

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาโปรแกรม TLW ในระบบไฟฟ้ากำลัง

THE STUDY OF TRANSMISSION LINE WORKSTATION PROGRAM IN POWER SYSTEMS



ยพ.
YHSO
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน...62402
วัน,เดือน,ปี...17 ส.ค. 2549

b.....11673089
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

ปีการศึกษา 2548

การศึกษาโปรแกรม TLW ในระบบไฟฟ้ากำลัง

THE STUDY OF TRANSMISSION LINE WORKSTATION PROGRAM IN
POWER SYSTEMS



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. วีระเชษฐ ชันเงิน

ปริญญาโทปีการศึกษา 2548

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาโปรแกรม TLW ในระบบไฟฟ้ากำลัง

ผู้จัดทำ

- 
1. นายชุ่นเหลียน สิริฐานวัฒน์
2. นายจูปนนท์ ไชคสกุล
3. นายธเนศ เดชโหมด
4. นายอวยชัย เจริญยิ่งสุขจินดา

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

การศึกษาโปรแกรม TRANSMISSION LINE WORKSTATION ในระบบไฟฟ้ากำลัง

นายชุ่นเหลียน สิริฐานวัฒน์

นายรูปนนท์ โชคสกุล

นายชเนศ เดชโหมด

นายอวยชัย เจริญยิ่งสุขจินดา

รศ.ดร. วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

โครงการนี้ ศึกษาเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดในระบบไฟฟ้ากำลัง และสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กเพื่อใช้วัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง และเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ (Electromagnetic Field Radiation Tester) และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม Transmission Line Workstation

สำหรับประโยชน์ที่จะได้รับจากเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก และโปรแกรม Transmission Line Workstation นี้ก็คือจะทำทราบว่าบริเวณใดมีสนามแม่เหล็กหนาแน่น เพื่อเราจะได้หลีกเลี่ยงบริเวณดังกล่าว และหาแนวทางแก้ไขรวมทั้งนำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบต่อไป

THE STUDY OF TRANSMISSION LINE WORKSTATION PROGRAM IN POWER SYSTEMS

Chunlian Sirithanavat

Thapanon Choksakoon

Thanet Detmote

Auychai Jarernyingsookjinda

Assoc.Prof. Dr. Werachet Khan-ngern Advisor

2005

ABSTRACT

The purpose of this project is to study magnetic field and electric field and design magnetic field measurement used measure flux density in power systems and calibrate with electromagnetic field radiation tester (commercial meter) to analyse magnetic field using transmission line workstation program.

The advantage of magnetic field measurement and transmission line workstation program is used to observe the flux density in power system. The data of magnetic flux density can be compared with the TLW simulation. The result is in agreement with magnetic field measurement.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับความช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง จาก รศ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษาชี้แนวทางและแนะนำ ด้วยดีตลอดมา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่ช่วยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ขอขอบคุณ เพื่อนๆและพี่ๆ ห้องปฏิบัติการการ วิจัย ElectroMagnetic Compatibility (EMC) ที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย จนสำเร็จไปได้ด้วยดี ขอขอบคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ราชบุรี 2 ที่เอื้อเฟื้อข้อมูล ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์จากการวิจัย

สุดท้าย ขอกราบขอบคุณบิดามารดา ที่สนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจตลอดมา จนประสบความสำเร็จดังปรารถนา



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	I
ABSTRACT.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูปภาพ.....	VII
สารบัญตาราง.....	XI
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 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 สนามแม่เหล็ก.....	4
2.2 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า.....	5
2.3 คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก.....	6
2.4 กฎของแอมแปร์.....	7
2.5 กฎมือขวา.....	7
2.6 กฎการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฟาราเดย์.....	8
2.7 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากขดลวด.....	9
2.8 สนามไฟฟ้า.....	10
2.9 ความหนาแน่นของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า.....	11
2.9.1 อีเล็กโทรดไฟฟ้าสม่ำเสมอ.....	12
2.9.2 อีเล็กโทรดไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ.....	12
2.10 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้าแรงสูง.....	13
2.10.1 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวนำสายไฟฟ้าควบ.....	13
2.10.2 ผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อคนและสัตว์.....	14
บทที่ 3 การออกแบบเครื่องวัดสนามแม่เหล็กและเซนเซอร์.....	16
3.1 แนวคิดในการออกแบบเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก.....	16
3.1.1 ภาครับสัญญาณ.....	17
3.1.2 ภาคขยายสัญญาณ.....	17
3.1.3 ภาคเรกติไฟร์.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.4 ภาคแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิทัล.....	19
3.1.5 ภาคแสดงผล.....	19
3.2 วงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก.....	20
3.3 วงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่แสดงการทำงานในแต่ละภาค.....	21
3.4 หลักการทำงานของวงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก.....	21
3.5 สรุป.....	23
บทที่ 4 การทดลองวัดสนามแม่เหล็ก.....	24
4.1 บทนำ.....	24
4.2 การทดลองที่ 1 การวัดสนามแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนลักษณะ ของหัวเซนเซอร์.....	24
4.2.1 วัดอุปกรณ์การทดลอง.....	24
4.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	24
4.2.3 วิธีการทดลอง.....	24
4.2.4 ผลการทดลอง.....	26
4.2.5 สรุปผลการทดลอง.....	28
4.3 การทดลองที่ 2 การวัดสนามแม่เหล็กโดยมีการเปลี่ยนแปลงแรงดัน และกระแสไฟฟ้า.....	28
4.3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	29
4.3.2 วิธีการทดลอง.....	29
4.3.3 สรุปผลการทดลอง.....	30
4.4 การทดลองที่ 3 วัดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน.....	30
4.4.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	30
4.4.2 วิธีการทดลอง.....	31
4.4.3 ผลการทดลอง.....	31
4.4.4 สรุปผลการทดลอง.....	32
4.4.5 สรุปผลการทดลอง.....	34
บทที่ 5 โปรแกรม Transmission Line Workstation.....	35
5.1 บทนำ.....	35
5.1.1 สถาปัตยกรรมของ TLW.....	35
5.1.2 ลักษณะเฉพาะเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต้องการ.....	35
5.1.3 วิธีการติดตั้งตัวดำเนินการ.....	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 การใช้งานโมดูล ACDC LINE.....	36
5.2.1 บทนำ ACDC LINE.....	36
5.2.2 สถาปัตยกรรม ACDC LINE.....	36
5.3 เริ่มการใช้งานโปรแกรม ACDC LINE.....	37
บทที่ 6 การทดลองใช้โปรแกรม TLW ในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง.....	51
6.1 บทนำ.....	51
6.2 วัตถุประสงค์การทดลอง.....	51
6.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง.....	51
6.4 วิธีการทดลอง.....	52
6.5 แผนผังการทดลอง.....	52
6.6 การทดลอง.....	52
6.6.1 การทดลองที่แรงดัน 500 kV กระแส 500 A SAG 13.93 m.....	52
6.6.2 การทดลองที่แรงดัน 500 kV กระแส 250 A SAG 13.93 m.....	54
6.6.3 การทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A SAG 14.6 m.....	56
6.6.4 การทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 250 A SAG 14.6 m.....	58
6.6.5 การทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A SAG 15.1 m.....	60
6.6.6 การทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A SAG 14.6 m (สลับเฟส C-B-A).....	62
6.6.7 การทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A SAG 14.6 m (สลับเฟส B-A-C).....	64
6.6.8 การทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A SAG 14.6 m (สลับเฟส A-C-B).....	66
6.6.9 การทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A SAG 14.6 m (สลับเฟส B-C-A).....	68
6.7 สรุปผลการทดลอง.....	70
บทที่ 7 การทดสอบวัดสนามแม่เหล็กจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง	
ที่ระดับแรงดัน 230 kV และ 500 kV.....	74
7.1 บทนำ.....	74
7.2 วัตถุประสงค์ในการทดสอบ.....	74
7.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ.....	74
7.4 วิธีการทดสอบ.....	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
7.5 ผลที่ได้จากการทดสอบ.....	75
7.5.1 ผลการทดสอบวัดสนามแม่เหล็กจากสถานที่จริงที่แรงดัน 230 kV กระแส 840 A.....	75
7.5.2 ผลการทดสอบวัดสนามแม่เหล็กจากสถานที่จริงที่แรงดัน 500 kV กระแส 478 A.....	77
7.6 การเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม TLW เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ และเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น.....	78
7.7 สรุปผลการทดลอง.....	80
บทที่ 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	81
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
ภาคผนวก.....	83
ภาคผนวก ก. เครื่องวัดสนามแม่เหล็กและภาพการทดลอง.....	84
ภาคผนวก ข. ข้อมูลที่ใช้กับโปรแกรม TLW.....	89
ภาคผนวก ค. ข้อมูลอุปกรณ์.....	98
กิตติกรรมประกาศ.....	114
เอกสารอ้างอิง.....	115

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ f, u, B และเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ	4
2.2 แนวสนามแม่เหล็กในระบบ 2 มิติ.....	5
2.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า.....	5
2.4 กระแสทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น.....	7
2.5 ทิศทางความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	8
2.6 การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฟาราเดย์.....	9
2.7 ลักษณะการเกิดสนามไฟฟ้า.....	11
2.8 สนามไฟฟ้าสถิตของตัวนำเดี่ยว และของสายควบคู่ ควบสามเส้น และควบสี่เส้น.....	13
3.1 แนวคิดในการออกแบบเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก.....	16
3.2 หัวเซนเซอร์ที่ใช้ขดลวด และลักษณะการพันขดลวด.....	17
3.3 Inverting Amplifier.....	17
3.4 Non-inverting Amplifier.....	18
3.5 วงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก.....	20
3.6 วงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่แสดงการทำงานในแต่ละภาค.....	21
4.1 แสดงการวัดในแนวตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก.....	25
4.2 แสดงการวัดในแนวขนานกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก.....	25
4.3 หัวเซนเซอร์ที่ทำจากลวดทองแดงเบอร์ 20 พันจำนวน 30 รอบ มีขนาดรัศมี 5 ซม.....	26
4.4 วงจรการทดลอง.....	29
4.5 แสดงวงจรการจำลองสายส่งไฟฟ้า.....	31
4.6 กราฟการทดลองการวัดค่าสนามแม่เหล็กตามแนวแกน $+x$ และ $-x$	32
4.7 กราฟการทดลองการวัดค่าสนามแม่เหล็กตามแนวแกน $+y$ และ $-y$	34
5.1 การเข้าสู่การใช้งานโปรแกรม TLW.....	37
5.2 เมนู file ในโหมดการทำงานต่างๆ.....	37
5.3 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Open Project.....	38
5.4 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Project Name.....	38
5.5 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Project Information.....	39
5.6 ไดอะล็อกบ็อกซ์ General Parameters.....	39
5.7 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Execution Options.....	41
5.8 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specifications-General.....	43
5.9 ไดอะล็อกบ็อกซ์อะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specifications-Regular Bundles.....	44
5.10 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specification-Irregular Bundles.....	44
5.11 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Right-of-way Descriptions.....	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 ไลอะลือกบ็อกส์ Lateral Profile Specifications.....	45
5.13 ไลอะลือกบ็อกส์ Profile Probe Characteristics.....	46
5.14 ไลอะลือกบ็อกส์ Climate/Weather Data.....	46
5.15 ไลอะลือกบ็อกส์ Weather Model Data.....	46
5.16 ไลอะลือกบ็อกส์ Shielding Object Descriptions.....	47
5.17 ไลอะลือกบ็อกส์ Coupled Object Descriptions.....	47
5.18 ไลอะลือกบ็อกส์ E-field and Ion Plots.....	48
5.19 ไลอะลือกบ็อกส์ Surge Performance Data – Part 1.....	48
5.20 ไลอะลือกบ็อกส์ Surge Performance Data – Part 2.....	49
5.21 ไลอะลือกบ็อกส์ Insulator Contamination Performance Data.....	49
5.22 ผลที่ได้จากการรันโปรแกรม TLW.....	50
6.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =500 kV กระแส =500 A ระยะSAG=13.93.....	52
6.2 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =500 kV กระแส =500 A ระยะSAG=13.93 m.....	53
6.3 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =500 kV กระแส =500 A ระยะSAG=13.93 m.....	53
6.4 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =500 kV กระแส =500 A ระยะSAG=13.93 m.....	53
6.5 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =500 kV กระแส =500 A ระยะSAG=13.93 m.....	54
6.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =500 kV กระแส =250 A ระยะSAG=13.93 m.....	54
6.7 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =500 kV กระแส =250 A ระยะSAG=13.93 m.....	55
6.8 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =500 kV กระแส =250 A ระยะSAG=13.93 m.....	55
6.9 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =500 kV กระแส =250 A ระยะSAG=13.93 m.....	55
6.10 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =500 kV กระแส =500 A ระยะSAG=13.93 m.....	56
6.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	56
6.12 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	57
6.13 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	57
6.14 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	57
6.15 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	58
6.16 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =250 A ระยะSAG=14.6 m.....	58
6.17 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =250 A ระยะSAG=14.6 m.....	59
6.18 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =250 A ระยะSAG=14.6 m.....	59
6.19 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =250 A ระยะSAG=14.6 m.....	59
6.20 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =250 A ระยะSAG=14.6 m.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.21 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=15.1 m.....	60
6.22 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=15.1 m.....	61
6.23 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=15.1 m.....	61
6.24 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=15.1 m.....	61
6.25 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=15.1 m.....	62
6.26 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	62
6.27 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	63
6.28 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	63
6.29 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	63
6.30 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	64
6.31 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	64
6.32 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	65
6.33 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	65
6.34 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	65
6.35 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	66
6.36 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	66
6.37 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	67
6.38 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	67
6.39 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	67
6.40 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	68
6.41 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	68
6.42 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	69
6.43 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	69
6.44 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	69
6.45 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m.....	70
6.46 แสดงการลดลงของสนามแม่เหล็กเมื่อทำการสลับเฟสของสายส่งวงจรขนาน.....	72
6.47 แสดงการลดลงของสนามไฟฟ้าเมื่อทำการสลับเฟสของสายส่งวงจรขนาน.....	72
7.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่วัดจากเครื่องวัดมาตรฐานกับเครื่องวัดที่ สร้างขึ้น ที่แรงดัน 230 kV.....	76
7.2 ผลค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม TLW ที่แรงดัน 230 kV.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่วัดจากเครื่องวัดมาตรฐานกับเครื่องวัด ที่สร้างขึ้น ที่แรงดัน 500 kV.....	77
7.4 ผลค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม TLW ที่แรงดัน 500 kV.....	78
7.5 กราฟผลการทดสอบวัดค่าสนามแม่เหล็ก ที่แรงดัน 230 kV.....	79
7.6 กราฟผลการทดสอบวัดค่าสนามแม่เหล็ก ที่แรงดัน 500 kV.....	80



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าจำกัดสูงสุดของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก 50/60 Hz.....	14
2.2 ข้อกำหนดความกว้างเขตเดินสายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต.....	14
3.1 แสดงการทำงานของส่วนภาคขยายสัญญาณ.....	22
4.1 ผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหม้อแปลงในแนวตั้งฉาก.....	29
4.2 ผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหม้อแปลงในแนวทำมุม 45 องศา.....	30
4.3 ผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กตามแนว +x.....	31
4.4 ผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กตามแนว -x.....	32
4.5 ผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กตามแนว +y.....	33
4.6 ผลการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กตามแนว -y.....	33
7.1 ผลการทดสอบวัดค่าสนามแม่เหล็ก ที่แรงดัน 230 kV.....	75
7.2 ผลการทดสอบวัดค่าสนามแม่เหล็ก ที่แรงดัน 500 kV.....	77
7.3 ผลการทดสอบวัดค่าสนามแม่เหล็ก ที่แรงดัน 230 kV.....	78
7.4 ผลการทดสอบวัดค่าสนามแม่เหล็ก ที่แรงดัน 500 kV.....	79



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การศึกษาโปรแกรม Transmission Line Workstation เป็นการศึกษาการใช้งานของโปรแกรม ในด้านการวิเคราะห์และคำนวณหาค่าปริมาณของสนามไฟฟ้าและปริมาณของสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น บริเวณสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง ทำให้เรารู้ปริมาณว่าที่บริเวณนั้นมีค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ว่ามีขนาดเท่าไร โดยใช้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐานทำการวัดค่าและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น และเปรียบเทียบผลของสนามแม่เหล็กที่ได้ที่กับการประมวลผลของโปรแกรม Transmission Line Workstation

เนื่องจากว่าในปัจจุบันเรารู้ว่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มีผลกระทบซึ่งทำให้เกิดอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ ตั้งแต่ระบบไฟฟ้าได้เข้ามามีส่วนร่วมในชีวิตประจำวันของเราอำนาจของสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเราไม่อาจที่จะหลีกเลี่ยงได้ เพราะอุปกรณ์ไฟฟ้าจะไม่สามารถที่จะทำงานได้ถ้าปราศจากอำนาจของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป ก็จะมีค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กแตกต่างกันออกไป โดยผู้ที่อาศัยอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีค่าสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กมากก็อาจก่อให้เกิดอันตรายขึ้นได้ เช่น อาจจะทำให้เกิดโรคมะเร็ง ต่อมาน้ำเหลืองวม เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่เราจำเป็นต้องรู้ปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เพื่อที่จะออกแบบระบบป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับมนุษย์ หรืออาจจะหลีกเลี่ยงที่จะอยู่ในบริเวณที่มีปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการศึกษาโปรแกรม Transmission Line Workstation ในการวัดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ในระบบไฟฟ้าว่าเกิดขึ้นได้อย่างไร
2. เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก ว่ามีหลักการทำงานอย่างไรเพื่อเข้าใจหลักการการทำงานของเครื่องมือวัด เพื่อที่จะสามารถใช้เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ในการวัดค่าปริมาณสนามแม่เหล็กได้อย่างถูกต้อง
3. เพื่อสามารถนำความรู้ มาออกแบบสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก ได้อย่างถูกต้อง
4. เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรม Transmission Line Workstation ในการประมวลผลของค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก แล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่ได้กับเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ และเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นว่าผลที่ได้เป็นอย่างไร

5. เพื่อศึกษาถึงแหล่งกำเนิดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น สายส่งไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง เพื่อที่จะเป็นข้อมูลทางด้านงานวิศวกรรมต่อไป

6. เพื่อนำผลของปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กนำมาวิเคราะห์ว่าปริมาณใดในระบบไฟฟ้ามีปริมาณมากน้อยเพียงใด เพื่อหาทางที่จะหลีกเลี่ยงเพื่อที่จะป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับร่างกายมนุษย์

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดงานวิจัย

1. ศึกษาการใช้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเชิงพาณิชย์ ในการวัดปริมาณค่าสนามแม่เหล็กในระบบไฟฟ้ากำลัง
2. ศึกษาโปรแกรม Transmission Line Workstation เพื่อนำมาใช้ในการหาค่าของปริมาณสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
3. ออกแบบสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก
4. ศึกษาวิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ และผลที่ได้จากเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น และจากการคำนวณด้วยโปรแกรม นำมาเปรียบเทียบวิเคราะห์ความถูกต้อง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ทำการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ว่ามีหลักการเกิดอย่างไร
2. ศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ว่ามีผลอย่างไรต่อร่างกายมนุษย์
3. ศึกษาการเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง
4. ออกแบบสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก
5. ทดสอบเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น และทำการปรับเทียบมาตรฐานกับเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเชิงพาณิชย์
6. ศึกษาการใช้โปรแกรม Transmission Line Workstation ในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง
7. ทดสอบวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต แห่งประเทศไทยขนาดแรงดัน 230 kV และ 500 kV
8. ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์กับผลที่ได้เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น และผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม TLW

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1. สามารถเข้าใจถึงทฤษฎีการเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
2. ทำให้สามารถมีความเข้าใจในการใช้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก ในการวัดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในระบบไฟฟ้ากำลัง
3. สามารถในการใช้โปรแกรม Transmission Line Workstation ในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้
4. เพื่อที่จะสามารถนำผลที่ได้ มาเป็นแนวทางในการวิจัยเรื่องต่างๆ ทางด้านสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก
5. สามารถรู้ถึงปริมาณของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เพื่อหาวิธีหลีกเลี่ยงอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับร่างกายเราได้
6. เพื่อเป็นข้อมูลใช้ในการออกแบบระบบการส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าของประเทศ



บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สนามแม่เหล็ก (magnetic field) [3]

อำนาจแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจากอุปกรณ์ไฟฟ้า ในความเป็นจริงแล้วไม่สามารถที่จะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นได้ โดยเฉพาะสนามแม่เหล็กที่ความถี่ประมาณ 50 - 60 เฮิร์ต ซึ่งมาจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงและอุปกรณ์ไฟฟ้าจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ใกล้กับบริเวณที่มีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กมากๆ

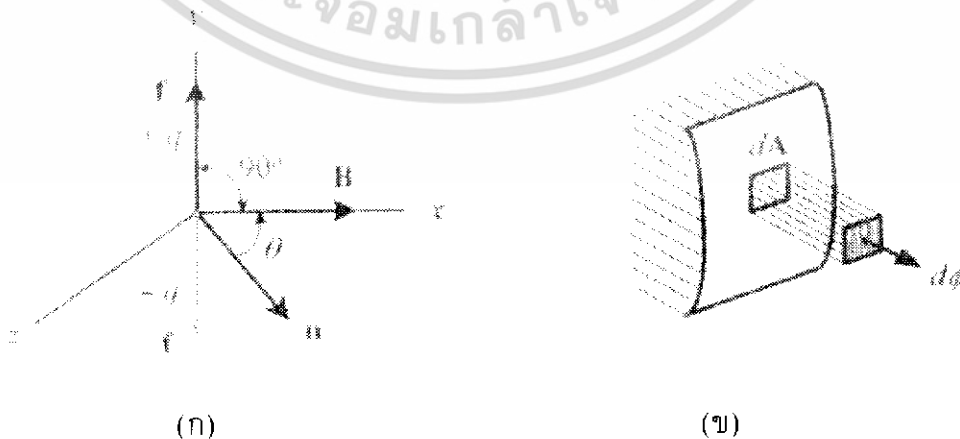
ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux density) สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นมาจากประจุไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่ ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B สามารถพิจารณาได้จากแรงที่กระทำต่อประจุที่เคลื่อนที่ในรูปสมการเวกเตอร์ดังนี้

$$f = qu \times B \dots\dots\dots(2.1)$$

กำหนดให้ค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก B มีค่าเท่ากับ 1 tesla (Wb/m^2) เมื่อประจุไฟฟ้า q ขนาด 1 coulomb เคลื่อนที่ไปในทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กด้วยความเร็ว u เท่ากับ 1 meter per second จะทำให้เกิดค่าแรง f เท่ากับ 1 newton จากรูปที่ 2.1 ก) ถ้าเวกเตอร์ u มีมุม θ เมื่อเทียบกับเวกเตอร์ B จะทำให้ได้ทิศทางของเวกเตอร์ f อยู่ในแนวตั้งฉากกับระนาบของ u และ B โดยจะมีขนาดเท่ากับ $quB\sin\theta$

จากนิยามของค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก จะได้ว่าถ้าทำการอินทิเกรตค่าความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็กบนพื้นที่หนึ่งๆ (A) ดังรูปที่ 2.1 ข) จะกำหนดให้เป็นค่าเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux) มีหน่วยเป็น weber (Wb) ดังนี้

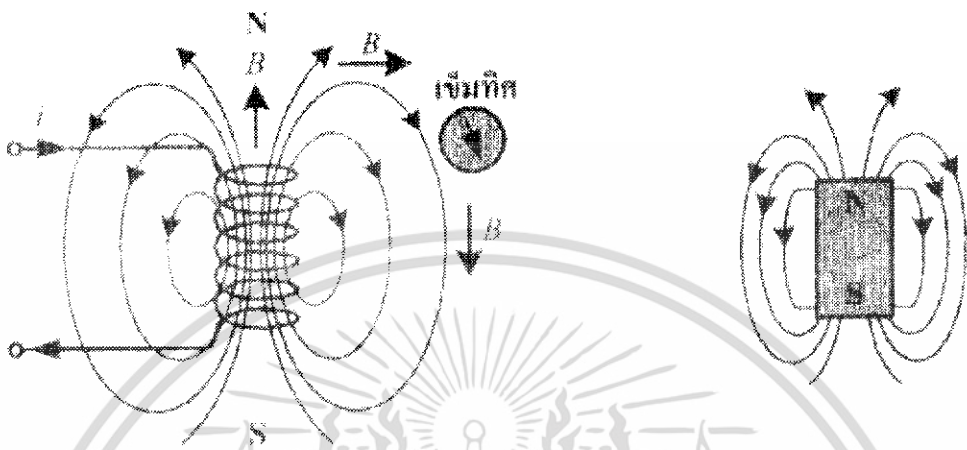
$$\phi = \int B \cdot dA = BA \dots\dots\dots(2.2)$$



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ f, u, B และเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ

จำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งออกจากพื้นผิวใดๆ จะต้องเท่ากับจำนวนเส้นแรงแม่เหล็กที่พุ่งเข้าพื้นที่ผิวนั้นๆ ซึ่งหมายความว่าแนวเส้นแรงแม่เหล็กต้องมีความต่อเนื่องกันเสมอ

$$\oint B \cdot dA = 0 \dots\dots\dots(2.3)$$



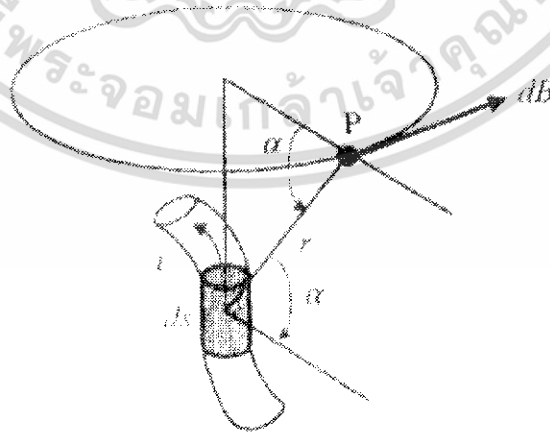
(ก) สนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์ (ข) สนามแม่เหล็กจากขั้วแม่เหล็ก

รูปที่ 2.2 แนวสนามแม่เหล็กในระบบ 2 มิติ

2.2 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า (magnetic field due to current) [3]

เมื่อมีกระแส i ไหลผ่านชิ้นส่วนเล็กๆ ds ของตัวนำไฟฟ้างดรูปที่ 2.3 กระแส i ในส่วน ds จะทำให้เกิดหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก dB ขึ้นที่จุด P ในสารกึ่งตัวกลางสมการ

$$dB = \mu \frac{idscos\alpha}{4\pi r^2} \dots\dots\dots(2.4)$$



รูปที่ 2.3 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้า

ค่า μ กำหนดให้เรียกชื่อว่า ค่าความซึมซาบแม่เหล็กของสารตัวกลางมีหน่วยเป็น weber per ampere-meter หรือ henrys per meter ทิศทางของเวกเตอร์ dB จะเป็นแนวเส้นสัมผัสกับวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ในแนวของ ds และลากผ่านจุด P ซึ่งกำหนดเป็นกฎพื้นฐานได้ว่า "ถ้าใช้มือขวากำลวดตัวนำไว้โดยที่ให้นิ้วหัวแม่มือแสดงทิศทางของกระแส i นิ้วมือที่เหลือจะแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็ก B ที่เกิดขึ้น"

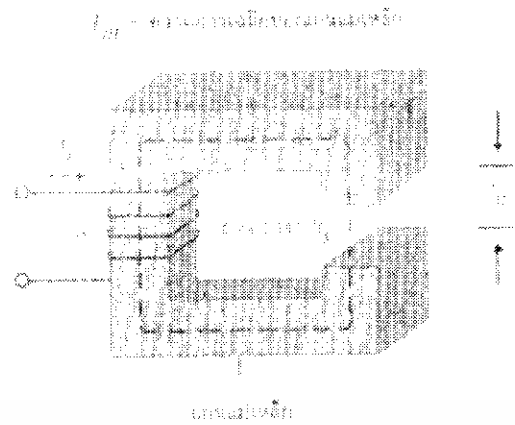
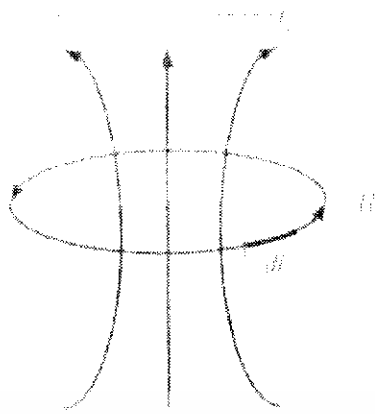
2.3 คุณสมบัติของสารแม่เหล็ก [4]

สารแม่เหล็กโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ

1. ไดอะแมกเนติก (diamagnetic) ได้แก่ สารที่ไม่สามารถซาบซึมสนามแม่เหล็กได้ ($\mu_r < 1$) ยกตัวอย่างเช่น ทองแดง (copper) บิสมัท (bismuth) เงิน (silver) และทอง (gold) เป็นต้น
2. พาราแมกเนติก (paramagnetic) ได้แก่ สารที่สามารถซาบซึมสนามแม่เหล็กได้เล็กน้อย ($\mu_r > 1$ เล็กน้อย) ยกตัวอย่างเช่น โครเมียม (chromium) แพลตตินัม (platinum) และอลูมิเนียม (aluminium) เป็นต้น
3. เฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnetic) ได้แก่ สารที่สามารถซาบซึมสนามแม่เหล็กได้มาก ($\mu_r \gg 1$) ยกตัวอย่างเช่น เหล็ก (iron) นิกเกิล (nickel) โคบอลต์ (cobalt) และเหล็กอัลลอยด์ (iron alloys) เป็นต้น

ค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity ; H) สำหรับวัสดุหนึ่งๆ จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนที่อยู่ในวัสดุนั้นๆ กับความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (magnetic flux density ; B) โดยอัตราส่วนของความสัมพันธ์ดังกล่าว (μ) จะขึ้นอยู่กับชนิดของเนื้อสารนั้นๆ จัดให้อยู่ในรูปสมการจะได้ $B = \mu H$ โดยจะนิยาม μ ว่าเป็น ความซาบซึมแม่เหล็ก (magnetic permeability) สำหรับที่สุญญากาศ (vacuum) และสารที่ไม่ใช่เฟอร์โรแมกเนติก (nonferromagnetic) โดยส่วนใหญ่ค่าความซาบซึมได้จะมีค่าคงที่ ซึ่งหมายถึงค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะแปรผันโดยตรงกับค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้า และที่สุญญากาศจะได้ค่าความซาบซึมได้เท่ากับ $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) ทำให้สามารถนิยามค่าความซาบซึมแม่เหล็กสัมพัทธ์ (μ_r ; relative permeability) ได้จากความสัมพันธ์ $\mu = \mu_0 \mu_r$ ซึ่งเป็นสมการทั่วไปที่ใช้สำหรับอธิบายคุณลักษณะของวัสดุแม่เหล็กต่างๆ สำหรับไดอะแมกเนติกจะมีค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์น้อยกว่าหนึ่ง ส่วนสารจำพวกพาราแมกเนติกจะมีค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์มากกว่าหนึ่งเล็กน้อย ในขณะที่สารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกจะมีค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์มากกว่า 10^5

ในทางปฏิบัติค่าความซาบซึมแม่เหล็กสัมพัทธ์ สำหรับไดอะแมกเนติกและพาราแมกเนติกจะไม่ค่อยแตกต่างจากค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์ของอากาศเท่าไร เพราะทั้งสองชนิดต่างก็มีค่า $\mu_r \approx 1$ จึงเป็นผลให้อุปกรณ์แม่เหล็กสำหรับอิเล็กทรอนิกส์กำลัง จึงนิยมใช้สารจำพวกเฟอร์โรแมกเนติกในการออกแบบ



(ก) กระแสทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก

(ข) ตัวอย่างขดลวดทองแดงพันรอบแกนแม่เหล็กที่มีช่องอากาศ

รูปที่ 2.4 กระแสทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น

2.4 กฎของแอมแปร์ [4]

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำทองแดง จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหรือที่เรียกกันว่า ความเข้มสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อเมตร (A/m) ซึ่งกฎของแอมแปร์ได้กล่าวไว้ว่า “การอินทิเกรตความเข้มสนามแม่เหล็ก จะมีค่าเท่ากับผลรวมกระแสไฟฟ้าที่ล้อมรอบโดยสนามแม่เหล็กนั้น” แสดงในสมการที่ 2.5

$$\oint H \cdot dl = \sum i_{enclose} \dots \dots \dots (2.5)$$

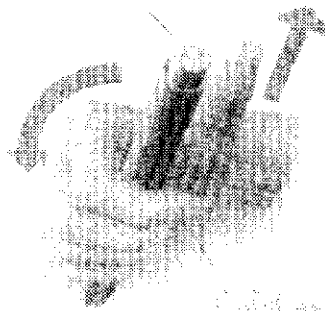
ในทางปฏิบัติของรูปที่ 2.4 (ข) จะเขียนเป็นสมการดังนี้

$$H_l H_l + H_x H_x = N i_l \dots \dots \dots (2.6)$$

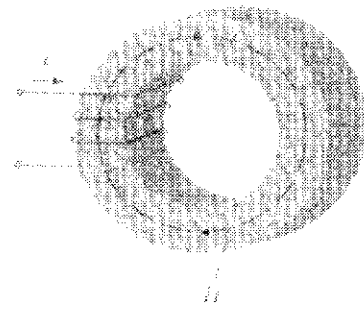
2.5 กฎมือขวา (right hand's rule) [4]

กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในตัวนำทองแดง จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก มีทิศทางตามกฎมือขวา ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับทิศทางการหมุนของสกรู กล่าวคือเมื่อสกรูหมุนไปด้านขวามือ ทิศทางของสกรูจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเช่นเดียวกัน เปรียบเทียบคือ กระแสไฟฟ้าจะเคลื่อนไปข้างหน้า และทิศทางการหมุนของสกรูคือทิศทางของสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะนิยมใช้ในการหาทิศทางของสนามแม่เหล็กในแกนไม่ว่าจะเกิดจากตัวนำทองแดงที่เป็นเส้นตรง หรือตัวนำทองแดงที่พันรอบแกนเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.5 กฎมือขวาสำหรับขดลวดทองแดง



รูปที่ 2.6 ขดลวดทองแดงแบบทอรอยด์



- (ก) กฎมือขวาสำหรับตัวนำทองแดงที่เป็นเส้นตรง (ข) กฎมือขวาสำหรับตัวนำทองแดงที่พันรอบแกนแม่เหล็กแบบทอรอยด์

รูปที่ 2.5 ทิศทางความเข้มสนามแม่เหล็ก

2.6 กฎการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฟาราเดย์ [4]

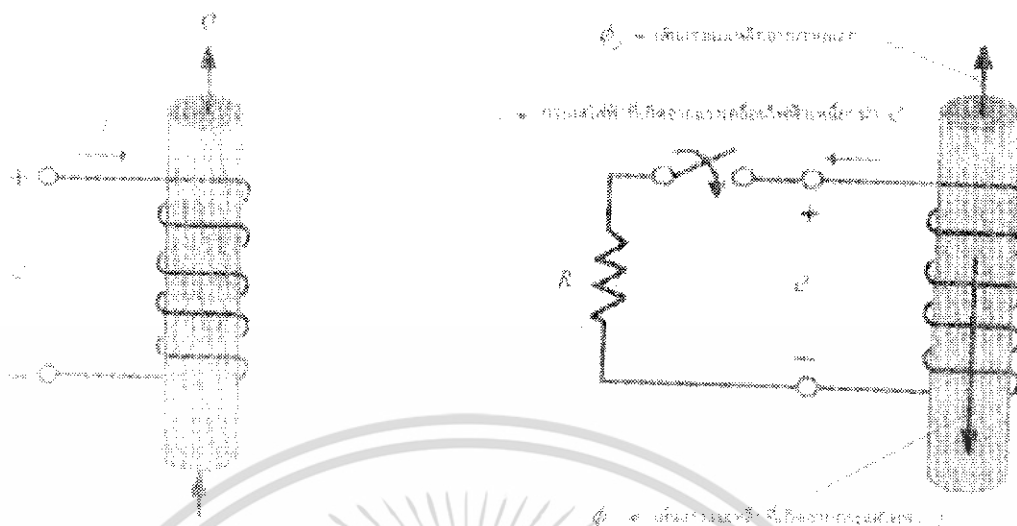
เมื่อพิจารณาถึงขดลวดทองแดงที่อยู่กับที่ ไม่ว่าจะ เป็นกรณีที่มีหรือไม่มีแกนเหล็ก ดังในรูปที่ 2.6 กำหนดแรงดันไฟฟ้าให้เป็นบวกไหลเข้า ทิศทางของแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎมือขวา ซึ่งเส้นแรงแม่เหล็กจะมีทิศทางไหลขึ้น และจากกฎฟาราเดย์ “แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากขดลวดทองแดงซึ่งมีสนามแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา จะมีค่าแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวดทองแดง N และอัตราการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ ” จึงสรุปได้ว่าวงจรแม่เหล็กที่ได้รับการทำแม่เหล็กด้วยระบบไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้เกิดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ขดลวดทองแดง ดังสมการที่ 2.7

$$\oint E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \int B \cdot ds \dots\dots\dots(2.7)$$

หรือ

$$e = -\frac{d(N\phi)}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\lambda}{dt} \dots\dots\dots(2.8)$$

ตัวของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามารถอธิบายได้จากกฎของเลนส์ (Lenz's law) เรื่องการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า จากกฎของเลนส์ที่ว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะต้องมีทิศทางที่ต้านการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง ซึ่งทำให้เกิดมันขึ้นมา” สมมติว่ามีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กภายนอก (ϕ_e) อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น ตัวของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะเป็นไปตามการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลต้านการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (flux linkage: λ) เช่นในรูปที่ 2.6 เมื่อ ϕ_e มีค่าเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ตัวของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะได้รับการต่อ



(ก) ทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กและขั้วแรงดัน

(ข) กฎของเลนส์

รูปที่ 2.6 การเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าของฟาราเดย์

ความต้านทานคร่อมขดลวดทองแดง กระแสไฟฟ้าก็จะไหลออกจากขั้วบนโดยคิดจากกฎมือขวา และเพื่อที่จะต้านกับการเปลี่ยนแปลงของเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้อง (ϕ_e) ทิศทางของ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะสร้าง ϕ_e ในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทาง ของ ϕ_e จึงกล่าวได้ว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น จะมีค่าเป็นบวกที่จุดต่อด้านบนเมื่อ เทียบกับจุดต่อด้านล่าง

2.7 แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากขดลวด [3]

แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากขดลวดซึ่งมีเส้นแรงแม่เหล็กเกี่ยวคล้องที่มีการเปลี่ยนแปลง ตามเวลาจะมีค่าแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด และอัตราการเปลี่ยนของแรงดัน เหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากขดลวด ดังสมการที่ 2.9

$$e \approx v = \frac{Nd\phi}{dt} \dots\dots\dots(2.9)$$

ถ้ากำหนดให้ค่าเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในวงจรมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของ รูปคลื่นไซน์จะได้ ดังสมการที่ 2.10

$$\phi = \phi_m \sin \omega t \dots\dots\dots(2.10)$$

$$e = \frac{Nd\phi_m \sin \omega t}{dt} = N\omega\phi_m \cos \omega t \dots\dots\dots(2.11)$$

