สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

พฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดิน

Transient Characteristic of Grounding Electrodes

T117513

นางสาวกาญจนา พลอยคำ
นายคมสัน สว่างเรือง
นายจตุพร นิ่มนวลพานิช
นายจักรพงษ์ แซ่ด่าน

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขหมู่..........
เลขทะเบียน 117513
วัน,เดือน,ปี - 5 มี.ค. 2554

b. 1234266X
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2553

พฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดิน

Transient Characteristic of Grounding Electrodes

นางสาวกาญจนา พลอยคำ
นายคมสัน สว่างเรือง
นายจตุพร นิ่มนวลพานิช
นายจักรพงษ์ แซ่ด่าน

อาจารย์ที่ปรึกษา
รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล
ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง พฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดิน

ผู้จัดทำ

นางสาวกาญจนา พลอยคำ
นายคมสัน สว่างเรือง
นายจตุพร นิ่มนวลพานิช
นายจักรพงษ์ แซ่ด่าน

....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดิน

นางสาวกาญจนา พลอยคำ
นายคมสัน สว่างเรือง
นายจตุพร นิ่มนวลพานิช
นายจักรพงษ์ แซ่ด่าน
รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดิน เมื่อเกิดกระแสฟ้าผ่าไหลลงดินที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่ากรณีพิจารณาดินชั้นเดียว ซึ่งมีรูปแบบการติดตั้งแท่งตัวนำลงดิน 2 รูปแบบ คือ แท่งตัวนำลงดินที่วางตัวในแนวดิ่ง (Vertical Ground Rod) และแท่งตัวนำลงดินที่วางตัวในแนวนอน (Horizontal Ground Rod) โดยทำการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม EMTP/ATPDraw ซึ่งพิจารณาผลของพฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ที่เกิดขึ้นต่อระบบต่อลงดินที่มีโมเดลของดินประกอบด้วย ความต้านทาน (R) ความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุไฟฟ้า (C) โดยวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้จากรูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และกราฟขนาดและมุมของอิมพิแดนซ์ ที่ความถี่ตั้งแต่ 0 Hz -10 MHz ได้ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ต่ำค่าความต้านทาน (R) มีผลมากที่สุดต่อระบบต่อลงดินแต่ที่ความถี่สูงเราไม่สามารถคิดผลของความต้านทาน (R) เพียงอย่างเดียวได้ ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความเก็บประจุ (C)ด้วย ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าให้มีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Transient Characteristic of Grounding Electrodes

Ms.Kanjana	Ploycome	
Mr.Komsan	Sawangruang	
Mr.Jatuporn	Nimnuanpanich	
Mr.Jukkrapong	Saedan	
Assoc. Prof. Siriwat	Potivejkul	Advisor
Dr. Peerawut	Yutthakowit	Advisor

Year 2010

ABSTRACT

This research presents the results of the study of transient characteristic of grounding electrodes when a lightning current flows into the electrode. The main objective is to study and analyze the grounding electrode of a lightning protection system in case of considering a 1-layer soil, which has two types of installation forms of a vertical ground rod and a horizontal ground rod. The results are simulated by using EMTP/ATPDraw program which considers transient behavior that occurs on the grounding electrode. The grounding electrodes in the soil are modeled by resistance (R), inductance (L), and capacitance (C). From the simulation results composing voltage waveforms, current waveforms, magnitude and angle of impedance in the frequency domain in a range from 0 Hz to 10 MHz, show that the resistance (R) is the most effective to grounding system in a low frequency range but in a high frequency range the effect of inductance (L) and capacitance (C) has to be taken into account in analysis. The analysis results can be adapted for being the methods of development of the grounding system for lightning protection system in an effective way.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงได้ เนื่องจากได้รับการช่วยเหลือ สนับสนุนจากหลายๆ ท่าน โดยเฉพาะรองศาสตราจารย์ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และ ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท ที่คอยกรุณาให้คำปรึกษาและแนวคิดอย่างใกล้ชิดทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ อีกทั้งยังช่วยเหลือแก้ไขปัญหาบางอย่างให้กับคณะผู้จัดทำ โดยมิเห็นแก่ความเหน็ดเหนื่อยและรำคาญใจ และได้กรุณาตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์ให้เป็นที่เรียบร้อย

นอกจากนั้นคณะผู้จัดทำต้องขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโท และเพื่อนร่วมโครงงานปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงที่คอยเป็นที่ปรึกษาตลอดเวลา ที่สำคัญคือความร่วมมือและความสามัคคีของคณะผู้จัดทำเอง

ท้ายที่สุดนี้คณะผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่านที่มิได้กล่าวถึงที่คอยสนับสนุนทางการศึกษาทางด้านการเรียนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน รวมถึงคอยให้กำลังใจที่ดีในทุกๆ เรื่อง

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....I
ABSTRACT.....II
กิตติกรรมประกาศ.....III
สารบัญ.....IV
สารบัญรูปภาพ.....VII
สารบัญตาราง.....XI
บทที่ 1 บทนำ.....1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน.....2
1.4 ขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์.....2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงงาน.....3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....4
2.1 ฟ้าผ่า.....4
2.1.1 ฟ้าผ่าคืออะไร.....4
2.1.2 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า.....5
2.1.3 ฟ้าผ่าซ้ำหลายลำ.....6
2.2 พฤติกรรมชั่วครู่ของแท่งกราวด์ต่อลงดิน.....7
2.3 ย่านของกระแสที่มีอันตรายต่อคน.....8
2.3.1 ผลของความถี่.....8
2.3.2 ผลของขนาดและระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย.....8
2.3.3 ความเร็วในการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน.....9
2.4 จุดประสงค์ของการต่อลงดิน.....10
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของดิน.....10
2.5.1 ผลกระทบของชนิดของดิน.....10
2.5.2 ผลของความชื้นและเกลือละลายในน้ำ.....11
2.5.3 ผลของเกลือละลายในน้ำ.....11
2.5.4 ผลของขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคดิน.....11
2.5.5 ผลของอุณหภูมิและความดัน.....11
2.6 โลหะที่ใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน.....12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.1 ทองแดง (Copper) 12

2.6.2 เหล็กชุบทองแดง (Copper-Clad Steel) 12

2.6.3 อลูมิเนียม (Aluminum)....................12

2.6.4 เหล็ก (Steel)....................13

2.7 การเลือกและการต่อตัวนำ 13

2.8 แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้....................14

2.8.1 ความต้านทานร่างกายคน....................14

2.8.2 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (Touch Voltage)....................14

2.8.3 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้ (Step Voltage) 15

2.9 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 15

บทที่ 3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแท่งตัวนำต่อลงดินกรณีพิจารณาดินชั้นเดียว 17

3.1 สมการพื้นฐาน....................17

3.2 พิจารณาศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากกระแสในแท่งตัวนำที่วางอยู่ในดิน ที่มีระยะเป็นอนันต์....................19

3.3 พิจารณาแท่งตัวนำที่วางในแนวดิ่ง (Vertical grounding electrodes) 23

3.4 พิจารณาแท่งตัวนำที่วางในแนวนอน (Horizontal grounding electrodes) 26

บทที่ 4 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง....................29

4.1 ค่าพารามิเตอร์ ความต้านทาน (R) ความจุไฟฟ้า (L) และความเหนี่ยวนำ (C) ..29

4.1.1 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่ง (Vertical Ground Rods)....................29

4.1.2 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวนอน (Horizontal Ground Rods)....................30

4.2 ผลการจำลอง (Simulation) 31

4.2.1 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่ง เมื่อกระแสลำฟ้าผ่าแรก (First stroke) ขนาดหนึ่งหน่วยไหลผ่าน และรัศมีของแท่งตัวนำ (a) = 0.0127 m 32

4.2.2 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่ง เมื่อกระแสลำฟ้าผ่าซ้ำ (Sub sequence stroke) ขนาดหนึ่งหน่วยไหลผ่าน และรัศมีของแท่งตัวนำ (a) = 0.0127 m....................34

4.2.3 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวนอน เมื่อกระแสลำฟ้าผ่าแรก (First stroke) ขนาดหนึ่งหน่วยไหลผ่าน เมื่อฝังลึก (d) = 0.5 m และรัศมีของแท่งตัวนำ (a) = 0.0127 m....................37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.4 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวนอน เมื่อกระแสลำฟ้าผ่าซ้ำ (Sub sequence stroke) ขนาดหนึ่งหน่วยไหลผ่าน เมื่อฝังลึก (d) = 0.5 m และรัศมีของแท่งตัวนำ (a) = 0.0127 m 41

4.2.5 ผลของความถี่กับขนาดและมุมของอิมพีแดนซ์ของแท่งตัวนำ 46

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 51

5.1 สรุปผลการทดลอง 51

5.2 ข้อเสนอแนะ 51

เอกสารอ้างอิง 52

ภาคผนวก 53

ประวัติผู้เขียน 86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่ หน้า

2.1 ฟ้าแลบกับฟ้าผ่าร่วมกัน 4
2.2 การกระจายของประจุในก้อนเมฆ cumulonimbus 5
2.3 สตรีมเมอร์ 6
2.4 กระบวนการเกิดฟ้าผ่าซ้ำ 7
2.5 รูปคลื่นลำฟ้าผ่าแรก (First Stroke) และลำฟ้าผ่าซ้ำ (Subsequent Stroke) 8
2.6 ผลของความชื้น อุณหภูมิ และสารเคมีภายในดินที่มีต่อ ความต้านทานจำเพาะของดิน 12
2.7 วงจรอุบัติเหตุเพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส 14
2.8 วงจรอุบัติเหตุเพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว 15
2.9 วิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีวัดแบบ 4 จุด 16
3.1 แหล่งกำเนิดกระแสแบบจุด 17
3.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากกระแสในแหล่งกำเนิดจุด 18
3.3 แท่งตัวนำ 19
3.4 ศักย์ไฟฟ้าในแท่งตัวนำเมื่อพิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดจุด 19
3.5 แท่งตัวนำที่วางตัวอยู่ในดินที่มีระยะอนันต์ใช้พิจารณาค่าความจุไฟฟ้า 21
3.6 แท่งตัวนำที่วางตัวในดินที่มีระยะอนันต์ใช้พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำ 22
3.7 แท่งตัวนำฝังลงดินในแนวดิ่ง 24
3.8 แนวความคิดการคำนวณค่าความต้านทานของแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวดิ่งโดยพิจารณาจากความต้านทานของตัวนำต่อลงดินที่พิจารณาดินที่มีขอบเขตเป็นอนันต์.24
3.9 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่งเมื่อพิจารณาความจุไฟฟ้าโดยใช้วิธีภาพเสมือน (Image method) 25
3.10 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่งเมื่อพิจารณาความเหนี่ยวนำ 25
3.11 แท่งตัวนำที่ฝังดินในแนวราบ 26
3.12 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวราบเมื่อพิจารณาความต้านทาน 26
3.13 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวราบเมื่อพิจารณาความจุไฟฟ้า 27
3.14 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวราบพิจารณาความเหนี่ยวนำ 28
4.1 วงจรสมมูลการวิเคราะห์แบบลำฟ้าผ่าแรก และลำฟ้าผ่าซ้ำ 31
4.2 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 5 F/m , C = 90.15 pF , μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω 32
4.3 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 10 F/m , C = 180.29 pF , μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω 32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.4 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 50 F/m , C = 901.45 pF , μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω 33

