if  $V_{CC} > 15V$ . The maximum output current is approximately 40mA independent of the magnitude of  $V_{CC}$ . Destructive dissipation can result from simultaneous short-circuit on all amplifiers.
3. This input current only exists when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistor becoming forward biased and thereby acting as input diodes clamps. In addition to this diode action, there is also NPN parasitic action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the Op-amps to go to the  $V_{CC}$  voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This is not destructive and normal output will set up again for input voltage higher than -0.3V.

## LM124-LM224-LM324

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_{CC}^+ = +5V$ ,  $V_{CC}^- = \text{Ground}$ ,  $V_o = 1.4V$ ,  $T_{amb} = +25^\circ C$  (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{io}$	Input Offset Voltage - note 1) $T_{amb} = +25^\circ C$		2	5	mV
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ LM324			7	
				7	
				9	
$I_{io}$	Input Offset Current $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		2	30 100	nA
$I_{ib}$	Input Bias Current - note 2) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		20	150 300	nA
$A_{vd}$	Large Signal Voltage Gain $V_{CC}^+ = +15V$ , $R_L = 2k\Omega$ , $V_o = 1.4V$ to $11.4V$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	50 25	100		V/mV
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_s \leq 10k\Omega$ ) $V_{CC}^+ = 5V$ to $30V$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	65 65	110		dB
$I_{CC}$	Supply Current, all Amp, no load $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		$V_{CC} = +5V$ 0.7 $V_{CC} = +30V$ 1.5 $V_{CC} = +5V$ 0.8 $V_{CC} = +30V$ 1.5	1.2 3 1.2 3	mA
$V_{icm}$	Input Common Mode Voltage Range $V_{CC} = +30V$ - note 3) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	0 0		$V_{CC} - 1.5$ $V_{CC} - 2$	V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ( $R_s \leq 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	70 60	80		dB
$I_{source}$	Output Current Source ( $V_{id} = +1V$ ) $V_{CC} = +15V$ , $V_o = +2V$	20	40	70	mA
$I_{sink}$	Output Sink Current ( $V_{id} = -1V$ ) $V_{CC} = +15V$ , $V_o = +2V$ $V_{CC} = +15V$ , $V_o = +0.2V$	10	20		mA $\mu A$
		12	50		
$V_{OH}$	High Level Output Voltage $V_{CC} = +30V$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$ $V_{CC} = +5V$ , $R_L = 2k\Omega$ $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$				V
		$R_L = 2k\Omega$	26 26	27	
		$R_L = 10k\Omega$	27 27	28	
			3.5 3		

## LM124-LM224-LM324

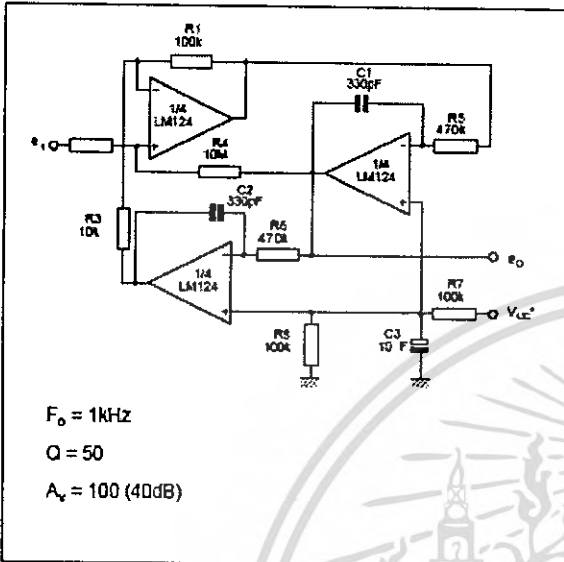
Symbol	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Unit
$V_{OL}$	Low Level Output Voltage ( $R_L = 10k\Omega$ ) $T_{amb} = +25^\circ C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		5	20 20	mV
SR	Slew Rate $V_{CC} = 15V, V_i = 0.5$ to $3V, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$ , unity Gain		0.4		V/ $\mu s$
GBP	Gain Bandwidth Product $V_{CC} = 30V, f = 100kHz, V_{in} = 10mV, R_L = 2k\Omega, C_L = 100pF$		1.3		MHz
THD	Total Harmonic Distortion $f = 1kHz, A_v = 20dB, R_L = 2k\Omega, V_o = 2V_{pp}, C_L = 100pF, V_{CC} = 30V$		0.015		%
$e_n$	Equivalent Input Noise Voltage $f = 1kHz, R_s = 100\Omega, V_{CC} = 30V$		40		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
$DV_{io}$	Input Offset Voltage Drift		7	30	$\mu V/^\circ C$
$DI_{io}$	Input Offset Current Drift		10	200	$pA/^\circ C$
$V_{o1}/V_{o2}$	Channel Separation - note 4) $1kHz \leq f \leq 20kHz$		120		dB

- $V_o = 1.4V, R_s = 0\Omega, 5V < V_{CC} < 30V, 0 < V_i < V_{CC} + 1.5V$
- The direction of the input current is out of the IC. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.
- The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3V. The upper end of the common-mode voltage range is  $V_{CC} + 1.5V$ , but either or both inputs can go to +32V without damage.
- Due to the proximity of external components insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.