ถ้ากำหนดให้ $\omega t=0$

$$E_{rms} = V_{rms} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{N\omega\phi_m}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$E_{rms} = \frac{2\pi f N \phi_m}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots(2.13)$$

$$E_{rms} = 4.44 f N \phi_m \dots\dots\dots(2.14)$$

$$\phi_m = BA \dots\dots\dots(2.15)$$

เมื่อ E_{rms} คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นที่ขดลวด หน่วย (V)

f คือ ความถี่ หน่วย (Hz)

N คือ จำนวนรอบของขดลวด

ϕ_m คือ เส้นแรงแม่เหล็ก หน่วย (Wb)

B คือ ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก หน่วย (T)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของขดลวด หน่วย (m^2)

2.8 สนามไฟฟ้า (electric field) [5]

สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการนำพลังงานไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง และเมื่อมีการส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สายส่งไฟฟ้าแรงสูงจะกลายเป็นแหล่งกำเนิดของคลื่นสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กกระจายอยู่โดยรอบในอากาศส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่อยู่ใกล้กับสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งเป็นปริมาณของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมานั้น จะขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าของสายส่งแรงสูงและระยะห่างจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สำหรับปริมาณความเข้มของสนามไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกมานั้น เราสามารถหาได้จากการคำนวณและจากการวัด

การเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าสามารถสรุปได้จากกฎของคูลอมป์ (coulomb's law) ว่าเมื่อมีวัตถุชิ้นเล็กๆ สองชิ้นวางห่างกันค่าหนึ่งในสุญญากาศโดยมีระยะห่างมากกว่าขนาดของวัตถุ โดยที่วัตถุแต่ละชิ้นมีประจุห่อหุ้มอยู่เป็นขนาด q_1 และ q_2 พบว่าจะเกิดแรงกระทำขึ้นระหว่างประจุทั้งสอง โดยแรงที่กระทำนี้จะแปรผันตรงกับผลคูณของประจุทั้งสอง และผกผันกับระยะห่างกำลังสอง ของประจุทั้งสอง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 2.16

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \dots\dots\dots(2.16)$$

เมื่อ F คือ แรงที่กระทำต่อประจุทั้งสอง หน่วยนิวตัน (N)

q_1 คือ ประจุตำแหน่งที่หนึ่ง หน่วยคูลอมป์ (C)

q_2 คือ ประจุตำแหน่งที่สอง หน่วยคูลอมป์ (C)

ϵ_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ มีค่า = 8.854×10^{-12} หน่วย F/m

r คือระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง หน่วยเมตร (m)

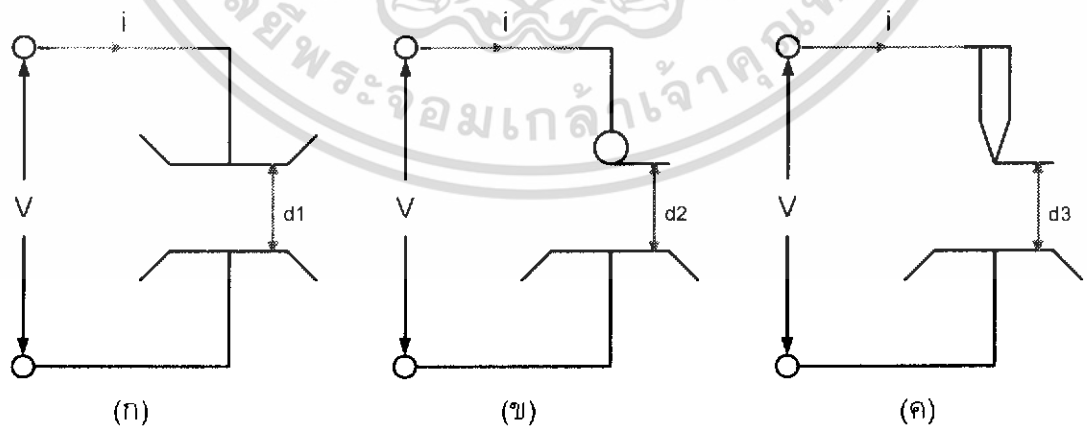
จากการที่ประจุทั้งสองสามารถส่งแรงกระทำระหว่างกันได้ ดังนั้นเมื่อนำประจุไฟฟ้าไปวาง ณ ตำแหน่งต่างๆ กันจะพบว่าจะมีแรงไฟฟ้ากระทำต่อประจุที่นำไปวางเสมอและเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณที่นำประจุไปวาง โดยประจุที่นำไปวางนั้นจะมีค่าเป็นบวกหนึ่งหน่วย โดยเรียกแรงที่กระทำต่อประจุว่าความเข้มสนามไฟฟ้า (E) มีหน่วยเป็น V/m ดังสมการที่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

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \dots\dots\dots(2.17)$$

- เมื่อ E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า หน่วยโวลต์ต่อเมตร (V/m)
- q คือ ประจุทดสอบที่นำไปวาง หน่วยคูลอมบ์ (C)
- ϵ_0 คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ มีค่า $= 8.854 \times 10^{-12}$ หน่วย F/m
- r คือ ระยะห่างระหว่างประจุที่นำไปวางทดสอบ หน่วยเมตร (m)

2.9 ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strength) [5]

ความคงทนของฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า หมายถึงค่าความเครียดฉนวนไฟฟ้า (electric field stress) สูงสุดที่ฉนวนนั้นทนอยู่ได้โดยไม่เกิดความเสียหาย หรือเกิดการ เบรกดาวน์หรือทำให้การเป็นฉนวนเสื่อมสภาพ มีหน่วยเป็นค่าแรงดันต่อความหนาต่อฉนวน หรือระยะห่างของอิเล็กโทรดเป็นโวลต์ต่อเซนติเมตร (V/cm) หรือกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร (kV/cm) ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ใช้กำหนดค่าความคงทนของฉนวนไฟฟ้า โดยทั่วไปจะหาจากไฟฟ้าที่สม่ำเสมอ (uniform field) คือเป็นสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดที่มีลักษณะเป็นแผ่นระนาบ (plate-to-plate) ความคงทนของการฉนวนต่อแรงดันไฟฟ้า E_b (สนามไฟฟ้าวิกฤต) ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ เช่น รูปลักษณะเรขาคณิตของอิเล็กโทรด ลักษณะสมบัติของ 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 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดเบรกดาวนจะไม่เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะจัดระยะ d_1, d_2 และ d_3 ให้เท่ากันก็ตาม ค่าแรงดันที่ทำให้เกิดการเบรกดาวน สามารถวัดได้ง่าย ฉนวนแต่ละชนิดจะมีค่าความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า ไม่ใช่ตายตัวค่าใดค่าหนึ่ง ส่วนใหญ่จะเป็นค่าสถิติหรือค่าโดยประมาณ มักจะกำหนดโดยค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด E_{max} ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดจุดหนึ่ง ระหว่างอิเล็กโทรดในขณะที่การเบรกดาวนเริ่มเกิดขึ้น ซึ่งจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอีกหลายประการ

2.9.1 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ หมายถึงอิเล็กโทรดที่มีค่าสนามไฟฟ้าทุกๆ จุดในช่วงระหว่างอิเล็กโทรดสม่ำเสมอเท่ากันตลอด เช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.7 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_{max} = E_{av} = \frac{V}{d} \dots \dots \dots (2.18)$$

เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไประหว่างอิเล็กโทรด หน่วย โวลต์ หรือกิโลโวลต์

d คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด หน่วย เซนติเมตร

E_{av} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าเฉลี่ย ณ จุดใดๆ ระหว่างอิเล็กโทรด หน่วยโวลต์ต่อเซนติเมตร หรือกิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร

E_{max} คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด

เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับอิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ จะเกิดเบรกดาวนทันทีที่ความเครียดสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งเท่ากันทุกจุดถึงค่าที่กำหนดค่าหนึ่งโดยประมาณ และกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในทันทีทันใด ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันขณะจะเกิดการเบรกดาวนนี้ ก็คือความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนนั่นเอง ซึ่งคำนวณได้จาก

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

เมื่อ V_b คือ แรงดันไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนด้านสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

E_b คือ ความเครียดสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการเบรกดาวนหรือคงทนทางไฟฟ้าของฉนวน

2.9.2 อิเล็กโทรดสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ อิเล็กโทรดแบบนี้ ความเครียดสนามไฟฟ้าแต่ละจุดจะมีค่าแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของจุดนั้นๆ ความแตกต่างกัน ณ จุดต่างๆ จะมากหรือน้อย ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะรูปทรงเลขาคณิตของอิเล็กโทรดที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอมากหรือน้อย เช่น อิเล็กโทรดในรูปที่ 2.7 (ข) ความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ผิวของอิเล็กโทรดทรงกลมสามารถคำนวณได้จาก

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

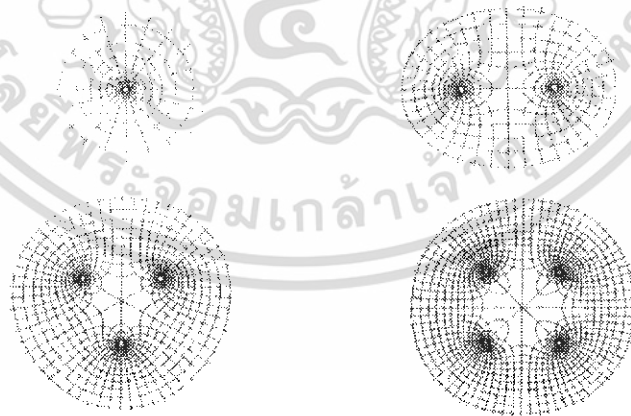
เมื่อ η^* คือ แฟกเตอร์สนามไฟฟ้า (field utilization factor) มีค่า ≤ 1

แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าคือ ดัชนีบอกให้ทราบว่าอิเล็กโทรดนั้นมีลักษณะของสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอมากน้อยเพียงใด

2.10 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดจากไฟฟ้าแรงสูง [5]

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

2.10.1 สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดจากตัวนำสายไฟฟ้าควบสายส่ง แรงสูงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย นิยมส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าโดยใช้สายครบที่เรียกว่า bundle conductor คือในแต่ละเฟสจะประกอบด้วยตัวนำหลายเส้น (ตั้งแต่ 2 เส้นขึ้นไป) โดยระยะห่างระหว่างเส้นในสายที่ครบที่เหมาะสมจะประมาณ 10 - 15 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นย่อย ซึ่งการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ได้กำหนดระยะห่างไว้ดังนี้ สายส่งแรงสูงขนาด 500 kV จำนวนตัวนำ 4 bundle มีระยะห่าง 44 เซนติเมตร สายส่งแรงสูงขนาด 230 kV จำนวนตัวนำ 2 bundle และ 4 bundle มีระยะห่าง 40 เซนติเมตร การเดินสายด้วยวิธีนี้ จะมีข้อดีดังนี้



รูปที่ 2.8 สนามไฟฟ้าสถิตของตัวนำเดี่ยว และของสายควบคู่ ควบสามเส้น และควบสี่เส้น

1. ความเข้มสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลง
2. เพื่อลดค่าความเหนี่ยวนำรวมของสายให้น้อยลง ส่งผลให้ค่าของสนามไฟฟ้าน้อยลง

3. เพื่อให้การระบายความร้อนในสายดีขึ้น

4. เพื่อให้ค่าความต้านทานรวมของสายลดลง

ซึ่งสามารถแสดงเป็นภาพการเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากสายส่งแรงสูงที่ใช้ตัวนำไฟฟ้าครบแบบ 2 เส้น 3 เส้น และ 4 เส้น เปรียบเทียบกับสายไฟฟ้าเส้นเดียว

2.10.2 ผลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กต่อคนและสัตว์ ผลกระทบหรืออันตรายจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่มีต่อคนและสัตว์ โดยเฉพาะบ้านเรือน หรือที่ทำงานที่อยู่ใกล้สายส่งแรงสูง จะมีความวิตกกังวลถึงอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นว่าจะส่งผลกระทบต่อร่างกายของคนและสัตว์ โดยองค์กรที่มีชื่อว่า The International Protection Association (IRPA) ได้กำหนดระดับสูงสุดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่ประชาชนสัมผัสได้อย่างปลอดภัยไว้ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าจำกัดสูงสุดของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก 50/60 Hz

สถานที่ที่มี E และ H	ความเข้มสนามไฟฟ้า (E)	ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (B)
สถานประกอบการ		
- ตลอดชั่วโมงทำงาน	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/วัน	10 kV/m	10 G (1 mT)

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดความกว้างเขตเดินสายไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต

ขนาดแรงดันไฟฟ้า (kV)	ระยะจากจุดกึ่งกลางเสา ออกไปด้านละ (m)	รวมเขตเดินสายไฟฟ้า (m)
69	9	18
115	12 – 25	24 – 50
230	20 – 25	40 – 50
500	35 – 40	70 – 80

จากผลกระทบจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่เกิดขึ้นจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีต่อคนและสัตว์ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้มีการตั้งข้อกำหนด ความกว้างเขตเดินสายไฟฟ้าของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเอาไว้ เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น ดังตารางที่ 2.2

จากการศึกษาของผู้เชี่ยวชาญต่างประเทศ พบว่าบุคคลที่เข้าไปอยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีปริมาณสูงเกินที่กำหนด ในระยะเวลาานานๆ อยู่ประจำอาจทำให้บุคคลนั้น ได้รับอันตรายจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้ ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเกิดโรคต่างๆ เช่น โรคมะเร็งผิวหนัง โรคต่อมไทรอยด์บวม โรคสมองเสื่อม และโรคที่เกี่ยวข้องกับเม็ดเลือด แต่ปัญหาจากอันตรายที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กก็สามารถป้องกันได้ด้วยการที่ไม่เข้าไปอยู่ในบริเวณที่มีความเข้มข้นสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสูงๆ ถ้ามีความจำเป็นต้องเข้าไปอยู่ในบริเวณดังกล่าวก็ไม่ควรที่จะอยู่นานเกินไป

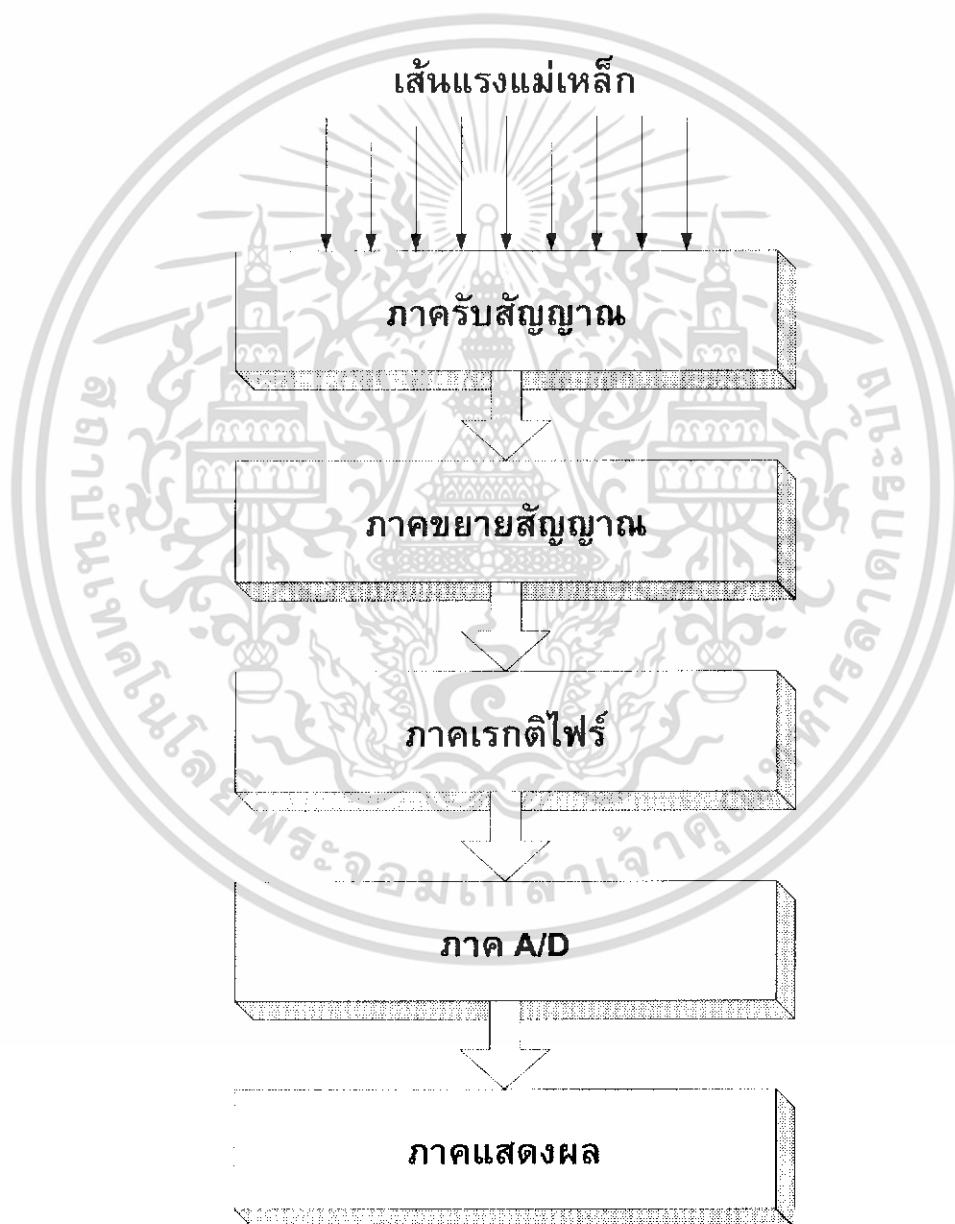


บทที่ 3

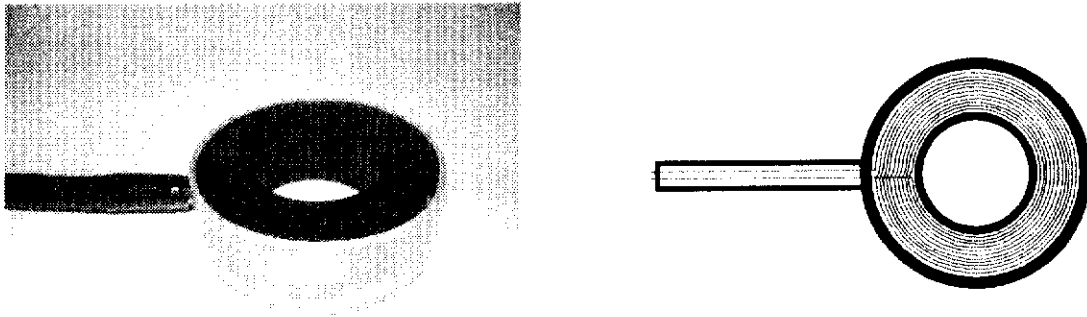
การออกแบบเครื่องวัดสนามแม่เหล็กและเซนเซอร์

3.1 แนวคิดในการออกแบบเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก

จากแนวคิดที่จะออกแบบสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก ได้มีการนำเอาวงจรอิเล็กทรอนิกส์มาทำงานร่วมกัน โดยมีภาคการทำงานของเครื่องวัดทั้งหมด 5 ส่วนการทำงานด้วยกัน ได้แก่ ภาครับสัญญาณ ภาคขยายสัญญาณ ภาคเรกติไฟร์ ภาคแสดงสัญญาณ จากอนาล็อกเป็นดิจิตอลและภาคแสดงผล ซึ่งทั้ง 5 ส่วนการทำงานนี้จะต้องทำงานสัมพันธ์กัน โดยมีหน้าที่ในแต่ละส่วนการทำงานดังนี้



รูปที่ 3.1 แนวคิดในการออกแบบเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก

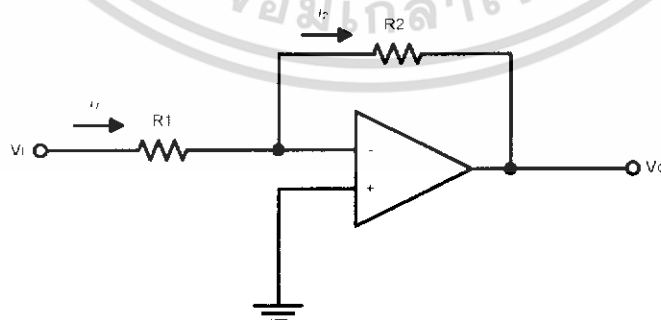


รูปที่ 3.2 หัวเซนเซอร์ที่ใช้ขดลวด และลักษณะการพันขดลวด

3.1.1 ภาครับสัญญาณ สำหรับการทำงานของเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก ในส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณ ฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่มีค่าเปลี่ยนแปลงเข้ามา โดยในการออกแบบจะใช้ขดลวดทองแดงทำหน้าที่เป็นภาครับสัญญาณ โดยอาศัยการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยภาครับสัญญาณจะรับสัญญาณสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิด เช่น สายส่งแรงสูง หม้อแปลงไฟฟ้า และอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิด

3.1.2 ภาคขยายสัญญาณ สำหรับภาครับสัญญาณและขยายสัญญาณนั้น จะมีการทำงานที่สัมพันธ์กันคือ หลังจากที่ยขดลวดรับสัญญาณสนามแม่เหล็ก จากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กเข้ามา สนามแม่เหล็กจะมีค่าน้อย จึงต้องมีการขยายสัญญาณที่รับมาให้สูงขึ้น โดยภาคขยายสัญญาณนี้ จะใช้คุณสมบัติของอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ Operational Amplifier (op-amp) ใช้ในการเพิ่มอัตราขยายสัญญาณให้สูงขึ้น

1. Inverter Amplifier เป็นการต่อวงจรภายนอกให้ออปแอมป์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแรงดันกระแสตรงหรือกระแสสลับ โดยได้สัญญาณเอาต์พุตตรงข้ามกับสัญญาณอินพุต ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 Inverting Amplifier

จากวงจร เราพบว่ากระแส i_1 มีค่าเท่ากับกระแส i_2 ซึ่งจากวงจร เราสามารถหาอัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตกับอินพุต ได้ดังต่อไปนี้

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

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

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

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

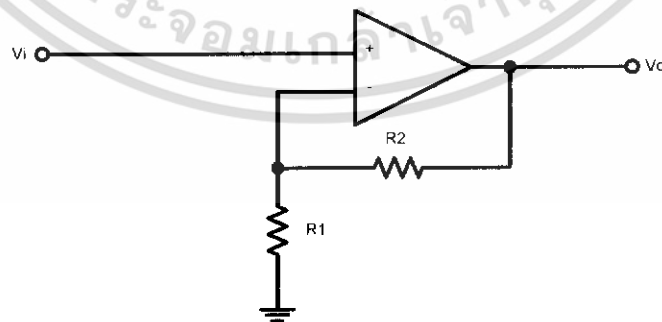
ดังนั้น จากสมการที่ 3.3 จะได้อัตราส่วนระหว่างเอาต์พุตกับอินพุตได้ดังนี้

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

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

เครื่องหมายลบในสมการแสดงว่า เมื่อแรงดันอินพุตเป็นบวก จะทำให้แรงดันเอาต์พุตเป็นลบ หรือเมื่อแรงดันอินพุตเป็นลบจะทำให้แรงดันเอาต์พุตเป็นบวก

2. Non-Inverting Amplifier เป็นการต่อวงจรภายนอกให้ออปแอมป์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส โดยอัตราขยายสัญญาณจะขึ้นอยู่กับการต่อวงจรภายนอก โดยได้สัญญาณเอาต์พุตเหมือนกับสัญญาณอินพุตดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Non-inverting Amplifier

จากวงจรเราสามารถหาอัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอินพุตได้ดังนี้

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

ดังนั้นจากสมการที่ 3.6 เราจะได้อัตราส่วนระหว่างแรงดันเอาต์พุตกับอินพุตได้ดังนี้

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

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

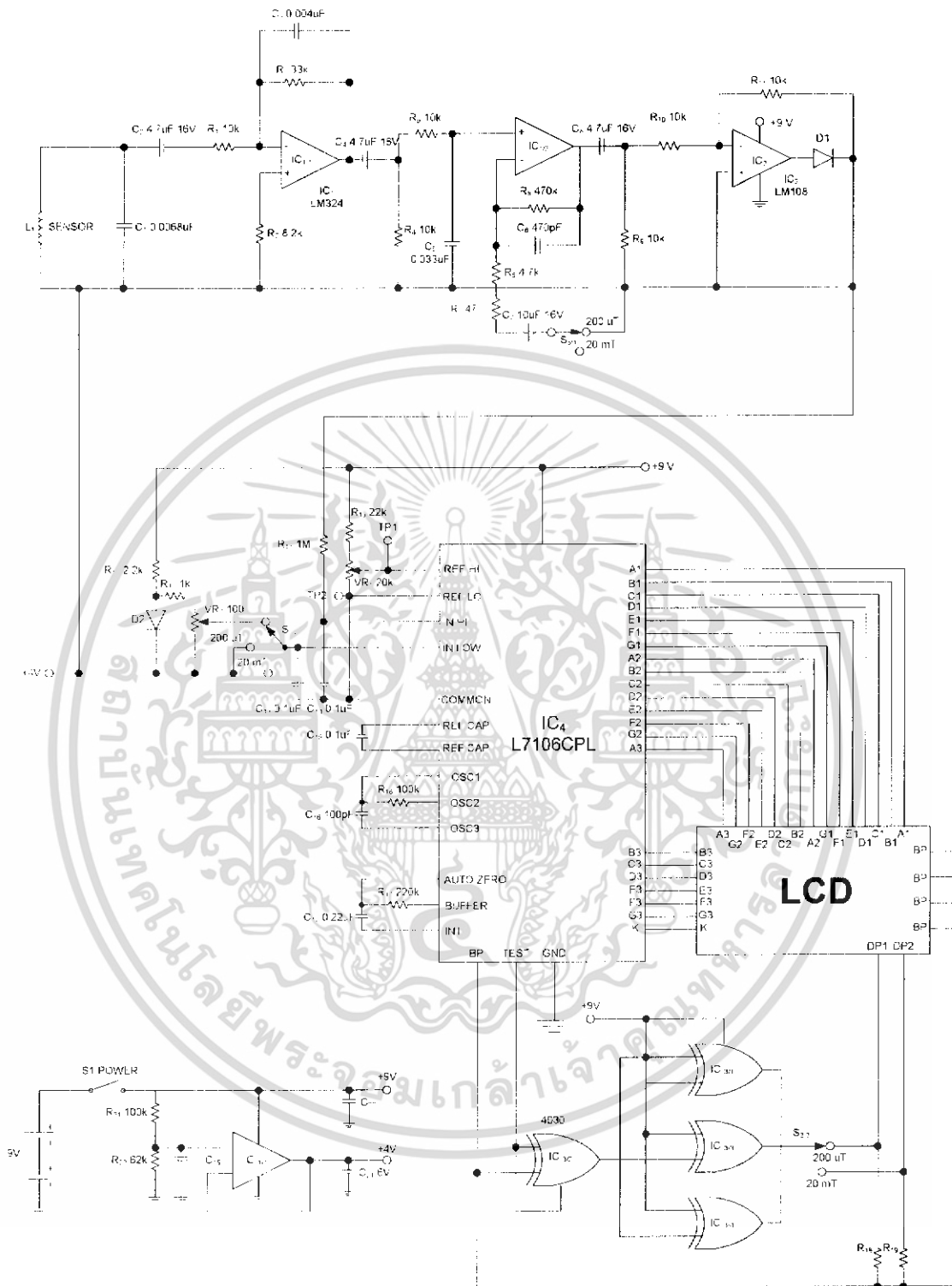
$$V_o = V_i \left[1 + \frac{R_2}{R_1} \right] \dots\dots\dots(3.9)$$

3.1.3 ภาคเรกติไฟร์ สำหรับภาคเรกติไฟร์ หลังจากที่ได้รับสัญญาณสนามแม่เหล็กผ่านภาคขยายสัญญาณแล้ว ภาคเรกติไฟร์จะทำหน้าที่แปลงสัญญาณไฟสลับ (AC) ให้ได้สัญญาณไฟตรง (DC) เพื่อส่งไปยังภาคแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอลต่อไป

3.1.4 ภาคแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล (A/D) เป็นภาคที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณโดยสัญญาณที่ผ่านภาคเรกติไฟร์เข้ามาจะเป็นสัญญาณอนาล็อก ภาคแปลงสัญญาณนี้จะแปลงสัญญาณที่เข้ามาให้เป็นสัญญาณดิจิตอลเพื่อควบคุมการทำงานของภาคแสดงผลต่อไป

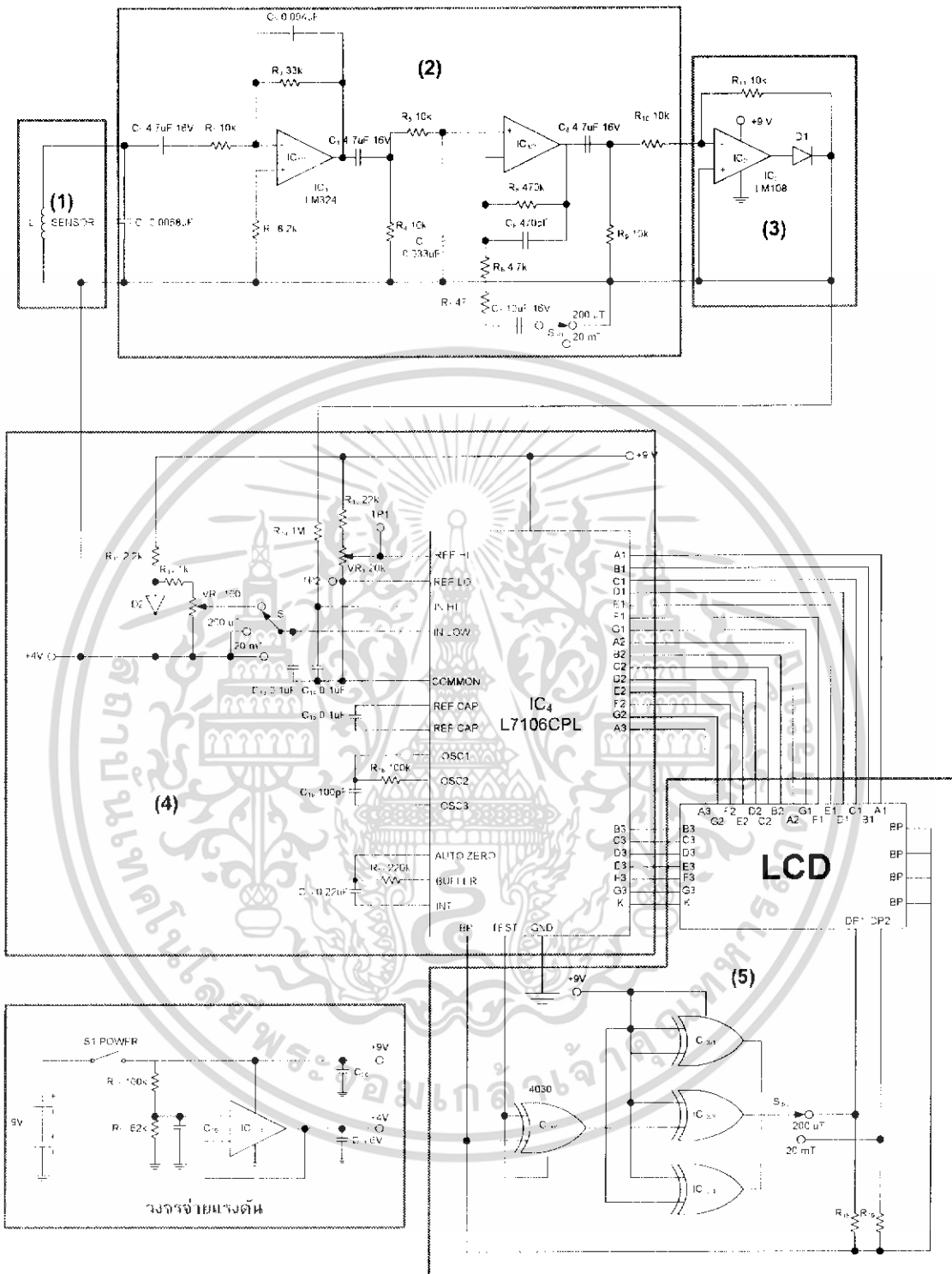
3.1.5 ภาคแสดงผล เป็นภาคสุดท้ายของการทำงานซึ่งแสดงผลเป็นตัวเลขดิจิตอล จะใช้ในการแสดงผลค่าของสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลงไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น มอเตอร์

3.2 วงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.5 วงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก

3.3 วงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่แสดงการทำงานในแต่ละภาค



หมายเลข (1) ภาครับสัญญาณ (2) ภาคขยายสัญญาณ (3) ภาคเรกติไฟฟ์
 (4) ภาค A/D (5) ภาคแสดงผล

รูปที่ 3.6 วงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่แสดงการทำงานในแต่ละภาค

3.4 หลักการทำงานของวงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก

หลักการทำงานของวงจรเครื่องวัดสนามแม่เหล็กเริ่มต้นจากหัวเซนเซอร์ (L_1) ทำหน้าที่เกี่ยวล้องฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นเข้ามาผ่านภาคขยายสัญญาณโดยใช้ IC_1 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่เข้ามาให้มีค่าสูงขึ้น จากนั้นส่งสัญญาณที่ขยายแล้ว ผ่านไปยัง IC_2 ที่ IC_2 จะทำหน้าที่เรกติไฟร์ ซึ่งจะแปลงสัญญาณ AC ให้เป็น DC จากนั้นจะส่งสัญญาณไปยัง IC_4 ซึ่งทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากอนาล็อกให้เป็นดิจิตอล และส่งสัญญาณดิจิตอลไปแสดงที่จอแอลซีดี สำหรับสวิทช์ S_3 ซึ่งเป็นแบบ 4 ขั้ว 3 ทาง เพื่อเลือกย่านการวัด 2 ย่านวัด และเลือกอัตราขยายให้กับออปแอมป์ ภายในสวิทช์ทั้ง 4 ขั้ว การทำงานจะหมุนพร้อมกัน สวิทช์ที่เลือกอัตราขยายสูงสุดเป็นสวิทช์ $S_{3/1}$ เมื่อบิดไปที่ย่าน $200 \mu T$ ส่วนสวิทช์ $S_{3/2}$ จะทำหน้าที่เลือกแรงดันอ้างอิงให้กับ IC_4 ในการปรับตั้งค่า และสวิทช์ $S_{3/3}$ จะทำหน้าที่ในการเลือกจุดทศนิยมที่จะแสดงบนจอแอลซีดี

สำหรับ IC_1 เป็นเบอร์ LM324 เป็นออปแอมป์ 4 ตัวใน 1 แพคเกจ ใช้เป็นภาคขยายสัญญาณสนามแม่เหล็กที่รับเข้ามา โดยที่หัวเซนเซอร์จะส่งสัญญาณผ่านไปยัง $IC_{1/1}$ ซึ่งผ่าน inverting amplifier ซึ่งในวงจรมีอัตราขยาย 3.3 เท่า ของสัญญาณที่เข้ามา ที่เอาท์พุทของ $IC_{1/1}$ จะป้อนสัญญาณให้กับ $IC_{1/2}$ ซึ่ง $IC_{1/2}$ จะทำหน้าที่เป็น non-inverting amplifier ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณต่อจาก $IC_{1/1}$ โดยใช้สวิทช์ $S_{3/1}$ เป็นตัวเลือกอัตราขยาย โดยที่เมื่อสวิทช์ $S_{3/1}$ อยู่ที่ตำแหน่ง $200 \mu T$ จะมีอัตราขยายเท่ากับ 100 เท่า สำหรับตำแหน่งที่สวิทช์อยู่ที่ $20 mT$ อัตราขยายจะเท่ากับ 1 เท่า

สำหรับภาคเรกติไฟร์ IC_2 เบอร์ LM 208 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณจากกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง และส่งไปยังภาคแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอลโดยใช้ IC_4 เบอร์ ICL7106 ทำหน้าที่วัดและแสดงผลความแตกต่างระหว่างขา IN HI และ IN LO โดยใช้สวิทช์ $S_{1/3}$ ทำหน้าที่เลือกแรงดันอ้างอิงให้กับ IC เบอร์ ICL7106 เมื่อสัญญาณที่เข้ามามีค่าสูงกว่าแรงดันอ้างอิงที่กำหนด จะทำให้เกิดความแตกต่างขึ้นระหว่างขา IN HI และ IN LO จากนั้น IC_4 จะส่งสัญญาณดิจิตอลแสดงผลค่าความแตกต่างที่จอแอลซีดี

การทำงานร่วมกันของ $IC_{1/1}$ และ $IC_{1/2}$ จะทำให้อัตราการขยายของสัญญาณสูงมาก ซึ่งสามารถแสดงการทำงานของภาคขยายเมื่อเลือกใช้ช่วงการวัดต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงการทำงานของส่วนภาคขยายสัญญาณ

ย่านการวัด	อัตราขยาย		อัตราขยายรวม
	$IC_{1/1}$	$IC_{1/2}$	
$200 \mu T$	3.3	100	330
$20 mT$	3.3	1	3.3

3.5 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์มาทำงานร่วมกัน โดยสามารถแบ่งการทำงานของเครื่องวัดทั้งหมด 5 ส่วนการทำงานด้วยกัน เริ่มตั้งแต่ ภาครับสัญญาณ ภาคขยายสัญญาณ ภาคเรกติไฟร์ ภาคแปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นดิจิตอล และภาคแสดงผล ในการทำงานของวงจรทั้งหมด จะใช้สวิตช์เป็นตัวเลือกย่านการวัดและอัตราขยายของวงจรซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.1



บทที่ 4

การทดลองวัดสนามแม่เหล็ก

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอผลที่ได้จากการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยภายในการทดลองมีการปรับเปลี่ยนลักษณะต่างๆของหัวเซนเซอร์มีทั้งการเพิ่มจำนวนรอบ เพิ่มจำนวนรัศมี ขนาดของขดลวด และขดลวดที่หุ้มด้วยฉนวนวานิชและขดลวดที่ทำจากสายไฟฟ้า เพื่อศึกษาการเกี่ยวคล้องของฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้า เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบหัวเซนเซอร์ต่อไป

4.2 การทดลองที่ 1 การวัดสนามแม่เหล็กโดยการเปลี่ยนลักษณะของหัวเซนเซอร์

4.2.1 วัตถุประสงค์การทดลอง

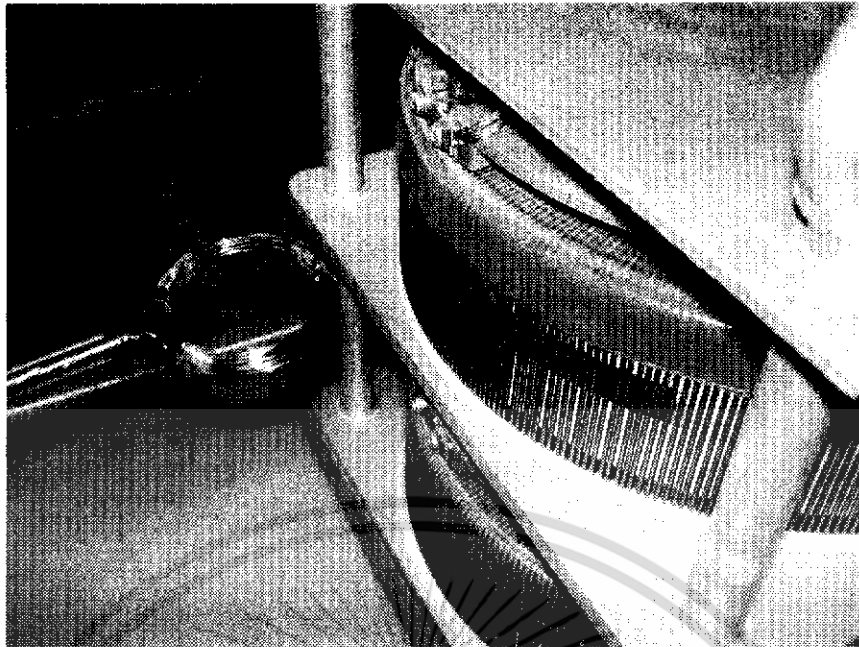
1. เพื่อทดสอบเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น
2. เพื่อออกแบบหัวเซนเซอร์ที่ใช้วัดสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม
3. เพื่อศึกษาทิศทางในการวัดในแนวนอนและในแนวตั้งจากกับอุปกรณ์กำเนิดสนามแม่เหล็ก

4.2.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

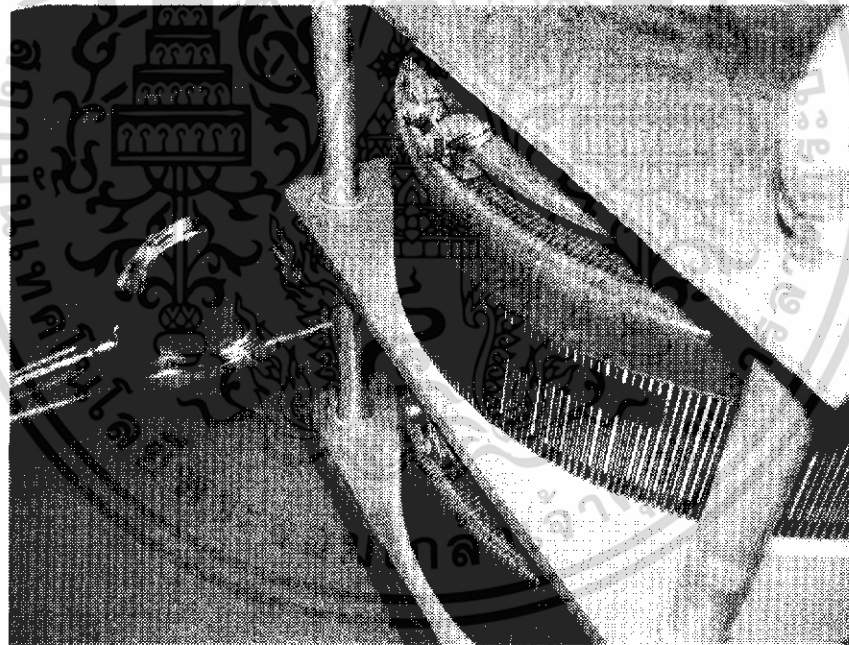
1. เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น
2. หัวเซนเซอร์แบบต่างๆ
3. อุปกรณ์กำเนิดสนามแม่เหล็ก

4.2.3 วิธีการทดลอง

1. ต่อดวงจรให้ Variac จ่ายแรงดันไปยังโหลดเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น
2. กำหนดระยะห่างของการวัดเป็นสองช่วงคือ 2 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร
3. ใช้หัวเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ในแนวนอนและตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น
4. ทำการเปลี่ยนลักษณะของหัวเซนเซอร์เป็นแบบต่างๆทำการวัดและบันทึกผลที่ได้

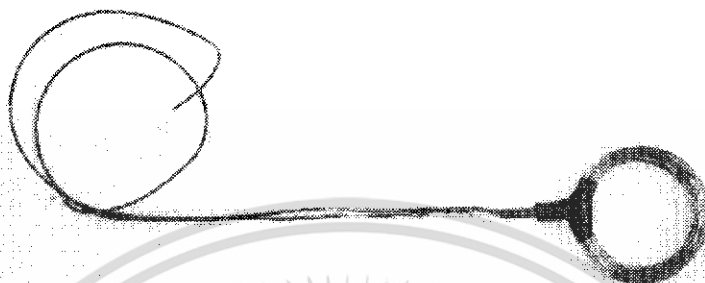


รูปที่ 4.1 การวัดในแนวตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 4.2 การวัดในแนวขนานกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

4.2.4 ผลการทดลอง



รูปที่ 4.3 หัวเซนเซอร์ที่ทำจากลวดทองแดงเบอร์ 20 พันจำนวน 30 รอบ มีขนาดรัศมี 5 ซม.