4.5 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 5 F/m , C = 237.82 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω 33

4.6 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 10 F/m , C = 476.19 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω 33

4.6 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 50 F/m , C = 2380.95 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω 34

4.8 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 5 F/m , C = 90.15 pF , μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω 34

4.9 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 10 F/m , C = 180.29 pF , μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω 35

4.10 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 50 F/m , C = 901.45 pF , μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω 35

4.11 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 5 F/m , C = 237.82 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω 35

4.12 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 10 F/m , C = 476.19 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω 36

4.13 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 50 F/m , C = 2380.95 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω 36

4.14 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 5 F/m , C = 133.32 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω 37

4.15 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 10 F/m , C = 266.63 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω 37

4.16 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 50 F/m , C = 1333.17 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω 38

4.17 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 5 F/m , C = 222.44 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω 38

4.18 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 10 F/m , C = 444.44 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.19 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 50 F/m , C = 2222.22 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω 39

4.20 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 5 F/m , C = 303.03 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω 39

4.21 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 10 F/m , C = 606.06 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω 39

4.22 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 50 F/m , C = 3030.30 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω 40

4.23 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 5 F/m , C = 375 pF , μ_r = 1 H/m , L = 15.70 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω 40

4.24 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 10 F/m , C = 758 pF , μ_r = 1 H/m , L = 15.70 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω 40

4.25 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 50 F/m , C = 3790 pF , μ_r = 1 H/m , L = 15.70 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω 41

4.26 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 5 F/m , C = 133.32 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω 41

4.27 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 10 F/m , C = 266.63 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω 42

4.28 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 50 F/m , C = 1333.17 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω 42

4.29 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 5 F/m , C = 222.44 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω 42

4.30 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 10 F/m , C = 444.44 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω 43

4.31 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 50 F/m , C = 2222.22 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω 43

4.32 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 5 F/m , C = 303.03 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω 43

4.33 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 10 F/m , C = 606.06 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω 44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.34 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 50 F/m , C = 3030.30 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω 44

4.35 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 5 F/m , C = 379 pF , μ_r = 1 H/m , L = 15.7 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω 44

4.36 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 10 F/m , C = 758 pF , μ_r = 1 H/m , L = 15.7 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω 45

4.37 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 50 F/m , C = 3790 pF , μ_r = 1 H/m , L = 15.7 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω 45

4.38 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 50 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 46

4.39 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 100 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 46

4.40 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 200 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 47

4.41 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 500 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 47

4.42 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 1000 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 47

4.43 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 2000 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 48

4.44 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 50 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 48

4.45 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 100 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 48

4.46 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 200 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 49

4.47 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 500 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 49

4.48 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 1000 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 49

4.49 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 2000 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ขั้นตอนของการทำปริญญานิพนธ์ 2
2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินบางชนิด 11
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 2.4 m..................................29
4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 6 m......................................29
4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 3 m......................................30
4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 6 m......................................30
4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 9 m......................................31
4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 12 m....................................31

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถสร้างความเสียหายเป็นอย่างมาก ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงสู่ระบบไฟฟ้า จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในระบบนั้นๆ อีกทั้งฟ้าผ่ามีการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูงทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายไปรบกวนระบบ เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในระบบวงจรไฟฟ้าเป็นแรงดันเสิร์จ และเป็นแรงดันเกินวิ่งไปตามสายไฟเข้าไปสู่อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อแรงดันสภาวะชั่วครู่ (Transient) ส่วนกระแสฟ้าผ่าที่ไหลลงสู่ดินก็อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในบริเวณนั้น อันเนื่องมาจาแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส

จากเหตุผลดังกล่าวจึงจำเป็นที่จะต้องมีเส้นทางให้กระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ดินได้อย่างสะดวกและรวดเร็วเพื่อลดผลกระทบของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นโดยการออกแบบแท่งกราวด์ต่อลงดินให้เหมาะสมเพื่อช่วยลดแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์พฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ที่มีผลต่อระบบต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยพิจารณาเป็นดินชั้นเดียว เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) ค่าความซึมซาบได้ของสนามไฟฟ้า (ε) และค่าความซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็ก (μ_0) ต่าง ๆ กัน และทำการวิเคราะห์ผลของกระแสฟ้าผ่าแบบรูปคลื่นลำฟ้าผ่าแรก (First stroke) และลำฟ้าผ่าซ้ำ (Subsequent stroke)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาผลกระทบของกระแสฟ้าผ่าที่วิเคราะห์แบบลำฟ้าผ่าแรก (First stroke) และ ลำฟ้าผ่าซ้ำ (Subsequent stroke)
2. เพื่อคำนวณและวิเคราะห์ผลของค่าความต้านทาน ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุไฟฟ้าของแท่งตัวนำต่อลงดินที่มีผลมาจากกระแสฟ้าผ่า
3. เพื่อจำลองพฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดินกรณีพิจารณาเป็นดินชั้นเดียวผ่านโปรแกรม EMTP/ATP Draw
4. เพื่อวิเคราะห์และจำลองผลของความถี่ที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ของแท่งตัวนำต่อลงดินผ่านโปรแกรม EMTP/ATP Draw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงงาน

1. ศึกษาและวิเคราะห์กระแสฟ้าผ่าที่มีผลกระทบต่อการต่อลงดิน เมื่อเป็นรูปคลื่นฟ้าลำผ่าแรก (First stroke) และลำฟ้าผ่าซ้ำ (Subsequent stroke)
2. คำนวณค่าความต้านทาน, ความเหนี่ยวนำ และ ความจุไฟฟ้า ที่ใช้ในการวิเคราะห์แท่งตัวนำต่อลงดินร่วมกับวิธี Image method
3. จำลองและวิเคราะห์ระบบต่อลงดินที่พิจารณากรณีดินชั้นเดียวผ่านโปรแกรม EMTP/ATPDraw และวิเคราะห์พฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดิน

1.4 ขั้นตอนการทำปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาระบบต่อลงดิน
2. ศึกษาวิธีการคิดแบบ Image method
3. คำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
4. ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการ simulation ระบบการต่อลงดิน EMTP/ATPDraw
5. จำลองผลจากโปรแกรม EMTP/ATPDraw
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากโปรแกรม EMTP/ATPDraw
7. สรุป และประเมินผล
8. จัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนของการทำปริญญานิพนธ์

การทำงาน	พ.ศ. 2553							พ.ศ. 2554	
	ภาคเรียนที่ 1					ภาคเรียนที่ 2			
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
1. ศึกษาระบบต่อลงดิน	↔	↔							
2. ศึกษาวิธีการคิดแบบ Image method		↔	↔	↔					
3. คำนวณค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง				↔	↔				
4. ศึกษาโปรแกรมที่ใช้ในการ simulation ระบบการต่อลงดิน EMTP/ATPDraw				↔	↔	↔			
5. จำลองผลจากโปรแกรม EMTP/ATPDraw						↔	↔		
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากโปรแกรม EMTP/ATPDraw							↔	↔	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟ้าผ่า [1]

2.1.1 ฟ้าผ่าคืออะไร

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ Benjamin Franklin และลูกชาย Thomas Folger ได้พิสูจน์ให้เห็นชัด ตั้งแต่ ปีค.ศ.1752 ที่เมืองฟิลาเดเฟีย สหรัฐอเมริกาว่า ฟ้าผ่าคือสปาร์กไฟฟ้า (lightning is electric spark) อันเป็นผลของการเกิดดิสชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ นับเป็นการเริ่มต้นของการศึกษาเชิงวิทยาศาสตร์ เพื่อหาข้อมูลเกี่ยวกับฟ้าผ่า การค้นพบนี้ เบนจามินได้พัฒนาหลักการป้องกันด้วยเสาล่อฟ้า เรียกว่า Franklin rod มาจนถึงทุกวันนี้

การสะสมประจุในก้อนเมฆมีปริมาณมาก ทำให้ก้อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูง ตั้งแต่ 10 เมกะโวลต์ ถึง 100 เมกะโวลต์ และเกิดดิสชาร์จระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลก เป็นวาบฟ้าผ่า (ground flash) หรือระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือภายในเมฆก้อนเดียวกันเป็น ฟ้าแลบ (air discharge) ฟ้าผ่าและฟ้าแลบมีโอกาสเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยธรรมชาติปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นฟ้าแลบ การศึกษาวิจัยของมนุษย์ส่วนมากจะให้ความสนใจเกี่ยวกับฟ้าผ่ามากกว่า

รูปที่ 2.1 ฟ้าแลบกับฟ้าผ่าร่วมกัน

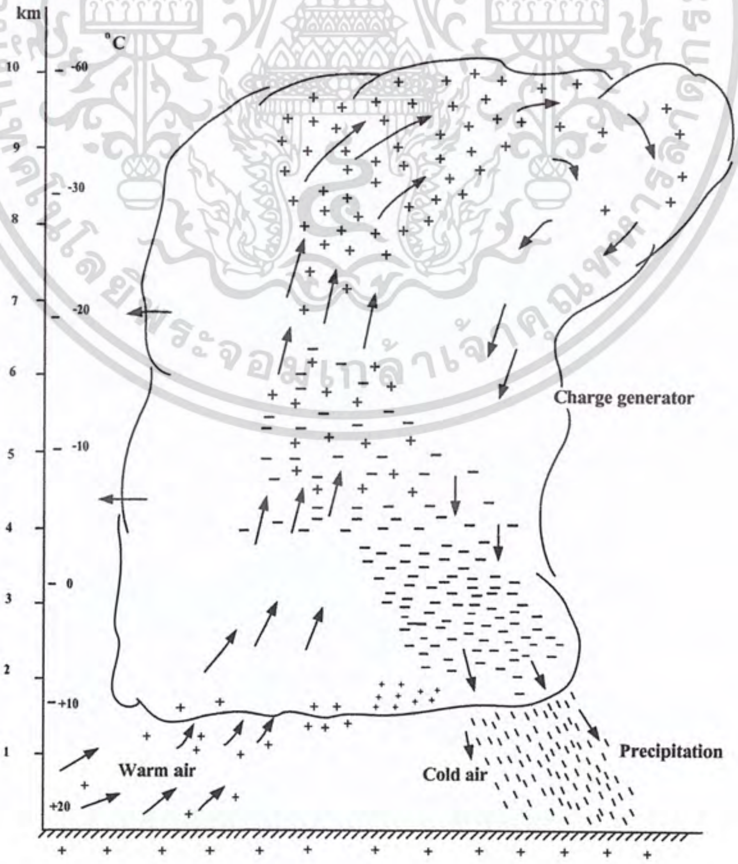
สิ่งต่างๆ ทั้งหลายในโลกนี้จะมีทั้งคุณและโทษอยู่ในตัว แต่ฟ้าผ่าดูเหมือนจะมีแต่โทษ เนื่องจากลำฟ้าผ่ามีความร้อนสูง โดยเฉพาะที่แกนลำฟ้าผ่ามีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 K จึงทำให้เกิดเพลิงไหม้แก่สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าได้ จากการวัดค่ากระแสฟ้าผ่าก็มีค่านับเป็นหลายสิบเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อยกิโลแอมป์ ซึ่งกระแสขนาดนี้ที่เกิดขึ้นในในช่วงระยะเวลาสั้นและรวดเร็ว ย่อมทำให้เกิดแรงกลแรงบิดและแรงระเบิดได้มากมาย ฉะนั้นเมื่อฟ้าผ่าที่ใดก็มักจะทำให้สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าเกิดระเบิดเสียหาย นอกจากนั้นแล้วการเปลี่ยนแปลงของกระแสฟ้าผ่ามีอัตราสูง จึงทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสาร เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในระบบวงจรไฟฟ้าเป็นแรงดันเสิร์จ และเป็นแรงดันเกินวิ่งไปตามสายไฟเข้าสู่อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อแรงดันทรานเซี้ยนต์ ส่วนกระแสฟ้าผ่าที่ไหลลงสู่ดินก็อาจเป็นอันตรายแก่สิ่งมีชีวิตอยู่ในบริเวณนั้น อันเนื่องมาจากแรงดันช่วงก้าว และแรงดันสัมผัสได้