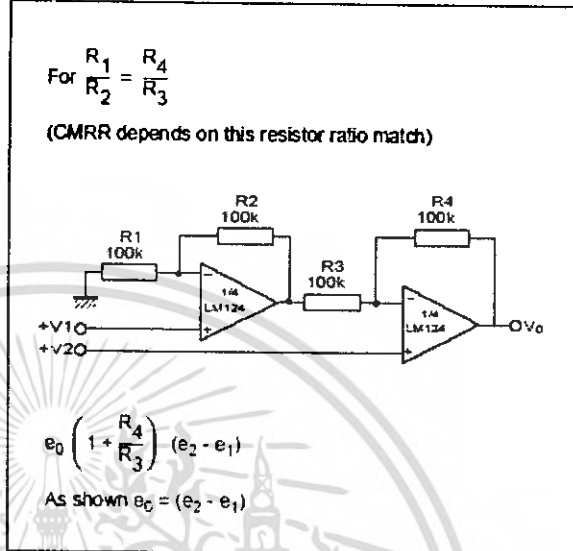
LM124-LM224-LM324

TYPICAL SINGLE - SUPPLY APPLICATIONS

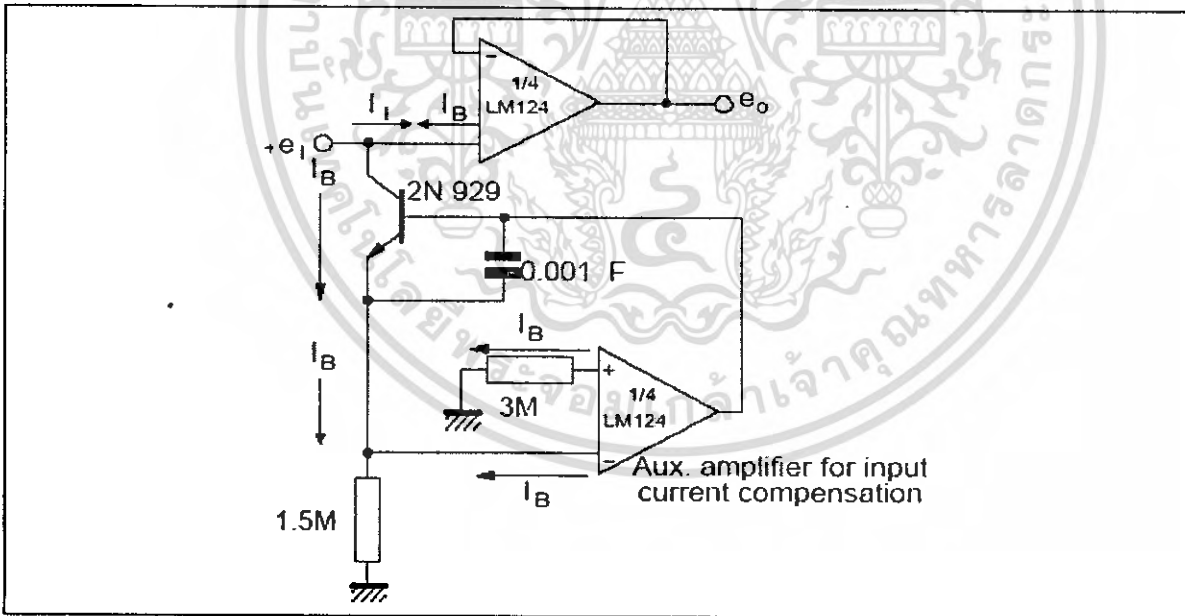
ACTIVER BANDPASS FILTER



HIGH INPUT Z, DC DIFFERENTIAL AMPLIFIER



USING SYMETRICAL AMPLIFIERS TO REDUCE INPUT CURRENT (GENERAL CONCEPT)



## LM124-LM224-LM324

## MACROMODEL

\*\* Standard Linear lcs Macromodels, 1993.

\*\* CONNECTIONS :

\* 1 INVERTING INPUT

\* 2 NON-INVERTING INPUT

\* 3 OUTPUT

\* 4 POSITIVE POWER SUPPLY

\* 5 NEGATIVE POWER SUPPLY

.SUBCKT LM124 1 3 2 4 5 (analog)