การทดลองหัวเซนเซอร์ที่ทำจากลวดทองแดงเบอร์ 20 พันจำนวน 30 รอบ มีขนาดรัศมี 5 ซม.

ในแนวขนานกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

1. ผลการทดลองวัดแนวขนานที่ระยะห่าง 2 ซม. = 14.30 μT
2. ผลการทดลองวัดแนวขนานที่ระยะห่าง 4 ซม. = 8.30 μT

การทดลองหัวเซนเซอร์ที่ทำจากลวดทองแดงเบอร์ 20 พันจำนวน 30 รอบ มีขนาดรัศมี 5 ซม.

ในแนวตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

1. ผลการทดลองวัดแนวตั้งฉากที่ระยะห่าง 2 ซม. = 32.20 μT
2. ผลการทดลองวัดแนวตั้งฉากที่ระยะห่าง 4 ซม. = 26.30 μT

การทดลองหัวเซนเซอร์ที่ทำจากลวดทองแดงเบอร์ 20 พันจำนวน 15 รอบ มีขนาดรัศมี 5 ซม.

ในแนวขนานกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

1. ผลการทดลองวัดแนวขนานที่ระยะห่าง 2 ซม. = 9.6 μT
2. ผลการทดลองวัดแนวขนานที่ระยะห่าง 4 ซม. = 2.8 μT

การทดลองหัวเซนเซอร์ที่ทำจากลวดทองแดงเบอร์ 20 พันจำนวน 15 รอบ มีขนาดรัศมี 5 ซม.

ในแนวตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

1. ผลการทดลองวัดแนวตั้งฉากที่ระยะห่าง 2 ซม. = 16.6 μT
2. ผลการทดลองวัดแนวตั้งฉากที่ระยะห่าง 4 ซม. = 12.2 μT

การทดลองหัวเซนเซอร์ที่ทำจากขดทองแดงเบอร์ 28 พันจำนวน 15 รอบ มีขนาดรัศมี 5 ซม. ในแนวตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

1. ผลการทดลองวัดแนวตั้งฉากที่ระยะห่าง 2 ซม. = 15.6 μT
2. ผลการทดลองวัดแนวตั้งฉากที่ระยะห่าง 4 ซม. = 11.4 μT

การทดลองหัวเซนเซอร์ที่ทำจากสายไฟหุ้มฉนวน พันจำนวน 15 รอบ มีขนาดรัศมี 5 ซม. ในแนวขนานกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

1. ผลการทดลองวัดแนวขนานที่ระยะห่าง 2 ซม. = 15.4 μT
2. ผลการทดลองวัดแนวขนานที่ระยะห่าง 4 ซม. = 9.4 μT

การทดลองหัวเซนเซอร์ที่ทำจากสายไฟฟ้าหุ้มฉนวน พันจำนวน 15 รอบ มีขนาดรัศมี 5 ซม. ในแนวตั้งฉากกับแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก

1. ผลการทดลองวัดแนวตั้งฉากที่ระยะห่าง 2 ซม. = 33.0 μT
2. ผลการทดลองวัดแนวตั้งฉากที่ระยะห่าง 4 ซม. = 27.2 μT

4.2.5 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจาก Variac ที่จ่ายแรงดันให้กับโหลดหม้อแปลงไฟฟ้า เมื่อนำหัวเซนเซอร์ลักษณะต่างๆ ไปวัด จะอ่านที่เครื่องวัดสนามแม่เหล็กแตกต่างกันออกไป ซึ่งจากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า หัวเซนเซอร์ที่นำไปวัดสนามแม่เหล็ก จะส่งผลต่อค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น การเพิ่มจำนวนรอบทำให้ค่าที่อ่านได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับการเพิ่มขนาดรัศมีของหัวเซนเซอร์ จะทำให้ค่าที่วัดได้ มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ในส่วนของขนาดขดลวด ขดลวดที่มีขนาดใหญ่กว่าจะทำให้ค่าที่วัดได้สูงกว่าขดลวดที่มีขนาดเล็ก เล็กน้อย และส่วนของหัวเซนเซอร์ที่ทำจากขดลวดอานฉนวนวานิช จะให้ค่าน้อยกว่าหัวเซนเซอร์ที่ทำจากสายไฟฟ้าเล็กน้อย

จากผลการทดลองสามารถอธิบายถึงลักษณะการเกิดของสนามแม่เหล็ก ที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไหล โดยจะเกิดสนามแม่เหล็กมีสูงบริเวณใกล้แหล่งกำเนิด และสนามแม่เหล็กจะมีค่าลดลงเมื่ออยู่ไกลจากแหล่งกำเนิด ในส่วนของการวัด หัวเซนเซอร์ที่มีพื้นที่หน้าตัดที่ใหญ่จะสามารถเกี่ยวคล้องสนามแม่เหล็กได้ดีกว่า

4.3 การทดลองที่ 2 วัดสนามแม่เหล็กโดยมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่โหลด

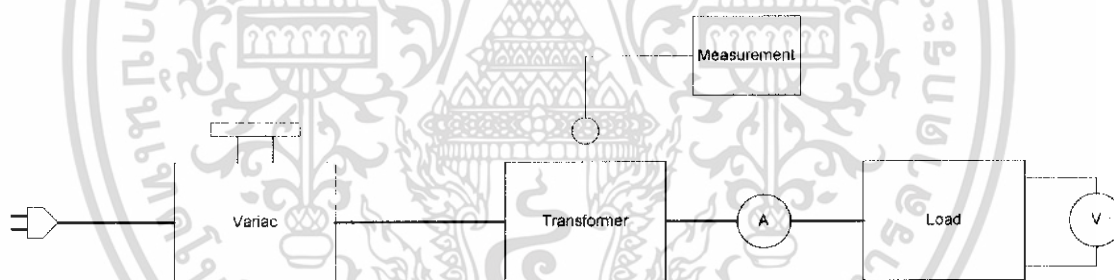
จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่า หัวเซนเซอร์ชนิดต่างๆ ที่นำไปวัดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะมีค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้จากเครื่องวัดที่สร้างขึ้น มีการเปลี่ยนแปลง โดยค่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้จะขึ้นอยู่กับหัวเซนเซอร์ที่นำไปวัด ซึ่งจากการทดลองทำให้เราทราบว่า หัวเซนเซอร์ลักษณะใดที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการออกแบบ ซึ่งในการทดลองต่อไปนี้เราจะใช้หัวเซนเซอร์ขนาดของขดลวดเบอร์ 20 มีขนาดรัศมี 5 เซนติเมตร

4.3.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น
2. หัวเซนเซอร์ที่ทำจากลวดทองแดงเบอร์ 20 พันจำนวน 30 รอบรัศมี 5 เซนติเมตร
3. หม้อแปลงไฟฟ้าขนาด 220/220 โวลต์
4. ดวงไฟขนาด 60 วัตต์ 1 ดวง
5. แอมป์มิเตอร์
6. โวลต์มิเตอร์
7. Variac ขนาด 220/250 โวลต์

4.3.2 วิธีการทดลอง

1. ต่อวงจรให้ Variac จ่ายแรงดันไปยังโหลดเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น
2. ทำการปรับแรงดันจ่ายให้กับหม้อแปลงที่แรงดัน 50 100 150 และ 200 โวลต์
3. กำหนดระยะห่างของการวัดเป็นสองช่วงคือ 2 เซนติเมตร และ 4 เซนติเมตร
4. ใช้หัวเซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากและทำมุม 45 องศากับสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น
5. บันทึกผลการทดลองที่ระยะต่างๆ



รูปที่ 4.4 วงจรการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากหม้อแปลงในแนวตั้งฉาก

แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	ระยะห่าง 2 ซม. ค่าความหนาแน่นเส้น แรงแม่เหล็ก(μT)	ระยะห่าง 4 ซม. ค่าความหนาแน่นเส้น แรงแม่เหล็ก(μT)
50	0.42	2.2	1.1
100	0.58	3.2	1.6
150	0.71	6.0	3.1
200	0.82	17.1	10.3

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหม้อแปลงในแนวทำมุม 45 องศา

แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	ระยะห่าง 2 ซม. ค่าความหนาแน่นเส้น แรงแม่เหล็ก(μT)	ระยะห่าง 4 ซม. ค่าความหนาแน่นเส้น แรงแม่เหล็ก(μT)
50	0.42	1.4	0.9
100	0.58	2.0	1.1
150	0.71	2.8	2.0
200	0.82	13.4	7.7

ในการทดลองเมื่อต่อวงจรตามรูปการทดลอง จากนั้นทำการปรับขนาดของแรงดันเพิ่มขึ้นทีละ 50 โวลต์ จ่ายให้กับหม้อแปลงไฟฟ้า 220/220 โวลต์ ที่ต่ออยู่กับดวงไฟขนาด 60 วัตต์ จากนั้นทำการบันทึกค่าของกระแสและค่าสนามแม่เหล็กในแต่ละช่วงของแรงดันไฟฟ้า

4.3.3 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น จะแปรผันตามค่าของกระแสที่จ่ายไปยังโหลด การเพิ่มขึ้นของกระแสไหลด เมื่อเราปรับแรงดันเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทราบได้จากการวัด ในการทดลองพบว่า สนามแม่เหล็กจะมีความเข้มสูงบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดและจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกับระยะที่วัดมีค่ามากขึ้น ในส่วนทิศทางของการวัด การวัดในแนวตั้งฉากกับทิศทางฟลักซ์แม่เหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กที่ได้มีค่าสูงกว่า การวัดในแนวขนานและแนวที่ทำมุม 45 องศา กับทิศทางฟลักซ์แม่เหล็ก เหตุผลที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะในแนวตั้งฉาก ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดสามารถเกี่ยวคล้องกับหัวเซนเซอร์ ได้ดีกว่าในแนวอื่นๆ

4.4 การทดลองที่ 3 วัดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน

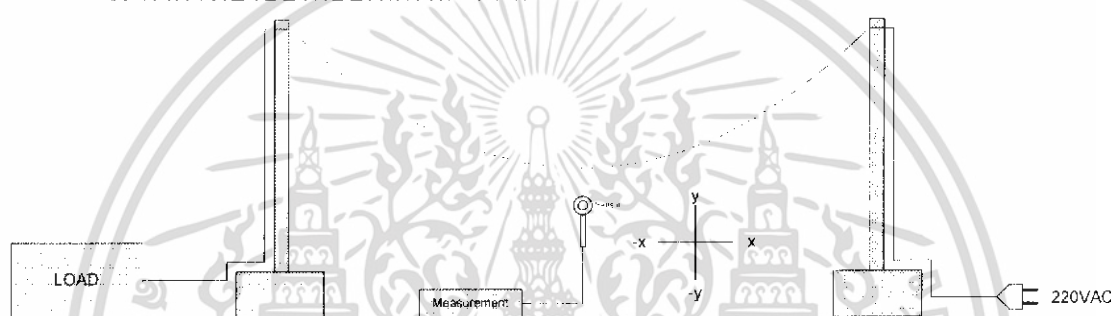
ตามที่ทราบกันดีแล้วว่า ภายในสายส่งตัวนำเมื่อมีกระแสไหล จะเกิดสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากหรือน้อย ก็ขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสที่ไหลภายในสายส่งตัวนำนั้น ในการทดลองนี้เราจะสร้างชุดทดลองขึ้นมาเปรียบเสมือนกับสายส่งไฟฟ้า ที่มีที่มียะยะห่างระหว่างเสา และระยะหย่อนยานของสาย เพื่อทำการวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายไฟฟ้าโดยนำเครื่องที่สร้างขึ้นทำการวัดเปรียบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐาน

4.4.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐาน
2. เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น
3. ชุดทดลองสายส่งไฟฟ้า
4. ดวงไฟขนาด 500 วัตต์

4.4.2 วิธีการทดลอง

1. ต่อดวงจรตามรูปการทดลอง
2. ทำการจ่ายแรงดัน 220 โวลต์ให้กับวงจรเพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นภายในตัวนำ
3. นำเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐาน และเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น มาทำการวัดสนามแม่เหล็กตามแนวแกน +X และ -X โดยกำหนดให้จุดห้องข้างของชุดทดลองเป็นจุด 0,0
4. นำเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐานและเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น ทำการวัดสนามแม่เหล็กตามแนวแกน +Y และ -Y โดยกำหนดให้จุดห้องข้างของชุดทดลองเป็นจุด 0,0
5. ในการวัดกำหนดให้เครื่องมือวัดอยู่ห่างจากระยะห้องข้างของสาย 3.5 เซนติเมตร
6. ทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากเครื่องมือวัดทั้งสอง



รูปที่ 4.5 วงจรการจำลองสายส่งไฟฟ้า

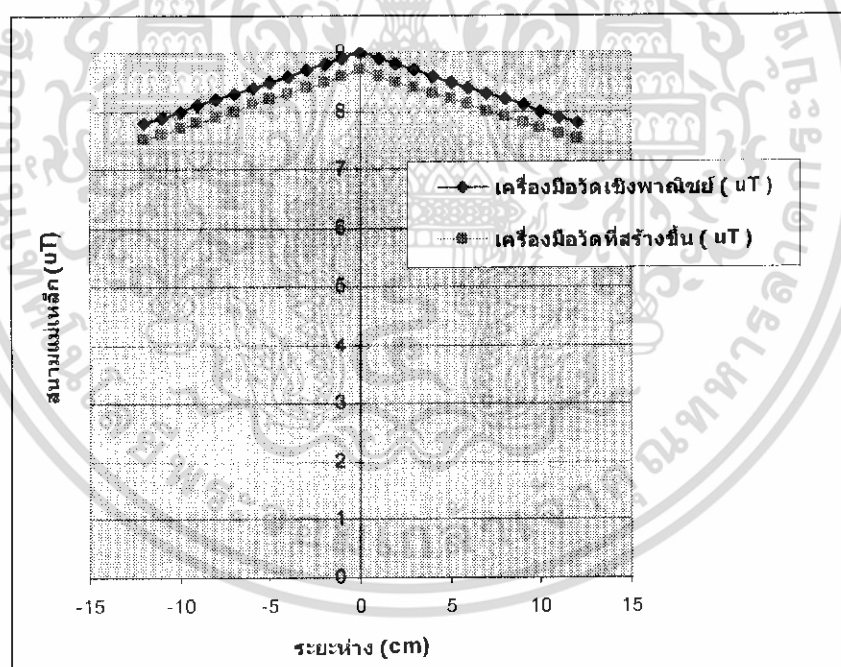
4.4.3 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวัดสนามแม่เหล็กตามแนว +X

ระยะห่าง (cm)	เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ (μT)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (μT)
0	9.0	8.7
1	8.9	8.6
2	8.8	8.5
3	8.7	8.4
4	8.6	8.3
5	8.5	8.2
6	8.4	8.1
7	8.3	8.0
8	8.2	7.9
9	8.1	7.8
10	8.0	7.7
11	7.9	7.6
12	7.8	7.5

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองวัดสนามแม่เหล็กตามแนว - X

ระยะห่าง (cm)	เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ (μT)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (μT)
0	9.0	8.7
-1	8.9	8.6
-2	8.8	8.5
-3	8.7	8.4
-4	8.6	8.3
-5	8.5	8.2
-6	8.4	8.1
-7	8.3	8.0
-8	8.2	7.9
-9	8.1	7.8
-10	8.0	7.7
-11	7.9	7.6
-12	7.8	7.5



รูปที่ 4.6 กราฟการทดลองการวัดสนามแม่เหล็กตามแนวแกน + X และ -X

4.4.4 สรุปผลการทดลอง

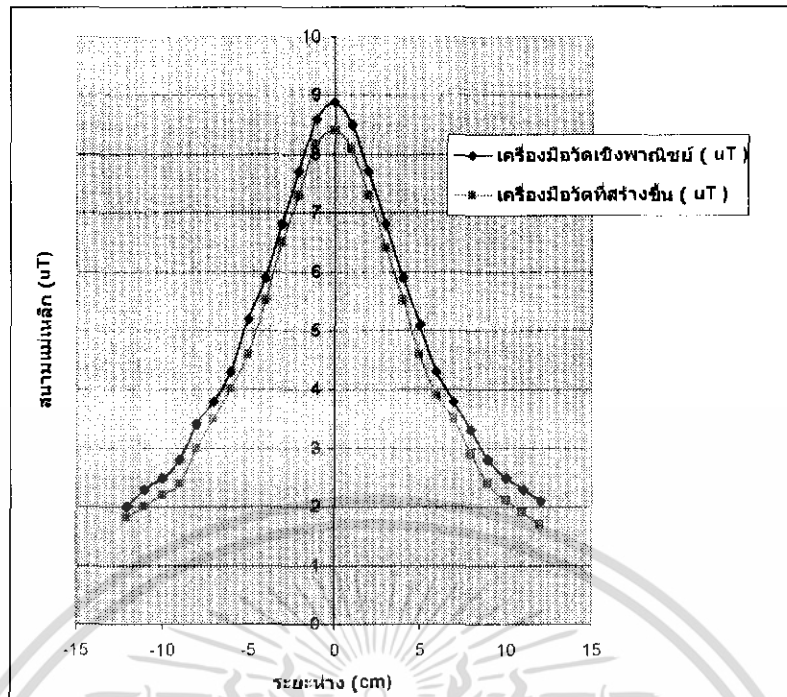
จากผลการทดลองวัดสนามแม่เหล็กของตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน ในแนวแกน +X และ -X จากชุดทดลองที่สร้างขึ้นปรากฏว่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์กับเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นค่าที่ได้จึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นจะมีค่าผิดพลาดอยู่ประมาณ 3.3 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองวัดสนามแม่เหล็กตามแนว +Y

ระยะห่าง (cm)	เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ (μT)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (μT)
0	8.9	8.5
1	8.5	8.1
2	7.7	7.3
3	6.8	6.4
4	5.9	5.5
5	5.1	4.6
6	4.3	3.9
7	3.8	3.5
8	3.3	2.9
9	2.8	2.4
10	2.5	2.1
11	2.3	1.9
12	2.1	1.7

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองวัดสนามแม่เหล็กตามแนว -Y

ระยะห่าง (cm)	เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ (μT)	เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (μT)
0	8.9	8.4
-1	8.6	8.2
-2	7.7	7.3
-3	6.8	6.5
-4	5.9	5.5
-5	5.2	4.6
-6	4.3	4.0
-7	3.8	3.5
-8	3.4	3.0
-9	2.8	2.4
-10	2.5	2.2
-11	2.3	2.0
-12	2.0	1.8



รูปที่ 4.7 กราฟการทดลองการวัดสนามแม่เหล็กตามแนวแกน +Y และ -Y

4.4.5 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองวัดสนามแม่เหล็กของตัวนำที่มีกระแสไหลผ่าน ในแนวแกน +Y และ -Y จากชุดทดลองที่สร้างขึ้นปรากฏว่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์กับเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นค่าที่ได้จึงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยที่เครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นจะมีค่าผิดพลาดอยู่ประมาณ 3.3 เปอร์เซ็นต์ สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากชุดทดลองที่สร้างขึ้นจะมีลักษณะคล้ายกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำไปเป็นข้อมูลส่วนหนึ่งของการนำเอาโปรแกรม TLW มาใช้หาค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่จะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 5

โปรแกรม Transmission Line Workstation

5.1 บทนำ

5.1.1 สถาปัตยกรรมของ TLW เป็นโปรแกรมที่มีเนื้อหาครอบคลุมสำหรับใช้ออกแบบสายส่งใหม่ และอัปเดตสายส่งเก่าที่มีอยู่เดิม โปรแกรมนี้ประกอบด้วยโมดูลย่อยหลายส่วนซึ่งสามารถใช้งานแยกเป็นอิสระ หรือจะใช้ร่วมกันออกแบบงานต่าง ๆ ได้ดังนี้

- วิเคราะห์และออกแบบสายส่งให้ถูกต้องเหมาะสม
- อัปเดตและออกแบบสายส่ง
- วิเคราะห์และออกแบบฐานราก
- วิเคราะห์ตัวนำและฉนวน
- วิเคราะห์และออกแบบโครงสร้าง

โปรแกรม TLW ในยุคก่อนใช้งานบน MS-DOS แต่ในปัจจุบันได้อัปเดตมาจนกระทั่งเวอร์ชัน 3.0 และใช้งานได้เต็มทีบนวินโดวส์ ซึ่งทำให้เพิ่มประสิทธิภาพของการออกแบบ และปรับปรุงแก้ไขการออกแบบสายส่งได้เป็นอย่างดี TLW ยังมีเอกสารช่วยเหลือ (help documentation) เพื่อใช้ศึกษาทำความเข้าใจรายละเอียดต่าง ๆ ได้ง่ายและรวดเร็ว ประกอบกับการแสดงผลเป็นรูปภาพสี ที่มีทั้ง 2 และ 3 มิติ ที่ทำให้เข้าใจผลลัพธ์ของการออกแบบได้ดีอีกด้วย

5.1.2 ลักษณะเฉพาะเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ต้องการ ACDE LINE ต้องการองค์ประกอบต่าง ๆ ของคอมพิวเตอร์ดังนี้

โปรเซสเซอร์ 80386 ขึ้นไป หรือที่ใช้ได้กับ PC (compatible PC)
RAM ว่างอย่างน้อย 4 MB พร้อมกับ memory ใช้รัน Microsoft Windows
Hard disk มีบว่างอย่างน้อย 25 MB พร้อมกับพื้นที่ดิสก์ที่ windows

ต้องการใช้รันโปรแกรม

Microsoft Windows 3.1 หรือมากกว่า

เมาส์ หรืออุปกรณ์ที่ใช้ชี้จุดได้

จอภาพ VGA หรือที่สูงกว่า

ดิสก์ไดรฟ์ 3.5 นิ้ว

5.1.3 วิธีการติดตั้งตัวดำเนินการ Executive ก่อนการติดตั้งควรปิดโปรแกรมอื่น ๆ ก่อน และผู้ใช้ต้องแน่ใจว่าคอมพิวเตอร์มีสเปคตามความต้องการของโปรแกรม จากนั้นจึงดำเนินการติดตั้ง Executive ก่อนเป็นอันดับแรกจากโปรแกรมทั้งหมด

วิธีติดตั้งตัวดำเนินการ Executive

1. ใส่ diskette ที่ 1 ในไดรฟ์ของคอมพิวเตอร์

2. กดปุ่ม start แล้วเลือก Run

3. พิมพ์ a :\setup (ชื่อไดรฟ์นั้นขึ้นอยู่กับคอมพิวเตอร์นั้น ๆ) จากนั้นกดปุ่ม

OK และทำตามคำแนะนำบนจอภาพ ตัวดำเนินการ Executive จะถูกติดตั้งในไดเรกทอรี TLW 30 โดยอัตโนมัติ

5.1.4 Executive Main Window หน้าต่าง Executive เป็นหน้าต่างแรกที่ใช้เข้าถึงโมดูลต่าง ๆ ของ โปรแกรม TLW ในหน้าต่างนี้ผู้ใช้สามารถเลือกใส่ไอคอนโมดูลต่าง ๆ ของโปรแกรมได้ตามความเหมาะสมของการทำงาน

การเปิดโปรแกรมย่อยเหล่านี้ ทำโดยการดับเบิลคลิกบนไอคอนที่ต้องการ

5.2 การใช้งานโมดูล ACDC LINE

5.2.1 บทนำ ACDC LINE โปรแกรม ACDC LINE ประกอบไปด้วยเครื่องมือสำคัญต่าง ๆ หลายอย่าง เพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของปรากฏการณ์สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่ง AC และ DC และสายส่ง AC/DC แบบไฮบริดจ์ โปรแกรมสามารถแสดงภาพการวางตัวของสายเพื่อใช้ในการคำนวณตามที่ใช้ใส่เข้าไปและสามารถคำนวณค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. แรงดันเกรเดียนท์ที่ผิวหนัง
2. ความสูญเสียโคโรนา
3. เสียงที่สามารถได้ยินได้
4. คลื่นรบกวนความถี่วิทยุ
5. โอโซน
6. สนามไฟฟ้า
7. ความหนาแน่นไอออน
8. กระแสไอออน
9. ระดับความเข้มสนามไฟฟ้าที่ทำให้รู้สึกได้
10. การเชื่อมโยงไปยังวัตถุ
11. การป้องกันจากวัตถุ
12. สนามแม่เหล็ก
13. การเลือกถนนบนพื้นฐานของการปนเปื้อน บนผิวถนน

5.2.2 สถาปัตยกรรม ACDC LINE โปรแกรม ACDC LINE ประกอบไปด้วยโปรแกรมย่อยต่าง ๆ หลายโปรแกรม ซึ่งถูกนำมารวมกันกลายเป็นโปรแกรมที่สมบูรณ์เพื่อใช้คำนวณค่าต่าง ๆ ของสายส่งเหนือพื้นดิน เมื่อผู้ใช้ใส่รหัสตัวนำที่ถูกต้อง โปรแกรมจะใส่ค่าคงที่ต่าง ๆ ทางกายภาพให้อัตโนมัติ โปรแกรมสามารถวิเคราะห์ และออกแบบสายส่ง AC, DC, สายส่งหลายวงจรหรือสายส่ง AC/DC แบบไฮบริดจ์ โดยการกำหนดระยะต่าง ๆ ของสายส่งและสายกราวด์ รวมถึงระยะห่างของเสาด้วย

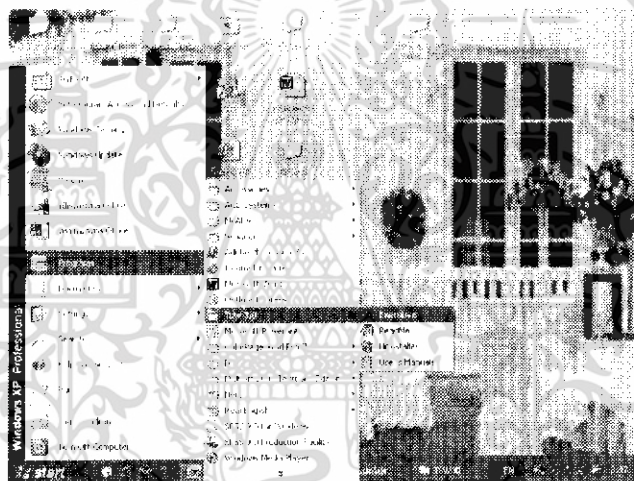
ในแต่ละโครงการโปรแกรมคำนวณสายส่งต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. สายส่ง AC จำนวนได้ถึง 12 เฟส
2. สายส่ง AC และ/หรือ DC bundles จำนวนได้ถึง 24 bundles (รวมเส้นที่มีไฟและสายกราวด์)
3. จำนวนตัวนำอิสระได้ 50 ตัวนำ
4. การวางตัวของสายส่งแบบธรรมดาและไม่ธรรมดา

5.3 เริ่มการใช้งานโปรแกรม ACDC LINE

1. เมื่อเปิดโปรแกรม TLW 3.0 ขึ้นมาที่หน้าต่าง Executive จะปรากฏโมดูลย่อยอยู่ 3 โมดูลให้ดับเบิลคลิกที่ ACDC LINE 3.0 จะได้หน้าต่างของโปรแกรมขึ้นมา ดังรูปที่ 5.1

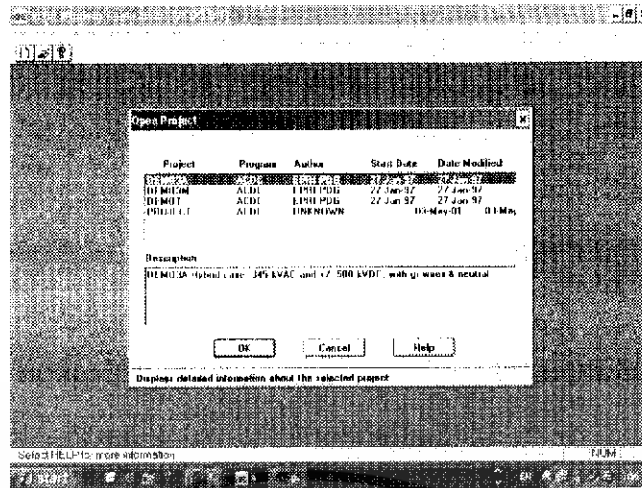
2. คลิกที่เมนู File จะปรากฏคำสั่งต่าง ๆ ขึ้นมา ถ้าต้องการสร้างงานขึ้นมาใหม่ให้เลือก New Project แต่ในที่นี้จะเป็นการศึกษาโปรแกรมตัวอย่าง (DEMO) ก่อนเพื่อทำความเข้าใจในการใส่ข้อมูลต่าง ๆ ดังนั้นเลือก Open Project เพื่อเลือกงานที่มีอยู่แล้ว ดังรูปที่ 5.2



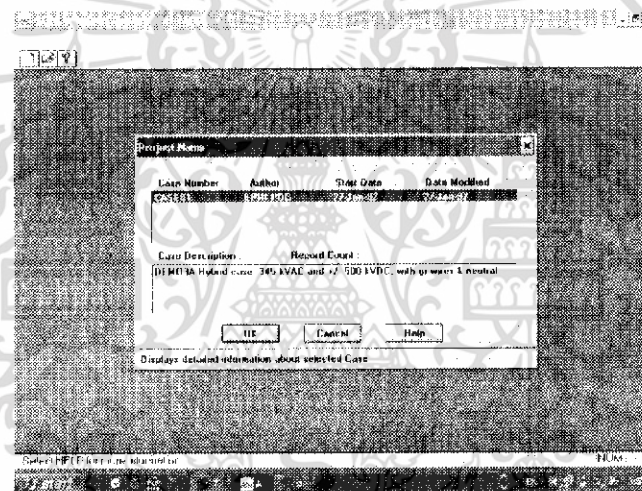
รูปที่ 5.1 การเข้าสู่การใช้งานโปรแกรม TLW



รูปที่ 5.2 เมนู file ในโหมดการทำงานต่าง ๆ



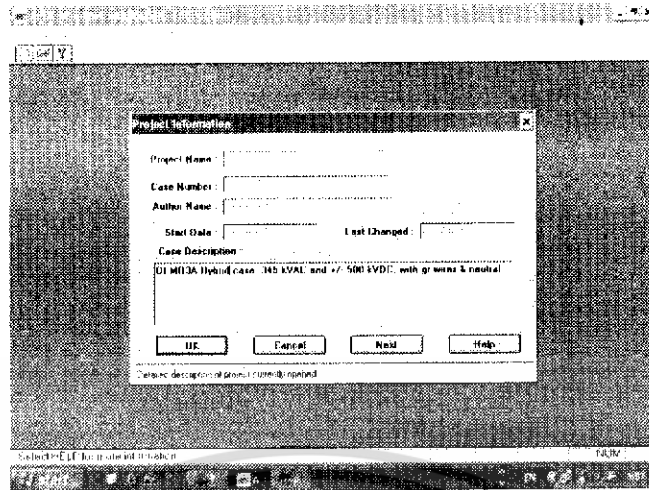
รูปที่ 5.3 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Open Project



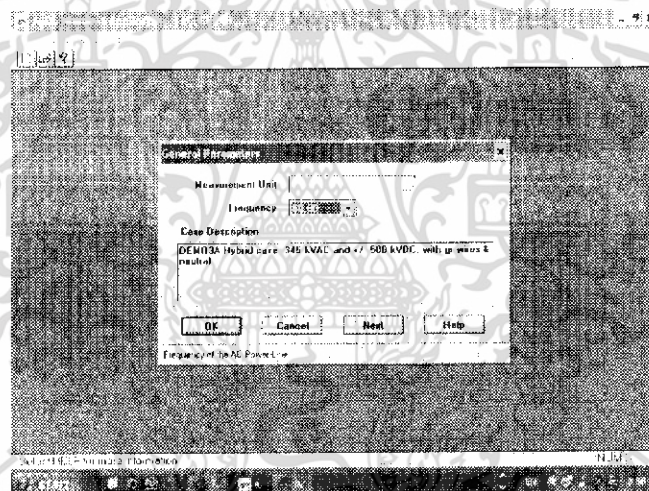
รูปที่ 5.4 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Project Name

3. จะปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์ Open Project ขึ้นมา ทำการเลือก DEMO 3A ในแถวบนสุดจะมีรายละเอียดของโครงการในช่อง Description : ด้านล่างซึ่งสามารถแก้ไขได้ จากนั้นกดปุ่ม OK ดังรูปที่ 5.3

4. ในไดอะล็อกบ็อกซ์ Project Name จะมีการแสดงกรณีของโครงการขึ้นที่กระทำอยู่ และรายละเอียดของโครงการนั้น จากนั้นคลิกปุ่ม OK ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.5 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Project Information



รูปที่ 5.6 ไดอะล็อกบ็อกซ์ General Parameters

5. โปรแกรมจะแสดงไดอะล็อกบ็อกซ์ Project Information ซึ่งมีช่องต่าง ๆ แสดงรายละเอียดของโครงการอีกครั้งซึ่งไม่สามารถแก้ไขได้ ยกเว้นในช่อง Description จากนั้นกดปุ่ม Next เพื่อทำการใส่ข้อมูลต่อไป ดังรูปที่ 5.5

6. ในไดอะล็อกบ็อกซ์ General Parameters จะมีช่องของ Measurement Out ซึ่งแสดงเป็นหน่วย SI ไม่สามารถแก้ไขได้ ซึ่งจะต้องทำการเลือกหลังจากเริ่มต้น Project ใหม่ เท่านั้น สำหรับช่อง Frequency สามารถออกจาก drop down menu (50 และ 60 Hz) และในช่อง Case Description สามารถแก้ไขเพิ่มเติมได้ด้วยเช่นกัน จากนั้นกดปุ่ม Next ดังรูปที่ 5.6

7. จะปรากฏไดอะล็อกบ็อกซ์ Execution Options ขึ้นมา ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 4 หัวข้อใหญ่ คือ Corona Calculations (average height), E-Field and Ion Calculation (actual height) , Magnetic Field Calculation ที่ใช้สามารถเลือกหัวข้อย่อยต่าง ๆ โดยคลิกในช่องว่างที่ต้องการ หัวข้อย่อยต่าง ๆ มีความหมายดังนี้

7.1 Surface gradient เป็นการคำนวณค่าแรงดันเกรเดียนท์สูงสุดที่ผิวของตัวนำที่ระดับความสูงเฉลี่ย ถ้าต้องการคำนวณที่ระดับความสูงจริง ต้องใช้ E-field and Ion Plots ในการคำนวณ

7.2 Corona loss โปรแกรมจะสร้างตารางผลรวมของความสูญเสียเนื่องจาก โคโรนาของสายส่งทั้ง AC และ DC สำหรับตารางความสูญเสียของสายส่ง DC จะมีตารางแสดงสภาพอากาศพิมพ์ออกมาด้วย

7.3 Audible noise เป็นการคำนวณเสียงที่เกิดจากสายส่ง โดยใช้วิธี EPRI-HVTRC และวิธีอื่น ๆ คือ BPA, CRIEM, EDF, ENFL และ IREQ