2.1.2 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า

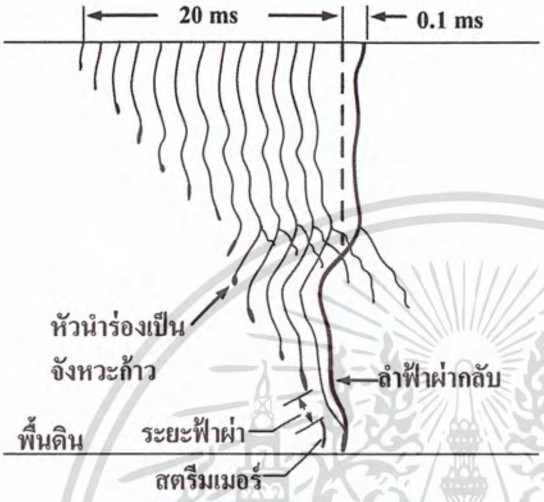
โดยทั่วไปฟ้าผ่าจะเริ่มต้นในก้อนเมฆที่มีประจุสะสม ระดับสูง 1.5-10 กิโลเมตร เหนือพื้นโลกซึ่งมีการกระจายของประจุ ที่ฐานของก้อนเมฆจะเป็นประจุลบ ส่วนบนของก้อนเมฆเป็นประจุบวก จุดเริ่มต้นของการเกิดฟ้าผ่า ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่กลุ่มประจุลบ คือ ที่ฐานของก้อนเมฆเพราะอยู่ใกล้โลก เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าถึงจุดวิกฤติ E_C ในก้อนเมฆประมาณ 10 kV/cm (ในบรรยากาศที่ระดับพื้นโลก $E_C \approx 30$ kV/cm) ก็จะเกิดไอออไนเซชันตามหลักการเกิดดิสชาร์จในก๊าซ



รูปที่ 2.2 การกระจายของประจุในก้อนเมฆ cumulonimbus

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดไอออไนเซชันของอากาศจะเกิดเป็นลีดเดอร์ (leader) หรือหัวนำร่อง มีทิศทางลงสู่พื้นโลกในลักษณะจังหวะก้าว (stepped leader) แบบสุ่มๆ ดังภาพสเก็ตในรูปที่ 2.3 มีช่วงก้าวตั้งแต่ 3 เมตร ถึง 200 เมตร เฉลี่ยช่วงก้าวประมาณ 50 เมตร ในทิศทางที่แตกตัวง่ายที่สุด ความเร็ว 10–100 km/s แต่ละจังหวะที่ก้าวจะหยุดพักราว 10–50 μs ก่อนที่จะกระโดดต่อไป



a) ภาพสเก็ตการขยายตัวของหัวนำร่อง

b) สตรีมเมอร์จะวิ่งขึ้นจากพื้นโลก

รูปที่ 2.3 สตรีมเมอร์

เมื่อหัวนำร่องเข้ามาใกล้พื้นโลก จะทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำที่พื้นโลก ที่ยอดแหลมของอาคาร สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ เป็นต้น เกิดไอออไนซ์เป็นสตรีมเมอร์ มีความยาว 1–100 (เฉลี่ย 20 m) วิ่งเข้าหาหัวนำร่อง ดังภาพสเก็ตในรูปที่ 2.3 จนมาพบกันจะเกิดเป็นลำฟ้าผ่า (main stroke) มีแสงจ้าจากพื้นโลกวิ่งไปหาก้อนเมฆด้วยความเร็วสูงกว่า $50x10^3$ km/s ตามแนวที่หัวนำร่องกรุยทางลงมาดังรูปที่ การเคลื่อนที่ของประจุในลำฟ้าผ่า ก็คือ กระแสฟ้าผ่านั่นเอง

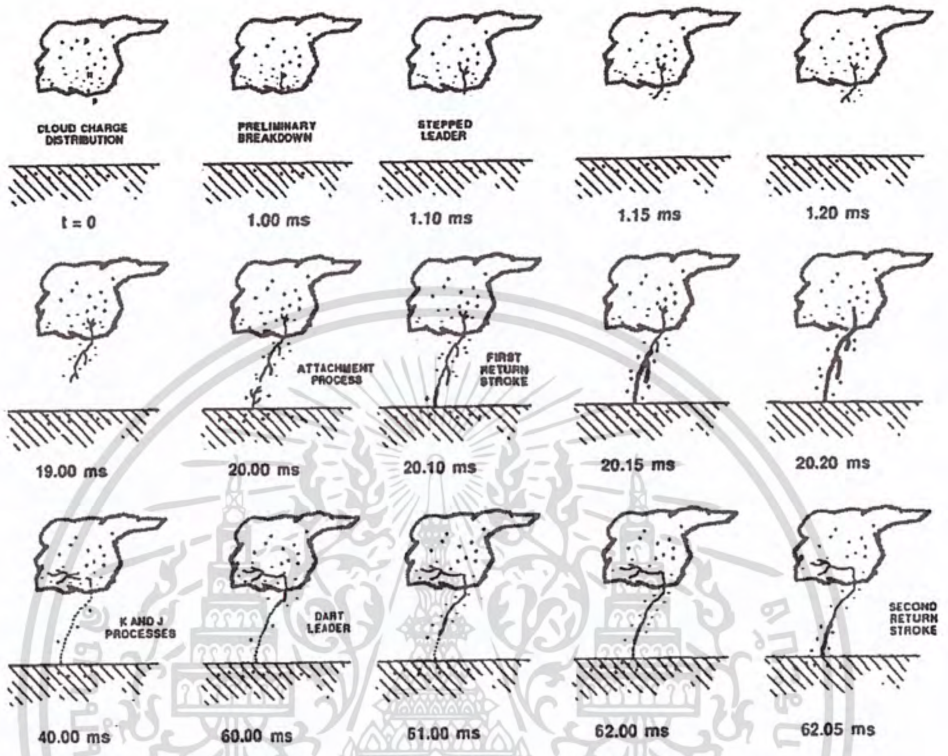
ระยะก้าวสุดท้ายที่หัวนำร่องกระโดดเข้าหาสตรีมเมอร์ เรียกว่าระยะฟ้าผ่า (striking distance) มีระยะเฉลี่ยประมาณ 50 เมตร

2.1.3 ฟ้าผ่าซ้ำหลายลำ

ถ้าสังเกตดูลำฟ้าผ่าขณะที่เกิดฟ้าผ่า มักจะพบว่า มีลำฟ้าผ่าตามแนวลำฟ้าผ่าครั้งแรกๆซึ่งบางทีก็มีการผ่าซ้ำหลายครั้ง ปรากฏการณ์เช่นนี้ อาจอธิบายได้ว่า ในก้อนเมฆอาจจะมีศูนย์กลางรวมกลุ่มของประจุหลายแห่ง เมื่อกลุ่มประจุใดมีความเครียดสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตก่อน ก็จะดิสชาร์จลงสู่พื้นโลกเป็นลำฟ้าผ่าแรก ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว หลังจากกลุ่มประจุแรกดิสชาร์จไปหมดแล้ว ก็จะทำให้เกิดสตรีมเมอร์ระหว่างกลุ่มประจุในก้อนเมฆ และเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดิสชาร์จลงสู่พื้นโลกตามแนวลำฟ้าผ่าลำแรก ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าอากาศในแนวลำฟ้าผ่าวิ่งลงมาก่อนนั้นยังคืนตัวสภาพฉนวนได้ไม่ทันที กล่าวคือยังมีสภาพนำไฟฟ้า เนื่องจากมีไอออนอยู่ จึงทำให้ประจุในก้อนเมฆจากกลุ่มอื่นดิสชาร์จได้ง่ายตามแนวนี้เป็น ฟ้าผ่าซ้ำ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กระบวนการเกิดฟ้าผ่าซ้ำ [2]

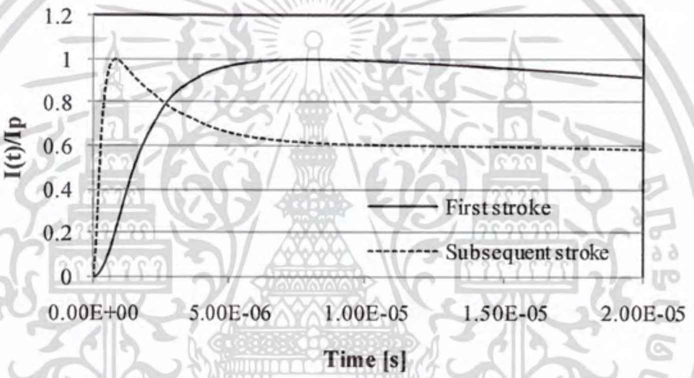
2.2 พฤติกรรมชั่วครู่ของแท่งกราวด์ต่อลงดิน [3]

ระบบต่อลงดินทำหน้าที่ควบคุมแรงดันเกินที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าหรือกระแสผิดพร่อง มิให้อันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานหรืออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า นอกจากนั้นระบบต่อลงดินถูกใช้ทั้งในระบบไฟฟ้ากำลังและระบบสื่อสารเพื่อใช้เป็นระดับแรงดันอ้างอิง พฤติกรรมของระบบต่อลงดินในย่านความถี่ต่ำหรือความถี่พลังงานนั้นตลอดจนการออกแบบถูกเข้าใจอย่างดีเป็นอย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามในกรณีที่กระแสฟ้าผ่าไหลผ่านระบบต่อลงดิน พฤติกรรมของระบบต่อลงดินจะมีลักษณะเป็นพลวัตรและค่อนข้างมีความแตกต่างจากพฤติกรรมในย่านความถี่ต่ำเนื่องจากกระแสฟ้าผ่ามีองค์ประกอบเชิงความถี่ในย่านความถี่ต่ำมากใกล้ย่านกระแสตรงไปถึงความถี่สูงระดับสิบเมกกะเฮิรตซ์ ดังรูปที่ 2.5 โดยค่าเวลายอดคลื่น (t_{peak}) ของลำฟ้าผ่าฟ้าซ้ำ จะเร็วกว่าค่า ของลำฟ้าผ่าแรก ซึ่งค่า เวลายอดคลื่น ของลำฟ้าผ่าแรก เท่ากับ 8 μs และค่าเวลายอดคลื่นของลำฟ้าผ่าซ้ำเท่ากับ 0.8μs และในบางกรณีประสิทธิภาพในการป้องกันของระบบต่อลงดินอาจถูกลดทอนในกรณีเมื่อกระแสฟ้าผ่าไหลผ่านเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพในย่านความถี่ต่ำหรือความถี่พลังงาน โดยองค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการป้องกันของระบบต่อลงดิน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ขนาด ตำแหน่งและรูปทรงของระบบต่อลงดิน
2. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดินที่ติดตั้งระบบต่อลงดิน
3. ขนาดและรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่า