\*\*\*\*\*

.MODEL MDTH D IS=1E-8 KF=3.104131E-15  
CJO=10F

\* INPUT STAGE

CIP 2 5 1.000000E-12

CIN 1 5 1.000000E-12

EIP 10 5 2 5 1

EIN 16 5 1 5 1

RIP 10 11 2.600000E+01

RIN 15 16 2.600000E+01

RIS 11 15 2.003862E+02

DIP 11 12 MDTH 400E-12

DIN 15 14 MDTH 400E-12

VOFP 12 13 DC 0

VOFN 13 14 DC 0

IPOL 13 5 1.000000E-05

CPS 11 15 3.783376E-09

DINN 17 13 MDTH 400E-12

VIN 17 5 0.000000e+00

DINR 15 18 MDTH 400E-12

VIP 4 18 2.000000E+00

FCP 4 5 VOFP 3.400000E+01

FCN 5 4 VOFN 3.400000E+01

FIBP 2 5 VOFN 2.000000E-03

FIBN 5 1 VOFP 2.000000E-03

\* AMPLIFYING STAGE

FIP 5 19 VOFP 3.600000E+02

FIN 5 19 VOFN 3.600000E+02

RG1 19 5 3.652997E+06

RG2 19 4 3.652997E+06

CC 19 5 6.000000E-09

DOPM 19 22 MDTH 400E-12

DONM 21 19 MDTH 400E-12

HOPM 22 28 VOUT 7.500000E+03

VIPM 28 4 1.500000E+02

HONM 21 27 VOUT 7.500000E+03

VINM 5 27 1.500000E+02

EOUT 26 23 19 5 1

VOUT 23 5 0

ROUT 26 3 20

COUT 3 5 1.000000E-12

DOP 19 25 MDTH 400E-12

VOP 4 25 2.242230E+00

DON 24 19 MDTH 400E-12

VON 24 5 7.922301E-01

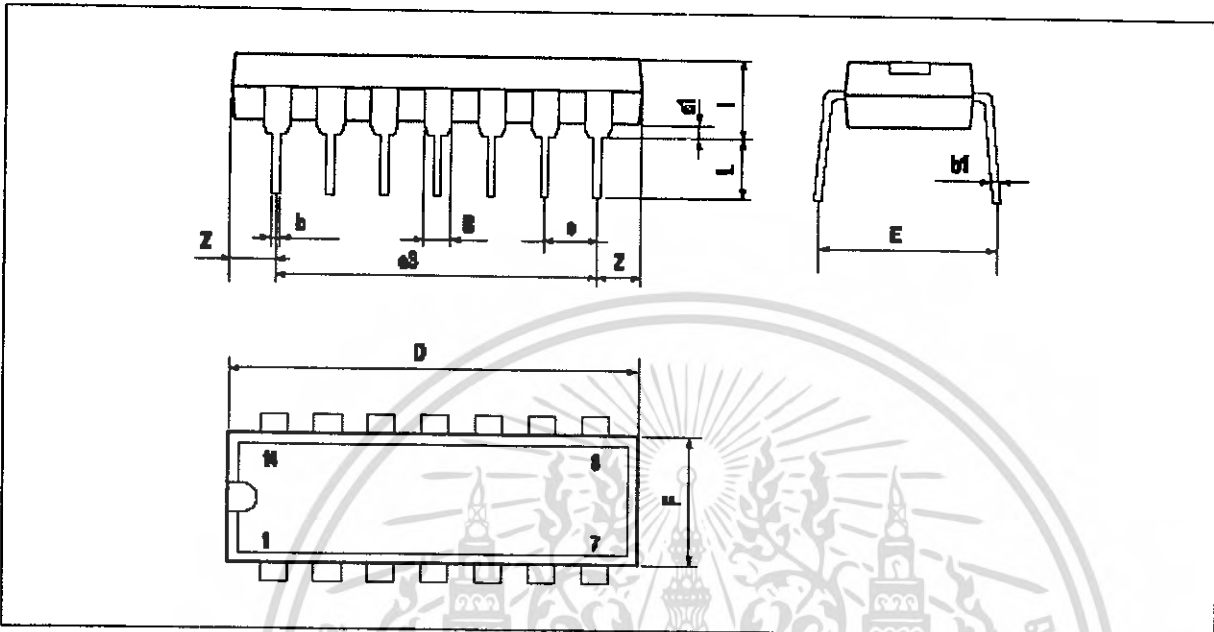
.ENDS

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$V_{CC}^+ = +15V$ ,  $V_{CC}^- = 0V$ ,  $T_{amb} = 25^\circ C$  (unless otherwise specified)