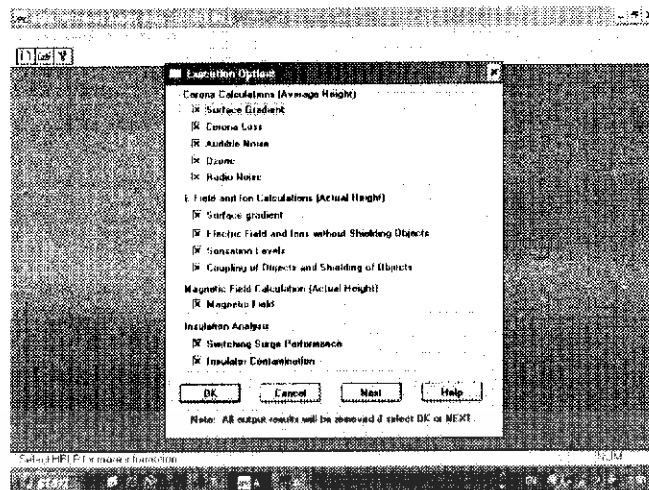
7.4 Ozone เป็นการคำนวณจำนวนของโอโซนที่เกิดจากตัวนำแต่ละเส้น และสามารถคำนวณการรวมตัวของโอโซนที่เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าปกติ ที่ระดับความสูงตามที่ต้องการเหนือพื้นดินทุก ๆ ระยะทางจาก Right-of-way โอโซนที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็น ปอนด์ ต่อไมล์ ต่อชั่วโมง การรวมตัวของโอโซนที่เพิ่มขึ้นมีหน่วยเป็น 1 ส่วน ต่อ 1000 ล้านส่วน ซึ่งหมายถึงโมเลกุลของโอโซน 1 โมเลกุล ต่อ โมเลกุลของก๊าซต่าง ๆ ในอากาศ 1000 ล้านโมเลกุล

7.5 Radio noise โปรแกรมจะสร้างตามรางแยกหัวข้อ และพิมพ์ค่าเกรเดียนท์ที่ผิว และการรบกวนคลื่นตามถี่วิทยุออกมา 2 ตาราง

การรบกวนคลื่นความถี่วิทยุมีหน่วยเป็น dB above 1 w/m² ของตัวนำแต่ละกลุ่มที่สถานะฝนฟ้าคะนองปานกลาง , L1 rain และ L50 rain

การรบกวนคลื่นความถี่วิทยุที่จุดต่าง ๆ หน่วยเป็น dB ที่ฝนฟ้าคะนองปานกลาง , ฝนตกหนัก (L1) และสถานะตัวนำเปียก (L50) ซึ่งวัดระยะจากจุดกึ่งกลางสายออกไปในหน่วยของฟุตและเมตร

7.6 Surface gradient คำนวณแรงดันเกรเดียนท์สูงสุดที่ผิวตัวนำที่ระดับความสูงจริง ผลลัพธ์จะได้ในระยะกลางช่วงเสา (midspan) และบริเวณทั่วไป ซึ่งมากกว่าผลลัพธ์จากการคำนวณในหัวข้อใหญ่ Corona Calculations ที่ใช้ความสูงเฉลี่ย



รูปที่ 5.7 ไอ้ดะลือกบ้อกซ์ Execution Options

7.7 Electric field and ions without shielding objects สำหรับสายส่ง DC จะคำนวณโคโรนาอิมิตัว , ค่าความเข้มสนามไฟฟ้า, ความหนาแน่นกระแส DC สูงสุดและความหนาแน่นไอออนสูงสุดในระยะต่าง ๆ จากจุดกึ่งกลางสาย สำหรับสายส่ง AC จะคำนวณค่า ณ จุดต่าง ๆ จากกึ่งกลางสาย เช่น ค่าความเข้มสนามไฟฟ้าสูงสุด และค่าอื่น ๆ

7.7.1 สำหรับแต่ละชุดของกลุ่มตัวนำ DC ระดับของโคโรนาอิมิตัวคำนวณบน พื้นฐานสภาพอากาศบริเวณตะวันออกเฉียงเหนือ (หนาว, เย็น และหน้าร้อนที่อบอุ่น) ตามที่ผู้ใช้สามารถระบุได้ และสามารถแสดงค่าความเข้มสนามไฟฟ้า DC สูงสุดใน 2 ลักษณะได้ คือ สนามไฟฟ้าสถิต (ไม่มีโคโรนา) และค่าอิมิตัว (โคโรนาสูงสุด) พร้อมกับตารางเพิ่มเติมอีก 2 ตาราง คือ ค่าความหนาแน่นกระแส DC สูงสุด และความหนาแน่นไอออนสูงสุด และตารางต่อไปแสดงค่าสนาม DC และความหนาแน่นไอออนที่ระยะต่าง ๆ วัดจากจุดกึ่งกลางสายในสภาพอากาศต่าง ๆ กัน คือ อากาศร้อนปานกลาง (50 และ 95%) และฝนตก (50 และ 95%)

7.7.2 สำหรับแต่ละชุดของกลุ่มตัวนำ AC ตารางผลลัพธ์จะแสดงค่าสนามไฟฟ้า AC สูงสุด , อัตราส่วนของแกนหลักและแกนรองของวงรี , องค์ประกอบแนวตั้ง , องค์ประกอบแนวนอน และศักย์ไฟฟ้าในอากาศตามจุดต่าง ๆ ที่กำหนด

7.8 Sensation levels โปรแกรมจะคำนวณค่าความเข้มสนามไฟฟ้าที่มนุษย์รู้สึกได้ แสดงออกมาเป็นตัวเลข 0-5 ซึ่งทำให้ทราบถึงผลตอบสนองต่าง ๆ ของบุคคลที่เข้าไปอยู่ในสภาพแวดล้อมนี้ ระดับ 0 เป็นระดับความรุนแรงที่น้อย และค่าตัวเลขมาก แสดงค่าความรุนแรงที่มาก ซึ่งหมายถึงทำให้รู้สึกไม่สบายตัว

7.9 Coupling of object and shielding of objects โปรแกรมจะสร้างผลลัพธ์ของแรงดันที่เชื่อมโยงไปยังวัตถุต่าง ๆ ในระยะ right-of-way (ความกว้างของเขตสิทธิปลอดภัย) ซึ่งเป็นผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นกับวัตถุทั้งที่อยู่กับที่หรือเคลื่อนไหวได้โดยผู้ใช้โปรแกรมเป็นผู้กำหนดลงไป พร้อมกับต้องใส่ข้อมูลผลกระทบจากการป้องกันของวัตถุด้วย

Magnetic Field Calculation (actual height) เป็นการคำนวณที่ระยะ ความสูงจริงของตัวนำ โปรแกรมไม่สามารถคำนวณตามสภาพภูมิประเทศเปลี่ยนแปลงได้ ความสูงของตัวนำอาจจะเปลี่ยนแปลงไปตามระยะช่วงเสา ความสูงที่แท้จริงคือระยะจากพื้นดินไปจนถึงกึ่งกลางของกลุ่มตัวนำ ค่านี้เหมาะสมที่จะใช้เป็นจุดที่กำหนดตามจุดที่กำหนดเหล่านี้จะถูกนำมาคำนวณ เนื่องจากระยะหย่อนยานของสายแนวยาว (longitudinal location) จุดที่กำหนดเหล่านี้จะถูกนำมาคำนวณ ดังนั้นค่าที่คำนวณออกมานี้จะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับค่าที่ได้รับมาคือใกล้กับระยะกึ่งกลางเสา หรือใกล้กับทาวเวอร์

7.10 Magnetic Field ในส่วนนี้โปรแกรมจะสร้างตารางผลลัพธ์ขึ้นมา 2 ตารางด้วยกัน คือ ตารางกระแสในสายของ

7.10.1 กลุ่มตัวนำ AC แสดงค่ากระแสเฟสเบอร์ (ค่าจริง), ค่าจินต์ภาพ และขนาดของกระแส) รวมถึงที่เกิดขึ้นที่สาย OHGW ด้วย

7.10.2 ตารางสนามแม่เหล็กที่จุดต่าง ๆ ทั้ง AC และ DC สำหรับกลุ่มตัวนำ AC จะแสดงค่าตามแกนหลักและอัตราส่วนระหว่างแกนหลักต่อแกนรอง องค์กรประกอบตามแนวแกนตั้งและนอน สำหรับกลุ่มตัวนำ DC จะแสดงค่าสนามแม่เหล็ก ณ จุดต่าง ๆ ในองค์กรประกอบแนวตั้งและแนวนอน หน่วยของสนามแม่เหล็กทั้งหมด คือ มิลลิเกาส์

Insulation Analysis การคำนวณนี้ครอบคลุมไปถึงความน่าจะเป็นการเกิดแฟลชโอเวอร์ของพาวเวอร์ และการเลือกฉนวนแบบต่าง ๆ บนพื้นฐานของสิ่งปนเปื้อนที่จะเกิดบนฉนวน การวิเคราะห์การป้องกันฟ้าผ่า วิเคราะห์ได้โดยใช้โปรแกรม Multiflash ใน TL Workstation

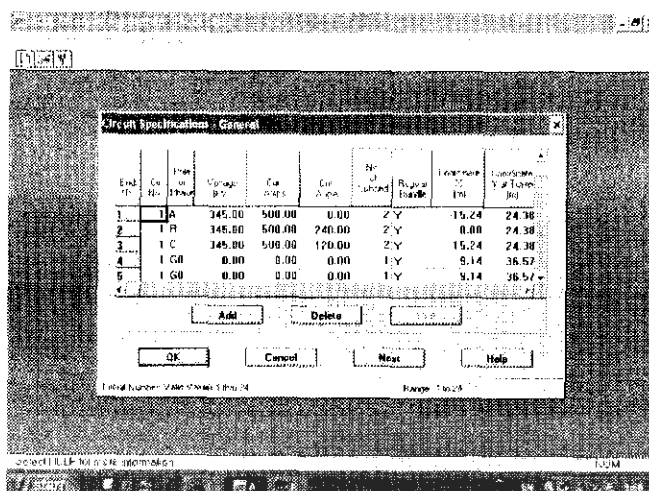
7.11 Switching surge performance เป็นการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของแฟลชโอเวอร์ของพาวเวอร์ในภาวะแห้งและฝนตก และแสดงค่าแก้ไขที่เหมาะสม โปรแกรมจะสร้างตารางขึ้นมาเป็นข้อมูลอินพุตที่สำคัญที่สุดในตารางที่ 3 "CFO Data" (critical flashover voltage) มีข้อมูลที่ถูกรับคำนวณขึ้นมาของกลุ่มตัวนำต่าง ๆ ในตารางที่ 5 "AT mospheric CFO (correction factors) แสดงถึงค่าแก้ไขที่เหมาะสม ใน 3 ตารางท้ายสุดประกอบไปด้วยค่า Switching surge performance ที่ถูกคำนวณขึ้นมา และค่าความน่าจะเป็นของแฟลชโอเวอร์ในสภาวะที่แห้งและฝนตก

7.12 Insulator contamination แสดงผลระดับของแรงดันและการปนเปื้อนของฉนวน พร้อมกับมีข้อเสนอแนะชนิดของฉนวนและความยาว ในหัวข้อนี้โปรแกรมจะสร้างตารางขึ้นมา 2 ตาราง เพื่อแสดงข้อมูลระดับแรงดันกับระดับการปนเปื้อนของฉนวน และแสดงข้อมูลคำแนะนำเกี่ยวกับฉนวน

8. หลังจากนั้นจะปรากฏไดอะล็อกบ็อกส์ Circuit Specifications-General ขึ้นมาซึ่งใช้สำหรับใส่ข้อมูลต่าง ๆ ลงไปดังนี้ ดังรูปที่ 5.8

8.1 จำนวนของกลุ่มสายตัวนำ เป็นส่วนที่ผู้ใช้แก้ไขไม่ได้ค่าดีฟอลท์คือ 1-23

8.2 จำนวนของวงจร สามารถใส่ค่าได้ตั้งแต่ 1-24 ค่าดีฟอลท์เป็น 1



รูปที่ 5.8 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specifications-General

8.3 ขั้วหรือเฟส ข้อมูลในส่วนนี้ใช้ระบุรูปแบบของกลุ่มตัวนำและแรงดันของ แต่ละเฟส ของสายส่ง AC สามารถใส่ค่าได้ตั้งแต่ A-L และค่ามุมโปรแกรมจะใส่ไปโดยอัตโนมัติ

A - L = กลุ่มสายตัวนำ AC

DC = กลุ่มสายตัวนำ DC

G0 = สายกราวด์แบบต่อเนื่อง

G1 = สายกราวด์แยกเป็นส่วนๆ

G2 = สาย neutral ของระบบ DC

8.4 แรงดัน ดีฟอลท์คือ 500V สำหรับสายส่ง DC ให้ใส่ขั้วของแรงดันด้วย และสาย กราวด์ทุกแบบหรือสาย neutral ของ DC ใส่ค่า 0

8.5 กระแสใช้งานปัจจุบัน ใส่ค่ากระแสพร้อมขั้วในกรณีสายส่ง DC

8.6 มุมเฟสที่ใช้งานปัจจุบัน ค่ามุมเฟสถ้าทราบหรือ โปรแกรมจะใส่ให้อัตโนมัติ จากอักษร A-L

8.7 จำนวนตัวนำของวงจรย่อย สำหรับใส่ค่าจำนวนตัวนำย่อย ค่าดีฟอลท์คือ 1

8.8 กลุ่มตัวนำแบบธรรมดา ช่องข้อมูลนี้แสดงรูปแบบของกลุ่มตัวนำ (ธรรมดาและ ไม่ธรรมดา) ใส่ค่า Y คือ "yes" เพื่อแสดงว่าเป็นกลุ่มตัวนำปกติ และ N คือ "no" สำหรับกลุ่ม ตัวนำที่ไม่ธรรมดาเช่นอาจจะมีช่องว่างระหว่างตัวนำย่อยที่ไม่เท่ากัน ขนาดตัวนำไม่เท่ากัน หรือรูปแบบการวางตัวของสายไม่เหมือนกับมาตรฐาน

8.9 พิกัดแกน X เป็นตำแหน่งของกลุ่มสายตัวนำตามแนว cross arm

8.10 พิกัดแกน Y เป็นความสูงของสายที่ตำแหน่งทาวเวอร์

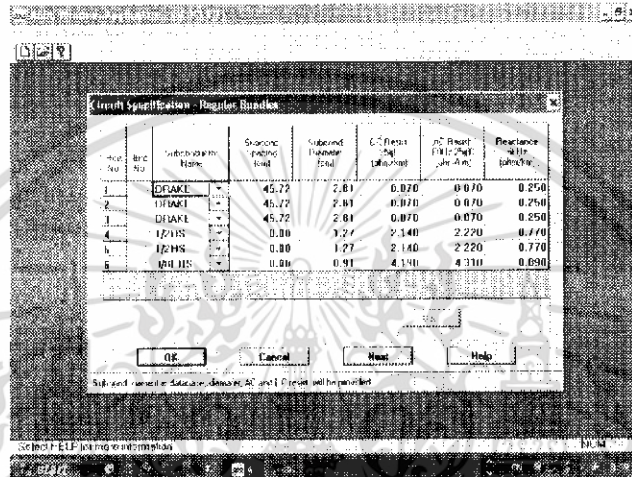
8.11 ระยะหย่อนยาน เป็นค่าแนวแกนตั้งระหว่างระยะที่น้อยที่สุดของสายกับพื้นดิน ปกติจะที่ midspan

8.12 ระยะช่วงเสา สำหรับใส่ค่าระยะระหว่างเสา

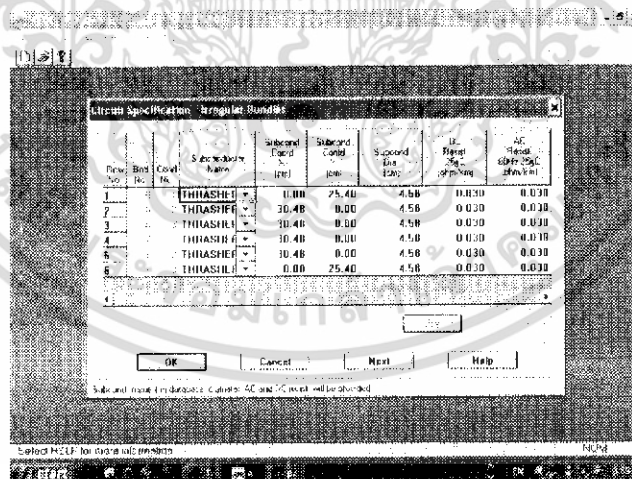
8.13 ตำแหน่งทาวเวอร์สำหรับใส่ค่าตามแนวแกน Z ของทาวเวอร์โดยสัมพันธ์กับจุดอ้างอิงซึ่งจะเป็นจุดใดก็ได้เช่น จุดมาร์ค หน้าสถานีไฟฟ้า

9. ไดอะล็อกบ็อกซ์อะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specifications-Regular Bundles เป็นไดอะล็อกบ็อกซ์สำหรับใส่ข้อมูลของกลุ่มสายตัวนำที่ได้กำหนดไว้ในข้อที่ 8 ในรายละเอียดต่างๆของสายเพิ่มเติม ดังแสดงในรูปที่ 5.9

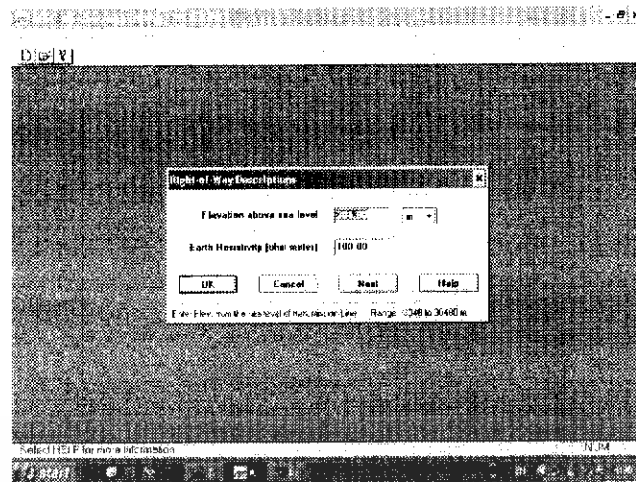
10. ในไดอะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specification-Irregular Bundles สามารถใส่ค่าต่างๆของตัวนำที่ไม่อยู่ในรูปแบบธรรมดาตามที่โปรแกรมกำหนด ดังรูปที่ 5.10



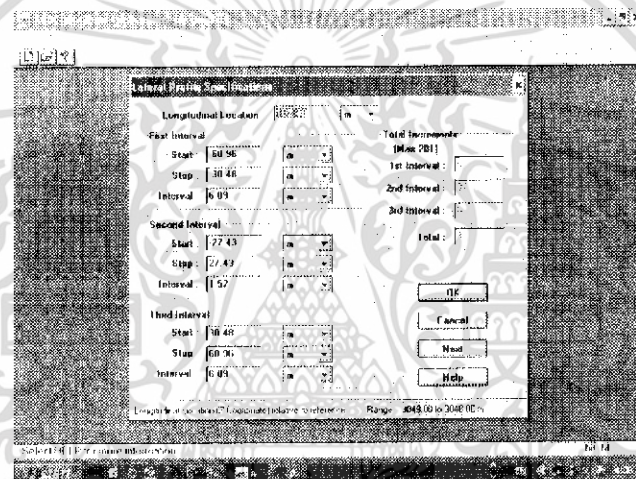
รูปที่ 5.9 ไดอะล็อกบ็อกซ์อะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specifications-Regular Bundles



รูปที่ 5.10 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Circuit Specification-Irregular Bundles

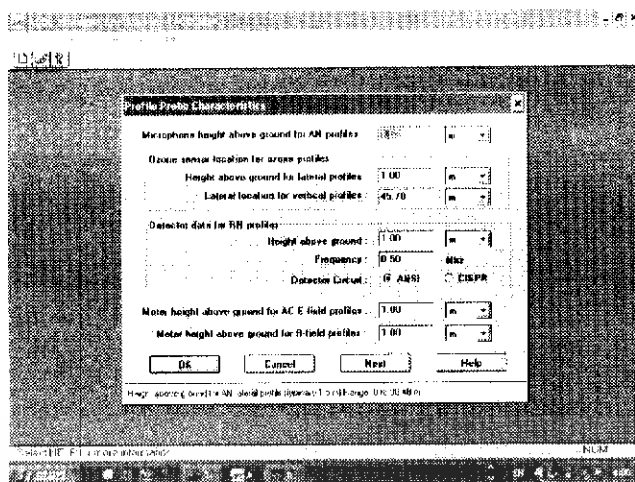


รูปที่ 5.11 ไดอะล็อกบ็อกส์ Right-of-way Descriptions

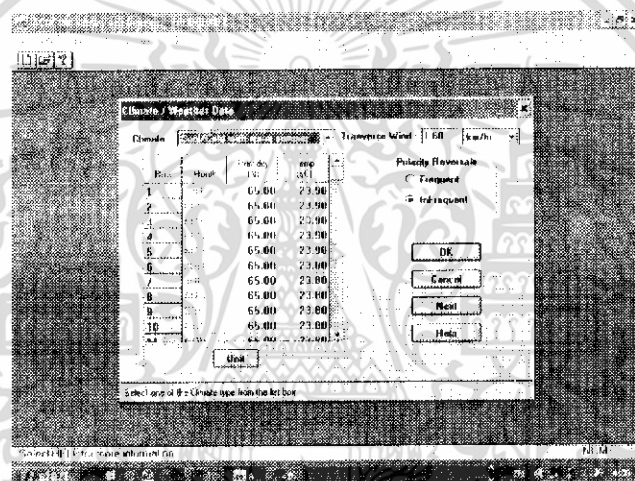


รูปที่ 5.12 ไดอะล็อกบ็อกส์ Lateral Profile Specifications

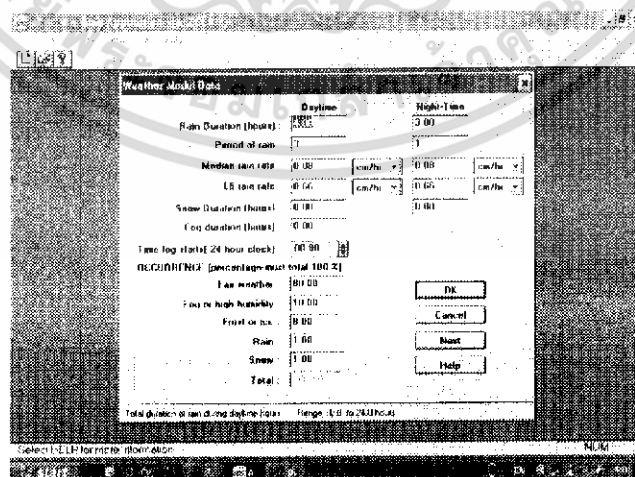
11. จากนั้นจะได้ไดอะล็อกบ็อกส์ Right-of-way Descriptions สำหรับใส่ข้อมูลความสูงของสายส่งจากระดับน้ำทะเลและค่าความต้านทานของดิน ดังรูปที่ 5.11
12. ในไดอะล็อกบ็อกส์ Lateral Profile Specifications จะมีช่องว่างสำหรับใส่ค่าอยู่ 10 ช่อง เป็นการกำหนดการวัดค่าตามแนวแกน Z และ X โดยตามแนวแกน X นั้นจะวัดตามจุดต่างที่ผู้ใช้กำหนดเองขึ้นมาเป็นช่วงๆได้ 3 ช่วง ดังรูปที่ 5.12
13. ในไดอะล็อกบ็อกส์ Profile Probe Characteristics แสดงสภาพในการวัดของมิเตอร์ว่าติดตั้งอยู่สูงจากพื้นเท่าใดตามแนวแกนตั้ง และแกนนอน วงจรการวัดเป็นแบบ ANSI หรือ CISPR และความถี่รบกวนคลื่นวิทยุที่จะวัด ดังรูปที่ 5.13



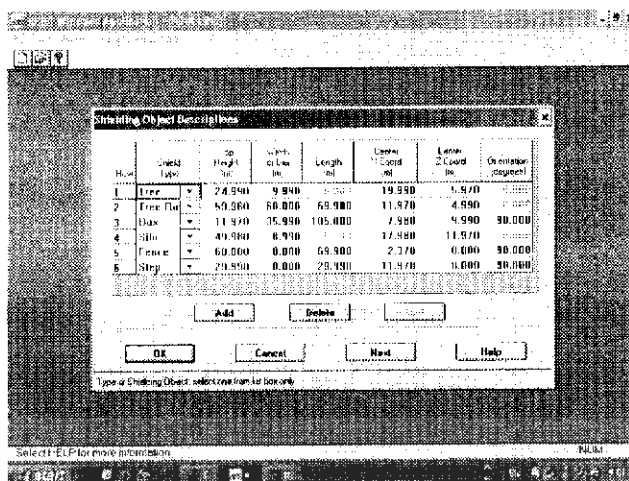
รูปที่ 5.13 ไดอะล็อกบ็อกส์ Profile Probe Characteristics



รูปที่ 5.14 ไดอะล็อกบ็อกส์ Climate/Weather Data



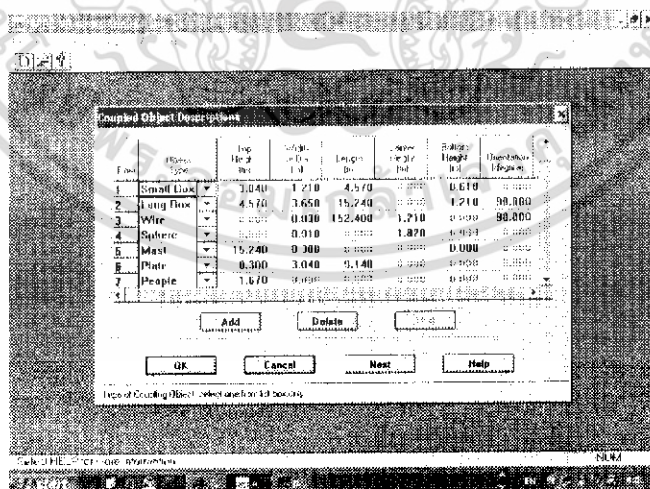
รูปที่ 5.15 ไดอะล็อกบ็อกส์ Weather Model Data



รูปที่ 5.16 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Shielding Object Descriptions

14. ไดอะล็อกบ็อกซ์ Climate/Weather Data แสดงค่าความชื้นและอุณหภูมิเป็นรายเดือนผู้ใช้สามารถเลือกได้จาก drop down menu หรือ ใส่เองได้ตามสภาพที่เกิดขึ้น และต้องใส่ข้อมูลความเร็วลมที่วิ่งผ่านแนวตั้งฉากด้วย ดังรูปที่ 5.14

15. สำหรับไดอะล็อกบ็อกซ์ Weather Model Data จะเป็นการกำหนดรายละเอียดสภาพภูมิอากาศลักษณะต่างๆ คือ ระยะเวลาเฉลี่ยที่ฝนตกในแต่ 1 วัน จำนวนครั้งที่ฝนตกใน 1 วัน ปริมาณน้ำฝนใน 1 วัน L5 rain rate คือ ค่าปริมาณน้ำฝนที่ตกเกินกว่า 5 % ในครั้งนั้น ระยะเวลาเฉลี่ยที่หิมะตกใน 1 วัน ระยะเวลาเฉลี่ยที่หมอกลง เวลาที่เริ่มมีหมอก ในกลุ่มข้อมูล Occurrence (percentage-must total 100%) นั้นเป็นการเฉลี่ยค่าสภาพอากาศออกเป็นเปอร์เซ็นต์ ผลรวมต้องเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 5.15

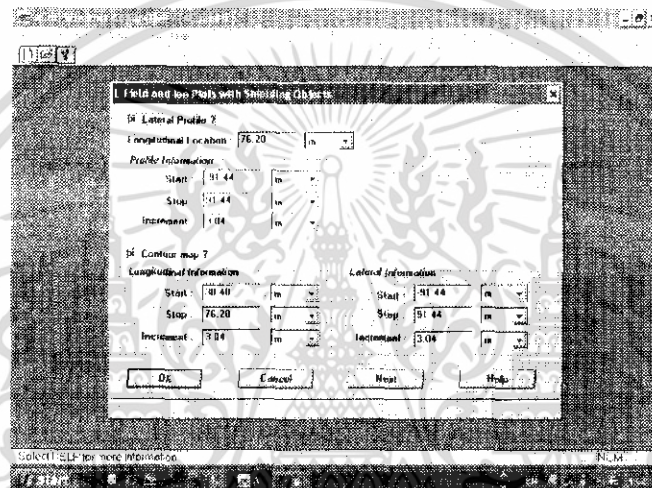


รูปที่ 5.17 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Coupled Object Descriptions

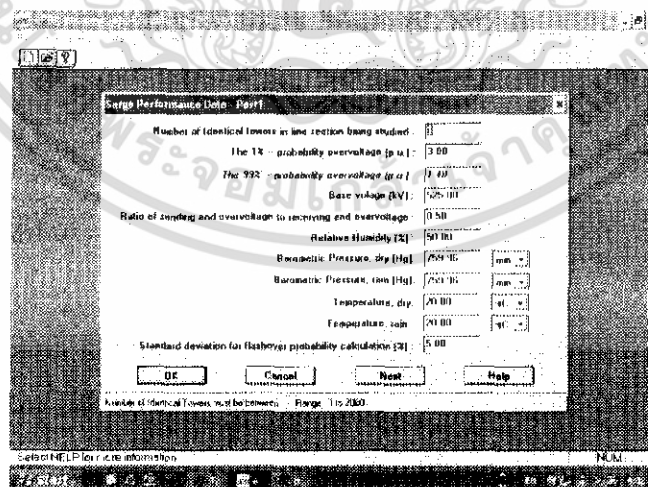
16. ในไดอะล็อกบ็อกซ์ Shielding Object Descriptions จะมีข้อมูลของวัตถุอยู่ 7 ชนิดที่ถูกปกป้องจากสนามไฟฟ้าและยังสามารถกำหนดเพิ่มเติมได้มากถึง 15 ชนิด ผู้ใช้สามารถกำหนดมิติ และตำแหน่งของวัตถุได้โดยจะคล้ายกับการกำหนดจุดพิกัดต่างๆ ของทาวเวอร์ ดังรูปที่ 5.16

17. ไดอะล็อกบ็อกซ์ Coupled Object Descriptions บรรจุข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าที่ผู้ใช้กำหนดเองได้มีลักษณะของการใส่ข้อมูลคล้ายกับข้อที่ 16 ดังรูปที่ 5.17

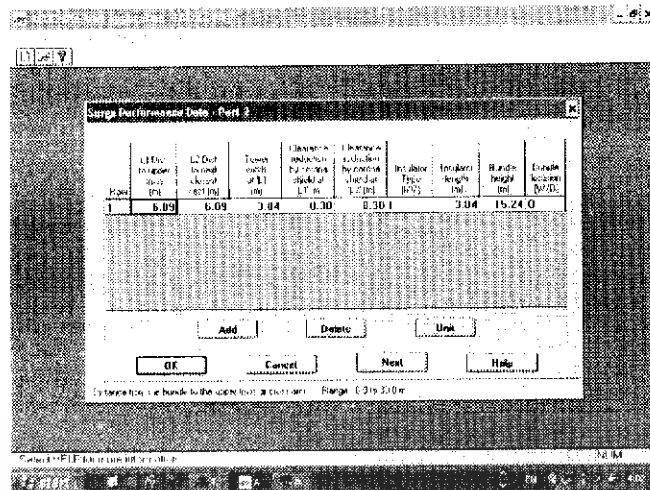
18. ไดอะล็อกบ็อกซ์ E-field and Ion Plots เป็นไดอะล็อกบ็อกซ์ที่กำหนดค่าสำหรับพล็อตค่าสนามไฟฟ้าและไอออน (ในกรณีที่มีสายส่ง DC) กับวัตถุที่ถูกปกป้องจากสนามไฟฟ้า ดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ไดอะล็อกบ็อกซ์ E-field and Ion Plots



รูปที่ 5.19 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Surge Performance Data – Part 1

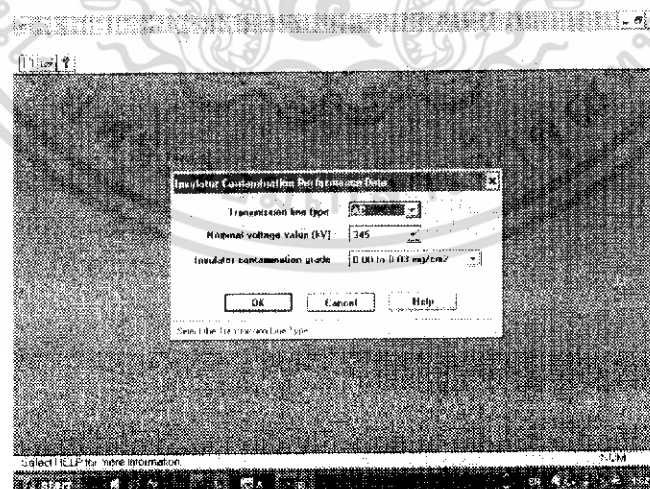


รูปที่ 5.20 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Surge Performance Data – Part 2

19. ในไดอะล็อกบ็อกซ์ Surge Performance Data – Part 1 สามารถใส่ค่าต่างๆ ได้คือจำนวนเสาที่กำลังศึกษาอยู่ สภาพอากาศ และคุณลักษณะของสวิตช์ซึ่งเสร็จ ดังรูปที่ 19

20. ไดอะล็อกบ็อกซ์ Surge Performance Data – Part 2 ประกอบด้วยข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงของเสา ตำแหน่งของวงแหวนโคโรนา คุณลักษณะและตำแหน่งของฉนวนหรือกลุ่มตัวนำ ดังรูปที่ 5.20

21. สำหรับไดอะล็อกบ็อกซ์สุดท้ายคือ Insulator Contamination Performance Data เป็นไดอะล็อกบ็อกซ์สำหรับใส่ข้อมูลของฉนวนโดยข้อมูลทั้ง 3 นี้จะถูกโปรแกรมวิเคราะห์ออกมาให้เห็นถึงสมรรถภาพของฉนวนที่ใช้ ดังรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 ไดอะล็อกบ็อกซ์ Insulator Contamination Performance Data

บทที่ 6

การทดลองใช้โปรแกรม TLW ในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

6.1 บทนำ

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอการทดลองการใช้โปรแกรม TLW ซึ่งเป็นการทดลองวัดค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า จากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงโดยการป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้กับโปรแกรม โดยทำการกำหนดค่าแรงดัน กระแส ระยะเวลา sag และเฟสที่เปลี่ยนแปลงโดยจะนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องวัดสนามแม่เหล็กมาตรฐาน และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น และการวางเฟสที่เปลี่ยนแปลงไปเพื่อศึกษาหาความแตกต่างของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น โดยเมื่อขนาดแรงดันและกระแสระยะ sag เกิดการเปลี่ยนแปลงไป โดยดูผลของความถูกต้องของค่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าว่าเป็นไปตามทฤษฎีหรือไม่

6.2 วัตถุประสงค์การทดลอง

1. เพื่อให้เห็นผลของแรงดันและกระแสที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้มีผลต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
2. เพื่อให้เห็นถึงผลของการเปลี่ยน phase sequence ที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง
3. เพื่อให้เห็นผลของระยะเวลา sag ที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้มีผลต่อสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าที่เกิดในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง

6.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

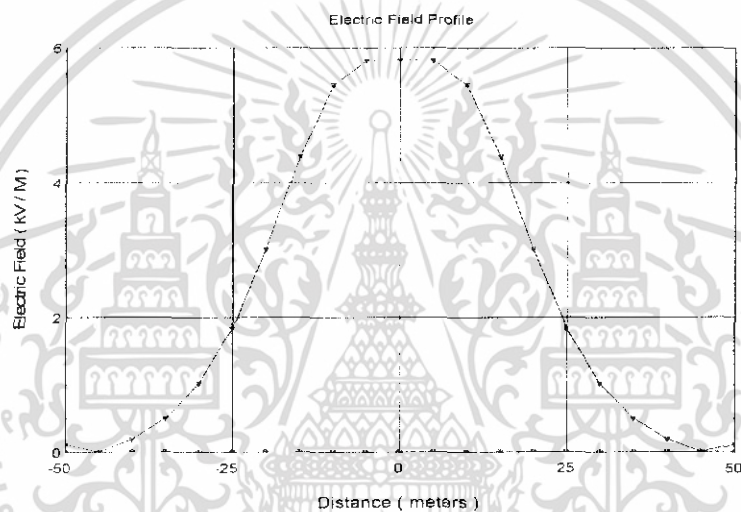
1. โปรแกรม TLW
2. คอมพิวเตอร์

6.4 วิธีการทดลอง

1. ทำการป้อนพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น แรงดัน กระแส มุมเฟส และระยะเวลา sag ลงไปในโปรแกรม TLW
2. ทำการปรับเปลี่ยนแรงดันจาก 500 kV เป็น 230 kV โดยให้กระแสที่ไหลในสายส่งมีค่าคงที่ ทำการรันโปรแกรมสังเกตค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้
3. ทำการปรับเปลี่ยนกระแสที่ไหลในสายส่ง โดยให้ระดับแรงดันมีค่าคงที่ ทำการรันโปรแกรม สังเกตค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้
4. ทำการปรับเปลี่ยนระยะเวลา sag และทำการรันโปรแกรม สังเกตค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้

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	.105	.007	.104	.016	.103
-147.6	-45.00	.028	.023	.002	.028	.003
-131.2	-40.00	.193	.009	.187	.048	.188
-114.8	-35.00	.507	.010	.501	.081	.504
-98.4	-30.00	1.029	.011	1.020	.131	1.024
-82.0	-25.00	1.851	.011	1.841	.201	1.845
-65.6	-20.00	3.029	.009	3.017	.267	3.020
-49.2	-15.00	4.397	.005	4.389	.263	4.385
-32.8	-10.00	5.447	.001	5.445	.143	5.435
-16.4	-5.00	5.809	.004	5.809	.029	5.804
0	0.00	5.817	.000	5.817	.000	5.818
16.4	5.00	5.809	.004	5.809	.029	5.804
32.8	10.00	5.447	.001	5.445	.143	5.435
49.2	15.00	4.397	.005	4.389	.263	4.385
65.6	20.00	3.029	.009	3.017	.267	3.020
82.0	25.00	1.851	.011	1.841	.201	1.845
98.4	30.00	1.029	.011	1.020	.131	1.024
114.8	35.00	.507	.010	.501	.081	.504
131.2	40.00	.193	.009	.187	.048	.188
147.6	45.00	.028	.023	.002	.028	.003
164.0	50.00	.105	.007	.104	.016	.103

รูปที่ 6.2 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =500 kV กระแส =500 A ระยะSAG=13.93 m