กระแสฟ้าผ่ามีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมพลวัตรของระบบต่อลงดิน กรณีที่กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นสั้นประสิทธิภาพเชิงพลวัตรของระบบต่อลงดินจะแย่ลงเนื่องจากผลของพฤติกรรมความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductive Behavior) กล่าวคือ ค่ายอดของกระแสและแรงดันไม่ได้เกิดขึ้นที่เวลาเดียวกัน และที่ขนาดกระแสค่ายอดที่เท่ากันของกระแสฟ้าผ่าและกระแสความถี่ต่ำ ค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากกระแสฟ้าผ่าจะมีค่าสูงกว่าแรงดันเกินที่เกิดจากกระแสที่ความถี่ต่ำอย่างมากเนื่องจากพฤติกรรมความเหนี่ยวนำ และกรณีที่กระแสอิมพัลส์ค่าสูงประสิทธิภาพเชิงพลวัตรของระบบต่อลงดินจะถูกปรับปรุงเนื่องจากดินเกิดการดิสชาร์จบางส่วนหรือเกิดไอออไนเซชันในดิน (Soil Ionization)



รูปที่ 2.5 รูปคลื่นลำฟ้าผ่าแรก (First Stroke) และลำฟ้าผ่าซ้ำ (Subsequent Stroke) [4]

2.3 ย่านของกระแสที่มีอันตรายต่อคน [5]

ย่านของกระแสที่มีอันตรายต่อคนขึ้นอยู่กับระยะเวลา ขนาดและความถี่ของกระแสที่ไหลผ่านร่างกายคน

2.3.1 ผลของความถี่

คนมีอันตรายเนื่องจากไฟฟ้าที่ความถี่ 50-60 เฮิรตซ์ แต่ที่ความถี่สูงกระแสที่ทำให้เกิดอันตรายต่อคนก็จะสูงขึ้น IEC ได้มีการกำหนดขนาดกระแสที่มีอันตรายกับคนตามฟังก์ชั่นของความถี่ (IEC 60479-2(1987-03))

2.3.2 ผลของขนาดและระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกาย

ผลของกระแสที่ไหลผ่านร่างกายตามขนาดกระแสที่เพิ่มขึ้นคือ รู้สึกถึงไฟดูด กล้ามเนื้อเกร็ง ไม่รู้สึกตัว หัวใจไม่ทำงาน ระบบควบคุมการหายใจไม่ทำงาน และเกิดการไหม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การรับรู้ถึงกระแส (Threshold of Perception) ขนาดกระแสเฉลี่ย 1 mA ทำให้คนรู้สึกถึงกระแสที่ไหลผ่าน Dalziel (IEEE Std 80-2000) ได้ทดลองกับผู้หญิง 28 คน และผู้ชาย 134 คนพบว่าค่ากระแสที่รับรู้ได้สำหรับผู้หญิงเท่ากับ 6 mA และกระแสที่รับรู้ได้สำหรับผู้ชายเท่ากับ 9 mA

2. กระแสปลดปล่อย (Let-go Current) ขนาดกระแสเฉลี่ย 1 – 6 mA ทำให้รู้สึกไม่สามารถที่จะจับส่วนที่มีไฟฟ้าต่อได้ แต่ไม่ทำให้สูญเสียการควบคุม Dalziel (IEEE Std 80-2000) ได้ทดลองกับผู้หญิง 28 คน และผู้ชาย 134 คนพบว่าค่ากระแสปลดปล่อยสำหรับผู้หญิงเท่ากับ 10.5 mA และกระแสปลดปล่อยสำหรับผู้ชายเท่ากับ 16 mA

3. กล้ามเนื้อเกร็ง (Muscular Contraction) ขนาดกระแสเฉลี่ย 9 – 25 mA ทำให้กล้ามเนื้อเกร็งและไม่สามารถควบคุมกล้ามเนื้อมือได้ แต่ไม่มีผลถาวร ความรู้สึกนี้จะหายไปเมื่อกระแสหยุดไหล

4. หัวใจเต้นผิดจังหวะ (Ventricular Fibrillation) ขนาดกระแสเฉลี่ย 60 – 100 mA ทำให้หัวใจไม่ทำงานและไม่สามารถสูบฉีดโลหิตไปเลี้ยงร่างกายได้ ดังนั้นการออกแบบต้องไม่ให้กระแสที่ไหลผ่านร่างกายคนเกินกว่าค่านี้เมื่อเกิดความผิดพร่องในระบบไฟฟ้าพลังงานที่ร่างกายดูดซับ, S_B เมื่อมีกระแสไหลผ่านร่างกายในช่วงระยะเวลาระหว่าง 0.03 – 3.0 วินาทีโดยไม่เกิดอันตราย สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$S_B = I_B 2 \times t_s \quad (2.1)$$

เมื่อ I_B คือกระแสที่ไหลผ่านร่างกายคน (A)

t_S คือระยะเวลาที่กระแสไหลผ่าน (s)

2.3.3 ความเร็วในการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกัน

ความเร็วในการตัดวงจรของอุปกรณ์ป้องกันเป็นตัวกำหนดระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายคนเมื่อมีกระแสผิดพร่องเกิดขึ้นในระบบ ระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันตัดวงจรพิจารณาได้สองระดับ คือระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันหลักทำงาน (Main Protection) และระยะเวลาที่อุปกรณ์ป้องกันเสริม (Backup Protection) ทำงาน เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันหลักทำงานมีค่าน้อยกว่าอุปกรณ์ป้องกันเสริมทำงาน ดังนั้นระยะเวลาที่กระแสไหลผ่านร่างกายคนสามารถใช้เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันหลักทำงาน แต่ถ้าต้องการให้เกิดความปลอดภัยมากขึ้นก็สามารถใช้เวลาที่อุปกรณ์ป้องกันเสริมทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 จุดประสงค์ของการต่อลงดิน [6]

การต่อลงดินมีจุดประสงค์หลัก 2 อย่างคือ

1. เพื่อเป็นทางผ่านของกระแสไฟฟ้าให้สามารถไหลลงดินได้สะดวก ทั้งในภาวะที่เกิดกระแสผิดปรกติปริมาณสูงเนื่องจากฟ้าผ่า หรือการลัดวงจรในระบบให้สามารถไหลลงดินได้โดยไม่สร้างผลกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้งานอยู่ในระบบไฟฟ้า
2. เพื่อช่วยป้องกันไม่ให้ผู้ที่ปฏิบัติงานอยู่ภายในบริเวณนั้นๆ ได้รับอันตรายเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าปริมาณสูงไหลลงสู่ดิน

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของดิน [6]

ดินและหินส่วนมากเมื่อแห้งสนิทจะไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า ยกเว้นมีสินแร่ปนอยู่จึงจะเป็นตัวนำเพราะมีโลหะปนอยู่ อย่างไรก็ตามทั้งทราย ดินร่วน และหินเองสามารถพิจารณาได้ว่าไม่เป็นตัวนำเพราะมีความต้านทานจำเพาะสูง แต่เมื่อมีน้ำเป็นองค์ประกอบความต้านทานจำเพาะลดลงต้องพิจารณาว่าเป็นตัวนำ แม้ว่ามันจะเป็นตัวนำที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับโลหะ ความต้านทานจำเพาะของดินจะถูกกำหนดด้วยปริมาณน้ำในดินและความต้านทานจำเพาะของน้ำเอง หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าการนำผ่านดินคือการนำผ่านน้ำที่อยู่ในดิน

ปัจจัยหลักที่กำหนดความต้านทานจำเพาะของดินคือ

1. ชนิดของดิน
2. องค์ประกอบทางเคมีของเกลือที่ละลายอยู่ในน้ำ
3. ความเข้มของเกลือละลายในน้ำ
4. ความชื้น
5. อุณหภูมิ
6. ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคดิน
7. ความแน่นของดิน

2.5.1 ผลกระทบของชนิดของดิน

ชนิดของดินเป็นส่วนที่สำคัญมากในการกำหนดความต้านทานจำเพาะของดิน แต่มันเป็นการยากที่จะกำหนดชนิดของดินได้อย่างชัดเจน ถึงแม้ว่าจะเป็นดินชนิดเดียวกันที่อยู่ต่างที่กันก็มีคุณสมบัติที่ต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินบางชนิด

ชนิดของดิน	ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω-m)
Loams, garden soil, etc.	50 - 500
Clays	80 - 500
Clay, sand and gravel mixtures	400 - 2500
Sand and gravel	600 - 1000
States, shale, sandstone, etc.	100 - 5000
Crystalline rock	2000 - 10000

2.5.2 ผลของความชื้นและเกลือละลายในน้ำ

เพราะว่าการนำกระแสเกิดจาก อิเล็กโทรไลด์เป็นหลักขึ้นอยู่กับปริมาณของน้ำและเกลือละลายเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดค่าความต้านทานจำเพาะ ปริมาณของน้ำขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สภาพอากาศ ช่วงเวลาของปี ธรรมชาติของดินและความลึกของดิน เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ความต้านทานจะลดลงดังกราฟที่ 2 ของรูปที่ 2.6

2.5.3 ผลของเกลือละลายในน้ำ

เนื่องจากปริมาณน้ำในดินเป็นปัจจัยหลักในการกำหนดค่าความต้านทาน ซึ่งในน้ำเองจะมีเกลือละลายเป็นตัวกำหนดความต้านทานของน้ำเมื่อปริมาณเกลือเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานของน้ำลดลงดังกราฟที่ 1 ของรูปที่ 2.6

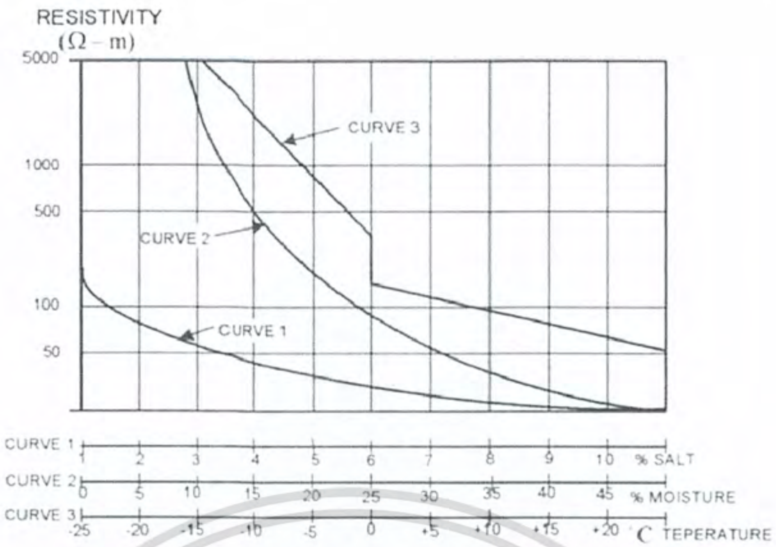
2.5.4 ผลของขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคดิน