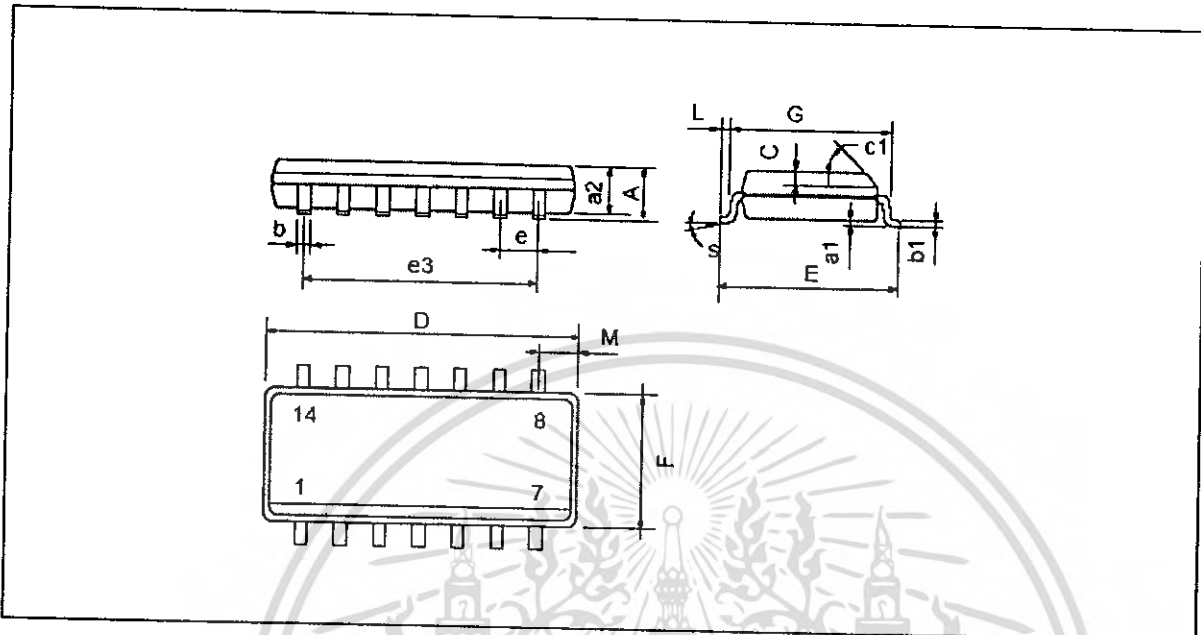
Symbol	Conditions	Value	Unit
$V_{io}$		0	mV
$A_{vd}$	$R_L = 2k\Omega$	100	V/mV
$I_{cc}$	No load, per amplifier	350	$\mu A$
$V_{icm}$		-15 to +13.5	V
$V_{OH}$	$R_L = 2k\Omega$ ( $V_{CC}^+ = 15V$ )	+13.5	V
$V_{OL}$	$R_L = 10k\Omega$	5	mV
$I_{os}$	$V_o = +2V$ , $V_{CC} = +15V$	+40	mA
GBP	$R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$	1.3	MHz
SR	$R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$	0.4	V/ $\mu s$

## LM124-LM224-LM324

**PACKAGE MECHANICAL DATA**  
**14 PINS - PLASTIC DIP**


Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
a1	0.51			0.020		
B	1.39		1.65	0.055		0.065
b		0.5			0.020	
b1		0.25			0.010	
D			20			0.787
E		8.5			0.335	
e		2.54			0.100	
e3		15.24			0.600	
F			7.1			0.280
l			5.1			0.201
L		3.3			0.130	
Z	1.27		2.54	0.050		0.100

## LM124-LM224-LM324

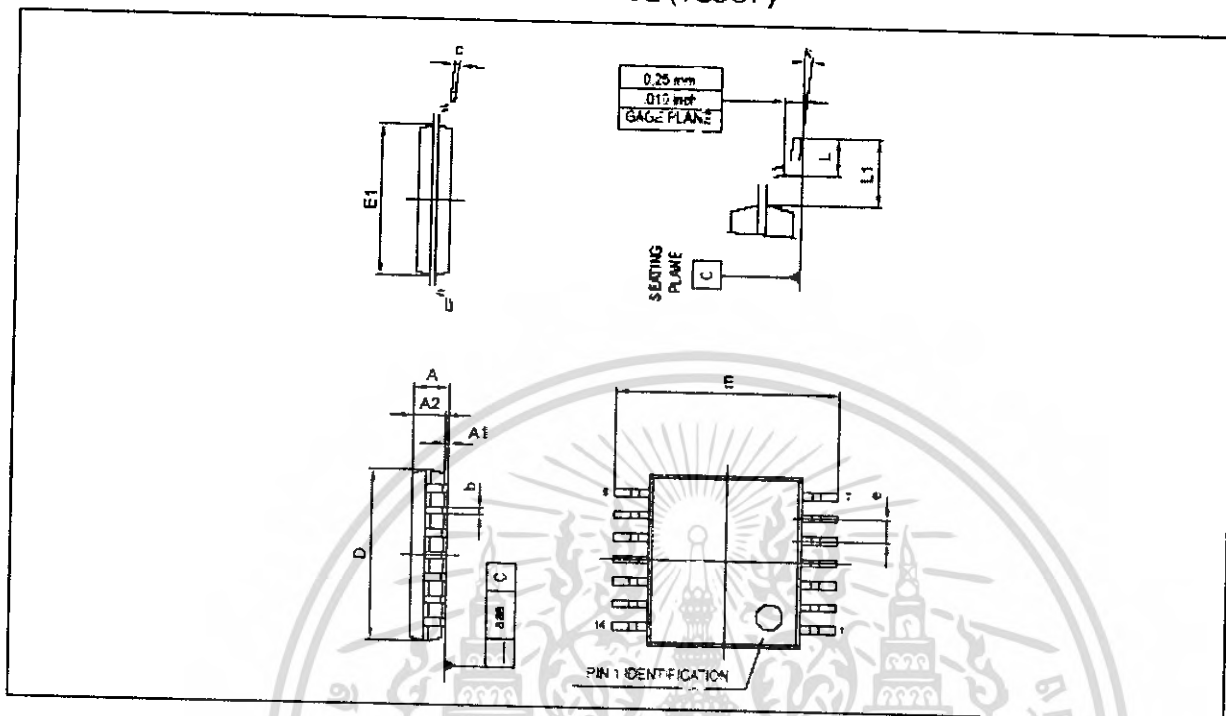
**PACKAGE MECHANICAL DATA**  
 14 PINS - PLASTIC MICROPACKAGE (SO)


Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.75			0.069
a1	0.1		0.2	0.004		0.008
a2			1.6			0.063
b	0.35		0.46	0.014		0.018
b1	0.19		0.25	0.007		0.010
C		0.5			0.020	
c1				45° (typ.)		
D (1)	8.55		8.75	0.336		0.344
E	5.8		6.2	0.228		0.244
e		1.27			0.050	
e3		7.62			0.300	
F (1)	3.8		4.0	0.150		0.157
G	4.6		5.3	0.181		0.208
L	0.5		1.27	0.020		0.050
M			0.68			0.027
S				8° (max.)		

Note : (1) D and F do not include mold flash or protrusions - Mold flash or protrusions shall not exceed 0.15mm (.066 inc) ONLY FOR DATA BOOK.

## PACKAGE MECHANICAL DATA

## 14 PINS - THIN SHRINK SMALL OUTLINE PACKAGE (TSSOP)



Dimensions	Millimeters			Inches		
	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.
A			1.20			0.05
A1	0.05		0.15	0.01		0.006
A2	0.80	1.00	1.05	0.031	0.039	0.041
b	0.19		0.30	0.007		0.15
c	0.09		0.20	0.003		0.012
D	4.90	5.00	5.10	0.192	0.196	0.20
E		6.40			0.252	
E1	4.30	4.40	4.50	0.169	0.173	0.177
e		0.65			0.025	
k	0°		8°	0°		8°
L	0.450	0.600	0.750	0.018	0.024	0.030
L1		1.00			0.039	
aaa			0.100			0.004

Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, STMicroelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of STMicroelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. STMicroelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of STMicroelectronics.

© The ST logo is a registered trademark of STMicroelectronics

© 2001 STMicroelectronics - Printed in Italy - All Rights Reserved  
STMicroelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - Canada - China - Finland - France - Germany - Hong Kong - India - Israel - Italy - Japan - Malaysia  
Malta - Morocco - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - United Kingdom - United States

© <http://www.st.com>



**3<sup>1</sup>/<sub>2</sub> Digit, LCD/LED Display, A/D Converters**

The Intersil ICL7106 and ICL7107 are high performance, low power, 3<sup>1</sup>/<sub>2</sub> digit A/D converters. Included are seven segment decoders, display drivers, a reference, and a clock. The ICL7106 is designed to interface with a liquid crystal display (LCD) and includes a multiplexed backplane drive; the ICL7107 will directly drive an instrument size light emitting diode (LED) display.

The ICL7106 and ICL7107 bring together a combination of high accuracy, versatility, and true economy. It features auto-zero to less than 10 $\mu$ V, zero drift of less than 1 $\mu$ V/ $^{\circ}$ C, input bias current of 10pA (Max), and rollover error of less than one count. True differential inputs and reference are useful in all systems, but give the designer an uncommon advantage when measuring load cells, strain gauges and other bridge type transducers. Finally, the true economy of single power supply operation (ICL7106), enables a high performance panel meter to be built with the addition of only 10 passive components and a display.

**Ordering Information**

PART NO.	TEMP. RANGE ( $^{\circ}$ C)	PACKAGE	PKG. NO.
ICL7106CPL	0 to 70	40 Ld PDIP	E40.6
ICL7106CM44	0 to 70	44 Ld MQFP	Q44.10x10
ICL7107CPL	0 to 70	40 Ld PDIP	E40.6
ICL7107RCPL	0 to 70	40 Ld PDIP (Note)	E40.6
ICL7107SCPL	0 to 70	40 Ld PDIP (Note)	E40.6
ICL7107CM44	0 to 70	44 Ld MQFP	Q44.10x10