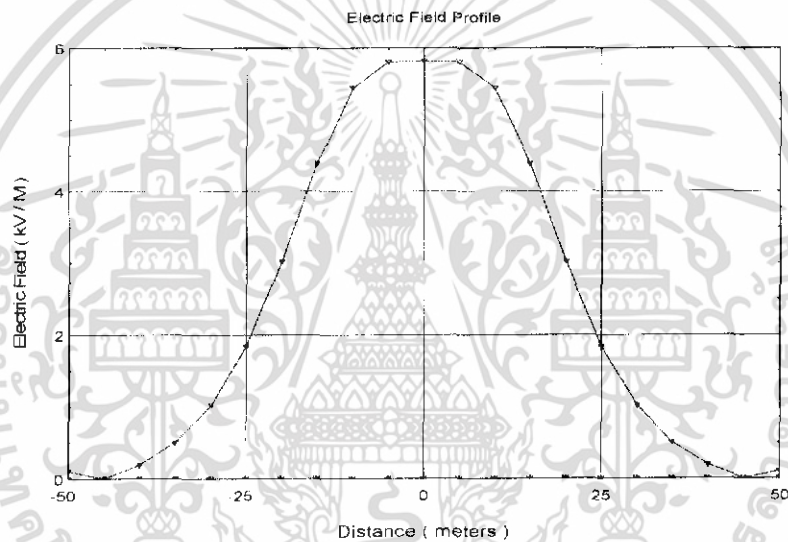
รูปที่ 6.3 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =500 kV กระแส =500 A ระยะSAG=13.93 m

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)		AC MAGNETIC FIELD				
		MAJOR AXIS (mG)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (mG)	HORIZONTAL COMP (mG)	RMS RESULTANT (mG)
-164.0	-50.00	10.31	.056	9.82	3.20	10.33
-147.6	-45.00	12.16	.031	11.86	2.68	12.16
-131.2	-40.00	14.42	.003	14.33	1.59	14.42
-114.8	-35.00	17.21	.032	17.20	.69	17.22
-98.4	-30.00	20.63	.077	20.22	4.23	20.66
-82.0	-25.00	24.53	.138	22.66	10.13	24.83
-65.6	-20.00	28.90	.222	23.03	18.60	29.60
-49.2	-15.00	32.59	.337	20.01	27.98	34.40
-32.8	-10.00	34.13	.496	18.01	33.57	38.10
-16.4	-5.00	32.65	.707	23.22	32.55	39.99
0	0.00	30.91	.858	26.65	30.79	40.72
16.4	5.00	34.15	.657	23.01	33.78	40.87
32.8	10.00	35.68	.478	17.72	35.35	39.54
49.2	15.00	33.90	.352	19.94	29.90	35.94
65.6	20.00	29.87	.267	23.13	20.51	30.92
82.0	25.00	25.26	.213	22.85	12.03	25.82
98.4	30.00	21.03	.180	20.44	6.22	21.36
114.8	35.00	17.46	.162	17.42	3.10	17.69
131.2	40.00	14.56	.154	14.53	2.40	14.73
147.6	45.00	12.21	.153	12.04	2.74	12.35
164.0	50.00	10.30	.157	9.98	3.04	10.43

รูปที่ 6.4 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =500 kV กระแส =500 A ระยะSAG=13.93 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	105	.007	104	.016	103
-147.6	-45.00	928	.023	902	.028	903
-131.2	-40.00	193	.009	187	.048	188
-114.8	-35.00	507	.010	501	.081	504
-98.4	-30.00	1,029	.011	1,020	.131	1,024
-82.0	-25.00	1,851	.011	1,841	.201	1,845
-65.6	-20.00	3,029	.009	3,017	.267	3,020
-49.2	-15.00	4,397	.005	4,389	.263	4,385
-32.8	-10.00	5,447	.001	5,445	.143	5,435
-16.4	-5.00	5,809	.004	5,809	.029	5,804
0	0.00	5,817	.000	5,817	.000	5,818
16.4	5.00	5,809	.004	5,809	.029	5,804
32.8	10.00	5,447	.001	5,445	.143	5,435
49.2	15.00	4,397	.005	4,389	.263	4,385
65.6	20.00	3,029	.009	3,017	.267	3,020
82.0	25.00	1,851	.011	1,841	.201	1,845
98.4	30.00	1,029	.011	1,020	.131	1,024
114.8	35.00	507	.010	501	.081	504
131.2	40.00	193	.009	187	.048	188
147.6	45.00	928	.023	902	.028	903
164.0	50.00	105	.007	104	.016	103

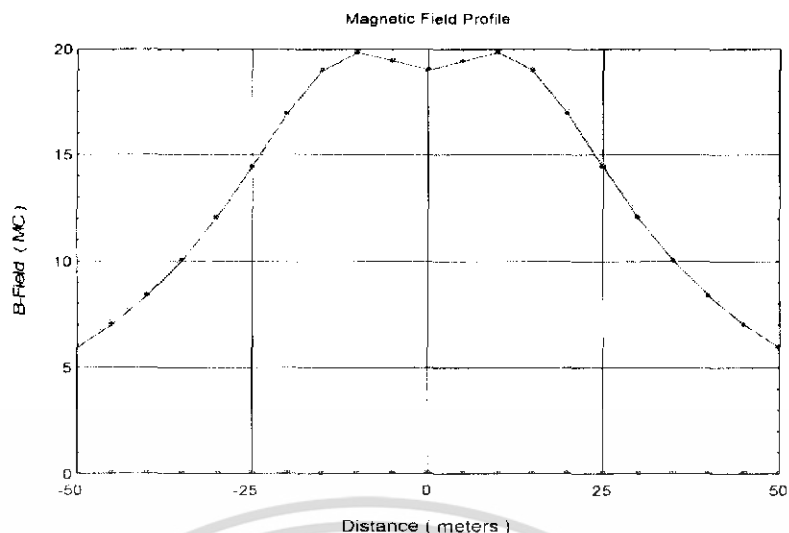
รูปที่ 6.7 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =500 kV กระแส =250 A ระยะSAG=13.93 m



รูปที่ 6.8 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =500 kV กระแส =250 A ระยะSAG=13.93 m

LATERAL DISTANCE (feet)	LATERAL DISTANCE (meters)	AC MAGNETIC FIELD				RMS RESULTANT (mG)
		MAJOR AXIS (mG)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (mG)	HORIZONTAL COMP (mG)	
-164.0	-50.00	5.93	209	5.51	2.50	6.05
-147.6	-45.00	7.02	199	6.72	2.46	7.15
-131.2	-40.00	8.37	187	8.21	2.25	8.51
-114.8	-35.00	10.03	173	10.00	1.87	10.18
-98.4	-30.00	12.05	155	12.01	2.11	12.19
-82.0	-25.00	14.41	130	13.87	4.34	14.53
-65.6	-20.00	16.91	998	14.73	8.48	16.99
-49.2	-15.00	18.99	959	13.24	13.66	19.02
-32.8	-10.00	19.84	920	8.96	17.71	19.85
-16.4	-5.00	19.43	903	3.93	19.03	19.43
0	0.00	19.00	900	.00	19.00	19.00
16.4	5.00	19.43	903	3.93	19.03	19.43
32.8	10.00	19.84	920	8.96	17.71	19.85
49.2	15.00	18.99	959	13.24	13.66	19.02
65.6	20.00	16.91	998	14.73	8.48	16.99
82.0	25.00	14.41	130	13.87	4.34	14.53
98.4	30.00	12.05	155	12.01	2.11	12.19
114.8	35.00	10.03	173	10.00	1.87	10.18
131.2	40.00	8.37	187	8.21	2.25	8.51
147.6	45.00	7.02	199	6.72	2.46	7.15
164.0	50.00	5.93	209	5.51	2.50	6.05

รูปที่ 6.9 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =500 kV กระแส =250 A ระยะSAG=13.93 m



รูปที่ 6.10 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 500 kV กระแส = 250 A ระยะSAG=13.93 m
 จากการทดลองที่แรงดัน 500 kV กระแส 250 A ระยะSAG 13.93 m พบว่าสนามไฟฟ้า
 มีค่าสูงสุด = 5.817 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 1.90 μ T

6.6.3 การทดลองที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m

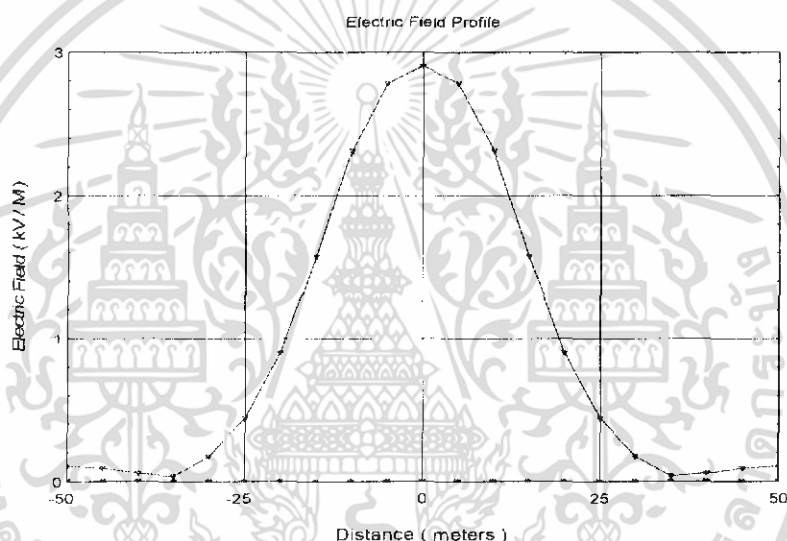
```

*****
| BUNDL | CIRC | VOLTAGE | ANGLE | CURRENT | # | BUNDLE COORDINATES | PH | | |
| #     | #    | (KV)   | (DEG) | (A)     | OF | X (m) | Y (m) | SAG (m) |
|*****|*****|*****|*****|*****|*|*****|*****|*****|
| 1     | 1    | 230.0  | 0      | 500     | 4  | -7.00 | 45.60 | 14.60 | A |
| 2     | 1    | 230.0  | 240   | 500     | 4  | -7.00 | 38.30 | 14.60 | B |
| 3     | 1    | 230.0  | 120   | 500     | 4  | -7.00 | 31.00 | 14.60 | C |
| 4     | 2    | 230.0  | 0      | 500     | 4  | 7.00  | 45.60 | 14.60 | A |
| 5     | 2    | 230.0  | 240   | 500     | 4  | 7.00  | 38.30 | 14.60 | B |
| 6     | 2    | 230.0  | 120   | 500     | 4  | 7.00  | 31.00 | 14.60 | C |
| 7     | 1    | 0.0    | 0      | 0        | 1  | -7.00 | 49.85 | 10.90 | GND |
| 8     | 2    | 0.0    | 0      | 0        | 1  | 7.00  | 49.85 | 10.90 | GND |
|*****|*****|*****|*****|*****|*|*****|*****|*****|
| MINIMUM GROUND CLEARANCE = 16.40 meter |
| POWER SYSTEM FREQUENCY   = 60 Hz        |
| SOIL RESISTIVITY          = 10 ohm meter  |
|*****|*****|*****|*****|*****|*|*****|*****|*****|
| SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES |
|*****|*****|*****|*****|*****|*|*****|*****|*****|
| BUNDL | CONDUCTOR | DIAMETER | SPACING | DC RESIST | AC RESIST | AC REACT |
| #     | NAME      | (mm)     | (mm)    | (ohm/km) | (ohm/km) | (ohm/km) |
|*****|*****|*****|*****|*****|*|*****|*****|*****|
| 1     | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 2     | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 3     | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 4     | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 5     | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 6     | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 7     | 1/2RS    | 1.260    | 0.000   | 2.1380   | 2.2190   | 7.710    |
| 8     | 1/2RS    | 1.260    | 0.000   | 2.1380   | 2.2190   | 7.710    |
|*****|*****|*****|*****|*****|*|*****|*****|*****|
    
```

รูปที่ 6.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 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	.108	.004	.108	.107
-147.6	-45.00	.093	.015	.093	.093
-131.2	-40.00	.060	.084	.060	.059
-114.8	-35.00	.042	.364	.039	.040
-98.4	-30.00	.179	.030	.175	.176
-82.0	-25.00	.448	.001	.443	.445
-65.6	-20.00	.908	.006	.901	.904
-49.2	-15.00	1.582	.007	1.575	1.576
-32.8	-10.00	2.316	.003	2.312	2.308
-16.4	-5.00	2.785	.001	2.784	2.779
0.0	0.00	2.906	.000	2.906	2.903
16.4	5.00	2.785	.001	2.784	2.779
32.8	10.00	2.316	.003	2.312	2.308
49.2	15.00	1.582	.007	1.575	1.576
65.6	20.00	.908	.006	.901	.904
82.0	25.00	.448	.001	.443	.445
98.4	30.00	.179	.030	.175	.176
114.8	35.00	.042	.364	.039	.040
131.2	40.00	.060	.084	.060	.059
147.6	45.00	.093	.015	.093	.093
164.0	50.00	.108	.004	.108	.107

รูปที่ 6.12 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m



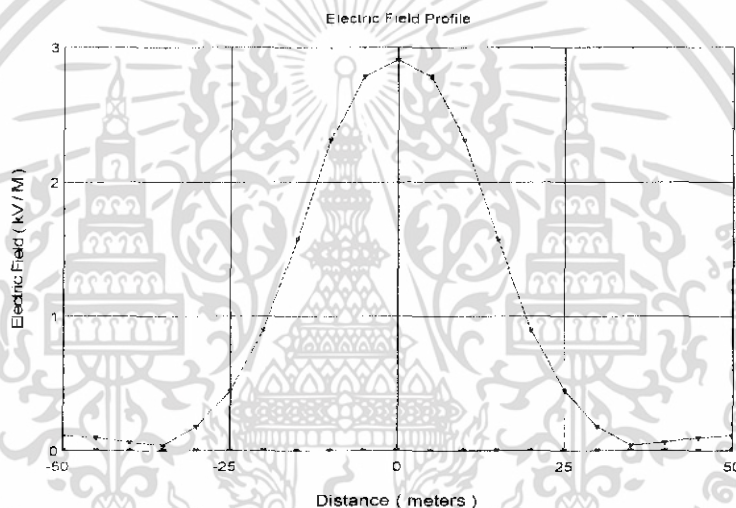
รูปที่ 6.13 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)	MAJOR AXIS (mG)	MINOR/MAJOR (RATIO)	AC MAGNETIC FIELD		RMS RESULTANT (mG)	
			VERTICAL COMP (mG)	HORIZONTAL COMP (mG)		
-164.0	-50.00	8.54	225	7.36	4.74	8.76
-147.6	-45.00	10.27	212	9.19	5.07	10.49
-131.2	-40.00	12.46	199	11.60	5.19	12.70
-114.8	-35.00	15.27	166	14.74	4.90	15.53
-98.4	-30.00	18.87	171	18.73	3.98	19.15
-82.0	-25.00	23.41	152	23.37	3.80	23.67
-65.6	-20.00	28.83	127	27.64	8.96	29.06
-49.2	-15.00	34.51	993	28.91	19.13	34.66
-32.8	-10.00	38.87	053	23.60	30.96	38.92
-16.4	-5.00	40.46	019	12.26	38.56	40.46
0.0	0.00	40.44	000	0.00	40.45	40.45
16.4	5.00	40.46	019	12.26	38.56	40.46
32.8	10.00	38.87	053	23.60	30.96	38.92
49.2	15.00	34.51	093	28.91	19.13	34.66
65.6	20.00	28.83	127	27.64	8.96	29.06
82.0	25.00	23.41	152	23.37	3.80	23.67
98.4	30.00	18.87	171	18.73	3.98	19.15
114.8	35.00	15.27	166	14.74	4.90	15.53
131.2	40.00	12.46	199	11.60	5.19	12.70
147.6	45.00	10.27	212	9.19	5.07	10.49
164.0	50.00	8.54	225	7.36	4.74	8.76

รูปที่ 6.14 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 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	.108	.004	.108	.002	.107
-147.6	-45.00	.093	.015	.093	.005	.093
-131.2	-40.00	.060	.084	.060	.010	.059
-114.8	-35.00	.042	.364	.039	.021	.040
-98.4	-30.00	.179	.030	.175	.040	.176
-82.0	-25.00	.448	.001	.443	.071	.445
-65.6	-20.00	.908	.006	.901	.114	.904
-49.2	-15.00	1.582	.007	1.575	.150	1.576
-32.8	-10.00	2.316	.003	2.312	.130	2.308
-16.4	-5.00	2.785	.001	2.784	.055	2.779
0	0.00	2.906	.000	2.906	.000	2.903
16.4	5.00	2.785	.001	2.784	.055	2.779
32.8	10.00	2.316	.003	2.312	.130	2.308
49.2	15.00	1.582	.007	1.575	.150	1.576
65.6	20.00	.908	.006	.901	.114	.904
82.0	25.00	.448	.001	.443	.071	.445
98.4	30.00	.179	.030	.175	.040	.176
114.8	35.00	.042	.364	.039	.021	.040
131.2	40.00	.060	.084	.060	.010	.059
147.6	45.00	.093	.015	.093	.005	.093
164.0	50.00	.108	.004	.108	.002	.107

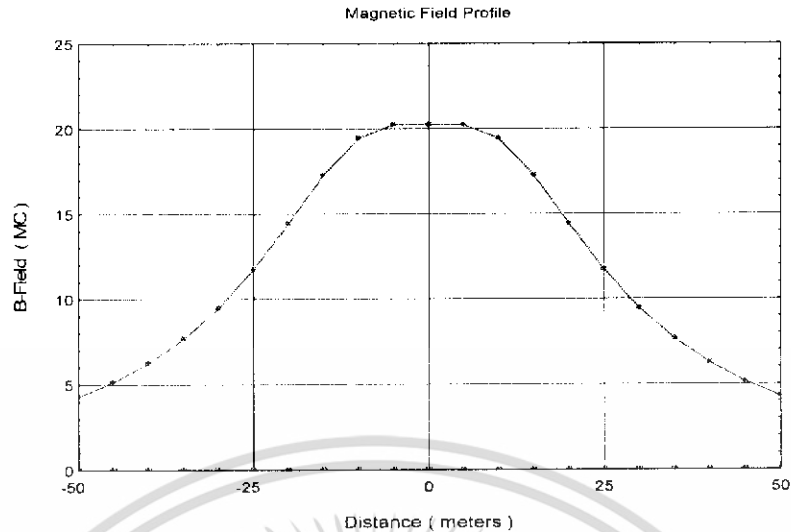
รูปที่ 6.17 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =250 A ระยะSAG=14.6 m



รูปที่ 6.18 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =250 A ระยะSAG=14.6 m

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)		AC MAGNETIC FIELD				
		MAJOR AXIS (mG)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (mG)	HORIZONTAL COMP (mG)	RMS RESULTANT (mG)
-164.0	-50.00	4.27	.225	3.68	2.37	4.38
-147.6	-45.00	5.13	.212	4.59	2.53	5.25
-131.2	-40.00	6.23	.199	5.80	2.60	6.35
-114.8	-35.00	7.64	.186	7.37	2.45	7.77
-98.4	-30.00	9.44	.171	9.36	1.99	9.57
-82.0	-25.00	11.70	.152	11.68	1.90	11.84
-65.6	-20.00	14.41	.127	13.82	4.48	14.53
-49.2	-15.00	17.26	.093	14.45	9.57	17.33
-32.8	-10.00	19.43	.053	11.80	15.48	19.46
-16.4	-5.00	20.23	.019	6.13	19.28	20.23
0	0.00	20.22	.000	.00	20.23	20.23
16.4	5.00	20.23	.019	6.13	19.28	20.23
32.8	10.00	19.43	.053	11.80	15.48	19.46
49.2	15.00	17.26	.093	14.45	9.57	17.33
65.6	20.00	14.41	.127	13.82	4.48	14.53
82.0	25.00	11.70	.152	11.68	1.90	11.84
98.4	30.00	9.44	.171	9.36	1.99	9.57
114.8	35.00	7.64	.186	7.37	2.45	7.77
131.2	40.00	6.23	.199	5.80	2.60	6.35
147.6	45.00	5.13	.212	4.59	2.53	5.25
164.0	50.00	4.27	.225	3.68	2.37	4.38

รูปที่ 6.19 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =250 A ระยะSAG=14.6 m



รูปที่ 6.20 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =250 A ระยะSAG=14.6 m
จากการทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 250 A ระยะSAG 14.6 m พบว่าสนามไฟฟ้ามี
ค่าสูงสุด = 2.906 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 2.023 μ T

6.6.5 การทดลองที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=15.1 m

```

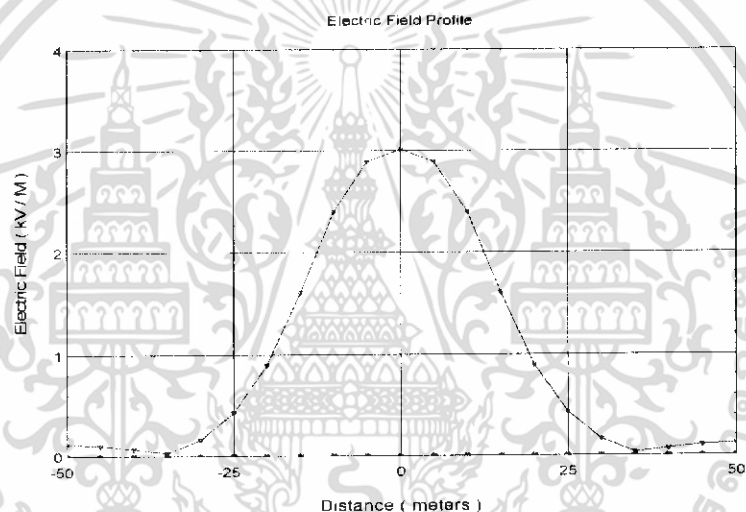
*****
ENL#  CIRC#  VOLTAGE  VOLTAGE  CURRENT  #  BUNDLE COORDINATES
      #      (KV)    (DEG)    (A)    (DEG)  OF  X      Y      SAG  PH
      #      #      #      #      #      COND  (m)   (m)   (m)
*****
1     1     230.0    0       500     0     4     -7.00  45.60  15.10  A
2     1     230.0   240     500    240   4     -7.00  38.30  15.10  B
3     1     230.0   120     500    120   4     -7.00  31.00  15.10  C
4     2     230.0    0       500     0     4      7.00  45.60  15.10  A
5     2     230.0   240     500    240   4      7.00  38.30  15.10  B
6     2     230.0   120     500    120   4      7.00  31.00  15.10  C
7     1     0.0      0        0        0     1     -7.00  49.85  11.40  GND
8     2     0.0      0        0        0     1      7.00  49.85  11.40  GND
*****
*          MINIMUM GROUND CLEARANCE = 15.90 meter *
*          POWER SYSTEM FREQUENCY   = 60.0 Hz *
*          SOIL RESISTIVITY           = 10.0 ohm meter *
*****
*****
SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES
*****
ENL#  CONDUCTOR  DIAMETER  SPACING  DC RESIST  AC RESIST  AC REACT
      #          NAME      (cm)      (cm)      (ohm/km)  (ohm/km)  (ohm/km)
*****
1     1     DRAKE      2.820    40.000    0.720     0.730     2.480
2     2     DRAKE      2.820    40.000    0.720     0.730     2.480
3     3     DRAKE      2.820    40.000    0.720     0.730     2.480
4     4     DRAKE      2.820    40.000    0.720     0.730     2.480
5     5     DRAKE      2.820    40.000    0.720     0.730     2.480
6     6     DRAKE      2.820    40.000    0.720     0.730     2.480
7     7     1-2HS     1.260     .000     2.1380    2.2190    7.710
8     8     1-2HS     1.260     .000     2.1380    2.2190    7.710
*****

```

รูปที่ 6.21 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=15.1 m

LATERAL DISTANCE		MAXIMUM FIELD	MINOR/MAJOR ELLIPSE AXES	VERTICAL	HORIZONTAL	SPACE POTENTIAL
(feet)	(meters)	(kV/m)	(ratio)	(kV/m)	(kV/m)	(kV)
-164.0	-50.00	114	.003	.114	.001	.113
-147.6	-45.00	101	.010	.101	.004	.101
-131.2	-40.00	069	.056	.069	.010	.068
-114.8	-35.00	031	.581	.030	.020	.031
-98.4	-30.00	163	.035	.158	.039	.160
-82.0	-25.00	434	.001	.428	.072	.430
-65.6	-20.00	906	.007	.898	.119	.902
-49.2	-15.00	1 615	.007	1.607	.160	1.609
-32.8	-10.00	2 399	.003	2.395	.139	2.391
-16.4	-5.00	2 892	.001	2.891	.056	2.886
.0	.00	3 011	.000	3.011	.000	3.008
16.4	5.00	2 892	.001	2.891	.056	2.886
32.8	10.00	2 399	.003	2.395	.139	2.391
49.2	15.00	1 615	.007	1.607	.160	1.609
65.6	20.00	906	.007	.898	.119	.902
82.0	25.00	434	.001	.428	.072	.430
98.4	30.00	163	.035	.158	.039	.160
114.8	35.00	031	.581	.030	.020	.031
131.2	40.00	069	.056	.069	.010	.068
147.6	45.00	101	.010	.101	.004	.101
164.0	50.00	114	.003	.114	.001	.113

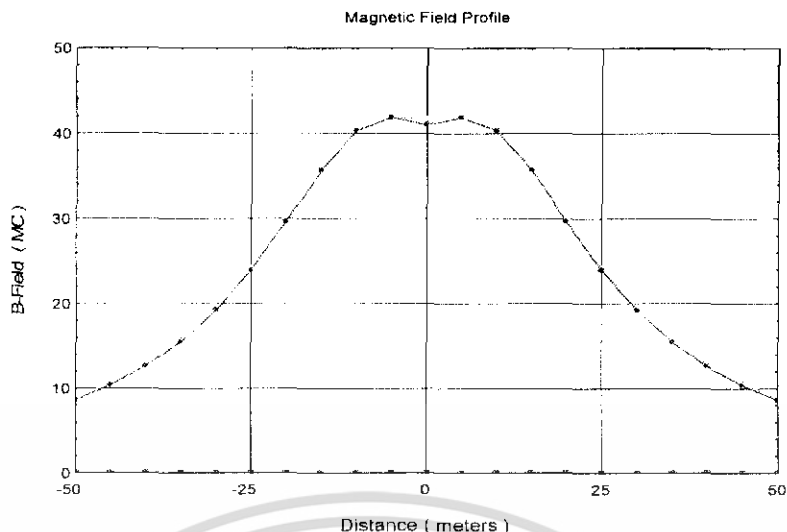
รูปที่ 6.22 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=15.1 m



รูปที่ 6.23 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=15.1 m

LATERAL DISTANCE		AC MAGNETIC FIELD				RMS RESULTANT
(feet)	(meters)	MAJOR AXIS (mG)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (mG)	HORIZONTAL COMP (mG)	(mG)
-164.0	-50.00	8.60	.225	7.34	4.89	8.82
-147.6	-45.00	10.35	.212	9.18	5.27	10.58
-131.2	-40.00	12.59	.200	11.63	5.45	12.84
-114.8	-35.00	15.48	.187	14.86	5.22	15.75
-98.4	-30.00	19.19	.172	18.99	4.31	19.48
-82.0	-25.00	23.92	.154	23.90	3.77	24.20
-65.6	-20.00	29.63	.129	28.57	8.70	29.87
-49.2	-15.00	35.68	.094	30.19	19.31	35.84
-32.8	-10.00	40.32	.053	24.73	31.91	40.37
-16.4	-5.00	41.85	.017	12.70	39.88	41.85
.0	.00	41.00	.000	.00	41.70	41.70
16.4	5.00	41.85	.017	12.70	39.88	41.85
32.8	10.00	40.32	.053	24.73	31.91	40.37
49.2	15.00	35.68	.094	30.19	19.31	35.84
65.6	20.00	29.63	.129	28.57	8.70	29.87
82.0	25.00	23.92	.154	23.90	3.77	24.20
98.4	30.00	19.19	.172	18.99	4.31	19.48
114.8	35.00	15.48	.187	14.86	5.22	15.75
131.2	40.00	12.59	.200	11.63	5.45	12.84
147.6	45.00	10.35	.212	9.18	5.27	10.58
164.0	50.00	8.60	.225	7.34	4.89	8.82

รูปที่ 6.24 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=15.1 m



รูปที่ 6.25 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=15.1 m
 จากการทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A ระยะSAG 15.1 m พบว่าสนามไฟฟ้ามี
 ค่าสูงสุด = 3.01 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 4.170 μ T

6.6.6 การทดลองที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m ทำการ
 เปลี่ยนเฟสของตัวนำ A-B-C ขนานกับเฟส C-B-A

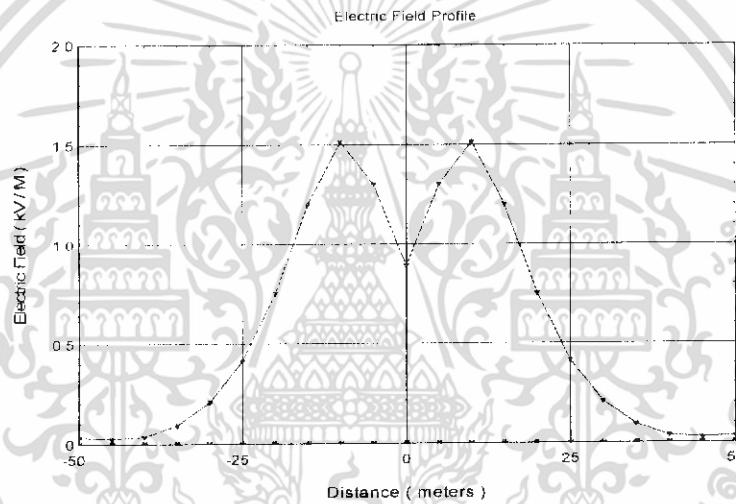
```

*****
| BNDL | CIRC | VOLTAGE | CURRENT | # | BUNDLE COORDINATES | | | |
| #    | #    | (KV)    | (A)     | OF | X | Y | SAG | PH |
|      |      | (DEG)   | (DEG)   | COND | (m) | (m) | (m) |   |
*****
| 1    | 1    | 230 0   | 500 0   | 4 | -7.00 | 45.60 | 14.60 | A |
| 2    | 1    | 230 0   | 500 240 | 4 | -7.00 | 38.30 | 14.60 | B |
| 3    | 1    | 230 0   | 500 120 | 4 | -7.00 | 31.00 | 14.60 | C |
| 4    | 2    | 230 0   | 500 120 | 4 | 7.00  | 45.60 | 14.60 | C |
| 5    | 2    | 230 0   | 500 240 | 4 | 7.00  | 38.30 | 14.60 | B |
| 6    | 2    | 230 0   | 500 0   | 4 | 7.00  | 31.00 | 14.60 | A |
| 7    | 1    | 0 0     | 0 0     | 1 | -7.00 | 49.85 | 10.90 | GND |
| 8    | 2    | 0 0     | 0 0     | 1 | 7.00  | 49.85 | 10.90 | GND |
*****
* MINIMUM GROUND CLEARANCE = 16.40 meter *
* POWER SYSTEM FREQUENCY  = 60. Hz *
* SOIL RESISTIVITY         = 10. 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    | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 2    | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 3    | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 4    | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 5    | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 6    | DRAKE    | 2.820    | 40.000  | 0.720    | 0.730    | 2.480    |
| 7    | 1/2HS    | 1.260    | 000     | 2.1380   | 2.2190   | 7.710    |
| 8    | 1/2HS    | 1.260    | 000     | 2.1380   | 2.2190   | 7.710    |
*****
    
```

รูปที่ 6.26 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 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	0.31	.049	0.31	0.02	0.31
-147.6	-45.00	0.25	.166	.025	0.04	0.25
-131.2	-40.00	0.37	.152	.036	0.09	0.37
-114.8	-35.00	0.93	.040	.092	0.17	0.92
-98.4	-30.00	2.06	.007	.206	0.31	2.07
-82.0	-25.00	4.16	.006	.413	0.54	4.15
-65.6	-20.00	7.57	.013	.752	0.82	7.54
-49.2	-15.00	1.203	.018	1.200	0.91	1.198
-32.8	-10.00	1.515	.028	1.515	0.46	1.507
-16.4	-5.00	1.305	.082	1.301	1.46	1.293
0.0	0.00	891	.415	891	2.18	890
16.4	5.00	1.305	.082	1.301	1.46	1.293
32.8	10.00	1.515	.028	1.515	0.46	1.507
49.2	15.00	1.203	.018	1.200	0.91	1.198
65.6	20.00	7.57	.013	.752	0.82	7.54
82.0	25.00	4.16	.006	.413	0.54	4.15
98.4	30.00	2.08	.007	.206	0.31	2.07
114.8	35.00	0.93	.040	.092	0.17	0.92
131.2	40.00	0.37	.152	.036	0.09	0.37
147.6	45.00	0.25	.166	.025	0.04	0.25
164.0	50.00	0.31	.049	0.31	0.02	0.31

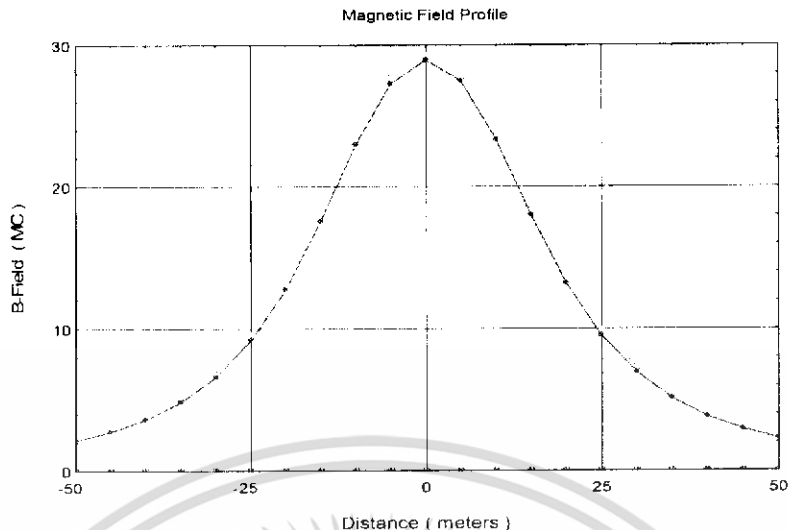
รูปที่ 6.27 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m



รูปที่ 6.28 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)	MAJOR AXIS (mG)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (mG)	HORIZONTAL COMP (mG)	RMS RESULTANT (mG)	
-164.0	-50.00	2.14	367	2.05	.99	2.28
-147.6	-45.00	2.78	361	2.72	1.10	2.93
-131.2	-40.00	3.62	356	3.62	1.29	3.85
-114.8	-35.00	4.85	349	4.80	1.83	5.14
-98.4	-30.00	6.61	340	6.21	3.19	6.98
-82.0	-25.00	9.15	325	7.55	5.97	9.63
-65.6	-20.00	12.77	302	7.82	10.80	13.33
-49.2	-15.00	17.56	268	5.50	17.33	18.18
-32.8	-10.00	22.94	227	9.31	21.60	23.52
-16.4	-5.00	27.25	190	22.38	16.39	27.74
0.0	0.00	28.93	173	28.93	5.02	29.36
16.4	5.00	27.49	185	22.32	16.83	27.95
32.8	10.00	23.33	216	9.16	22.04	23.87
49.2	15.00	17.99	252	5.42	17.74	18.55
65.6	20.00	13.16	280	7.89	11.16	13.67
82.0	25.00	9.49	298	7.68	8.25	9.90
98.4	30.00	6.89	306	6.27	3.36	7.20
114.8	35.00	5.07	310	4.57	1.86	5.31
131.2	40.00	3.80	310	3.80	1.19	3.98
147.6	45.00	2.90	309	2.89	.92	3.03
164.0	50.00	2.25	307	2.21	.79	2.35

รูปที่ 6.29 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m



รูปที่ 6.30 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m
 จากการทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A ระยะSAG 14.6 m พบว่าสนามไฟฟ้ามี
 ค่าสูงสุด = 1.515 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 2.936 μ T

6.6.7 การทดลองที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m ทำการ
 เปลี่ยนเฟสของตัวนำ A-B-C ขนานกับเฟส B-A-C

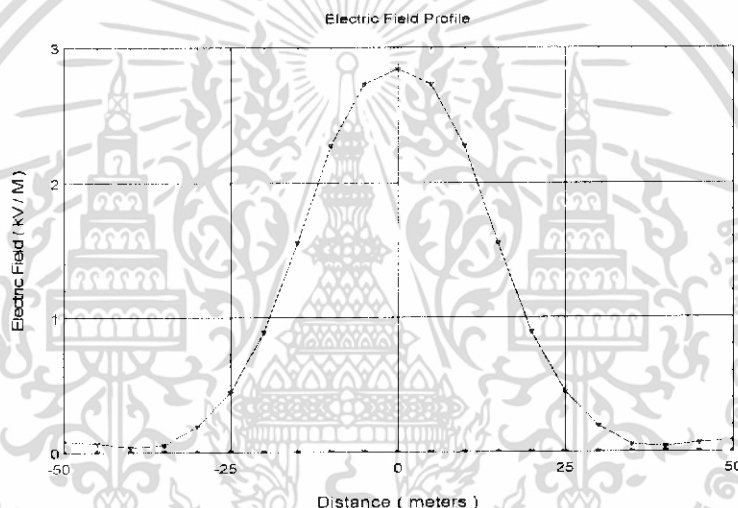
```

*****
BNDL CIRC VOLTAGE CURRENT # BUNDLE COORDINATES
# # (KV) (DEG) (A) (DEG) OF COND X Y SAG PH
*****
1 1 230.0 0 500 0 4 -7.00 45.60 14.60 A
2 1 230.0 240 500 240 4 -7.00 38.30 14.60 B
3 1 230.0 120 500 120 4 -7.00 31.00 14.60 C
4 2 230.0 240 500 240 4 7.00 45.60 14.60 B
5 2 230.0 0 500 0 4 7.00 38.30 14.60 A
6 2 230.0 120 500 120 4 7.00 31.00 14.60 C
7 1 0 0 0 0 1 -7.00 49.85 10.90 GND
8 2 0 0 0 0 1 7.00 49.85 10.90 GND
*****
MINIMUM GROUND CLEARANCE = 16.40 meter
POWER SYSTEM FREQUENCY = 60 Hz
SOIL RESISTIVITY = 10 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 DRAKE 2.820 40.000 0.720 0.730 2.480
2 DRAKE 2.820 40.000 0.720 0.730 2.480
3 DRAKE 2.820 40.000 0.720 0.730 2.480
4 DRAKE 2.820 40.000 0.720 0.730 2.480
5 DRAKE 2.820 40.000 0.720 0.730 2.480
6 DRAKE 2.820 40.000 0.720 0.730 2.480
7 1/2HS 1.260 0.000 2.1380 2.2190 7.710
8 1/2HS 1.260 0.000 2.1380 2.2190 7.710
*****
    
```

รูปที่ 6.31 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 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	080	.011	.080	.079
-147.6	-45.00	066	.032	.066	.065
-131.2	-40.00	037	.192	.036	.010
-114.8	-35.00	056	.168	.053	.020
-98.4	-30.00	193	.034	.189	.038
-82.0	-25.00	453	.019	.448	.069
-65.6	-20.00	901	.015	.894	.112
-49.2	-15.00	1560	.013	1.553	.148
-32.8	-10.00	2278	.011	2.274	.129
-16.4	-5.00	2729	.011	2.729	.060
0.0	0.00	2841	.089	2.841	.033
16.4	5.00	2729	.011	2.729	.060
32.8	10.00	2278	.011	2.274	.129
49.2	15.00	1560	.013	1.553	.148
65.6	20.00	901	.015	.894	.112
82.0	25.00	453	.019	.448	.069
98.4	30.00	193	.034	.189	.038
114.8	35.00	056	.168	.053	.020
131.2	40.00	037	.192	.036	.010
147.6	45.00	066	.032	.066	.005
164.0	50.00	080	.011	.080	.002