อนุภาคของดินจะมีขนาดต่างๆ และเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดความต้านทาน ขนาดและการกระจายตัวมีผลกับการเก็บความชื้น ซึ่งความชื้นจะสร้างแรงตึงผิวที่จุดสัมผัสของอนุภาคถ้าอนุภาคสามารถเก็บความชื้นได้มากความต้านทานจะต่ำ

2.5.5 ผลของอุณหภูมิและความดัน

อุณหภูมิของดินนั้นอาจไม่ต้องนำมาพิจารณาถ้าอุณหภูมิของดินมีค่าสูงกว่า 0 °C แต่ถ้าอุณหภูมิลดลงจนต่ำกว่า 0 °C น้ำภายในดินจะกลายเป็นน้ำแข็งทำให้ค่าความต้านทานภายในดินเพิ่มขึ้นรวดเร็วมากดังกราฟที่ 3 ของรูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อดินมีความชื้น 12.5% ของน้ำหนักดิน ทำนองเดียวกันในทางปฏิบัติผลจากความดันสามารถละเลยได้ จะเห็นได้ว่าความต้านทานจำเพาะของดินมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง ดังนั้นถ้าต้องการรู้ค่า ณ ตำแหน่งใดควรใช้วิธีการวัดที่ตำแหน่งนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ผลของความชื้น อุณหภูมิ และสารเคมีภายในดินที่มีต่อความต้านทานจำเพาะของดิน

2.6 โลหะที่ใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน [6]

2.6.1 ทองแดง (Copper)

ทองแดงมักจะถูกเลือกใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเป็นโลหะที่มีคุณสมบัติความนำไฟฟ้าที่ดี และไม่มีปัญหาในเรื่องของการผุกร่อนเพราะทองแดงจะปฏิบัติตัวเป็นขั้วลบ (Cathodic) เมื่อเปรียบเทียบกับโลหะอื่นๆ ที่ฝังอยู่โดยรอบ

2.6.2 เหล็กชุบทองแดง (Copper-Clad Steel)

เหล็กชุบทองแดงนั้น นิยมใช้เป็นแท่งหลักดิน (Ground rod) และเป็นตะแกรงต่อลงดิน เพื่อทำการหลีกเลี่ยงการถูกขโมยตัดตัวนำทองแดงที่ใช้ในระบบต่อลงดินออกไปขาย

2.6.3 อลูมิเนียม (Aluminum)

อลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไม่นิยมใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดินภายในสถานีไฟฟ้าแบบธรรมดาเนื่องจากมีข้อเสียดังต่อไปนี้ คือ

1. อลูมิเนียมจะต้องมีการผุกร่อน เมื่อมีการฝังลงในดิน และเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ไม่ดีได้เมื่อเกิดการผุกร่อน

2. เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้เกิดการผุกร่อนที่ผิวของอลูมิเนียม ทั้งนี้เพราะว่าอลูมิเนียมประพฤติตัวเป็นขั้วบวก (anodic) เมื่อเทียบกับโลหะอื่นฝังอยู่ในบริเวณเดียวกันโดยส่วนมากแล้วอลูมิเนียมจะใช้เป็นเปลือกหุ้มของอุปกรณ์ภายในสถานีไฟฟ้าแบบ GIS (Gas insulated Substation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 เหล็ก (Steel)

เหล็กมักจะมีการนำไปใช้เป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน และใช้เป็นแท่งหลักดิน แต่ในการนำไปใช้งานนั้นจะต้องทำการแก้ปัญหาเรื่องการผุกร่อนที่ผิวของวัสดุก่อน ซึ่งส่วนมากจะนำไปชุบสังกะสีที่ผิวองเหล็ก หรือสารที่สามารถเคลือบผิวของเหล็ก เพื่อให้ประพฤติตัวเป็นขั้วลบเมื่อทำการฝังดินในระบบต่อลงดิน ถึงแม้จะทำการเลือกใช้ทองแดง หรือเหล็กชุบทองแดงเป็นตัวนำในระบบต่อลงดิน เพื่อแก้ปัญหาการเกิดการผุกร่อนที่ผิวตัวนำที่ใช้ในระบบต่อลงดิน แต่ก็ยังมีปัญหาเนื่องจากการผุกร่อนของโลหะผสมที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่ฝังในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดินเพราะว่าทองแดง และ เหล็กนั้นจะประพฤติตัวเสมือน Galvanize Cell โดยมีดินทำหน้าที่เป็นสารละลายที่นำไฟฟ้า โดยที่เหล็กจะประพฤติเสมือนขั้วบวก และทองแดงจะประพฤติตัวเสมือนขั้วลบ ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาการผุกร่อนของเหล็กที่ฝังภายในบริเวณเดียวกับระบบต่อลงดินได้ดังนี้

1. ทำการเคลือบผิววัสดุที่ประพฤติตัวเป็นขั้วบวก เมื่อฝังลงในดินโดยการพันเทปพลาสติกหรือใช้ Asphalt ผสมเคลือบที่ผิวของวัสดุ
2. การกำหนดวางแนวท่อในบริเวณที่มีการฝังระบบต่อลงดินนั้น จะต้องเลือกใช้วัสดุที่มีการเคลือบผิวโลหะ เพื่อป้องกันการผุกร่อน
3. ใช้คุณสมบัติของขั้วลบ ในการป้องกันการผุกร่อน หรือ ควบคุมการแสไฟฟ้าในระบบ
4. หลีกเลี่ยงการใช้ท่อเหล็ก โดยเลือกใช้ท่อพลาสติกแทน

2.7 การเลือกและการต่อตัวนำ [5]

ในระบบกราวนด์กริดตัวนำที่ใช้ทำกริด สายต่อ และแท่งรากสายดินต้องมีอายุการใช้งานได้นานและมีคุณสมบัติดังนี้

1. มีความนำไฟฟ้าเพียงพอเพื่อไม่ให้เกิดความต่างศักย์ภายในตัวนำมากเกินไป
2. ต้องไม่หลอมละลายหรือเสียรูปทางกลเมื่อมีกระแสผิดพร่องที่รุนแรงและเกิดขึ้นเป็นเวลานาน
3. มีความเชื่อถือได้ทางกลและทนอุณหภูมิสูงได้
4. ต้องสามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้ไม่ว่าจะอยู่ในสภาพที่มีการกัดกร่อนหรือภายใต้แรงทางกล

การต่อตัวนำในระบบกราวนด์กริดต้องมีความแข็งแรงและมีคุณสมบัติต่าง ๆ คือ ต้องมีความนำไฟฟ้าที่ดี ป้องกันการกัดกร่อน ทนต่อแรงกระทำทางกลที่ทำให้เกิดความเสียหายได้ และจุดต่อต้องสามารถรับกระแสผิดพร่องและทนแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของกระแสผิดพร่องได้การต่อตัวนำและการทดสอบจุดต่อดูรายละเอียดได้จากมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IEEE Std. 837–1989 (IEEE Standard for Qualifying Permanent Connections used in Substation Grounding)

2.8 แรงดันไฟฟ้าที่มนุษย์สามารถทนได้ [5]

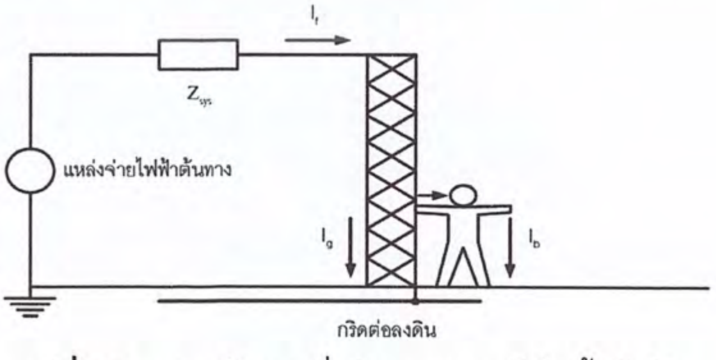
การออกแบบระบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ที่ปฏิบัติงานในสถานีไฟฟ้าขณะเกิดความผิดพร่องลงดินต้องพิจารณาค่าความต้านทานของร่างกายคน และผลของวัสดุปูผิวดินที่อยู่ด้านบนของพื้นสถานีไฟฟ้า เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสและแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้

2.8.1 ความต้านทานร่างกายคน

สำหรับระบบไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับ 50 – 60 Hz ร่างกายคนสามารถแทนได้ด้วยความต้านทาน กระแสที่ไหลผ่านร่างกายคนอาจพิจารณาได้สองกรณี คือจากแขนไปที่เท้าทั้งสองข้าง หรือจากเท้าข้างหนึ่งไปยังอีกข้างหนึ่ง ความต้านทานร่างกายภายในมีค่า 300 โอห์ม ความต้านทานร่างกายรวมทั้งชั้นของผิวหนังจะมีค่าอยู่ระหว่าง 500 – 3000 โอห์ม จากการทดลองของ Dalziel (IEEE Std 80-2000) เพื่อหากระแสปลดปล่อย (Let-go Current) โดยใช้น้ำเกลือแทนมือและเท้าทั้งสองข้าง และใช้กระแสสลับ 60 Hz ได้ความต้านทานระหว่างมือกับมือมีค่าเฉลี่ย 2330 โอห์ม ความต้านทานระหว่างมือกับเท้าทั้งสองข้างมีค่าเฉลี่ย 1130 โอห์ม จากการวิเคราะห์สรุปว่าความต้านทานระหว่างมือกับมือ มือกับเท้าทั้งสองข้างหรือระหว่างเท้าทั้งสองข้างของคนใช้ค่าความต้านทานเท่ากับ 1000 โอห์ม

2.8.2 แรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่มนุษย์สามารถทนได้ (Touch Voltage)

ในรูปที่ 2.7 เป็นวงจรอุบัติเหตุเพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส เมื่อคนสัมผัสโครงโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการต่อลงดินในขณะที่มีกระแสผิดพร่องเกิดขึ้นทำให้เกิดกระแสไหลผ่านร่างกาย ค่า R_g และ Z_{sys} มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า $R_f/2$ ดังนั้น Z_{Th} จึงมีค่าโดยประมาณเท่ากับ $R_f/2$ และค่า V คือค่าแรงดันไฟฟ้าสัมผัสที่โครงโลหะก่อนที่คนจะไปสัมผัส

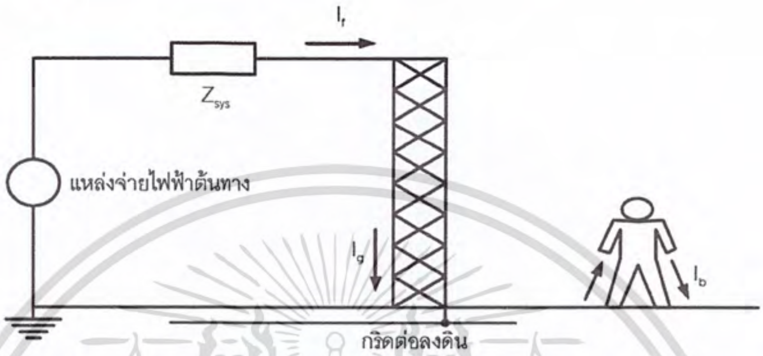


รูปที่ 2.7 วงจรอุบัติเหตุเพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 แรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวที่มนุษย์สามารถทนได้ (Step Voltage)