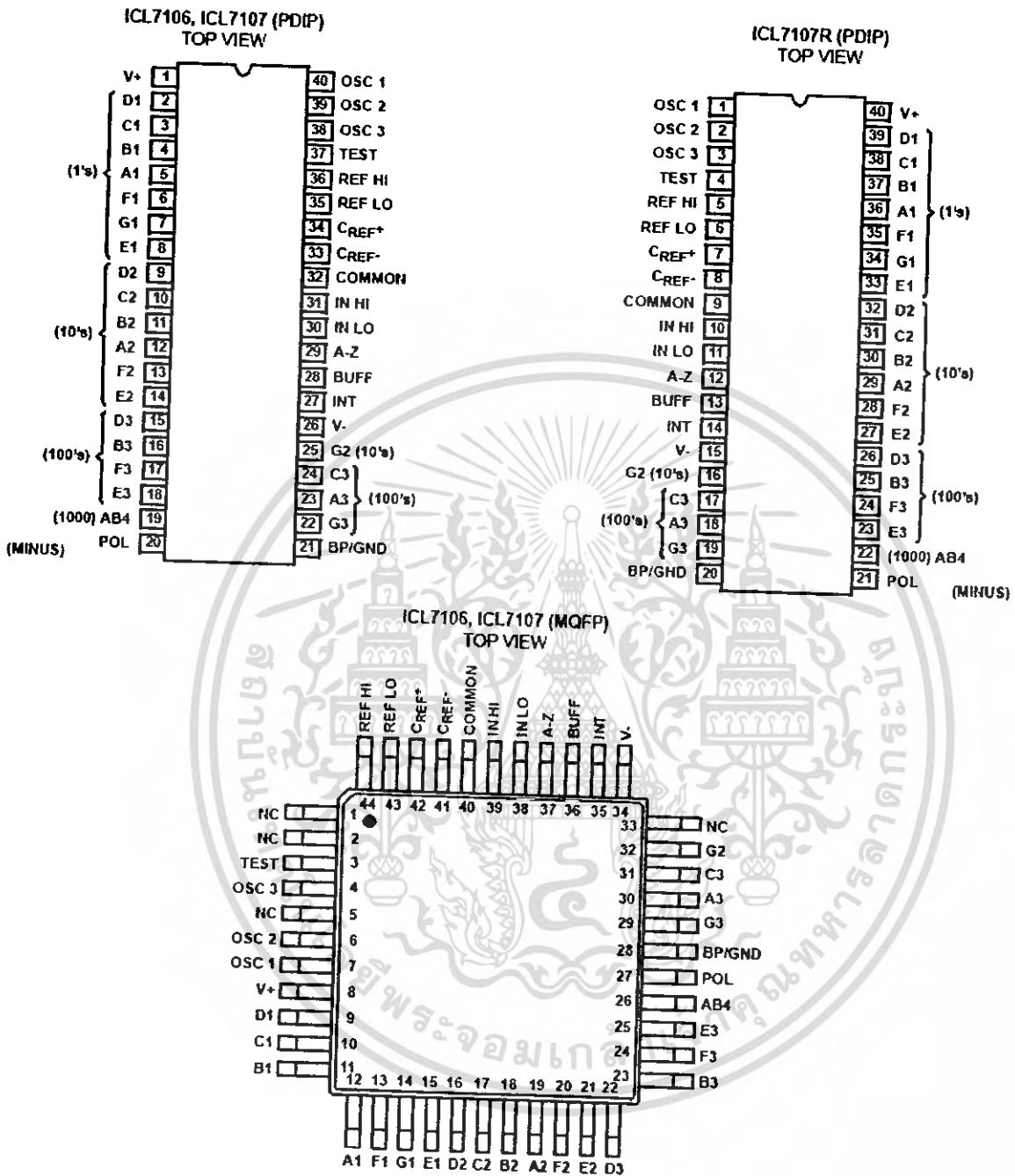
NOTE: "R" indicates device with reversed leads for mounting to PC board underside. "S" indicates enhanced stability.

**Features**

- Guaranteed Zero Reading for 0V Input on All Scales
- True Polarity at Zero for Precise Null Detection
- 1pA Typical Input Current
- True Differential Input and Reference, Direct Display Drive
  - LCD ICL7106, LED ICL7107
- Low Noise - Less Than 15 $\mu$ Vp-p
- On Chip Clock and Reference
- Low Power Dissipation - Typically Less Than 10mW
- No Additional Active Circuits Required
- Enhanced Display Stability

ICL7106, ICL7107, ICL7107S

Pinouts



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ICL7106, ICL7107, ICL7107S

### Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage	
ICL7106, V+ to V-	15V
ICL7107, V+ to GND	6V
ICL7107, V- to GND	-9V
Analog Input Voltage (Either Input) (Note 1)	V+ to V-
Reference Input Voltage (Either Input)	V+ to V-
Clock Input	
ICL7106	TEST to V+
ICL7107	GND to V+

### Thermal Information

Thermal Resistance (Typical, Note 2)	$\theta_{JA}$ (°C/W)
PDIP Package	50
MQFP Package	75
Maximum Junction Temperature	150°C
Maximum Storage Temperature Range	-65°C to 150°C
Maximum Lead Temperature (Soldering 10s) (MQFP - Lead Tips Only)	300°C

### Operating Conditions

Temperature Range	0°C to 70°C
-------------------	-------------

**CAUTION:** Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

### NOTES:

- Input voltages may exceed the supply voltages provided the input current is limited to  $\pm 100\mu\text{A}$ .
- $\theta_{JA}$  is measured with the component mounted on a low effective thermal conductivity test board in free air. See Tech Brief TB379 for details.