รูปที่ 6.32 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m



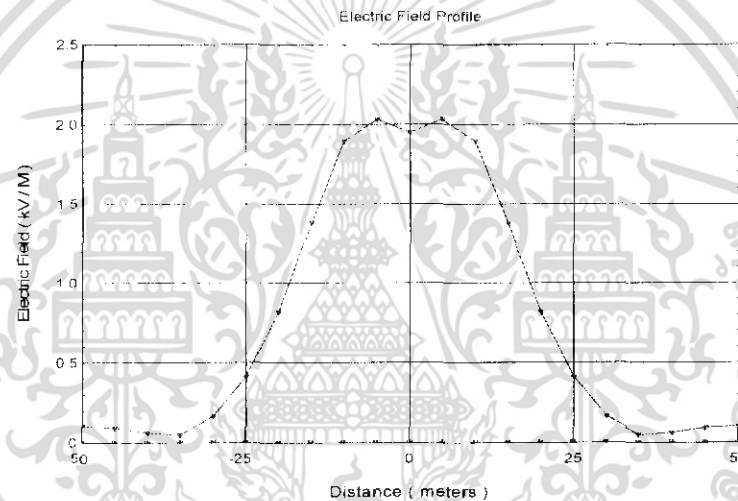
รูปที่ 6.33 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)	MAJOR AXIS (mG)	MINOR/MAJOR (RATIO)	AC MAGNETIC FIELD		RMS RESULTANT (mG)
			VERTICAL COMP (mG)	HORIZONTAL COMP (mG)	
-164.0	-50.00	7.56	197	6.46	7.70
-147.6	-45.00	9.14	193	8.13	9.31
-131.2	-40.00	11.18	191	10.35	11.38
-114.8	-35.00	13.81	190	13.28	14.06
-98.4	-30.00	17.22	192	17.07	17.54
-82.0	-25.00	21.57	194	21.55	21.97
-65.6	-20.00	26.83	196	25.80	27.33
-49.2	-15.00	32.36	198	27.26	32.99
-32.8	-10.00	36.55	205	22.65	29.64
-16.4	-5.00	37.88	219	13.51	36.35
0.0	0.00	37.66	225	8.48	37.66
16.4	5.00	37.74	203	13.52	36.05
32.8	10.00	36.33	169	22.60	29.10
49.2	15.00	32.14	139	27.17	17.75
65.6	20.00	26.62	111	25.66	7.68
82.0	25.00	21.40	083	21.39	1.91
98.4	30.00	17.10	054	16.89	2.77
114.8	35.00	13.72	024	13.11	4.06
131.2	40.00	11.12	005	10.18	4.47
147.6	45.00	9.11	033	7.97	4.42
164.0	50.00	7.54	059	6.32	4.14

รูปที่ 6.34 ค่าของสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 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	103	.006	.103	.002	.103
-147.6	-45.00	.090	.021	.090	.004	.090
-131.2	-40.00	.061	.100	.061	.010	.060
-114.8	-35.00	.047	.336	.046	.020	.047
-98.4	-30.00	.170	.043	.166	.037	.168
-82.0	-25.00	.415	.006	.410	.064	.413
-65.6	-20.00	.823	.001	.817	.099	.819
-49.2	-15.00	1.385	.003	1.380	.118	1.379
-32.8	-10.00	1.897	.022	1.895	.083	1.889
-16.4	-5.00	2.032	.061	2.032	.125	2.026
0	0.00	1.950	.110	1.950	.186	1.948
16.4	5.00	2.032	.061	2.032	.125	2.026
32.8	10.00	1.897	.022	1.895	.083	1.889
49.2	15.00	1.385	.003	1.380	.118	1.379
65.6	20.00	.823	.001	.817	.099	.819
82.0	25.00	.415	.006	.410	.064	.413
98.4	30.00	.170	.043	.166	.037	.168
114.8	35.00	.047	.336	.046	.020	.047
131.2	40.00	.061	.100	.061	.010	.060
147.6	45.00	.090	.021	.090	.004	.090
164.0	50.00	103	.006	.103	.002	.103

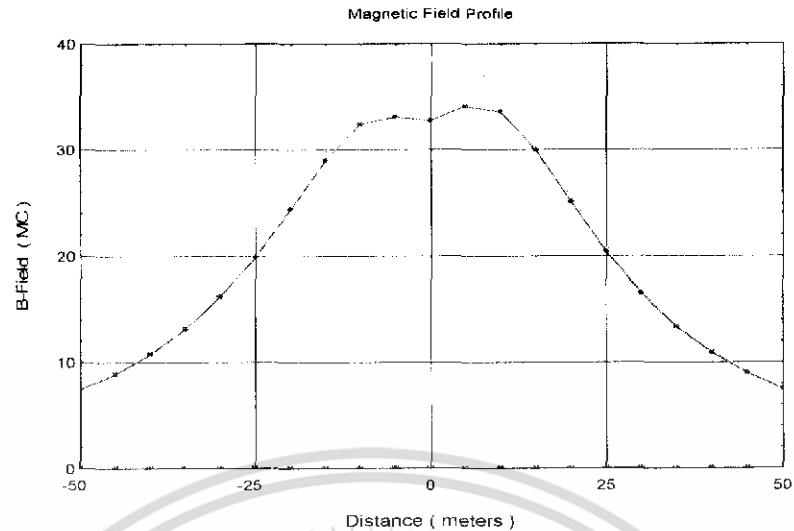
รูปที่ 6.37 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m



รูปที่ 6.38 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)	MAJOR AXIS (mG)	AC MAGNETIC FIELD			RMS RESULTANT (mG)
		MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (mG)	HORIZONTAL COMP (mG)	
-164.0	-50.00	7.43	139	6.55	7.50
-147.6	-45.00	8.89	114	8.13	8.95
-131.2	-40.00	10.75	.086	10.19	10.79
-114.8	-35.00	13.12	.054	12.84	13.14
-98.4	-30.00	16.12	.015	16.10	16.13
-82.0	-25.00	19.88	.036	19.70	19.90
-65.6	-20.00	24.34	.107	22.59	24.48
-49.2	-15.00	28.97	.208	22.57	29.59
-32.8	-10.00	32.35	.350	18.68	34.27
-16.4	-5.00	33.03	.525	18.06	37.29
0	0.00	32.70	.624	20.45	38.54
16.4	5.00	34.04	.514	17.79	38.28
32.8	10.00	33.53	.367	18.57	35.71
49.2	15.00	29.94	.260	22.74	30.94
65.6	20.00	25.04	.194	22.88	25.51
82.0	25.00	20.35	.157	20.03	20.60
98.4	30.00	16.43	.139	16.43	16.59
114.8	35.00	13.31	.134	13.14	13.43
131.2	40.00	10.87	.136	10.45	10.97
147.6	45.00	8.96	.143	8.35	9.05
164.0	50.00	7.46	.153	6.73	7.55

รูปที่ 6.39 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m



รูปที่ 6.40 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m

จากการทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A ระยะSAG 14.6 m พบว่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุด = 2.032 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 3.854 μ T

6.6.9 การทดลองที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m ทำการเปลี่ยนเฟสของตัวนำ A-B-C ขนานกับเฟส B-C-A

```

*****
| BNDL | DIRC | VOLTAGE | ANGLE | CURRENT | # | BUNDLE COORDINATES | PH | | |
| # | # | (kV) | (DEG) | (A) | (DEG) | (COND) | X | Y | SAG |
| (m) | (m) | (m) |
*****
| 1 | 1 | 230.0 | 0.0 | 500.0 | 0.0 | 4 | -7.00 | 45.60 | 14.60 | A |
| 2 | 1 | 230.0 | 240.0 | 500.0 | 240.0 | 4 | -7.00 | 38.30 | 14.60 | B |
| 3 | 1 | 230.0 | 120.0 | 500.0 | 120.0 | 4 | -7.00 | 31.00 | 14.60 | C |
| 4 | 2 | 230.0 | 240.0 | 500.0 | 240.0 | 4 | 7.00 | 45.60 | 14.60 | B |
| 5 | 2 | 230.0 | 120.0 | 500.0 | 120.0 | 4 | 7.00 | 38.30 | 14.60 | C |
| 6 | 2 | 230.0 | 0.0 | 500.0 | 0.0 | 4 | 7.00 | 31.00 | 14.60 | A |
| 7 | 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1 | -7.00 | 49.85 | 10.90 | GND |
| 8 | 2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1 | 7.00 | 49.85 | 10.90 | GND |
*****
* MINIMUM GROUND CLEARANCE = 16.40 meter *
* POWER SYSTEM FREQUENCY = 60 Hz *
* SOIL RESISTIVITY = 10 ohm meter *
*****

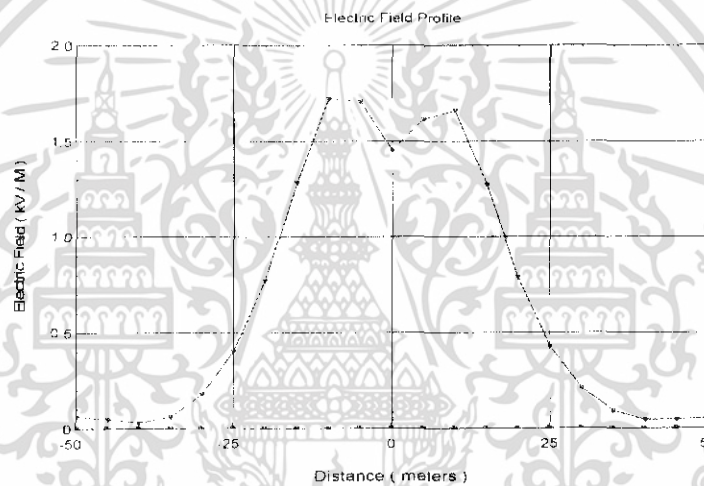
*****
* SUBCONDUCTOR INFORMATION - REGULAR BUNDLES *
*****
| ENDL | CONDUCTOR | DIAMETER | SPACING | DC RESIST | AC RESIST | AC REACT |
| # | NAME | (cm) | (cm) | (ohm/km) | (ohm/km) | (ohm/km) |
*****
| 1 | DRAKE | 2.820 | 40.000 | 0.720 | 0.730 | .2480 |
| 2 | DRAKE | 2.820 | 40.000 | 0.720 | 0.730 | .2480 |
| 3 | DRAKE | 2.820 | 40.000 | 0.720 | 0.730 | .2480 |
| 4 | DRAKE | 2.820 | 40.000 | 0.720 | 0.730 | .2480 |
| 5 | DRAKE | 2.820 | 40.000 | 0.720 | 0.730 | .2480 |
| 6 | DRAKE | 2.820 | 40.000 | 0.720 | 0.730 | .2480 |
| 7 | 1/2HS | 1.260 | .000 | 2.1380 | 2.2190 | .7710 |
| 8 | 1/2HS | 1.260 | .000 | 2.1380 | 2.2190 | .7710 |
*****

```

รูปที่ 6.41 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ป้อนที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 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	060	017	060	002	060
-147.6	-45.00	049	052	049	004	049
-131.2	-40.00	029	289	029	009	029
-114.8	-35.00	062	133	060	018	060
-98.4	-30.00	181	038	178	033	179
-82.0	-25.00	404	023	400	059	402
-65.6	-20.00	778	020	773	092	775
-49.2	-15.00	1,290	022	1,286	110	1,285
-32.8	-10.00	1,721	032	1,720	075	1,713
-16.4	-5.00	1,768	073	1,707	134	1,700
0.0	0.00	1,453	140	1,453	204	1,452
16.4	5.00	1,614	080	1,614	139	1,608
32.8	10.00	1,660	023	1,659	055	1,653
49.2	15.00	1,278	002	1,274	098	1,273
65.6	20.00	794	003	790	067	792
82.0	25.00	432	003	428	057	430
98.4	30.00	212	022	209	033	210
114.8	35.00	092	081	091	018	092
131.2	40.00	044	196	044	009	044
147.6	45.00	045	092	045	004	045
164.0	50.00	053	030	053	002	052

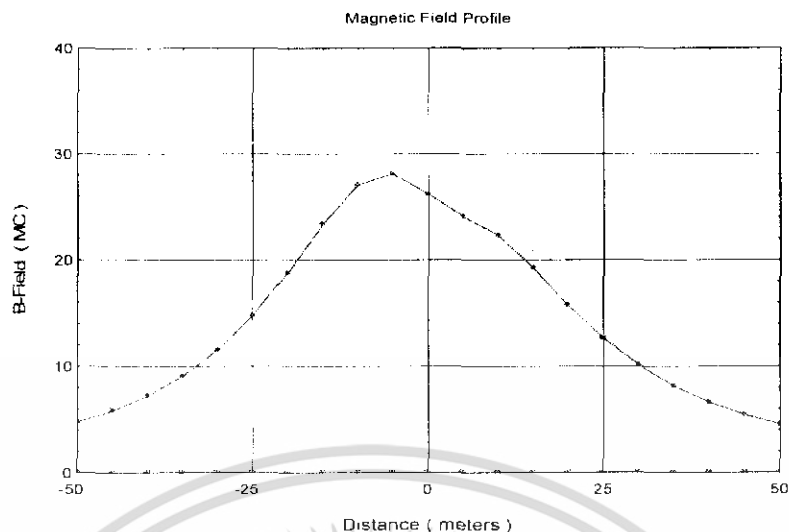
รูปที่ 6.42 ค่าของสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m



รูปที่ 6.43 กราฟสนามไฟฟ้าที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m

LATERAL DISTANCE (feet) (meters)	MAJOR AXIS (mG)	AC MAGNETIC FIELD			RMS RESULTANT (mG)	
		MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (mG)	HORIZONTAL COMP (mG)		
-164.0	-50.00	4.78	307	4.32	2.50	5.00
-147.6	-45.00	5.84	316	5.47	2.76	6.12
-131.2	-40.00	7.23	329	6.89	3.02	7.61
-114.8	-35.00	9.08	346	8.00	3.36	9.60
-98.4	-30.00	11.53	368	11.52	4.25	12.28
-82.0	-25.00	14.75	395	14.35	6.75	15.86
-65.6	-20.00	18.82	427	16.59	11.97	20.46
-49.2	-15.00	23.34	469	16.39	19.89	25.77
-32.8	-10.00	27.04	528	14.62	26.86	30.58
-16.4	-5.00	28.06	624	20.24	26.17	33.08
0.0	.00	26.15	751	25.70	20.23	32.70
16.4	5.00	24.07	748	20.92	21.59	30.06
32.8	10.00	22.30	573	12.87	22.26	25.71
49.2	15.00	19.23	401	12.97	16.16	20.72
65.6	20.00	15.74	265	13.77	8.70	16.28
82.0	25.00	12.62	162	12.33	3.39	12.79
98.4	30.00	10.11	084	10.10	.86	10.14
114.8	35.00	8.14	023	7.99	1.58	8.14
131.2	40.00	6.62	027	6.25	2.19	6.62
147.6	45.00	5.44	069	4.91	2.39	5.46
164.0	50.00	4.53	105	3.89	2.36	4.55

รูปที่ 6.44 ค่าของสนามสนามแม่เหล็กที่แรงดัน =230 kV กระแส =500 A ระยะSAG=14.6 m



รูปที่ 6.45 กราฟสนามแม่เหล็กที่แรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ระยะSAG=14.6 m
จากการทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A ระยะSAG 14.6 m พบว่าสนามไฟฟ้ามี
ค่าสูงสุด = 1.721 kV/m และสนามแม่เหล็กสูงสุด = 3.308 μ T

6.7 สรุปผลการทดลอง

กำหนดให้เฟส A-B-C ขนานกับ A-B-C ทำการทดลองที่แรงดัน 230 kV ระยะSAG
14.6 m และ 500 kV ระยะSAG 13.93 m

กำหนดแรงดัน = 500 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด = 5.817 kV/m

กำหนดแรงดัน = 500 kV กระแส = 250 A ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด = 5.817 kV/m

กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด = 2.906 kV/m

กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 250 A ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด = 2.906 kV/m

กำหนดแรงดัน = 500 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด = 40.72 mG

กำหนดแรงดัน = 500 kV กระแส = 250 A ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด = 19.00 mG

กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด = 40.46 mG

กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 250 A ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด = 20.23 mG

การเปลี่ยนระยะSAG

กำหนดให้เฟส A-B-C ขนานกับ A-B-C ทำการทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A
ระยะSAG 15.1 m

กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด = 3.01 kV/m

กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด = 41.70 mG

การสลับเฟสสายส่ง

เฟส A-B-C ขนานกับ A-B-C ทำการทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A ระยะSAG 14.6 m
 กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด = 2.906 kV/m
 กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด = 40.46 mG

เฟส A-B-C ขนานกับ B-A-C ทำการทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A ระยะSAG 14.6 m
 กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด = 2.841 kV/m
 กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด = 38.78 mG

เฟส A-B-C ขนานกับ A-C-B ทำการทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A ระยะSAG 14.6 m
 กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด = 2.032 kV/m
 กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด = 38.54 mG

เฟส A-B-C ขนานกับ B-C-A ทำการทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500 A ระยะSAG 14.6 m
 กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด = 1.721 kV/m
 กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด = 33.08 mG

เฟส A-B-C ขนานกับ C-B-A ทำการทดลองที่แรงดัน 230 kV กระแส 500A ระยะSAG 14.6 m
 กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด = 1.515 kV/m
 กำหนดแรงดัน = 230 kV กระแส = 500 A ได้ค่าสนามแม่เหล็กสูงสุด = 29.36 mG

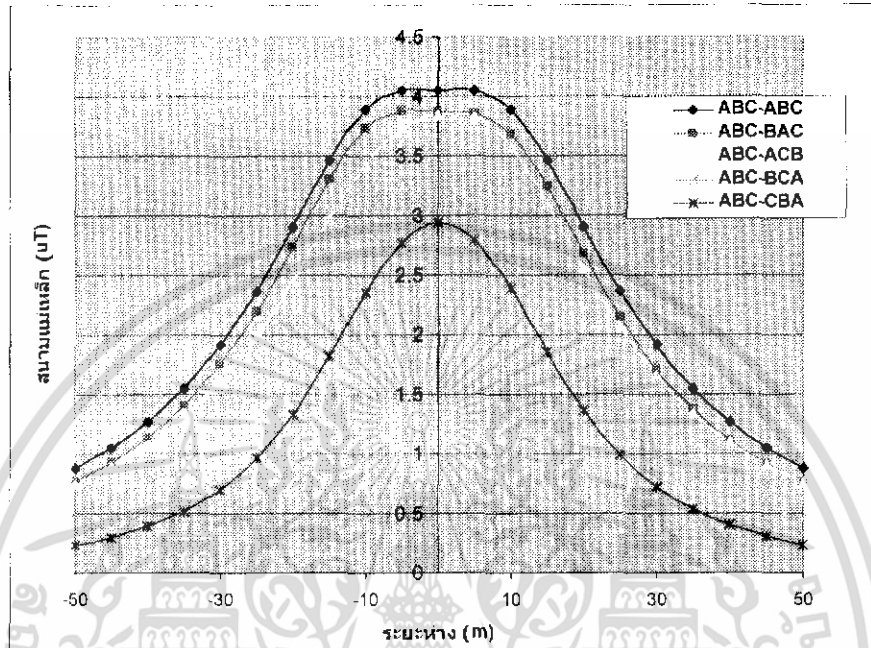
จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าแรงดันจะส่งผลต่อค่าสนามไฟฟ้า โดยที่ถ้าค่าของแรงดันมีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่าสนามไฟฟ้ามี่ค่าสูงขึ้นตามไปด้วย และถ้าแรงดันไฟฟ้ามีค่าลดลงก็จะทำให้ค่าของสนามไฟฟ้ามี่ค่าลดลงตามไปด้วย ซึ่งกล่าวได้ว่าค่าของสนามไฟฟ้าที่เกิดในสายส่งจะมีการแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายส่ง

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในระบบสายส่งไฟฟ้าจะส่งผลต่อค่าสนามแม่เหล็กถ้ากระแสมีค่าสูง จะทำให้ค่าสนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น และเมื่อกระแสมีค่าลดลงก็จะทำให้ค่าของสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงตามไปด้วย จึงกล่าวได้ว่า ค่าสนามแม่เหล็กจะแปรผันตรงกับค่าของกระแสไฟฟ้าภายในระบบสายส่งไฟฟ้า

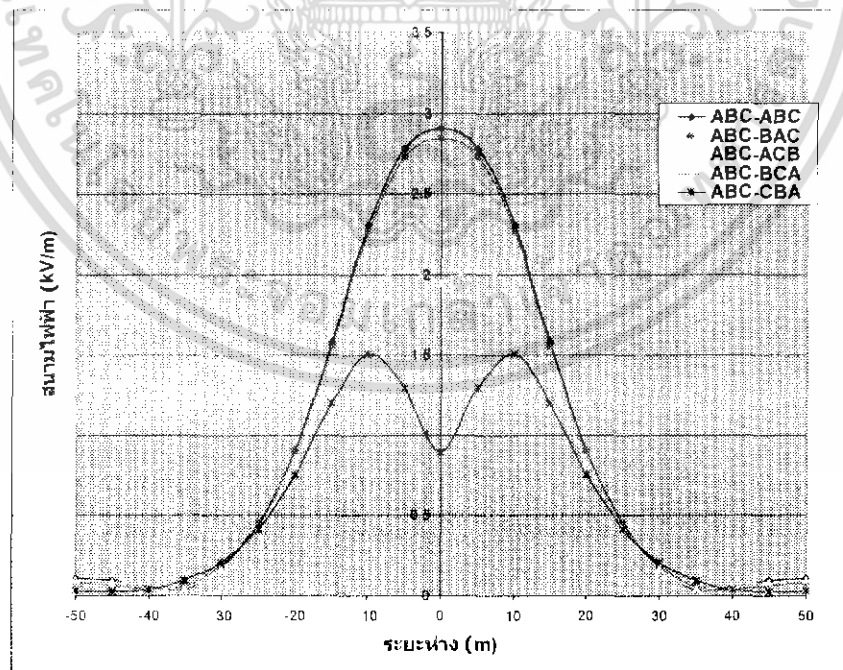
จากการทดลองเมื่อทำการเปลี่ยนระยะ sag ให้ระยะ sag มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้ามี่ค่ามากขึ้นเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับระยะ sag ที่น้อยกว่าก็จะสังเกตเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

จากการทดลองการสลับเฟสของระบบสายส่งไฟฟ้ากำลังที่มีวงจรขนานกัน เมื่อทำการออกแบบให้มีการสลับเฟสกันแล้วจะทำให้สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงอย่างเห็นได้

ชัด โดยการออกแบบสลับเฟสเป็นลักษณะวงจร A-B-C ขนานกับวงจร C-B-A จะทำให้สนามไฟฟ้าลดลงจากวงจร A-B-C ขนานกับวงจร A-B-C ถึง 47.86 เปอร์เซ็นต์ และสนามแม่เหล็กลดลง ถึง 27.43 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการออกแบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อมจากสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 6.46 แสดงการลดลงของสนามแม่เหล็กเมื่อทำการสลับเฟสของสายส่งวงจรขนาน



รูปที่ 6.47 แสดงการลดลงของสนามไฟฟ้าเมื่อทำการสลับเฟสของสายส่งวงจรขนาน

ซึ่งจากการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า ผลของแรงดันและกระแสระยะ sag และการสลับเฟสของวงจรที่จ่ายในระบบไฟฟ้ากำลังแรงสูง มีผลต่อค่าสนามแม่เหล็กและค่าสนามไฟฟ้า แต่วิธีที่ดีที่สุดสำหรับการลดค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กก็คือการสลับเฟสของสายส่งวงจรขนานโดยสามารถสังเกตได้จากรูปที่ 6.46 และ 6.47



บทที่ 7

การทดสอบวัดค่าสนามแม่เหล็กจากระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับแรงดัน 230 kV และ 500 kV

7.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกทำการทดสอบวัดสนามแม่เหล็ก จากสถานที่จริงที่ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่ระดับแรงดัน 230 kV และ 500 kV สถานที่คือ บริเวณ ต.ดอนตะโก อ.เมือง จ.ราชบุรี และ ต.จอมบึง อ.จอมบึง จ.ราชบุรี ตามลำดับ โดยทำการนำเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเชิงพาณิชย์ (electromagnetic field radiation tester) และเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นทำการวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงดังกล่าว ซึ่งจากการวัดสามารถจะบอกได้ว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูงเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด

7.2 วัตถุประสงค์ในการทดสอบ

1. เพื่อวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นบริเวณใต้ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูงจากเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเชิงพาณิชย์ (electromagnetic field radiation tester) และเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น
2. เพื่อทำการเปรียบเทียบสนามแม่เหล็ก จากเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเชิงพาณิชย์ (electromagnetic field radiation tester) และเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นกับโปรแกรม TLW ว่าเป็นไปในทิศทางเดียวกันหรือไม่
3. เพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงไปวิเคราะห์ความถูกต้อง

7.3 เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบ

1. เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเชิงพาณิชย์ (electromagnetic field radiation tester)
2. เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น
3. โปรแกรม TLW

7.4 วิธีการทดสอบ

1. ทำการเลือกบริเวณที่ตั้งเสาระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV และ 500 kV
2. ทำการเลือกจุดบริเวณที่จะทำการวัดสนามแม่เหล็ก จากนั้นทำการเลือกบริเวณจุดกึ่งกลางระหว่างเสาสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นบริเวณที่เรียกกันว่าบริเวณท้องช้าง หรือระยะ height min ซึ่งจะวัดตามแนวขวางกับสายส่ง
3. นำเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเชิงพาณิชย์ (electromagnetic field radiation tester) วัดตามระยะห่างที่ระยะ 5, 10, 15, 20, 25 เมตร และที่ระยะ -5,-10,-15,-20,-25

เมตร โดยเริ่มวัดจากจุดห้องข้างของสายไปในแนวตามขวางกับแนวเดินสายที่ระยะห่างตามที่กำหนด

4. นำเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น วัดตามระยะห่างที่ระยะ 5, 10, 15, 20, 25 เมตร และที่ระยะ -5,-10,-15,-20,-25 เมตร โดยเริ่มวัดจากจุดห้องข้างของสายไปในแนวตามขวางกับแนวเดินสายที่ระยะห่างตามที่กำหนด

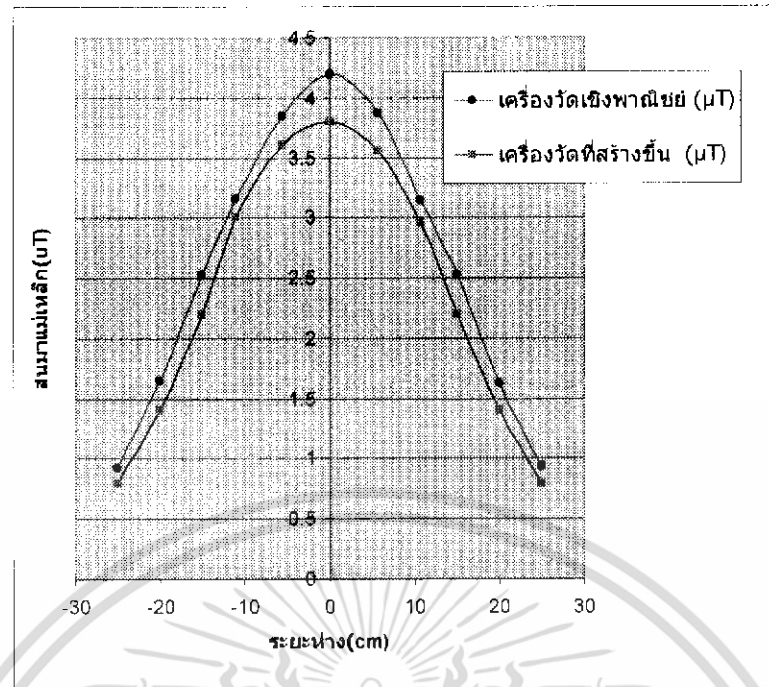
5. ทำการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดสอบวัดจากสถานที่จริงว่าสนามแม่เหล็กจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นไปในลักษณะเดียวกับการประมวลผลด้วยโปรแกรมหรือไม่

7.5 ผลที่ได้จากการทดสอบ

7.5.1 ผลการทดสอบวัดสนามแม่เหล็กจากสถานที่จริงที่แรงดัน 230 kV กระแส 840 A

ตารางที่ 7.1 ผลการทดสอบวัดสนามแม่เหล็กที่แรงดัน 230 kV

ระยะห่าง (m)	สนามแม่เหล็กที่วัดได้จาก เครื่องวัดเชิงพาณิชย์ (μ T)	สนามแม่เหล็กที่วัดได้จาก เครื่องวัดที่สร้างขึ้น (μ T)
- 25	0.92	0.8
- 20	1.65	1.4
- 15	2.53	2.2
- 10	3.16	3.0
- 5	3.85	3.6
0	4.20	3.8
5	3.85	3.5
10	2.99	3.0
15	2.52	2.2
20	1.63	1.4
25	0.93	0.8



รูปที่ 7.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่วัดจากเครื่องวัดเชิงพาณิชย์ กับเครื่องวัดที่สร้างขึ้นที่แรงดัน 230 kV

```

*****
*
*      MAGNETIC FIELD PROFILE
*      at 1.00 meter above ground
*      longitudinal distance: 165.00 meter
*
*****

```

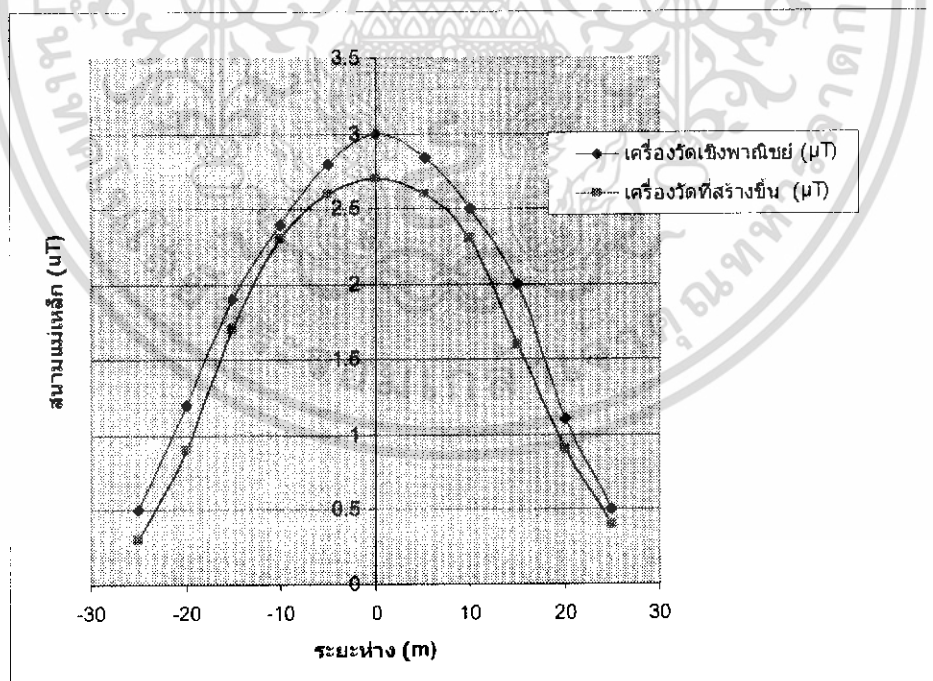
LATERAL DISTANCE		AC MAGNETIC FIELD					RMS RESULTANT (mG)
(feet)	(meters)	MAJOR AXIS (mG)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (mG)	HORIZONTAL COMP (mG)		
-164.0	-50.00	3.59	.367	3.45	1.66	3.82	
-147.6	-45.00	4.63	.361	4.57	1.84	4.93	
-131.2	-40.00	6.09	.356	6.08	2.17	6.46	
-114.8	-35.00	8.15	.349	8.06	3.08	8.63	
-98.4	-30.00	11.11	.340	10.44	5.35	11.73	
-82.0	-25.00	15.38	.325	12.68	10.03	16.17	
-65.6	-20.00	21.45	.302	13.13	18.15	22.40	
-49.2	-15.00	29.50	.268	9.23	29.11	30.54	
-32.8	-10.00	38.54	.227	15.65	36.29	39.52	
-16.4	-5.00	45.79	.190	37.60	27.54	46.61	
0.0	0.00	48.60	.173	48.60	8.43	49.33	
16.4	5.00	46.18	.185	37.50	28.27	46.96	
32.8	10.00	39.19	.216	15.39	37.03	40.09	
49.2	15.00	30.22	.252	9.10	29.80	31.16	
65.6	20.00	22.11	.280	13.26	18.75	22.96	
82.0	25.00	15.95	.298	12.91	10.50	16.64	
98.4	30.00	11.57	.306	10.71	5.64	12.10	
114.8	35.00	8.52	.310	8.35	3.13	8.92	
131.2	40.00	6.39	.310	6.36	2.00	6.69	
147.6	45.00	4.87	.309	4.86	1.55	5.10	
164.0	50.00	3.78	.307	3.72	1.33	3.95	

รูปที่ 7.2 ผลสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม TLW ที่แรงดัน 230 kV

7.5.2 ผลการทดสอบวัดสนามแม่เหล็กจากสถานที่จริงที่แรงดัน 500 kV กระแส 478 A

ตารางที่ 7.2 ผลการทดสอบวัดสนามแม่เหล็กที่แรงดัน 500 kV

ระยะห่าง (m)	สนามแม่เหล็กที่วัดได้จาก เครื่องวัดเชิงพาณิชย์ (μT)	สนามแม่เหล็กที่วัดได้จาก เครื่องวัดที่สร้างขึ้น (μT)
- 25	0.5	0.3
- 20	1.2	0.9
- 15	1.9	1.7
- 10	2.4	2.3
- 5	2.8	2.6
0	3.0	2.7
5	2.8	2.6
10	2.5	2.3
15	2.0	1.6
20	1.1	0.9
25	0.5	0.4



รูปที่ 7.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่วัดจากเครื่องวัดเชิงพาณิชย์กับเครื่องวัดที่สร้างขึ้นที่แรงดัน 500 kV

```

*****
*
*      MAGNETIC FIELD PROFILE      *
*      at 1.00 meter above ground  *
*
* longitudinal distance: 165.00 meter *
*
*****

```

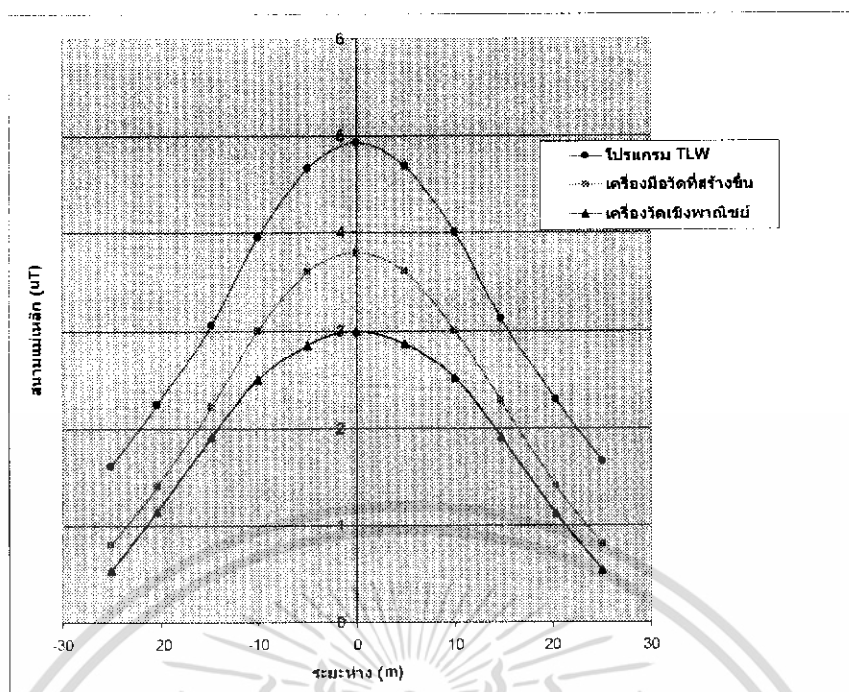
LATERAL DISTANCE		AC MAGNETIC FIELD					RMS RESULTANT (mG)
(feet)	(meters)	MAJOR AXIS (mG)	MINOR/MAJOR (RATIO)	VERTICAL COMP (mG)	HORIZONTAL COMP (mG)		
-164.0	-50.00	3.85	.328	3.82	1.35	4.05	
-147.6	-45.00	4.87	.331	4.74	1.94	5.13	
-131.2	-40.00	6.23	.331	5.87	2.95	6.57	
-114.8	-35.00	8.10	.326	7.13	4.67	8.52	
-98.4	-30.00	10.68	.313	8.31	7.50	11.19	
-82.0	-25.00	14.20	.292	8.70	11.95	14.79	
-65.6	-20.00	18.81	.259	7.05	18.11	19.43	
-49.2	-15.00	24.25	.218	5.87	24.11	24.82	
-32.8	-10.00	29.40	.175	16.45	24.90	29.85	
-16.4	-5.00	32.82	.141	28.87	16.28	33.14	
0	0.00	33.97	.128	33.97	4.36	34.25	
16.4	5.00	32.94	.142	28.85	16.56	33.27	
32.8	10.00	29.61	.176	16.44	25.18	30.07	
49.2	15.00	24.51	.220	5.94	24.39	25.10	
65.6	20.00	19.08	.261	7.18	18.37	19.72	
82.0	25.00	14.45	.294	8.82	12.21	15.06	
98.4	30.00	10.90	.316	8.42	7.74	11.44	
114.8	35.00	8.30	.329	7.25	4.88	8.74	
131.2	40.00	6.40	.335	5.98	3.14	6.75	
147.6	45.00	5.01	.335	4.85	2.09	5.28	
164.0	50.00	3.97	.333	3.92	1.46	4.19	

รูปที่ 7.4 ผลสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม TLW ที่แรงดัน 500 kV

7.6 การเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม TLW เครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ และเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น

ตารางที่ 7.3 ผลการทดสอบวัดสนามแม่เหล็ก ที่แรงดัน 230 kV

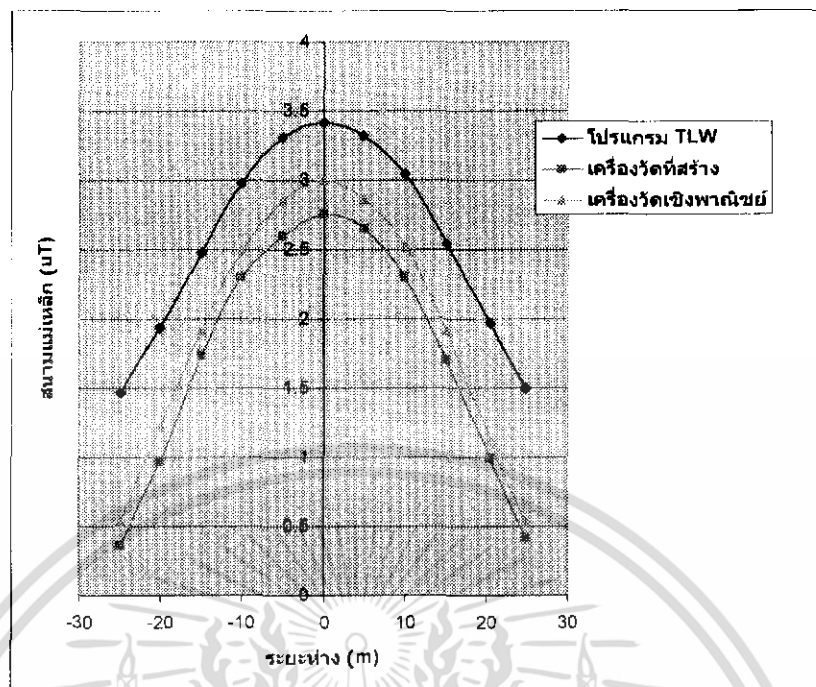
ระยะห่าง (m)	สนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ (μT)	สนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น (μT)	สนามแม่เหล็กที่วัดได้จากโปรแกรม TLW (μT)
- 25	0.92	0.8	1.61
- 20	1.65	1.4	2.24
- 15	2.53	2.2	3.05
- 10	3.16	3.0	3.95
- 5	3.85	3.6	4.66
0	4.20	3.8	4.93
5	3.85	3.5	4.69
10	2.99	3.0	4.00
15	2.52	2.2	3.11
20	1.63	1.4	2.29
25	0.93	0.8	1.66