ในรูปที่ 2.8 เป็นวงจรอุบัติเหตุเพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว เมื่อคนเดินหรือยืนอยู่ในสถานีไฟฟ้าในขณะที่มีกระแสผิดพร่องเกิดขึ้น ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างเท้าทั้งสองข้างและมีกระแสไหลผ่านร่างกาย ค่า R_g และ Z_{sys} มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า $2R_f$ ดังนั้น Z_{Th} จึงมีค่าโดยประมาณเท่ากับ $2R_f$ และค่า V_{Th} คือค่าแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าวก่อนที่คนถูกไฟฟ้าดูด



รูปที่ 2.8 วงจรอุบัติเหตุเพื่อจำลองหาแรงดันไฟฟ้าช่วงก้าว

2.9 การวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน [6]

จากปัจจัยต่างๆ ภายในดินเป็นผลให้ความต้านทานจำเพาะของดินในแต่ละแห่งแตกต่างกันไป ดังนั้นในการออกแบบระบบต่อลงดินแต่ละครั้งจึงจำเป็นต้องวัดค่าความตานทานจำเพาะของดินทุกๆ ครั้ง การวัดความต้านทานจำเพาะของดินสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และให้ผลที่ถูกต้องอีกทั้งยังสะดวกเนื่องจากไม่ต้องใช้แท่งดินยาวมากในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินคือ การวัดแบบ 4 จุด การวัดแบบนี้เป็นการหาความต้านทานจำเพาะของดิน โดยการวัดค่ากระแส และแรงดันโดยปักแท่งดิน 4 แท่ง โดยระยะห่างมีทั้งที่เท่ากันและไม่เท่ากัน แต่วิธีที่นิยมคือ กำหนดระยะห่างระหว่างแท่งดินเท่ากัน ซึ่งเป็นวิธีของเวนเนอร์ (Wenner's Four-Pin Method) ดังรูปที่ 2.9 และสามารถคำนวณหาความต้านทานจำเพาะของดินได้ดังนี้

$$\rho = \frac{4\pi AR}{1+\dfrac{2A}{\sqrt{A^2+4B^2}}-\dfrac{A}{\sqrt{A^2+B^2}}} \qquad (2.2)$$

โดยที่ ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω-m)

R คือ ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ (Ω)

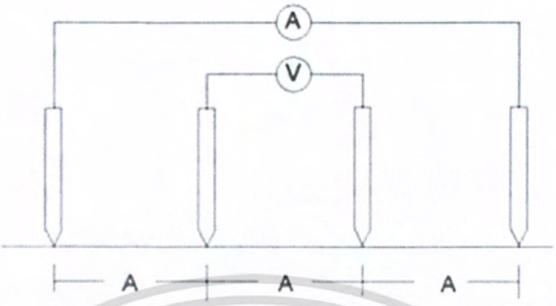
A คือ ระยะห่างระหว่างแท่งดินข้างเคียงที่อยู่ติดกัน (m)

B คือ ความลึกของแท่งดินจากผิวดิน (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณี B<<A เราจะได้ว่า

$$\rho = 2\pi AR \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.9 วิธีการวัดความต้านทานจำเพาะของดินด้วยวิธีวัดแบบ 4 จุด

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทที่ 3

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ของแท่งตัวนำต่อลงดินกรณีพิจารณาดินชั้นเดียว (Homogenous Soil)

การต่อลงดินของระบบไฟฟ้าอาจมีวัตถุประสงค์หลายอย่างขึ้นอยู่กับลักษณะของวงจรการต่อลงดินเพื่อป้องกันศักย์ไฟฟ้าเกินระหว่างโครงสร้างโลหะกับดินขณะเกิดความผิดพร่องหรือช่วงทำงานปกติ เพื่อให้อิมพีแดนซ์ความผิดพร่องต่ำและให้อุปกรณ์กำจัดความผิดพร่องทันท่วงที แล้วยังนำกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดินเพื่อจำกัดแรงดันฟ้าผ่าบนสายส่งหรือสายโทรศัพท์ นอกจากนั้นระบบต่อลงดิน ยังใช้เป็นระดับแรงดันอ้างอิงในระบบไฟฟ้ากำลังและอิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย

3.1 สมการพื้นฐาน

พิจารณากระแสในแหล่งกำเนิดจุด (Point Current Source)

รูปที่ 3.1 แหล่งกำเนิดกระแสแบบจุด

จากรูป 3.1 จะสามารถคำนวณความหนาแน่นกระแส (J)

$$J = \sigma E = \frac{E}{\rho} \tag{3.1}$$

แหล่งกำเนิดเป็นแบบจุด จะได้ความนำของกระแสที่ระยะ r ใดๆ

$$J = \frac{I}{4\pi r^2} = \frac{E}{\rho} \tag{3.2}$$

โดยที่ J คือ ความหนาแน่นกระแส (A/m^2)

σ คือ ความนำจำเพาะของดิน (S.m)

E คือ ความเข้มสนามไฟฟ้า (V/m)

ρ คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน (Ω.m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

117513

ความต่างศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากกระแสในแหล่งกำเนิดจุด

รูปที่ 3.2 ความต่างศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากกระแสในแหล่งกำเนิดจุด

ศักย์ไฟฟ้าที่จุด b ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแบบจุดจะได้จากการอินทิเกรตค่าสนามไฟฟ้า ดังสมการที่ 3.3

$$V = \int_b^\infty \bar{E} d\bar{x} = \int_b^\infty \frac{I\rho}{4\pi r^2} dx \tag{3.3}$$

$$= \frac{I\rho}{4\pi} \int_b^\infty \frac{1}{x^2} dx = \frac{I\rho}{4\pi} \left(-\frac{1}{x} \right) \Bigg|_{x=b}^{x=\infty}$$

$$= \frac{I\rho}{4\pi} \left(0 - \left(-\frac{1}{x} \right) \right)$$

จากการอินทิเกรตจะได้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่จุด b ดังสมการ 3.4

$$V(b) = \frac{I\rho}{4\pi b} \tag{3.4}$$

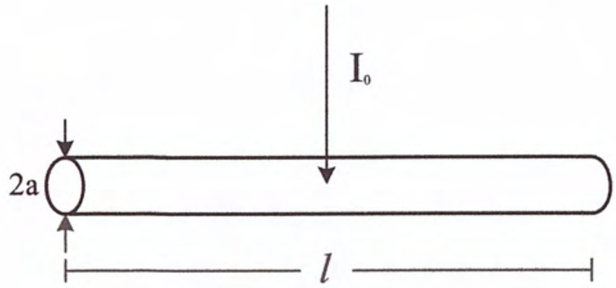
จากสมการที่ 3.4 จะได้ความต้านทานของตัวนำในแหล่งกำเนิดจุดถึงจุด b

$$R = \frac{\rho}{4\pi b} \tag{3.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

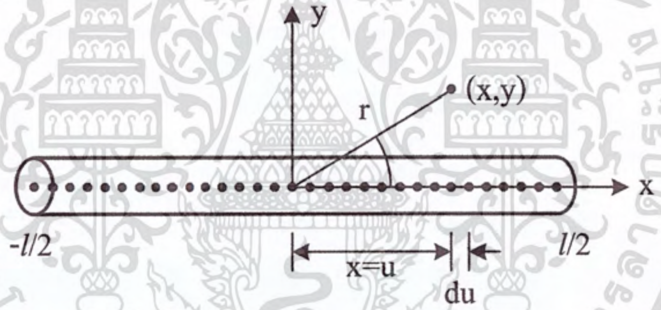
3.2 พิจารณาศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากกระแสในแท่งตัวนำที่วางอยู่ในดินที่มีระยะเป็นอนันต์

สมมติว่าตัวนำวางตามแกน x ระหว่าง x = - *l*/2 และ x = *l*/2 แล้วให้กระแส I_0 เข้าที่จุดกลางแท่งตัวนำ และให้กระแสบนตัวนำที่ระยะ x = u คือ I(u) ดังรูป



รูปที่ 3.3 แท่งตัวนำ

สมมติว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากกระแสในส่วนตัวนำยาว du เสมือนว่าเป็นแหล่งกำเนิดจุด ที่แกนตัวนำ ดังรูป



รูปที่ 3.4 ศักย์ไฟฟ้าในแท่งตัวนำเมื่อพิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดจุด

จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากกระแสรั่วไหลตามผิวตัวนำทั้งหมดคือ

$$V(x,y) = \frac{I\rho}{4\pi r} \tag{3.6}$$

เมื่อ

$$I = \frac{I_0}{l}dx \text{ และ } r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{3.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่าจากสมการที่ 3.7 ลงในสมการที่ 3.6 แล้วทำการอินทิเกรต

$$dV(x,y) = \frac{(I_0 dx)\rho}{4\pi l\sqrt{x^2+y^2}} \tag{3.8}$$

พิจารณาศักย์ไฟฟ้าที่จุด (x,y) และแหล่งกำเนิดกระแสแบบจุดที่จุด (x-u,0) จะได้

$$dV(x,y) = \frac{(I_0 dx)\rho}{4\pi l\sqrt{(x-u)^2+y^2}} \tag{3.9}$$

$$\int dV(x,y) = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{I_0\rho}{4\pi l}\frac{1}{\sqrt{(x-u)^2+y^2}}du$$

$$= \frac{I_0\rho}{4\pi l}\int_{-l/2}^{l/2} \frac{1}{\sqrt{(x-u)^2+y^2}}du$$

$$V(x,y) = \frac{I_0\rho}{4\pi l}\left[\operatorname{asinh}\left(\frac{x-u}{y}\right)\right]_{-l/2}^{l/2}$$

$$V(x,y) = \frac{I_0\rho}{4\pi l}\left[\operatorname{asinh}\left(\frac{x+\frac{l}{2}}{y}\right) - \operatorname{asinh}\left(\frac{x-\frac{l}{2}}{y}\right)\right] \tag{3.10}$$

ถ้าไม่คิดความต้านทานของตัวนำ จะได้เงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับที่ผิวของตัวนำ y = a (a = รัศมีของตัวนำ) คือ

$$V(x,y) = \frac{I_0\rho}{4\pi l}\left[\operatorname{asinh}\left(\frac{x+\frac{l}{2}}{a}\right) - \operatorname{asinh}\left(\frac{x-\frac{l}{2}}{a}\right)\right] \tag{3.11}$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.11 เพื่อให้ได้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย

$$V_{av} = \frac{1}{l}\int_{-l/2}^{l/2} V(x,y)\,dx \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{av} = \frac{1}{l}\int_{-l/2}^{l/2} \frac{I_0\rho}{4\pi l}\left[\operatorname{asinh}\left(\frac{x+\frac{l}{2}}{a}\right) - \operatorname{asinh}\left(\frac{x-\frac{l}{2}}{a}\right)\right]dx \tag{3.13}$$

$$V_{av} = \frac{I_0\rho}{4\pi l^2}\left[\left\{\left(x+\frac{l}{2}\right)\operatorname{asinh}\left(\frac{x+\frac{l}{2}}{a}\right) - \sqrt{\left(x+\frac{l}{2}\right)^2 + a^2}\right\}\right.$$

$$\left. -\left\{(x-\frac{l}{2})\operatorname{asinh}\left(\frac{x-\frac{l}{2}}{a}\right) - \sqrt{\left(x+\frac{l}{2}\right)^2 + a^2}\right\}\right]$$