### Electrical Specifications (Note 3)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
<b>SYSTEM PERFORMANCE</b>					
Zero Input Reading	$V_{IN} = 0.0V$ , Full Scale = 200mV	-000.0	$\pm 000.0$	+000.0	Digital Reading
Stability (Last Digit) (ICL7105S, ICL7107S Only)	Fixed Input Voltage (Note 6)	-000.0	$\pm 000.0$	+000.0	Digital Reading
Ratiometric Reading	$V_{IN} = V_{REF}$ , $V_{REF} = 100mV$	999	999/1000	1000	Digital Reading
Rollover Error	$-V_{IN} = +V_{IN} \approx 200mV$ Difference in Reading for Equal Positive and Negative Inputs Near Full Scale	-	$\pm 0.2$	$\pm 1$	Counts
Linearity	Full Scale = 200mV or Full Scale = 2V Maximum Deviation from Best Straight Line Fit (Note 5)	-	$\pm 0.2$	$\pm 1$	Counts
Common Mode Rejection Ratio	$V_{CM} = 1V$ , $V_{IN} = 0V$ , Full Scale = 200mV (Note 5)	-	50	-	$\mu\text{V/V}$
Noise	$V_{IN} = 0V$ , Full Scale = 200mV (Peak-To-Peak Value Not Exceeded 95% of Time)	-	15	-	$\mu\text{V}$
Leakage Current Input	$V_{IN} = 0$ (Note 5)	-	1	10	$\mu\text{A}$
Zero Reading Drift	$V_{IN} = 0$ , 0°C To 70°C (Note 5)	-	0.2	1	$\mu\text{V/}^\circ\text{C}$
Scale Factor Temperature Coefficient	$V_{IN} = 199mV$ , 0°C To 70°C, (Ext. Ref. 0ppm/ $^\circ\text{C}$ ) (Note 5)	-	1	5	ppm/ $^\circ\text{C}$
End Power Supply Character V+ Supply Current	$V_{IN} = 0$ (Does Not Include LED Current for ICL7107)	-	1.0	1.8	mA
End Power Supply Character V- Supply Current	ICL7107 Only	-	0.6	1.8	mA
COMMON Pin Analog Common Voltage	25k $\Omega$ Between Common and Positive Supply (With Respect to + Supply)	2.4	3.0	3.2	V
Temperature Coefficient of Analog Common	25k $\Omega$ Between Common and Positive Supply (With Respect to + Supply)	-	80	-	ppm/ $^\circ\text{C}$
<b>DISPLAY DRIVER ICL7106 ONLY</b>					
Peak-To-Peak Segment Drive Voltage	V+ = to V- = 9V (Note 4)	4	5.5	6	V
Peak-To-Peak Backplane Drive Voltage					

### ICL7106, ICL7107, ICL7107S

Electrical Specifications (Note 3) (Continued)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
<b>DISPLAY DRIVER ICL7107 ONLY</b>					
Segment Sinking Current	V+ = 5V, Segment Voltage = 3V				
Except Pins 19 and 20		5	8	-	mA
Pin 19 Only		10	16	-	mA
Pin 20 Only		4	7	-	mA

NOTES:

- Unless otherwise noted, specifications apply to both the ICL7106 and ICL7107 at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $f_{\text{CLOCK}} = 48\text{kHz}$ . ICL7106 is tested in the circuit of Figure 1. ICL7107 is tested in the circuit of Figure 2.
- Back plane drive is in phase with segment drive for "off" segment, 180 degrees out of phase for "on" segment. Frequency is 20 times conversion rate. Average DC component is less than 50mV.
- Not tested, guaranteed by design.
- Sample Tested.