รูปที่ 7.5 กราฟผลการทดสอบวัดสนามแม่เหล็ก ที่แรงดัน 230 kV

ตารางที่ 7.4 ผลการทดสอบวัดสนามแม่เหล็ก ที่แรงดัน 500 kV

ระยะห่าง (m)	สนามแม่เหล็กที่วัดได้จาก เครื่องวัดเชิงพาณิชย์ (μT)	สนามแม่เหล็กที่วัดได้จาก เครื่องวัดที่สร้างขึ้น (μT)	สนามแม่เหล็กที่วัดได้จาก โปรแกรม TLW (μT)
- 25	0.5	0.3	1.47
- 20	1.2	0.9	1.94
- 15	1.9	1.7	2.48
- 10	2.4	2.3	2.98
- 5	2.8	2.6	3.31
0	3.0	2.7	3.42
5	2.8	2.6	3.32
10	2.5	2.3	3.00
15	2.0	1.6	2.54
20	1.1	0.9	1.97
25	0.5	0.4	1.50



รูปที่ 7.6 กราฟผลการทดสอบวัดสนามแม่เหล็ก ที่แรงดัน 500 kV

7.7 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV และ 500 kV พบว่าค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ และเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้นจะมีค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กสูงบริเวณจุดต่ำสุดของสายหรือที่เรียกว่าจุด ท้องช้าง และเมื่อทำการวัดโดยเคลื่อนที่ออกไกลจากสายพบว่าสนามแม่เหล็กที่อ่านได้มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด และจากการทดสอบวัดพื้นที่บางจุดภายใต้แนวสายส่ง ค่าที่อ่านได้จะมีค่าสูงสาเหตุเพราะระดับในพื้นที่มีระดับที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการทดสอบจึงควรเลือกบริเวณใต้สายส่งที่มีพื้นที่มีความสม่ำเสมอเพื่อให้ค่าที่วัดได้มีความถูกต้องที่สุด

เมื่อได้สนามแม่เหล็กที่วัดได้จากเครื่องมือวัดทั้งสองเครื่อง มาเปรียบเทียบกับปรากฏว่าค่าสนามแม่เหล็กที่วัดได้มีผลไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งสายส่งขนาด 230 kV และ 500 kV จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม ในส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะต้องป้อนในโปรแกรม ข้อมูลที่ได้มาจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ราชบุรี 2 ข้อมูลที่ได้มานั้นมีตั้งแต่ ข้อมูลของเสาทั้ง 230 kV และ 500 kV ขนาดกระแสที่ไหลภายในสาย ลักษณะการจัดลำดับเฟส และระยะ SAG เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดลอง เมื่อทำการป้อนค่าพารามิเตอร์ที่ได้ ป้อนลงในโปรแกรมแล้วทำการรันโปรแกรม ปรากฏว่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรมเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับค่าที่วัดค่าจากเครื่องมือวัดเชิงพาณิชย์ และค่าที่ได้จากเครื่องมือที่สร้างขึ้น

บทที่ 8

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า ทำให้ทราบว่า การเกิดของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้านั้น จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิดรวมถึงระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น ระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง จากการทดลองพบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามค่าของกระแสที่จ่ายไปยังโหลด การเพิ่มขึ้นของกระแส จะส่งผลทำให้มีสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งทราบได้จากการวัด ในการทดลองพบว่า สนามแม่เหล็กจะมีความเข้มสูงบริเวณใกล้แหล่งกำเนิด และจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดกับระยะที่วัดมีค่ามากขึ้น ในส่วนทิศทางการวัด การวัดในแนวตั้งฉากกับทิศทางของของฟลักซ์แม่เหล็ก จะทำให้ได้สนามแม่เหล็กที่ดีที่สุด

จากการทดลองโปรแกรม TLW สามารถสรุปได้ว่า แรงดันจะส่งผลต่อสนามไฟฟ้า โดยเมื่อค่าแรงดันในระบบส่งจ่ายไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจะทำให้สนามไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งกล่าวได้ว่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสายส่งไฟฟ้าแรงสูง จะแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในสายส่งแรงสูง ในส่วนของกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายส่งนั้น จะส่งผลต่อสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น เมื่อในระบบส่งจ่ายมีกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น พบว่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าของกระแส ซึ่งกล่าวได้ว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง จะแปรผันตรงกับขนาดของกระแสที่ไหลในสายส่ง

จากการทดลอง การสลับเฟสของระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการส่งจ่ายแบบวงจรถนน เมื่อมีการสลับเฟสกัน ทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าลดลง ซึ่งจากการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าสายส่งไฟฟ้าแรงสูงที่มีระบบส่งจ่ายไฟฟ้ากำลังแบบวงจรถนน ควรออกแบบสลับเฟสที่เป็นลักษณะวงจร A-B-C ขนานกับวงจร C-B-A จะทำให้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีค่าน้อยลงที่สุด ซึ่งจะเป็ประโยชน์ในการป้องกันอันตรายจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่จะเกิดขึ้นภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง

จากการทดลองวัดสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV และ 500 kV จากสถานที่จริงของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยในการทดลองนำเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเชิงพาณิชย์และเครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นเอง นำไปวัดค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากสายส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่แรงดัน 230 kV และ 500 kV และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับการประมวลผลสนามแม่เหล็กจากโปรแกรม TLW ปรากฏว่าสนามแม่เหล็กที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

8.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาเกี่ยวกับการเกิดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เป็นสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อการค้นคว้าทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้า เกี่ยวกับการเกิดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่เกิดในระบบไฟฟ้ากำลัง ข้อมูลที่ได้จากการศึกษามาทั้งหมดนี้ จะเป็นแนวทางที่ดีในการ

ออกแบบระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง ที่มีความปลอดภัยจากสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมภายใต้สายส่งไฟฟ้าแรงสูง ส่วนของโปรแกรม TLW เป็นโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำในการประมวลผลสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ควรที่จะมีการค้นคว้าและทำการวิจัยให้ดียิ่งขึ้นต่อไปในอนาคต เพื่อเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและออกแบบระบบการส่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง



เอกสารอ้างอิง

- [1] Kraus,J.D., **Electromagnetic**, McGrawHill International Edition,1992.
- [2] **Transmission Line Reference Book** , 345 kV ,Second Edition , New York.
- [3] ชัยวุฒิ จัตโรทัย, **Electrical Machine**, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,เอกสารประกอบการสอน.ปีการศึกษา 2548
- [4] วีระเชษฐ์ ชันเงิน, **อิเล็กทรอนิกส์กำลัง**, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพฯ : วิ.เจ.พรินติ้ง. 2548.
- [5] สำรวย สังข์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**,กรุงเทพฯ : 2547.
- [6] เอกสาร ,**การออกแบบระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง 230 kV และ 500 kV**, การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย





ภาคผนวก ก
เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กและภาพการทดลอง



รูปที่ ก.1 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กเชิงพาณิชย์ (Electromagnetic field radiation tester)



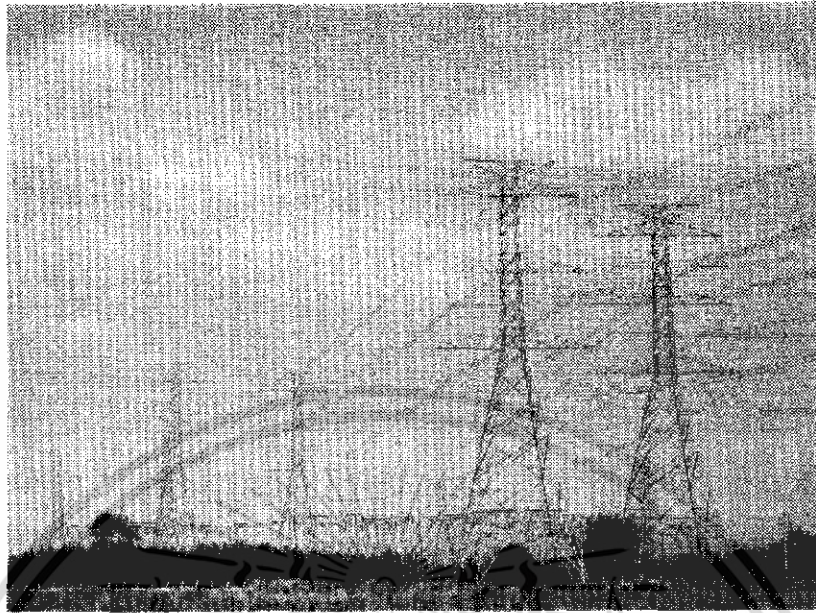
รูปที่ ก.2 เครื่องวัดสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น



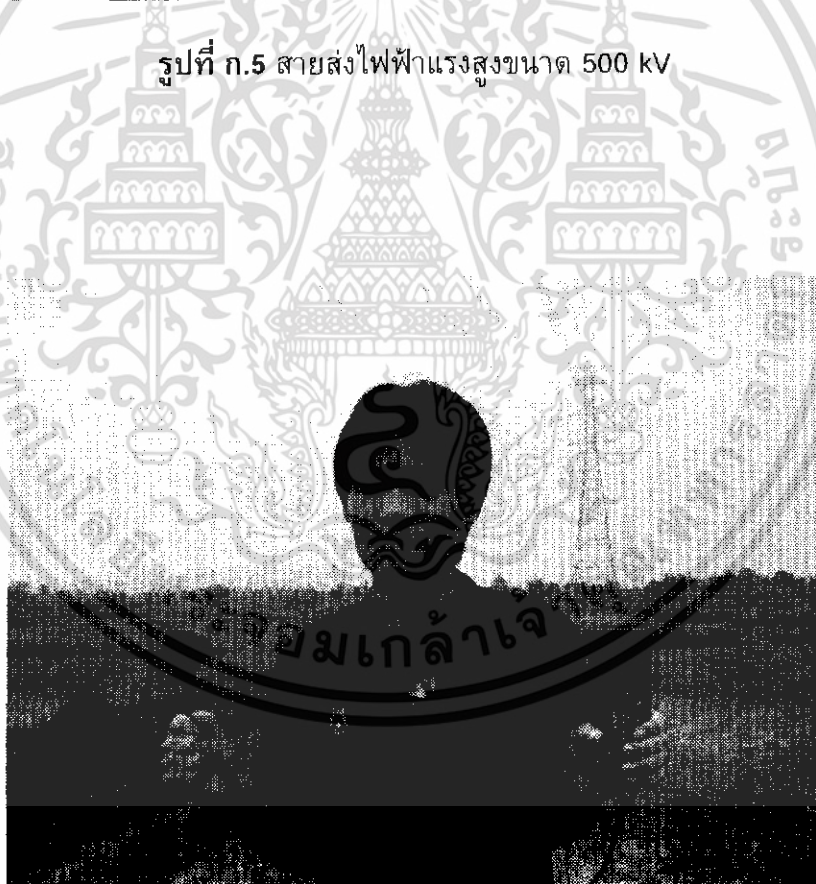
รูปที่ ก.3 ชุดทดลองวัดสนามแม่เหล็กจากสายตัวนำ



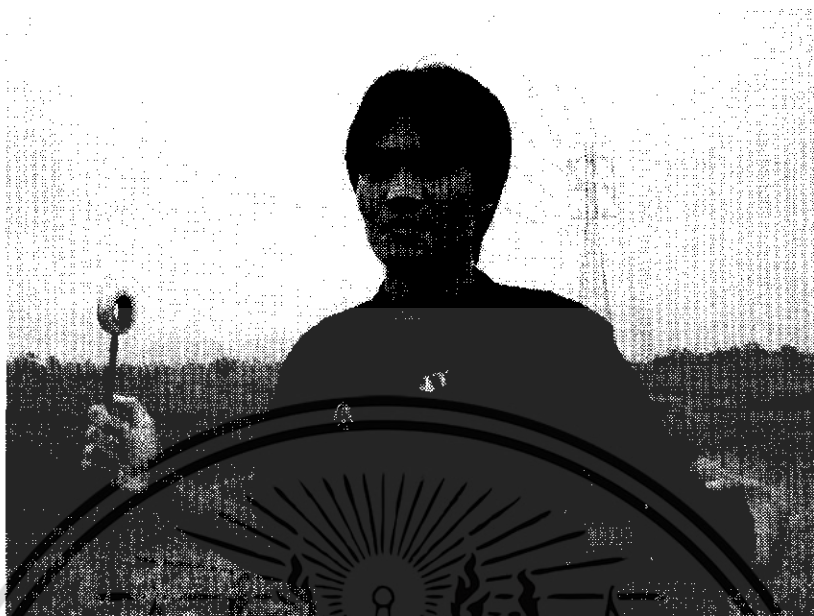
รูปที่ ก.4 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 230 kV



รูปที่ ก.5 สายส่งไฟฟ้าแรงสูงขนาด 500 kV



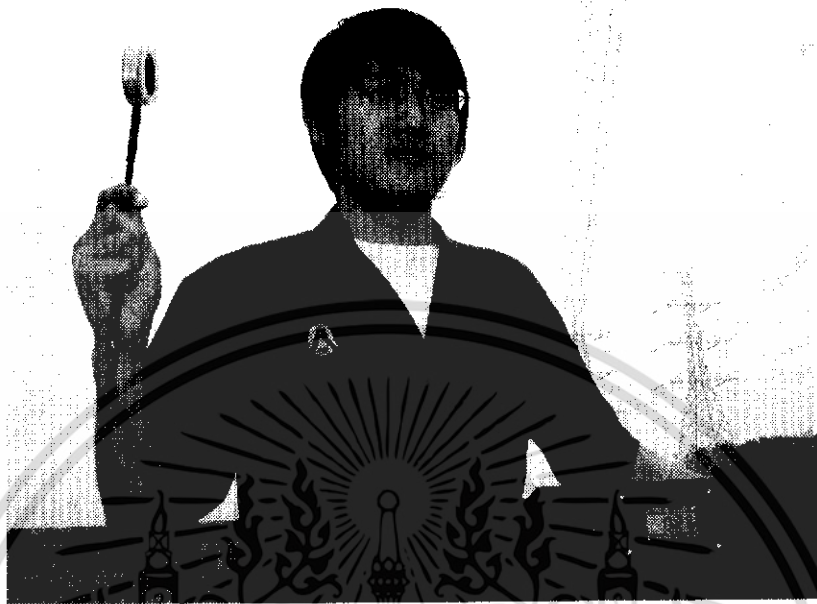
รูปที่ ก.6 ลักษณะการวัดสนามแม่เหล็กจากสายส่งแรงสูงขนาด 230 kV ด้วยเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเชิงพาณิชย์



รูปที่ ก.7 ลักษณะการวัดสนามแม่เหล็กจากสายส่งแรงสูงขนาด 230 kV ด้วยเครื่องมือวัดที่สร้าง
ขึ้น

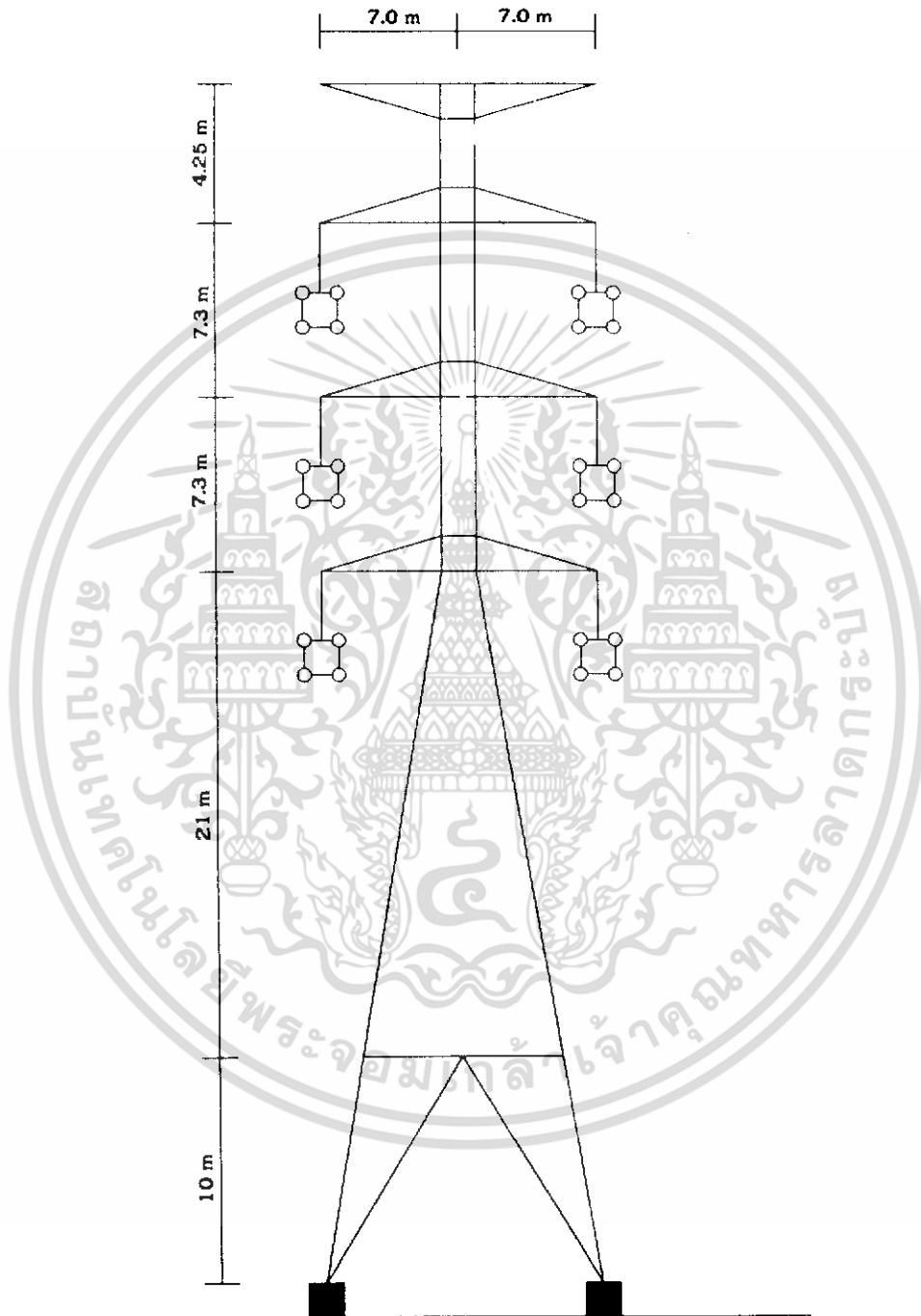


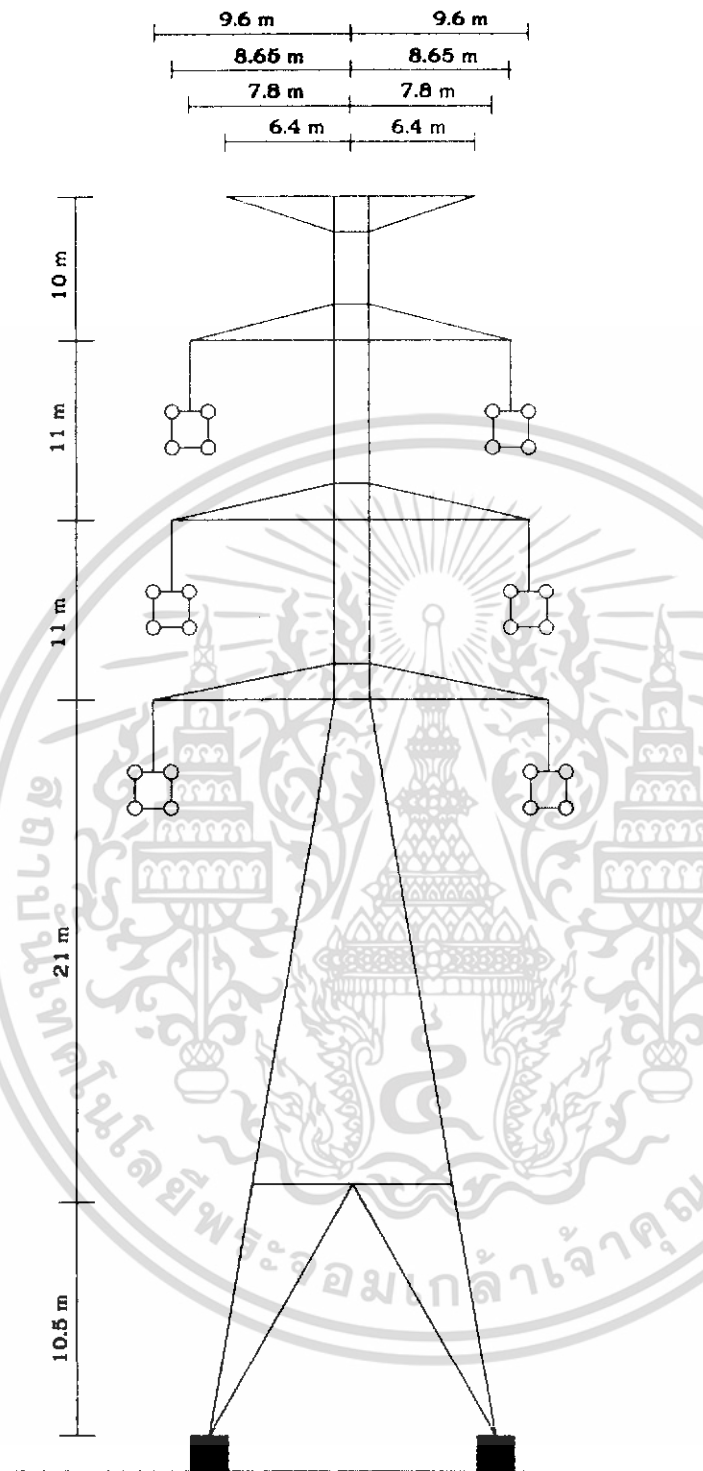
รูปที่ ก.8 ลักษณะการวัดสนามแม่เหล็กจากสายส่งแรงสูงขนาด 500 kV ด้วยเครื่องมือวัด
สนามแม่เหล็กเชิงพาณิชย์



รูปที่ ก.9 ลักษณะการวัดสนามแม่เหล็กจากสายส่งแรงสูงขนาด 500 kV ด้วยเครื่องมือวัดที่สร้างขึ้น

ภาคผนวก ข
ข้อมูลที่ให้กับโปรแกรม TLW





รายละเอียดของย่อเสาโครงเหล็ก: ควบทรา

ชนิดของเสาโครงเหล็ก	Type	มุมเบี่ยงเบน (Deflection Angle)	สัญลักษณ์
1. เสาแขวนลูกถ้วยแขวน (Suspension Tower)	SA1,DA1,WSA1,WA1	0° - 1°	S=วงจรเดี่ยว (single circuit)
	QA1,LSA1,DA1,LWA1	0° - 1°	D=วงจรคู่ (double circuit) W=สายคู่ (Twist conductor)
2. เสาแบบรับแรงดึง (Tension Tower)	SB1,DB2,WSB1,WB2,QB2	0° - 15°	L=ช่วงเสายาวเป็นพิเศษ (Long Span)
	SC1,DC2,WSC1,WC2,QC2	15° - 30°	T=ต้นสลับสาย (Transposition)
	SD1,DD2,WSD1,WD2,QD2	30° - 60°	Q=4วงจร (Quad circuit)
	DE2	0° - 90°	C=เสาพิเศษที่มีความสูงมาก 1 หรือ 2 = จำนวนสายไฟที่ขอมไฟ ขาดได้
2.2 เสาต้นปลายสาย (Deadend Tower)	SDE,DOE,WSDE,WDE,QDE	0° + 45° Slack Span 0° + Complete Deadend	
	SDE(90°),DDE(90°),WSDE(90°) WDE(90°),QDE(90°)	0° + 90° Slack Span 0° + Complete Deadend	
2.3 เสาต้นสลับสาย (Transposition Tower)	ST1,DT2,WT2	0° - 1°	DD2 มีอาร์มทอม 1 ต้น DDE มีอาร์มทอม 2 ต้น

3. ชนิดของเสาโครงเหล็ก สายส่ง 500KV.		
3.1 เสาโครงเหล็กวงจรเดี่ยว (Single Tower)	SLV(3°)	0°-3°
	SMV(3°)	0°-3°
	SMV(9°)	3°-9°
	SHV(3°)	0°-3°
	SHV(15°)	3°-15°
	STR(3°)	0°-3°
	T 40	0°-40°
	T 60	0°-60°, 0°+45° Terminal
	DL(3°)	0°-3°
	DM(3°)	0°-3°
	DM(9°)	3°-9°
3.2 เสาโครงเหล็กวงจรคู่ (Double Circuit)	DH(3°)	0°-3°
	DH(15°)	3°-15°
	DTR(0°)	ไม่มีรูปประกอบ
	DT 20	0°-20°
	DT 40	0°-40°
	DT 60	0°-60°, 0°+45° Terminal
		S=วงจรเดี่ยว(single circuit) D=วงจรคู่(double circuit) L=Light M=Medium H=Heavy T=Tension TR=ทับสลับสาย(Transposition) V = V-String Suspension

ระยะการทำงาน BAREHAND				
ระดับแรงดัน เฟส - เฟส กิโลโวลต์	ระยะความปลอดภัย			
	เฟส - กราวด์		เฟส - เฟส	
	เมตร	ฟุต/นิ้ว	เมตร	ฟุต/นิ้ว
30 - 35	0.7	2' - 4'	0.7	2' - 4'
35.1 - 46	0.8	2' - 6'	0.8	2' - 6'
46.1 - 72.5	0.9	3' - 0'	0.9	3' - 0'
72.6 - 121	1.0	3' - 4'	1.4	4' - 6'
138 - 145	1.1	3' - 6'	1.5	5' - 0'
161 - 169	1.2	3' - 8'	1.7	5' - 6'
230 - 242	1.5	5' - 0'	2.5	8' - 4'
345 - 362	2.1	7' - 0'	4.1	13' - 4'
500 - 552	3.4	11' - 0'	6.1	20' - 0'
700 - 765	4.6	15' - 0'	9.4	31' - 0'
ระยะความปลอดภัยในการใช้ HOT STICK				
ระดับแรงดัน เฟส - เฟส กิโลโวลต์	ระยะความปลอดภัยของ HOT STICK			
	เมตร	ฟุต/นิ้ว		
2.1 - 1.5	0.6	2' - 0'		
15.1 - 35	0.7	2' - 4'		
35.1 - 46	0.8	2' - 6'		
46.1 - 72.5	0.9	3' - 0'		
72.6 - 121	1.0	3' - 4'		
138 - 145	1.1	3' - 6'		
161 - 169	1.2	3' - 8'		
230 - 242	1.5	5' - 0'		
345 - 362	2.1	7' - 0'		
500 - 552	3.4	11' - 0'		
700 - 765	4.6	15' - 0'		

มาตรฐานระยะห่างที่ปลอดภัยในการก่อสร้างทางไฟฟ้า

รายการ	11 KV	22 KV	33 KV	69 KV	115 KV	230 KV	8C. 500 KV	DC. 500 KV
ระยะ SPAN 10 เมตร					350	430	490	420
ความกว้างใบแนวเขตเดินสายไฟฟ้า		4		9	12	20	36	30
จำนวนลูกถ้วย Single Suspension				7	8	14	27	27
จำนวนลูกถ้วย Tension				8	9	15	52	52
Ground Clearance								
ข้ามทางรถไฟ	9	9	9	10	11	12	16	16
ข้ามทางหลวง, บริเวณใบเมืองและปริมณฑล				7	9	10	14.5	14.5
ข้ามแนวสัญญาณระบบท. ๒ ปีกี่สิบต้นที่มีการเพาะปลูก, บริเวณที่มีเครื่องมือเกษตรกรรมเข้าถึงได้	6	7	7	7	7.5	9	13	13
๒ ปีกี่สิบต้นที่คนเดินทำบั้นจะเข้าไปถึงได้, พื้นที่ที่มีการเพาะปลูก	5	5	5	5	6	7.5	11	11
๒ ปีกี่สิบต้นที่มีการสัญจรทางเรือ				10	11	12	16	16
Crossing Clearances								
สายส่ง 230 เควี	4	4	4	4	4.3	5.8	6	6
สายส่ง 115 เควี	2	2	2	2	2.9	4.3	5.25	5.25
สายส่ง 69 เควี	2	2	2	2	2.3	3.7	4.65	4.65
สายส่ง 33 เควี	1	1	1	2	2	3.5	4.65	4.65
สายส่ง 22 เควี	1	1	1	2	2	3.5	4.65	4.65
สายโทรคมนาคม	2	2	2	3	4.5	5.2	5.25	5.25
ท่อก๊าซ							13	13

ข้อมูลจากกองวิศวกรรมสายส่ง

ข้อมูลรายละเอียดสาย Conductor OHG.

ชนิดสาย	จำนวนเส้น		พื้นที่ mm ²	เส้นผ่าศูนย์กลาง mm.	น้ำหนัก Kg./m	แรงดึงสูงสุด Kg.	รับแรงดึงสูงสุด A *
	Aluminium	Steel					
1 4/0 AWG. ACSR	6	1	85.02	14.3	0.433	3,790.00	378.00
2 366.4 MCM. ACSR(LINNET)	26	7	170.45	18.31	0.689	6,400.00	504.00
3 477 MCM. ACSR (HAWK)	26	7	241.70	21.81	0.978	8,860.00	625.00
4 477 MCM. ACSR (HEN)	30	7	241.70	22.4	1.112	10,800.00	630.00
5 477 MCM. AAC (COSMOS)	19	-	241.70	20.13	0.667	3,780.00	615.00
6 477 MCM. AAC (SYRINCA)	37	-	241.70	20.16	0.678	3,930.00	614.00
7 795 MCM. ACSR	42	7	402.83	26.8	1.274	9,120.00	845.00
8 795 MCM. ACSR (OONDOR)	54	7	402.83	27.76	1.525	12,800.00	852.00
9 1272MCM. ACSR	42	7	644.52	33.91	2.04	14,050.00	1,125.00
10 7/16" (OHG)	-	7	59.558	11.05	0.594	6,577.00	-
11 3/8" (OHG)	-	7	51.05	9.144	0.406	4,900.00	-
12 5/16" (OHG)	-	7	42.54	7.925	0.305	3,628.00	-

คุณสมบัติของเชือกชนิดต่าง ๆ

ขนาด	เชือกมปตา			เชือกมลอบ		
	กก./ม	แรงดึงสูงสุด (กก.)	แรงดึงใช้งาน (กก.)	กก./ม	แรงดึงสูงสุด (กก.)	แรงดึงใช้งาน (กก.)
6.5	0	273	55	0	615	123
9	0.1	614	123	0.1	1360	272
12	0.1	1200	240	0.1	2270	445
16	0.2	2000	400	0.2	3680	736
19	0.3	2450	490	0.2	5102	1020
22	0.3	3500	700	0	6750	1350
25	0.4	4100	820	0.4	9100	1820
28	0.5	5450	1090	0.5	11350	2270
32	0.6	6150	1230	0.7	13600	2720
38	0.4	8400	1680	0.9	18200	3640

ขนาด	เชือกประสมทึบหนักเป็นปาน			เชือกประสมทึบหนักเป็นหนัก		
	กก./ม	แรงดึงสูงสุด (กก.)	แรงดึงใช้งาน (กก.)	กก./ม	แรงดึงสูงสุด (กก.)	แรงดึงใช้งาน (กก.)
6.5	0.1	3500	400	0.2	3090	618
9	0.4	5540	1108	0.4	6880	1376
12	0.6	9720	1945	0.7	12100	2420
16	0.9	15150	3030	1	18700	3740
19	1.3	21600	4320	1.8	26300	5340
22	1.8	29200	5840	2	36200	7240
25	2.4	38000	7600	2.6	47000	9400
28	3	47800	9560	3.3	59200	11840
32	3.7	58700	11740	4.1	72700	14540
38	5.4	83700	16740	5.9	103500	20700

Fraction of Inch to millimetres	
--	--

Inch	mm
1/64	0.397
1/32	0.794
3/64	1.191
1/16	1.587
5/64	1.984
3/32	2.381
7/64	2.778
1/8	3.175
9/64	3.572
5/32	3.969
11/64	4.366
3/16	4.762
13/64	5.159

Inch	mm
7/32	5.556
15/64	5.953
1/4	6.350
17/64	6.747
9/32	7.144
19/64	7.541
5/16	7.937
21/64	8.334
11/32	8.731
23/64	9.128
3/8	9.525
25/64	9.922
13/32	10.319

Inch	mm
27/64	10.716
7/16	11.112
29/64	11.509
15/32	11.906
31/64	12.303
1/2	12.700
33/64	13.097
17/32	13.494
35/64	13.891
9/16	14.287
37/64	14.684
19/32	15.081
39/64	15.478

Inch	mm
5/8	15.875
41/64	16.272
21/32	16.669
43/64	17.07
11/16	17.452
45/64	17.859
23/32	18.256
47/64	18.653
3/4	19.050
49/64	19.447
25/32	19.844
51/64	20.241
13/16	20.637

Inch	mm
53/64	21.034
27/32	21.431
55/64	21.828
7/8	22.225
57/64	22.622
29/32	23.019
59/64	23.416
15/16	23.812
61/64	24.209
31/32	24.606
63/64	25.003
1	25.400
2	50.800

ภาคผนวก ค
ข้อมูลอุปกรณ์



LM124/LM224/LM324/LM2902

Low Power Quad Operational Amplifiers

General Description

The LM124 series consists of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to 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.

Application areas include transducer amplifiers, DC gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM124 series can be directly operated off of the standard +5V power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional $\pm 15V$ power supplies.

Unique Characteristics

- In the linear mode the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage
- The unity gain cross frequency is temperature compensated
- The input bias current is also temperature compensated

Advantages

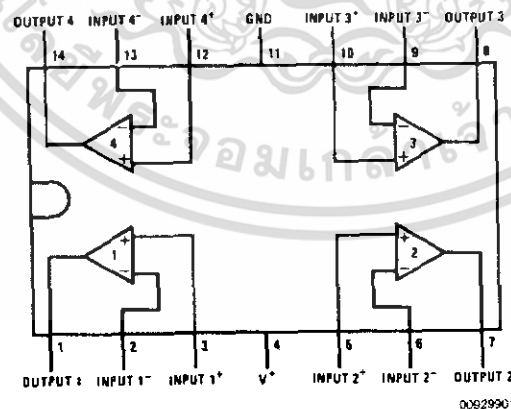
- Eliminates need for dual supplies
- Four internally compensated op amps in a single package
- Allows directly sensing near GND and V_{OUT} also goes to GND
- Compatible with all forms of logic
- Power drain suitable for battery operation

Features

- Internally frequency compensated for unity gain
- Large DC voltage gain 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain) 1 MHz (temperature compensated)
- Wide power supply range:
Single supply 3V to 32V
or dual supplies $\pm 1.5V$ to $\pm 16V$
- Very low supply current drain (700 μA) — essentially independent of supply voltage
- Low input biasing current 45 nA (temperature compensated)
- Low input offset voltage 2 mV and offset current: 5 nA
- Input common-mode voltage range includes ground
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage swing 0V to $V^+ - 1.5V$

Connection Diagrams

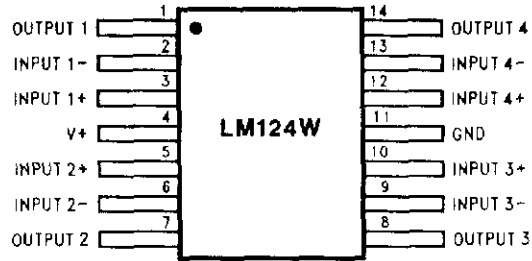
Dual-In-Line Package



Top View

Order Number LM124J, LM124AJ, LM124J/883 (Note 2), LM124AJ/883 (Note 1), LM224J, LM224AJ, LM324J, LM324M, LM324MX, LM324AM, LM324AMX, LM2902M, LM2902MX, LM324N, LM324AN, LM324MT, LM324MTX or LM2902N LM124AJRQML and LM124AJRQMLV (Note 3)
See NS Package Number J14A, M14A or N14A

Connection Diagrams (Continued)



00929-11

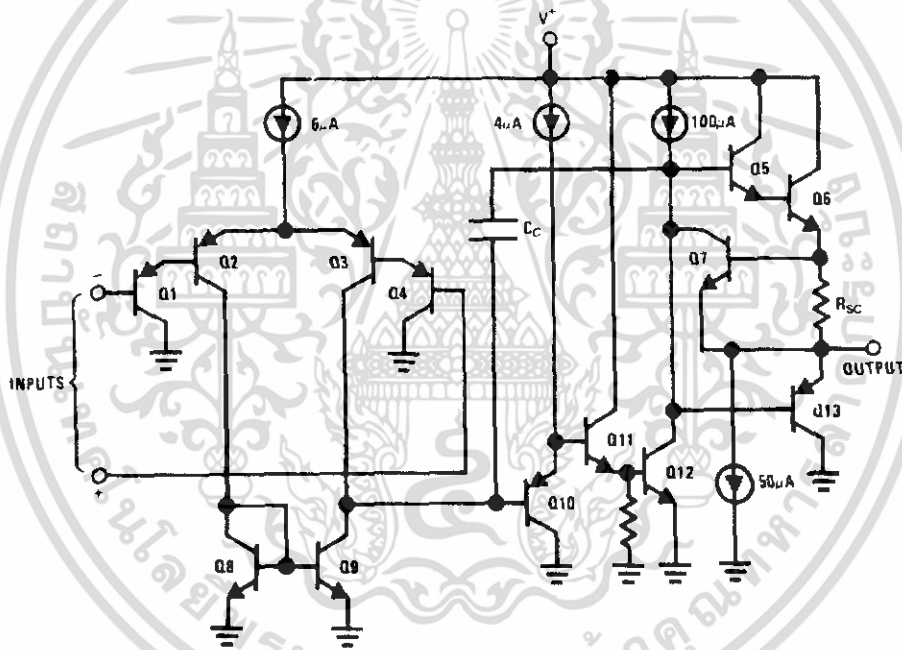
Order Number LM124AW/883, LM124AWG/883, LM124W/883 or LM124WG/883
 LM124AWRQML and LM124AWRQMLV (Note 3)
 See NS Package Number W14B
 LM124AWGRQML and LM124AWGRQMLV (Note 3)
 See NS Package Number WG14A

Note 1: LM124A available per JM38510/11006

Note 2: LM124 available per JM38510/11005

Note 3: See STD Mil DWG 5962R99504 for Radiation Tolerant Device

Schematic Diagram (Each Amplifier)



00829902

Absolute Maximum Ratings (Note 12)

Distributors for availability and specifications.