จะได้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยดังสมการที่ 3.14

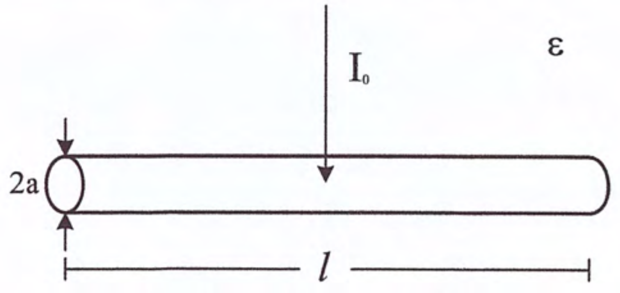
$$V_{av} = \frac{I_0\rho}{4\pi l^2}\left[\left\{l\operatorname{asinh}\left(\frac{l}{a}\right) - \sqrt{l^2+a^2} + a\right\} - \left\{-a + l\operatorname{asinh}\left(-\frac{l}{a}\right) + \sqrt{l^2+a^2}\right\}\right] \tag{3.14}$$

ค่าความต้านทานของแท่งตัวนำที่วางตัวอยู่ในดินที่มีระยะอนันต์ได้คือ

$$R(l,a) = \frac{V_{av}}{I_0} \tag{3.15}$$

$$R(l,a) = \frac{\rho}{2\pi l}\left[ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\} + \frac{a}{l} - \sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right] \tag{3.16}$$

ค่าความจุไฟฟ้าของแท่งตัวนำที่วางตัวอยู่ในดินโดยที่ดินมีระยะอนันต์



รูปที่ 3.5 แท่งตัวนำที่วางตัวอยู่ในดินที่มีระยะอนันต์ใช้พิจารณาค่าความจุไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาค่าความเข้มสนามไฟฟ้าจาก

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon r^2} \tag{3.17}$$

ค่าความจุไฟฟ้า

$$C = \frac{Q}{V} \tag{3.18}$$

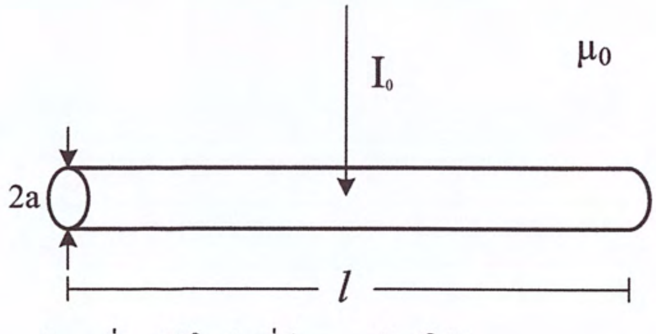
โดยที่ $P = \frac{1}{C}$ ดังนั้น $V = PQ$

โดยที่ P คือ ตัวแปรสมมดิ
E คือ สนามไฟฟ้า
Q คือ ประจุไฟฟ้า
V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า
ε คือ ความต้านทานจำเพาะของดิน
r คือ รัศมี
C คือ ค่าตัวเก็บประจุ

จะได้ค่าส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้า (P) ที่ความยาว l รัศมี a ดังสมการที่ 3.19

$$P(l,a) = \frac{1}{C(l,a)} = \frac{1}{2\pi\varepsilon l}\left[ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right] \tag{3.19}$$

ค่าความเหนี่ยวนำของแท่งตัวนำที่วางตัวอยู่ในดินโดยที่ดินมีระยะอนันต์



รูปที่ 3.6 แท่งตัวนำที่วางตัวในดินที่มีระยะอนันต์ใช้พิจารณาค่าความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย $\bar{A}$ เป็นศักย์ไฟฟ้าเวกเตอร์สนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ

$$\bar{A} = \frac{\mu_0 il}{4\pi}\left[\int_{-l/2}^{l/2} \frac{dy}{\sqrt{(y_0 - y)^2 + x_0^2}}\right]$$

$$= \frac{\mu_0 il}{4\pi}\left[\operatorname{asinh}\left(\frac{y_0 - y}{x_0}\right)\right]_{-l/2}^{l/2}$$

$$= \frac{\mu_0 il}{4\pi}\left[\operatorname{asinh}\left(\frac{y_0 + l/2}{x_0}\right) - \operatorname{asinh}\left(\frac{y_0 - l/2}{x_0}\right)\right] \quad (3.20)$$

อนุพันธ์ของค่าความเหนี่ยวนำคือ

$$dL = \frac{Ady}{i} \quad (3.21)$$

ทำการอินทิเกรตสมการที่ 3.21

$$\int dL = \int \frac{Ady}{i} \quad (3.22)$$

$$L = \frac{\mu_0 l}{4\pi}\int_{-l/2}^{l/2}\left[\operatorname{asinh}\left(\frac{y_0 + l/2}{x_0}\right) - \operatorname{asinh}\left(\frac{y_0 - l/2}{x_0}\right)\right]dy \quad (3.23)$$

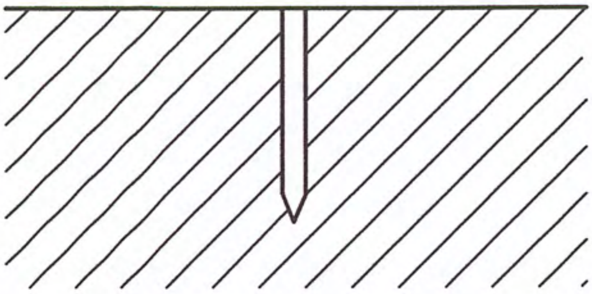
จะได้ค่าความเหนี่ยวนำของแท่งตัวนำที่วางตัวในดินที่มีระยะอนันต์

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left[\ln\left\{\frac{l}{a}\left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\} + \frac{a}{l} + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2}\right] \quad (3.24)$$

3.3 พิจารณาแท่งตัวนำที่วางในแนวดิ่ง (Vertical grounding electrodes)

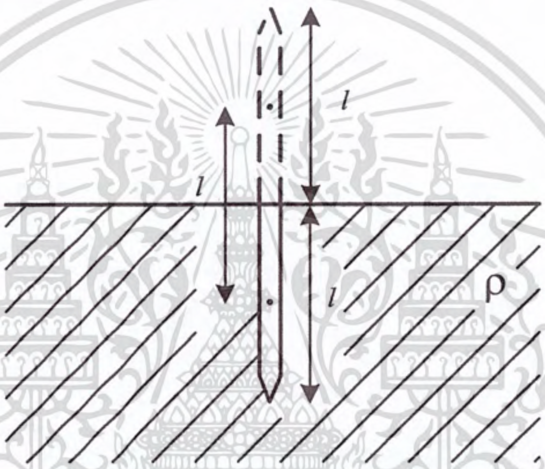
ระบบต่อลงดินที่นิยมสร้างประกอบด้วยหลักดินหนึ่งหลักหรือหลายหลักเชื่อมต่อกันด้วยสายเปลือย ในการศึกษานี้จะพิจารณาเฉพาะแท่งตัวนำต่อลงดินแบบหนึ่งแท่งดังรูปที่ 3.7 เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แท่งตัวนำฝังลงดินในแนวดิ่ง

3.3.1 ความต้านทาน (R)



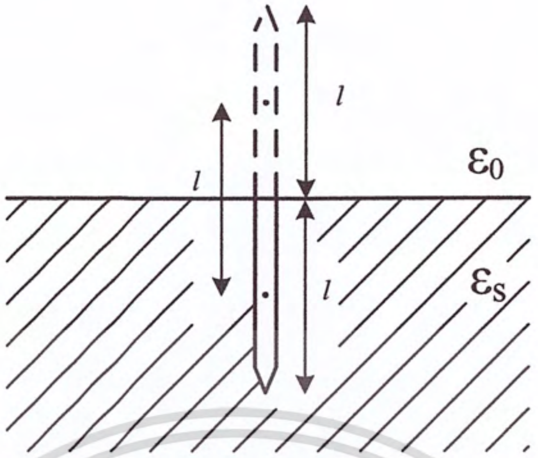
รูปที่ 3.8 แนวความคิดการคำนวณค่าความต้านทานของแท่งตัวนำต่อลงดินในแนวดิ่ง โดยพิจารณาจากความต้านทานของตัวนำต่อลงดินที่พิจารณาดินที่มีขอบเขตเป็นอนันต์

หากหลักดินที่วางตัวในแนวดิ่ง เราจะพิจารณาบนสมมติฐานเสมือนว่าแบ่งครึ่งแท่งตัวนำ ทำให้ความยาวของแท่งตัวนำเป็นครึ่งหนึ่ง นั่นคือ $l = l/2$ จะได้ความต้านทานของแท่งตัวนำเป็น 2 เท่าของแท่งตัวนำความยาว l ที่วางตัวอยู่ในดินที่มีระยะเป็นอนันต์ ถ้าหากปักแท่งตัวนำที่มีความยาว l จะได้ความต้านทานของแท่งตัวนำเป็น 2 เท่าของแท่งตัวนำที่มีความยาว $2l$ ที่วางตัวในดินที่มีระยะเป็นอนันต์ โดยพิจารณาจากรูป 3.8
จะได้ค่าความต้านทานของแท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่งดังสมการที่ 3.24

$$R_V(l,a) = \frac{\rho}{2\pi l}\left[\ln\left\{\frac{2l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{2l}\right)^2}\right)\right\} + \frac{a}{2l} - \sqrt{1+\left(\frac{a}{2l}\right)^2}\right] \qquad (3.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ค่าความจุไฟฟ้า (C)



รูปที่ 3.9 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่งเมื่อพิจารณาความจุไฟฟ้าโดยใช้วิธีภาพเสมือน (Image method) [7]

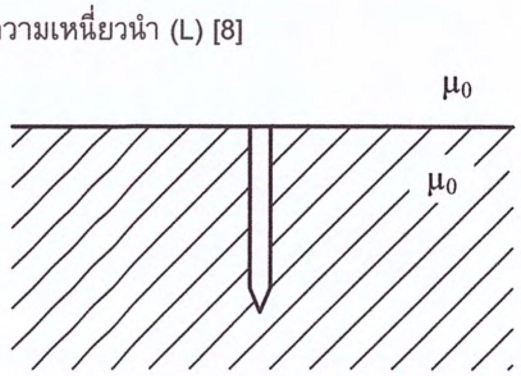
พิจารณาค่าความจุไฟฟ้า

$$\frac{1}{C_V(l,a)} = P_V(l,a) = P(l,a) + P(l,l)\left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{\varepsilon_s + \varepsilon_0}\right) \tag{3.25}$$

$$P_V(l,a) = \left[\frac{1}{2\pi\varepsilon l}\left[\ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\} + \frac{a}{l} - \sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right]\right]$$

$$+\left[\frac{1}{2\pi\varepsilon l}\left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{\varepsilon_s + \varepsilon_0}\right)\left[ln\left\{\frac{l}{l}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{l}{l}\right)^2}\right)\right\} + \frac{l}{l} - \sqrt{1+\left(\frac{l}{l}\right)^2}\right]\right] \tag{3.26}$$

3.3.3 ความเหนี่ยวนำ (L) [8]