### Typical Applications and Test Circuits

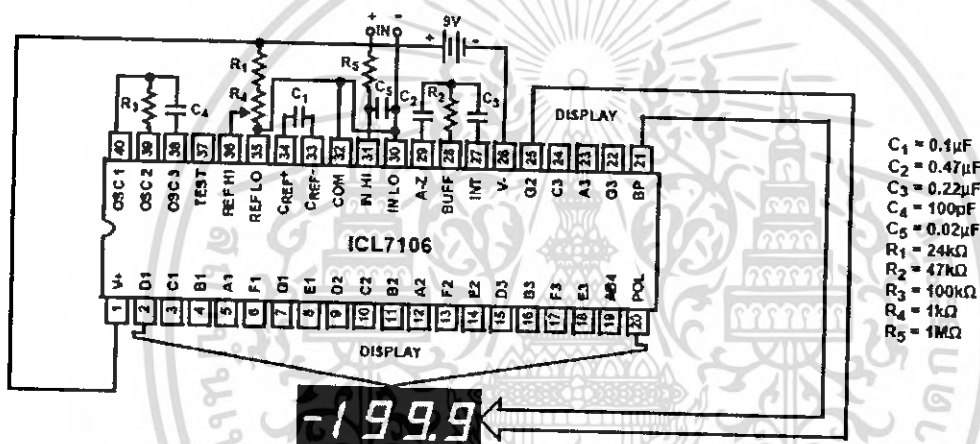


FIGURE 1. ICL7106 TEST CIRCUIT AND TYPICAL APPLICATION WITH LCD DISPLAY COMPONENTS SELECTED FOR 200mV FULL SCALE

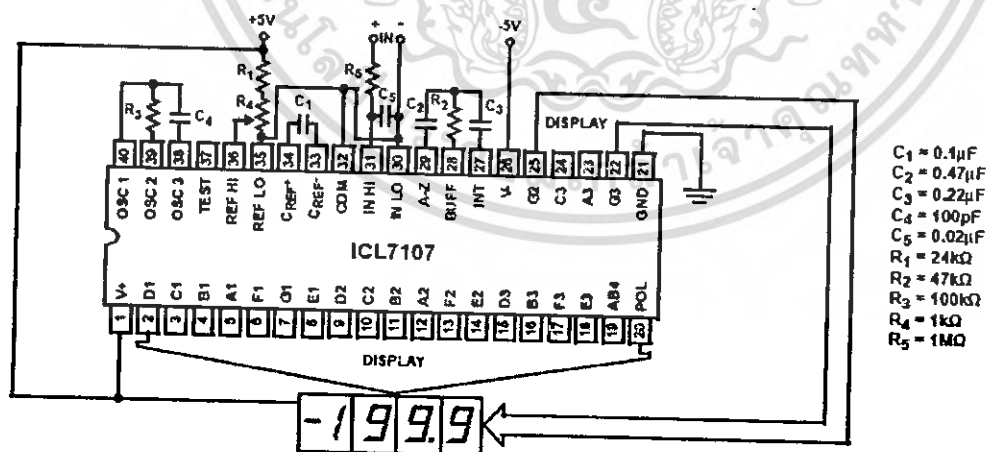


FIGURE 2. ICL7107 TEST CIRCUIT AND TYPICAL APPLICATION WITH LED DISPLAY COMPONENTS SELECTED FOR 200mV FULL SCALE

## ICL7106, ICL7107, ICL7107S

### Design Information Summary Sheet

#### • OSCILLATOR FREQUENCY

$$f_{OSC} = 0.45/RC$$

$$C_{OSC} > 50pF; R_{OSC} > 50k\Omega$$

$$f_{OSC} (Typ) = 48kHz$$

#### • OSCILLATOR PERIOD

$$t_{OSC} = RC/0.45$$

#### • INTEGRATION CLOCK FREQUENCY

$$f_{CLOCK} = f_{OSC}/4$$

#### • INTEGRATION PERIOD

$$t_{INT} = 1000 \times (4/f_{OSC})$$

#### • 60/50Hz REJECTION CRITERION

$$t_{INT}/60Hz \text{ or } t_{INT}/50Hz = \text{Integer}$$

#### • OPTIMUM INTEGRATION CURRENT

$$I_{INT} = 4\mu A$$

#### • FULL SCALE ANALOG INPUT VOLTAGE

$$V_{INFS} (Typ) = 200mV \text{ or } 2V$$

#### • INTEGRATE RESISTOR

$$R_{INT} = \frac{V_{INFS}}{I_{INT}}$$

#### • INTEGRATE CAPACITOR

$$C_{INT} = \frac{(t_{INT})^2(I_{INT})}{V_{INT}}$$

#### • INTEGRATOR OUTPUT VOLTAGE SWING

$$V_{INT} = \frac{(I_{INT})(t_{INT})}{C_{INT}}$$

#### • V<sub>INT</sub> MAXIMUM SWING:

$$(V^- + 0.5V) < V_{INT} < (V^+ - 0.5V), V_{INT} (Typ) = 2V$$

#### • DISPLAY COUNT

$$COUNT = 1000 \times \frac{V_{IN}}{V_{REF}}$$

#### • CONVERSION CYCLE

$$t_{CYC} = t_{CLOCK} \times 4000$$

$$t_{CYC} = t_{OSC} \times 16,000$$

when  $f_{OSC} = 48kHz; t_{CYC} = 333ms$

#### • COMMON MODE INPUT VOLTAGE

$$(V^- + 1V) < V_{IN} < (V^+ - 0.5V)$$

#### • AUTO-ZERO CAPACITOR

$$0.01\mu F < C_{AZ} < 1\mu F$$

#### • REFERENCE CAPACITOR

$$0.1\mu F < C_{REF} < 1\mu F$$

#### • V<sub>COM</sub>

Biased between V<sub>I</sub> and V<sub>-</sub>.

#### • V<sub>COM</sub> $\approx$ V<sub>+</sub> - 2.8V

Regulation lost when V<sub>+</sub> to V<sub>-</sub>  $\leq$  6.8V

If V<sub>COM</sub> is externally pulled down to (V<sub>+</sub> to V<sub>-</sub>)/2, the V<sub>COM</sub> circuit will turn off.

#### • ICL7106 POWER SUPPLY: SINGLE 9V

$$V^+ - V^- = 9V$$

Digital supply is generated internally

$$V_{GND} \approx V^+ - 4.5V$$

#### • ICL7106 DISPLAY: LCD

Type: Direct drive with digital logic supply amplitude.

#### • ICL7107 POWER SUPPLY: DUAL $\pm 5.0V$

$$V^+ = +5V \text{ to GND}$$

$$V^- = -5V \text{ to GND}$$

Digital Logic and LED driver supply V<sub>+</sub> to GND

#### • ICL7107 DISPLAY: LED

Type: Non-Multiplexed Common Anode

### Typical Integrator Amplifier Output Waveform (INT Pin)