Military/Aerospace specified devices are required,
please contact the National Semiconductor Sales Office/

	LM124/LM224/LM324	LM2902
	LM124A/LM224A/LM324A	
Supply Voltage, V^*	32V	26V
Differential Input Voltage	32V	26V
Output Voltage	-0.3V to +32V	-0.3V to +26V
Output Current		
($V_{IN} < -0.3V$) (Note 6)	50 mA	50 mA
Power Dissipation (Note 4)		
Molded DIP	1130 mW	1130 mW
Cavity DIP	1260 mW	1260 mW
Small Outline Package	800 mW	800 mW
Output Short-Circuit to GND (One Amplifier) (Note 5)		
$V^* \leq 15V$ and $T_A = 25^\circ C$	Continuous	Continuous
Operating Temperature Range		-40°C to +85°C
LM324/LM324A	0°C to +70°C	
LM224/LM224A	-25°C to +85°C	
LM124/LM124A	-55°C to +125°C	
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	260°C	260°C
Soldering Information		
Dual-In-Line Package		
Soldering (10 seconds)	260°C	260°C
Small Outline Package		
Vapor Phase (60 seconds)	215°C	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C	220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.		
ESD Tolerance (Note 13)	250V	250V

Electrical Characteristics

$V^* = +5.0V$, (Note 7), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM124A			LM224A			LM324A			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	(Note 8) $T_A = 25^\circ C$	1	2		1	3		2	3		mV
Input Bias Current (Note 9)	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$, $V_{CM} = 0V$, $T_A = 25^\circ C$	20	50		40	80		45	100		nA
Input Offset Current	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$, $V_{CM} = 0V$, $T_A = 25^\circ C$	2	10		2	15		5	30		nA
Input Common-Mode Voltage Range (Note)	$V^* = 30V$, (LM2902, $V^* = 26V$), $T_A = 25^\circ C$	0	$V^* - 1.5$		0	$V^* - 1.5$		0	$V^* - 1.5$		V
Supply Current	Over Full Temperature Range $R_L = \infty$ On All Op Amps $V^* = 30V$ (LM2902 $V^* = 26V$) $V^* = 5V$		1.5 0.7	3 1.2		1.5 0.7	3 1.2		1.5 0.7	3 1.2	mA
Open-Loop Voltage Gain	$V^* = 15V$, $R_L \geq 2k\Omega$, ($V_O = 1V$ to $11V$), $T_A = 25^\circ C$	50	100		50	100		25	100		V/mV
Common-Mode Rejection Ratio	DC, $V_{CM} = 0V$ to $V^* - 1.5V$,	70	85		70	85		65	85		dB

LM124/LM224/LM324/LM2902

Electrical Characteristics (Continued)V⁺ = +5.0V, (Note 7), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM124A			LM224A			LM324A			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Rejection Ratio	T _A = 25°C										
Power Supply Rejection Ratio	V ⁺ = 5V to 30V (LM2902, V ⁺ = 5V to 26V), T _A = 25°C	65	100		65	100		65	100	dB	
Amplifier-to-Amplifier Coupling (Note 11)	f = 1 kHz to 20 kHz, T _A = 25°C (Input Referred)		-120			-120			-120	dB	
Output Current	Source	V _{IN} ⁺ = 1V, V _{IN} ⁻ = 0V, V ⁺ = 15V, V _O = 2V, T _A = 25°C			20			40			mA
	Sink	V _{IN} ⁻ = 1V, V _{IN} ⁺ = 0V, V ⁺ = 15V, V _O = 2V, T _A = 25°C			10			20			
		V _{IN} ⁻ = 1V, V _{IN} ⁺ = 0V, V ⁻ = 15V, V _O = 200 mV, T _A = 25°C			12			50			μA
Short Circuit to Ground	(Note 5) V ⁺ = 15V, T _A = 25°C		40	60		40	60		40	60	mA
Input Offset Voltage	(Note 8)			4			4			5	mV
V _{OS} Drift	R _S = 0Ω		7	20		7	20		7	30	μV/°C
Input Offset Current	I _{IN(+)} - I _{IN(-)} , V _{CM} = 0V			30			30			75	nA
I _{OS} Drift	R _S = 0Ω		10	200		10	200		10	300	pA/°C
Input Bias Current	I _{IN(+)} or I _{IN(-)}		40	100		40	100		40	200	nA
Input Common-Mode Voltage Range (Note 10)	V ⁺ = +30V (LM2902, V ⁺ = 26V)	0		V ⁺ -2	0		V ⁺ -2	0		V ⁺ -2	V
Large Signal Voltage Gain	V ⁺ = +15V (V _O Swing = 1V to 11V) R _L ≥ 2 kΩ	25			25			15			V/mV
Output Voltage Swing	V _{OH}	V ⁺ = 30V (LM2902, V ⁺ = 26V)			26			26			V
	R _L = 2 kΩ			27			28				
	V _{OL}	V ⁺ = 5V, R _L = 10 kΩ			5			20			mV
Output Current	Source	V _O = 2V			10			20			mA
	V _{IN} ⁺ = +1V, V _{IN} ⁻ = 0V, V ⁺ = 15V			10			15				
	Sink	V _{IN} ⁻ = +1V, V _{IN} ⁺ = 0V, V ⁺ = 15V			5			8			

Electrical CharacteristicsV⁺ = +5.0V, (Note 7), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM124/LM224			LM324			LM2902			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	(Note 8) T _A = 25°C		2	5		2	7		2	7	mV
Input Bias Current (Note 9)	I _{IN(+)} or I _{IN(-)} , V _{CM} = 0V, T _A = 25°C		45	150		45	250		45	250	nA
Input Offset Current	I _{IN(+)} or I _{IN(-)} , V _{CM} = 0V, T _A = 25°C		3	30		5	50		5	50	nA
Input Common-Mode Voltage Range (Note 10)	V ⁺ = 30V, (LM2902, V ⁺ = 26V), T _A = 25°C	0		V ⁺ -1.5	0		V ⁺ -1.5	0		V ⁺ -1.5	V

Electrical Characteristics (Continued)

= +5.0V, (Note 7), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM124/LM224			LM324			LM2902			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Supply Current	Over Full Temperature Range $R_i = \infty$ On All Op Amps $V^+ = 30V$ (LM2902 $V^+ = 26V$) $V^- = 5V$		1.5	3		1.5	3		1.5	3	mA
Open-Loop Voltage Gain	$V^+ = 15V$, $R_L \geq 2k\Omega$, ($V_O = 1V$ to $11V$), $T_A = 25^\circ C$	50	100		25	100		25	100		V/mV
Common-Mode Rejection Ratio	DC, $V_{CM} = 0V$ to $V^+ - 1.5V$, $T_A = 25^\circ C$	70	85		65	85		50	70		dB
Power Supply Rejection Ratio	$V^+ = 5V$ to $30V$ (LM2902, $V^+ = 5V$ to $26V$), $T_A = 25^\circ C$	65	100		65	100		50	100		dB
Common-Mode Amplifier Gain (Note 11)	$f = 1$ kHz to 20 kHz, $T_A = 25^\circ C$ (Input Referred)		-120			-120			-120		dB
Input Current	Source $V_{IN}^+ = 1V$, $V_{IN}^- = 0V$, $V^+ = 15V$, $V_O = 2V$, $T_A = 25^\circ C$	20	40		20	40		20	40		mA
	Sink $V_{IN}^- = 1V$, $V_{IN}^+ = 0V$, $V^+ = 15V$, $V_O = 2V$, $T_A = 25^\circ C$	10	20		10	20		10	20		mA
	$V_{IN}^- = 1V$, $V_{IN}^+ = 0V$, $V^+ = 15V$, $V_O = 200$ mV, $T_A = 25^\circ C$	12	50		12	50		12	50		μA
Short-Circuit Current to Ground	(Note 5) $V^+ = 15V$, $T_A = 25^\circ C$		40	60		40	60		40	60	mA
Input Offset Voltage	(Note 8)			7			9			10	mV
Input Offset Voltage Drift	$R_S = 0\Omega$			7			7			7	$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current	$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$, $V_{CM} = 0V$					100		150		200	nA
Input Offset Current Drift	$R_S = 0\Omega$			10			10		10		$pA/^\circ C$
Input Bias Current	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$		40	300		40	500		40	500	nA
Input Common-Mode Voltage Range (Note 6)	$V^+ = +30V$ (LM2902, $V^+ = 26V$)	0		$V^+ - 2$	0		$V^+ - 2$	0		$V^+ - 2$	V
Open-Loop Voltage Gain	$V^+ = +15V$ (V_O Swing = $1V$ to $11V$) $R_L \geq 2$ k Ω		25			15			15		V/mV
Output Voltage Swing	V_{OH} $V^+ = 30V$ (LM2902, $V^+ = 26V$)	$R_L = 2$ k Ω	26		26		22				V
		$R_L = 10$ k Ω	27	28	27	28	23	24			
	V_{OL} $V^+ = 5V$, $R_L = 10$ k Ω		5	20		5	20		5	100	mV
Output Current	Source $V_O = 2V$	$V_{IN}^+ = +1V$, $V_{IN}^- = 0V$, $V^+ = 15V$	10	20	10	20	10	20			mA
	Sink $V_{IN}^- = +1V$, $V_{IN}^+ = 0V$, $V^+ = 15V$	5	8	5	8	5	8				

Note 4: For operating at high temperatures, the LM324/LM324A/LM2902 must be derated based on a +125°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 88°C/W which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM224/LM224A and LM124/LM124A can be derated based on a +150°C maximum junction temperature. The dissipation is the total of all four amplifiers — use external resistors, where possible, to allow the amplifier to saturate or to reduce the power which is dissipated in the integrated circuit.

Note 5: Short circuits from the output to V^+ can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V^+ . At values of supply voltage in excess of +15V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

Note 6: This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral NPN parasitic transistor action.

Electrical Characteristics (Continued)

on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the op amps to go to the V^+ 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 states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than $-0.3V$ (at $25^\circ C$).

Note 7: These specifications are limited to $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$ for the LM124/LM124A. With the LM224/LM224A, all temperature specifications are limited to $-25^\circ C \leq T_A \leq +85^\circ C$, the LM324/LM324A temperature specifications are limited to $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$, and the LM2902 specifications are limited to $-40^\circ C \leq T_A \leq +85^\circ C$.

Note 8: $V_O = 1.4V$, $R_S = 0\Omega$ with V^+ from 5V to 30V, and over the full input common-mode range (0V to $V^+ - 1.5V$) for LM2902, V^+ from 5V to 26V.

Note 9: The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.

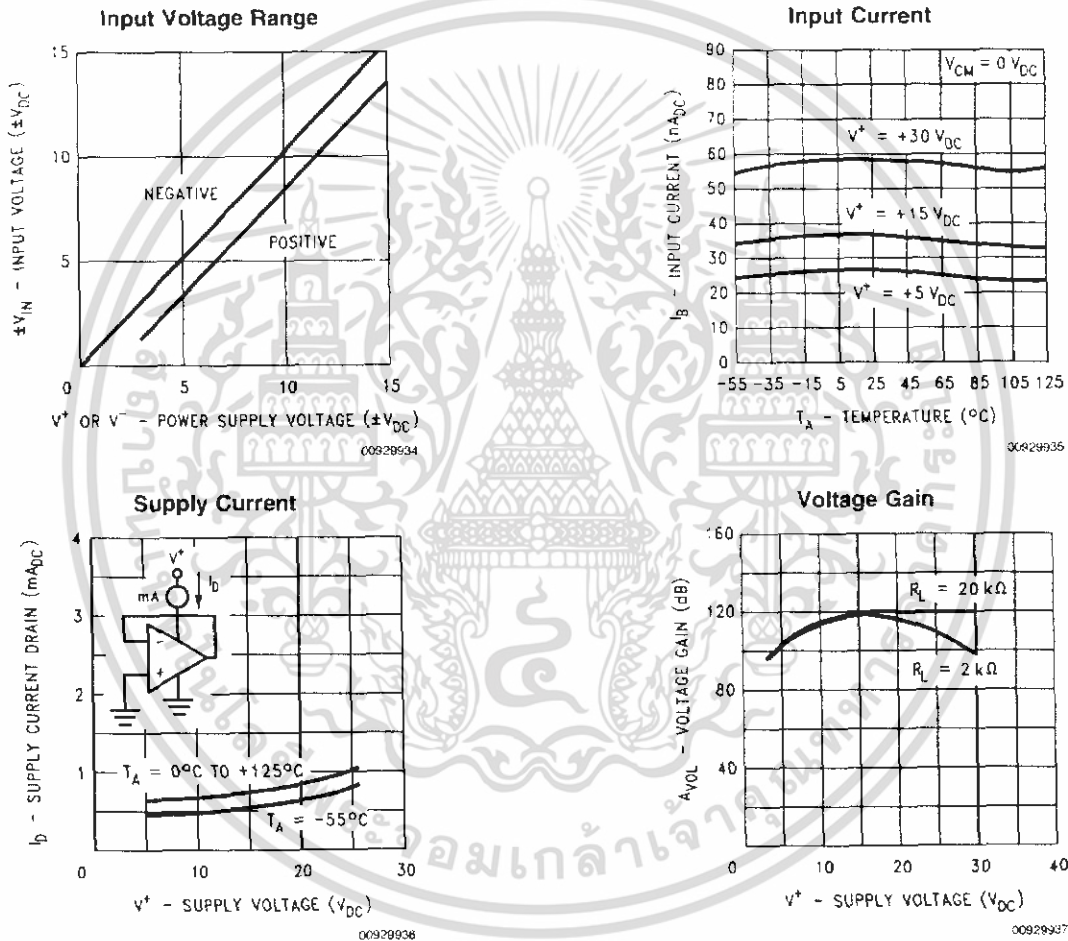
Note 10: The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than $0.3V$ (at $25^\circ C$). The upper end of the common-mode voltage range is $V^+ - 1.5V$ (at $25^\circ C$), but either or both inputs can go to $+32V$ without damage ($+26V$ for LM2902), independent of the magnitude of V^+ .

Note 11: Due to 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.

Note 12: Refer to RETS124AX for LM124A military specifications and refer to HETS124X for LM124 military specifications.

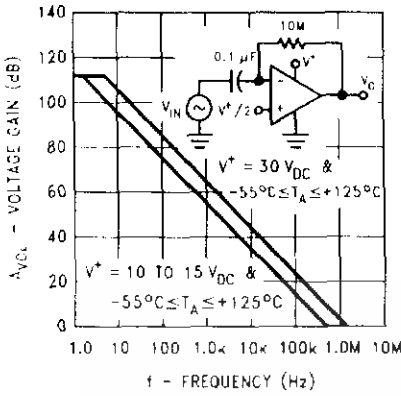
Note 13: Human body model, $1.5\text{ k}\Omega$ in series with 100 pF .

Typical Performance Characteristics



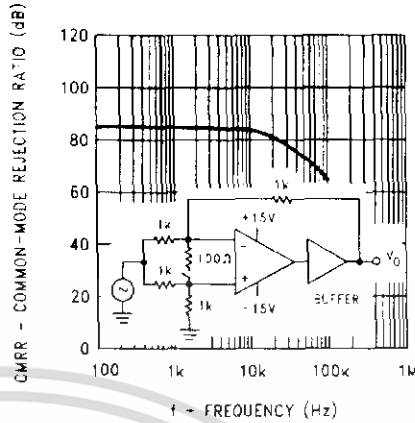
Typical Performance Characteristics (Continued)

Open Loop Frequency Response



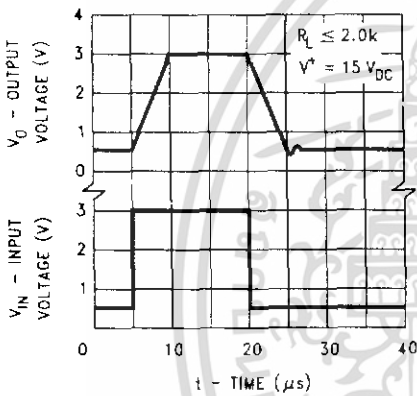
00929938

Common Mode Rejection Ratio



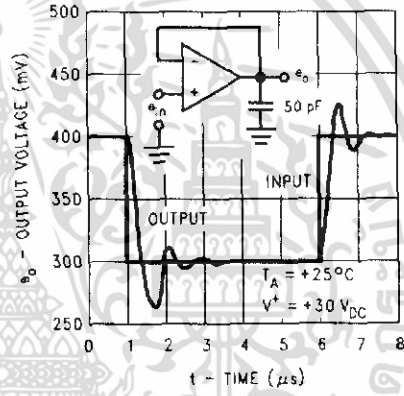
00929939

Voltage Follower Pulse Response



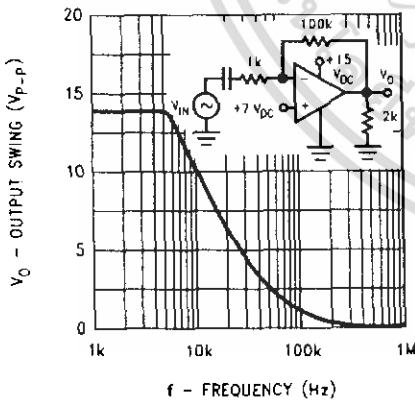
00929940

Voltage Follower Pulse Response (Small Signal)



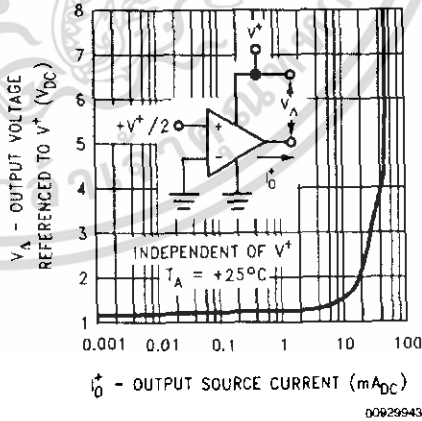
00929941

Large Signal Frequency Response



00829942

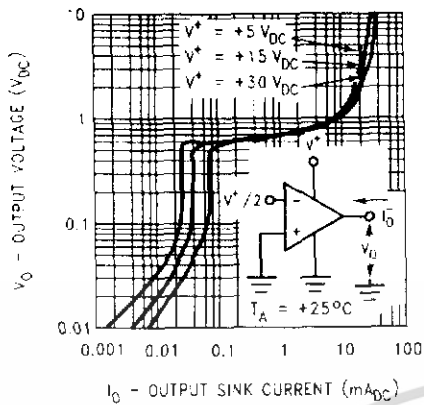
Output Characteristics Current Sourcing



00829943

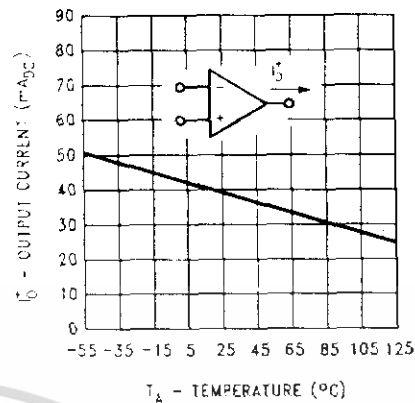
Typical Performance Characteristics (Continued)

Output Characteristics Current Sinking



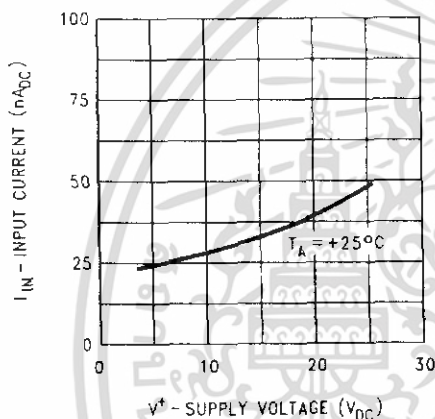
00929944

Current Limiting



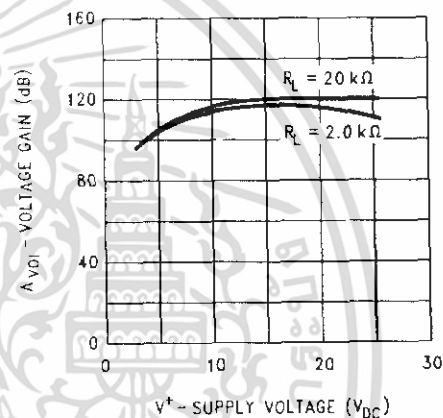
00929945

Input Current (LM2902 only)



00929946

Voltage Gain (LM2902 only)



00929947

Application Hints

The LM124 series are op amps which operate with only a single power supply voltage, have true-differential inputs, and remain in the linear mode with an input common-mode voltage of $0 V_{DC}$. These amplifiers operate over a wide range of power supply voltage with little change in performance characteristics. At $25^\circ C$ amplifier operation is possible down to a minimum supply voltage of $2.3 V_{DC}$.

The pinouts of the package have been designed to simplify PC board layouts. Inverting inputs are adjacent to outputs for all of the amplifiers and the outputs have also been placed at the corners of the package (pins 1, 7, 8, and 14).

Precautions should be taken to insure that the power supply for the integrated circuit never becomes reversed in polarity or that the unit is not inadvertently installed backwards in a test socket as an unlimited current surge through the resulting forward diode within the IC could cause fusing of the internal conductors and result in a destroyed unit.

Large differential input voltages can be easily accommodated and, as input differential voltage protection diodes are not needed, no large input currents result from large differential input voltages. The differential input voltage may be larger than V^+ without damaging the device. Protection

should be provided to prevent the input voltages from going negative more than $-0.3 V_{DC}$ (at $25^\circ C$). An input clamp diode with a resistor to the IC input terminal can be used.

To reduce the power supply drain, the amplifiers have a class A output stage for small signal levels which converts to class B in a large signal mode. This allows the amplifiers to both source and sink large output currents. Therefore both NPN and PNP external current boost transistors can be used to extend the power capability of the basic amplifiers. The output voltage needs to raise approximately 1 diode drop above ground to bias the on-chip vertical PNP transistor for output current sinking applications.

For ac applications, where the load is capacitively coupled to the output of the amplifier, a resistor should be used, from the output of the amplifier to ground to increase the class A bias current and prevent crossover distortion.

Where the load is directly coupled, as in dc applications, there is no crossover distortion.

Capacitive loads which are applied directly to the output of the amplifier reduce the loop stability margin. Values of 50 pF can be accommodated using the worst-case non-inverting unity gain connection. Large closed loop gains or resistive isolation should be used if larger load capacitance must be driven by the amplifier.



December 2005

LM108/LM108AQML Operational Amplifiers

General Description

The LM108 is a precision operational amplifier having specifications a factor of ten better than FET amplifiers over a -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$ temperature range.

The devices operate with supply voltages from $\pm 2\text{V}$ to $\pm 20\text{V}$ 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 makes possible many designs that are not practical with conventional amplifiers. In

fact, it operates from $10\text{ M}\Omega$ source resistances, introducing less error than devices like the 709 with $10\text{ k}\Omega$ sources. Integrators with drifts less than $500\ \mu\text{V}/\text{sec}$ and analog time delays in excess of one hour can be made using capacitors no larger than $1\ \mu\text{F}$.

Features

- Maximum input bias current of $3.0\ \text{nA}$ over temperature
- Offset current less than $400\ \text{pA}$ over temperature
- Supply current of only $300\ \mu\text{A}$, even in saturation
- Guaranteed drift characteristics

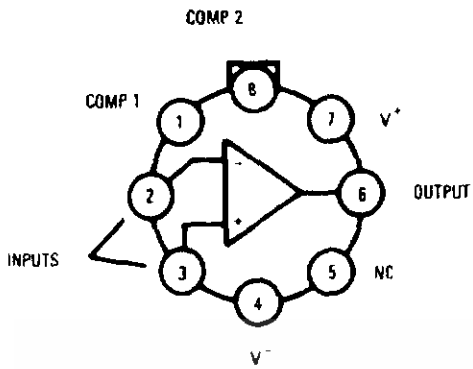
Ordering Information

NS PART NUMBER	SMD PART NUMBER	NS PACKAGE NUMBER	PACKAGE DISCIPTION
LM108AH/883		H08C	8LD Metal Can
LM108AJ-8/883		J08A	8LD CERDIP
LM108AJ/883		J14A	14LD CERDIP
LM108AWG/883		WG10A	10LD Ceramic SOIC
LM108AHRQML	5962R9863702QGA 100k rd(Si)	H08C	8LD Metal Can
LM108AHRQMLV	5962R9863702VGA 100k rd(Si)	H08C	8LD Metal Can
LM108AJ-8RQMLV	5962R9863702VPA 100k rd(Si)	J08A	8LD CERDIP
LM108AJRQML	5962R9863702QCA 100k rd(Si)	J14A	14LD CERDIP
LM108AJRQMLV	5962R9863702VCA 100k rd(Si)	J14A	14LD CERDIP
LM108AWGRQML	5962R9863702QZA 100k rd(Si)	WG10A	10LD Ceramic SOIC
LM108AWGRQMLV	5962R9863702VZA 100k rd(Si)	WG10A	10LD Ceramic SOIC
LM108AWRQML	5962R9863702QHA 100k rd(Si)	W10A	10LD CERPACK
LM108AWRQMLV	5962R9863702VHA 100k rd(Si)	W10A	10LD CERPACK
LM108H/883		H08C	8LD Metal Can
LM108J/883		J14A	14LD CERDIP
LM108J-8/883		J08A	8LD CERDIP

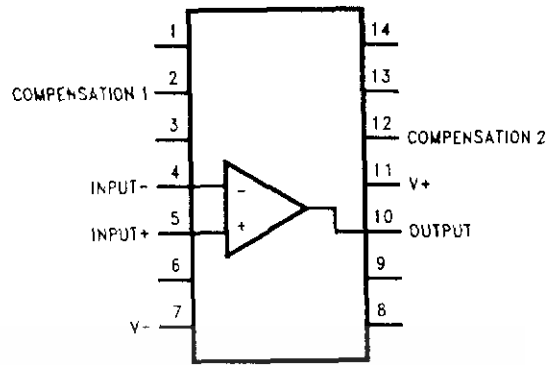
LM108/LM108AQML Operational Amplifiers

Connection Diagrams

Metal Can Package



14 Lead Dual-In-Line Package



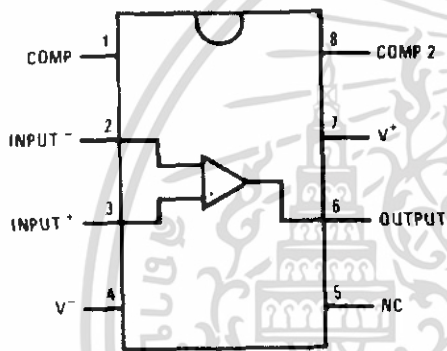
Top View

See NS Package Number J14A

*Package is connected to Pin 4 (V⁻)
 **Unused pin (no internal connection) to allow for input anti-leakage guard ring on printed circuit board layout.

See NS Package Number H08C

8 Lead Dual-In-Line Package



Top View

See NS Package Number J08A

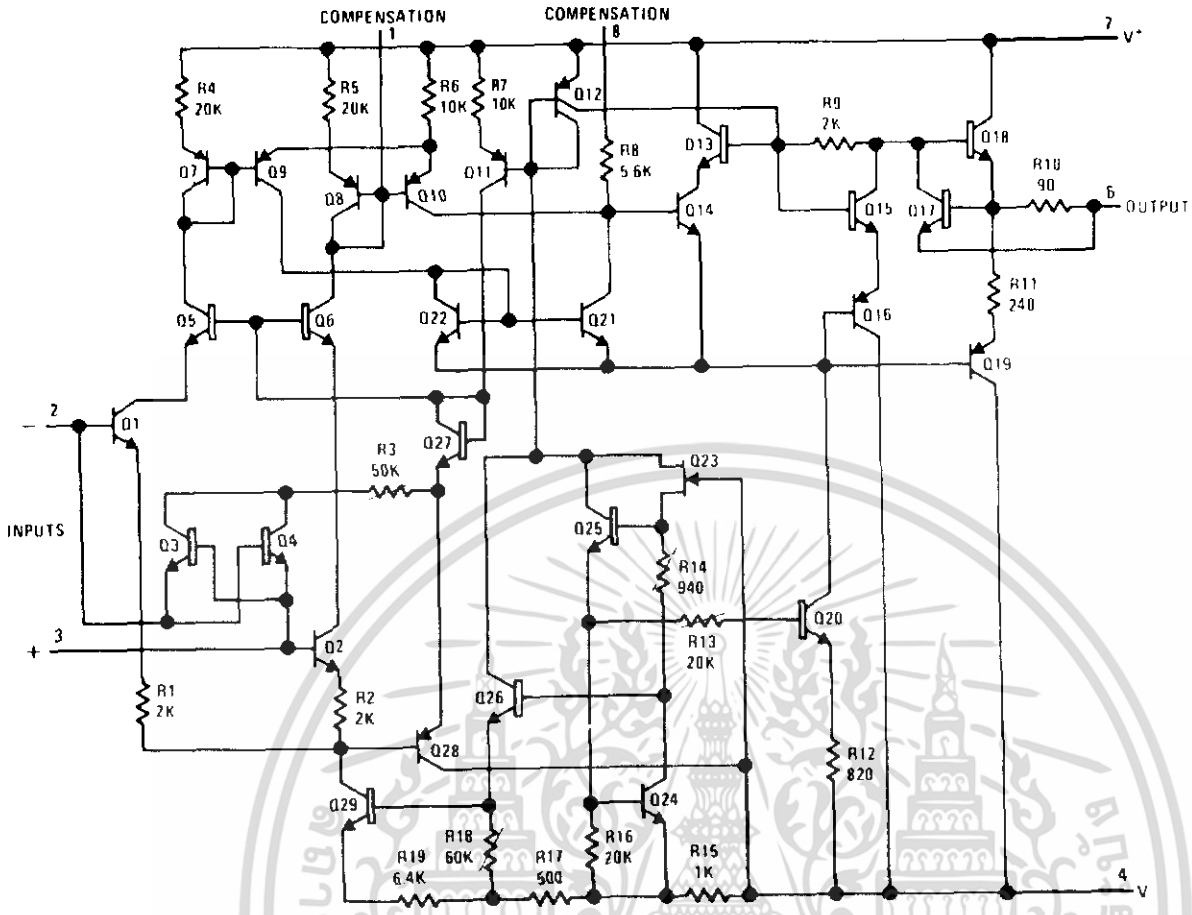
10 Lead Flatpack/SOIC Package



Top View

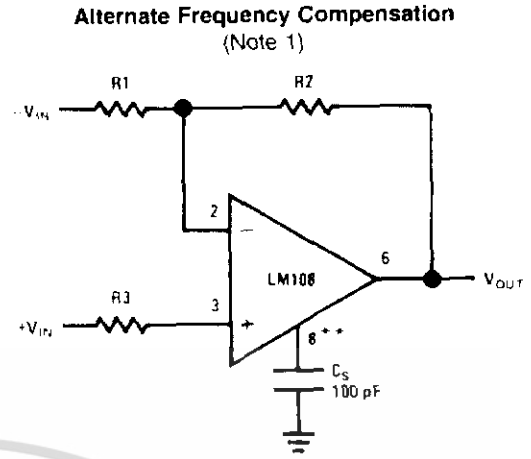
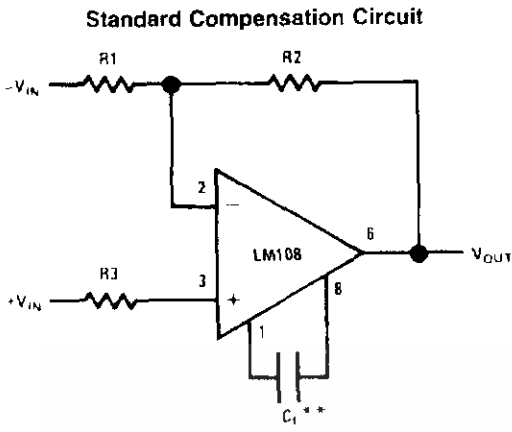
See NS Package Number W10A, WG10A

Schematic Diagram



20120508

Compensation Circuits



$$C_1 \geq \frac{R_1 C_0}{R_1 + R_2}$$

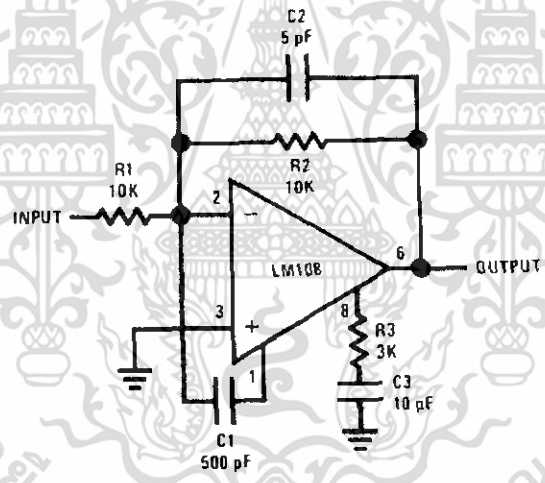
**Bandwidth and slew rate are proportional to 1/C_S

C₀ = 30 pF

**Bandwidth and slew rate are proportional to 1/C₁

Note 1: Improves rejection of power supply noise by a factor of ten.

Feedforward Compensation



20120603

Absolute Maximum Ratings (Notes 2, 3)

	LM108RH	LM108/LM108A
Supply Voltage	±22V	±20V
Power Dissipation (Note 4)		
Metal Can 8 LD	330mW @ +125°C	
CERDIP 14LD	400mW @ +125°C	
CERDIP 8LD	400mW @ +125°C	
CERPACK 10LD	330mW @ +125°C	
Ceramic SOIC 10 LD	330mW @ +125°C	
Differential Input Current (Note 5)	±10 mA	
Differential Input Voltage (Note 7)	±30V	N/A
Output Voltage (Note 6)	±20V	±15V
Output Short-Circuit Duration	Continuous	
Operating Temperature Range	-55°C ≤ T _A ≤ +125°C	
Storage Temperature Range	-65°C ≤ T _A ≤ +150°C	
Thermal Resistance		
θ _{JA}		
Metal Can 8 LD Still Air	150°C/W	
500LF / Min Air Flow	86°C/W	
CERDIP 14LD Still Air	94°C/W	
500LF / Min Air Flow	55°C/W	
CERDIP 8LD Still Air	120°C/W	
500LF / Min Air Flow	68°C/W	
CERPACK 10LD Still Air	225°C/W	
500LF / Min Air Flow	142°C/W	
Ceramic SOIC 10 LD Still Air	225°C/W	
500LF / Min Air Flow	142°C/W	
θ _{Jc}		
Metal Can 8 LD	38°C/W	
CERDIP 14LD	13°C/W	
CERDIP 8LD	17°C/W	
CERPACK 10LD	21°C/W	
Ceramic SOIC 10 LD	21°C/W	
Package Weight (typical)		
Metal Can 8 LD	990mg	
CERDIP 14LD	2,180mg	
CERDIP 8LD	1,090mg	
CERPACK 10LD	225mg	
Ceramic SOIC 10 LD	210mg	
Maximum Junction Temperature	175°C	150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	300°C	
ESD Tolerance (Note 8)	2000V	

Quality Conformance Inspection

Mil-Std-883, Method 5005 - Group A

Subgroup	Description	Temp (°C)
1	Static tests at	+25°C
2	Static tests at	+125°C
3	Static tests at	-55°C
4	Dynamic tests at	+25°C
5	Dynamic tests at	+125°C
6	Dynamic tests at	-55°C
7	Functional tests at	+25°C
8A	Functional tests at	+125°C
8B	Functional tests at	-55°C
9	Switching tests at	+25°C
10	Switching tests at	+125°C
11	Switching tests at	-55°C

LM108 Electrical Characteristics

DC Parameters

The following conditions apply to all the following parameters, unless otherwise specified.

$$V_{CC} = \pm 20V, V_{CM} = 0V$$

Symbol	Parameter	Conditions	Notes	Min	Max	Units	Sub-groups
V_{IO}	Input Offset Voltage	$V_{CM} = -15V$		-2.0	2.0	mV	1
				-3.0	3.0	mV	2, 3
		$V_{CM} = 15V$		-2.0	2.0	mV	1
				-3.0	3.0	mV	2, 3
		$V_{CC} = \pm 5V$		-2.0	2.0	mV	1
				-3.0	3.0	mV	2, 3
I_{IO}	Input Offset Current	$V_{CM} = -15V$		-0.2	0.2	nA	1
				-0.4	0.4	nA	2, 3
		$V_{CM} = 15V$		-0.2	0.2	nA	1
				-0.4	0.4	nA	2, 3
		$V_{CC} = \pm 5V$		-0.2	0.2	nA	1
				-0.4	0.4	nA	2, 3
$\pm I_{IB}$	Input Bias Current	$V_{CM} = -15V$		-0.1	2.0	nA	1
				-1.0	3.0	nA	2,
				-0.1	3.0	nA	3
				-0.1	2.0	nA	1
				-1.0	3.0	nA	2,
				-0.1	3.0	nA	3
		$V_{CM} = 15V$		-0.1	2.0	nA	1
				-1.0	3.0	nA	2,
				-0.1	3.0	nA	3
				-0.1	2.0	nA	1
				-1.0	3.0	nA	2,
				-0.1	3.0	nA	3
$V_{CC} = \pm 5V$		-0.1	2.0	nA	1		
		-1.0	3.0	nA	2,		
		-0.1	3.0	nA	3		
		-0.1	2.0	nA	1		
		-1.0	3.0	nA	2,		
		-0.1	3.0	nA	3		
PSRR	Power Supply Rejection \pm Ratio	$\pm 20V \leq V_{CC} \leq \pm 5V$		80		dB	1, 2, 3

M108 Electrical Characteristics (Continued)**DC Parameters** (Continued)

The following conditions apply to all the following parameters, unless otherwise specified.

$$V_{CC} = \pm 20V, V_{CM} = 0V$$

Symbol	Parameter	Conditions	Notes	Min	Max	Units	Sub-groups
CMRR	Common Mode Rejection Ratio	$-15V \leq V_{CM} \leq 15V$		85		dB	1, 2, 3
ISC	Short Circuit Current	$V_{CC} = \pm 15V$		-30	-1.0	mA	1, 2, 3
ISC	Short Circuit Current	$V_{CC} = \pm 15V$		1	30	mA	1, 2, 3
ISD	Power Supply Current				0.6	mA	1
					0.4	mA	2
					0.8	mA	3
	Input Resistance		(Note 13)	30		M Ω	1
VIR	Input Voltage Range	$V_{CC} = \pm 15V$	(Note 12)	14		V	1, 2
			(Note 12)		-14	V	1, 2
			(Note 12)	13.5		V	3
			(Note 12)		-13.5	V	3
			(Note 12)	15		V	1, 2, 3
			(Note 12)		-15	V	1, 2, 3
VO	Output Voltage Swing	$V_{CC} = \pm 15V, R_L = 10K\Omega$		13		V	4, 5, 6
VO	Output Voltage Swing	$V_{CC} = \pm 15V, R_L = 10K\Omega$			-13	V	4, 5, 6
AOL	Open Loop Voltage Gain	$V_{CC} = \pm 15V, R_L = 10K\Omega, V_{out} = 0 \text{ to } 10V$	(Note 10)	50		V/mV	4
			(Note 10)	25		V/mV	5, 6
AOL	Open Loop Voltage Gain	$V_{CC} = \pm 15V, R_L = 10K\Omega, V_{out} = 0 \text{ to } -10V$	(Note 10)	50		V/mV	4
			(Note 10)	25		V/mV	5, 6

AC Parameters

The following conditions apply to all the following parameters, unless otherwise specified.

$$V_{CC} = \pm 20V, V_{CM} = 0V.$$

Symbol	Parameter	Conditions	Notes	Min	Max	Units	Sub-groups
TR	Rise Time		(Note 13)		1.0	μS	7
OS	Overshoot		(Note 13)		30	%	7