รูปที่ 3.10 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่งเมื่อพิจารณาความเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำของแท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่งโดยที่ค่าความซึมซาบของสนามแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) มีค่าเท่ากับค่าความซึมซาบของสนามแม่เหล็กของดิน (μ) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำดังสมการ

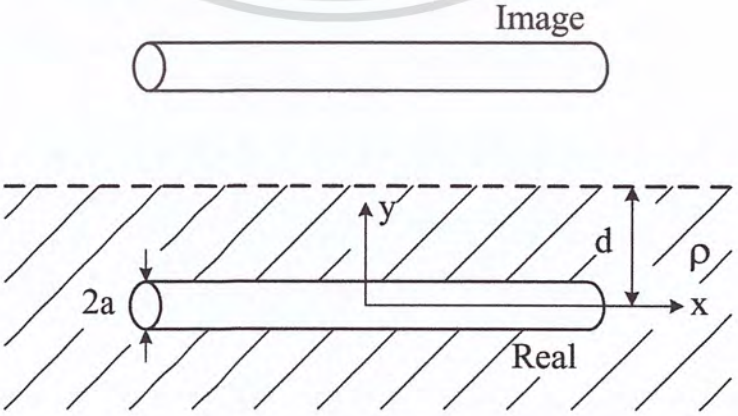
$$L_V(l,a) = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left[\ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right] \tag{3.27}$$

3.4 พิจารณาแท่งตัวนำที่วางในแนวนอน (Horizontal grounding electrodes)

3.4.1 ความต้านทาน R

รูปที่ 3.11 แท่งตัวนำที่ฝังดินในแนวราบ

เราสามารถพิสูจน์ความต้านทานของตัวนำที่ฝังลงในดิน ซึ่งด้านบนของดินมีอากาศเป็นตัวกลาง ได้โดยการสมมติให้มีแท่งตัวนำที่มีเหมือนกันทุกประกาวางอยู่ตรงข้ามกันโดยที่มีระยะห่างกัน d จากเส้นขอบสมมติ โดยมีความต้านทานหาได้โดยการสมมติว่าตัวนำสองตัวมีระยะห่างกัน 2d ในตัวกลาง เมื่อเกิดกระแสไหลในแท่งตัวนำจะเกิดสนามไฟฟ้ากระจายบนผิวตัวนำของแท่งตัวนำทั้ง 2 ในบริเวณที่สนามไฟฟ้ามาเจอกันพอดี จะเกิดการหักล้างกันของสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ทำให้เสมือนในบริเวณนั้นเป็นผิวดินปกติ ดังนั้นจะได้ความต้านทานของแท่งตัวนำฝังดินเท่ากับ



รูปที่ 3.12 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวราบเมื่อพิจารณาความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

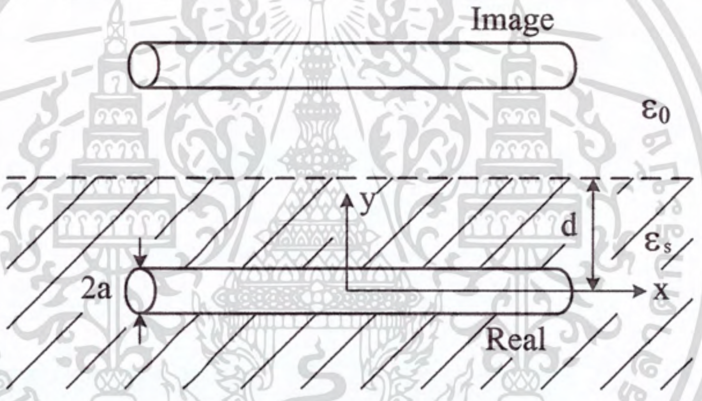
ดังนั้นจะได้ความต้านทานของแท่งตัวนำฝังดินเท่ากับ

$$R_1 = R_1\left(a\right) + R_1(2d) \tag{3.28}$$

$$R_1 = \left[\frac{\rho}{2\pi l}\left[\ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right]\right]$$

$$+\left[\frac{\rho}{2\pi l}\left[\ln\left\{\frac{l}{2d}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{2d}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{2d}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{2d}{l}\right)^2}\right]\right] \tag{3.29}$$

3.4.2 ค่าความจุไฟฟ้า C



รูปที่ 3.13 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวราบเมื่อพิจารณาความจุไฟฟ้า

พิจารณาค่าความจุไฟฟ้า

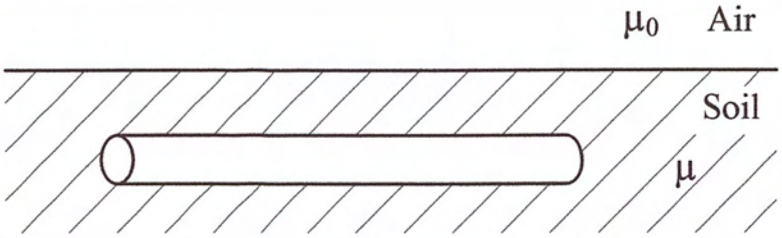
$$\frac{1}{C_H(l,a)} = P_H(l,a) = P\left(l,a\right) + P(l,2d)\left(\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_0}{\varepsilon_s+\varepsilon_0}\right) \tag{3.30}$$

$$P_H(l,a) = \left[\frac{1}{2\pi\varepsilon l}\left[\ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right]\right]$$

$$+\left[\frac{1}{2\pi\varepsilon l}\left(\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_0}{\varepsilon_s+\varepsilon_0}\right)\left[ln\left\{\frac{l}{2d}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{2d}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{2d}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{2d}{l}\right)^2}\right]\right] \tag{3.31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 ความเหนี่ยวนำ L



รูปที่ 3.14 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวราบพิจารณาความเหนี่ยวนำ

เมื่อพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำของแท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่งโดยที่ค่าความซึมซาบของสนามแม่เหล็กของอากาศ (μ_0) มีค่าเท่ากับค่าความซึมซาบของสนามแม่เหล็กของดิน (μ) จะได้ค่าความเหนี่ยวนำดังสมการ

$$L_H(l,a)=\frac{\mu_0 l}{2\pi}\left[\ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right] \quad (3.32)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง

4.1 ค่าพารามิเตอร์ ความต้านทาน (R) ความจุไฟฟ้า (L) และความเหนี่ยวนำ (C)

4.1.1 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่ง (Vertical Ground Rods)

เมื่อพิจารณาแท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่ง (Vertical Ground Rods) จากการออกแบบและการคำนวณค่า โดยแยกตามกรณีความยาวแท่งตัวนำฝังลงดินที่ความลึกต่างกัน คือ 2.4 m และ 6 m จะได้ค่าพารามิเตอร์ดังแสดงตามตารางที่ 4.1 - 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 2.4 m

ความต้านทาน(R)		ความจุไฟฟ้า(C)		ความเหนี่ยวนำ(L)	
ρ(Ω.m)	R(Ω)	ε_r(F/m)	C(ρF)	μ_0(H/m)	L(μH)
50	18.67	5	90.15	$4\pi\times10^{-7}$	2.36
100	37.73				
200	74.66	10	180.29		
500	186.65				
1000	373.30	50	901.45		
2000	746.60				

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 6 m

ความต้านทาน(R)		ความจุไฟฟ้า(C)		ความเหนี่ยวนำ(L)	
ρ(Ω.m)	R(Ω)	ε_r(F/m)	C(ρF)	μ_0(H/m)	L(μH)
50	8.70	5	237.82	$4\pi\times10^{-7}$	7.85
100	17.40				
200	34.80	10	476.19		
500	87.00				
1000	174.00	50	2380.95		
2000	348.00				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวนอน (Horizontal Ground Rods)

เมื่อพิจารณาแท่งตัวนำที่วางตัวในแนวนอน (Horizontal Ground Rods) จากการออกแบบและการคำนวณค่า โดยแยกตามกรณีความยาวแท่งตัวนำฝังลงดินที่ความลึก 0.5 m ที่ความยาวแท่งตัวนำต่างกันคือ 3 m, 6 m, 9 m และ 12 m จะได้ค่าพารามิเตอร์ดังแสดงตามตารางที่ 4.3 - 4.6

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 3 m

ความต้านทาน(R)		**ความจุไฟฟ้า(C)**		**ความเหนี่ยวนำ(L)**	
ρ(Ω.m)	**R(Ω)**	**ε_r(F/m)**	**C(ρF)**	**μ_0(H/m)**	**L(μH)**
50	16.61	5	133.32	$4\pi\times10^{-7}$	3.10
100	33.21				
200	66.42	10	266.63		
500	166.05				
1000	332.10	50	1333.17		
2000	664.20				

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 6 m

ความต้านทาน(R)		**ความจุไฟฟ้า(C)**		**ความเหนี่ยวนำ(L)**	
ρ(Ω.m)	**R(Ω)**	**ε_r(F/m)**	**C(ρF)**	**μ_0(H/m)**	**L(μH)**
50	9.95	5	222.44	$4\pi\times10^{-7}$	7.02
100	19.90				
200	39.80	10	444.44		
500	99.50				
1000	199.00	50	2222.22		
2000	398.00				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 9 m

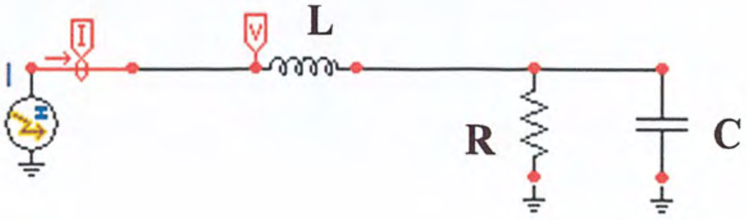
ความต้านทาน(R)		ความจุไฟฟ้า(C)		ความเหนี่ยวนำ(L)	
ρ(Ω.m)	**R(Ω)**	**ε_r(F/m)**	**C(ρF)**	**μ_0(H/m)**	**L(μH)**
50	7.30	5	303.03	$4\pi\times10^{-7}$	11.25
100	14.60				
200	29.20	10	606.06		
500	73.00				
1000	146.00	50	3030.30		
2000	292.00				

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ R , L , C ที่ความยาวแท่งตัวนำ 12 m

ความต้านทาน(R)		ความจุไฟฟ้า(C)		ความเหนี่ยวนำ(L)	
ρ(Ω.m)	**R(Ω)**	**ε_r(F/m)**	**C(ρF)**	**μ_0(H/m)**	**L(μH)**
50	5.84	5	379.00	$4\pi\times10^{-7}$	15.70
100	11.68				
200	23.36	10	758.00		
500	58.40				
1000	116.80	50	3790.00		
2000	233.60				

4.2 ผลการจำลอง (Simulation)

จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์นำค่าที่ได้มาจำลองผลผ่านทางโปรแกรม EMTP/ATPDraw แล้วทำการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มเมื่อกระแสฟ้าผ่าแบบลำฟ้าผ่าแรกและลำฟ้าผ่าซ้ำไหลผ่านแท่งตัวนำต่อลงดิน โดยรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกและลำฟ้าผ่าซ้ำ เมื่อทำการเปลี่ยนขนาดเป็นหนึ่งหน่วยเป็นไปตามรูปที่ 2.5 เพื่อดูพฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของระบบต่อลงดิน โดยใช้วงจรสมมูลในการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.1

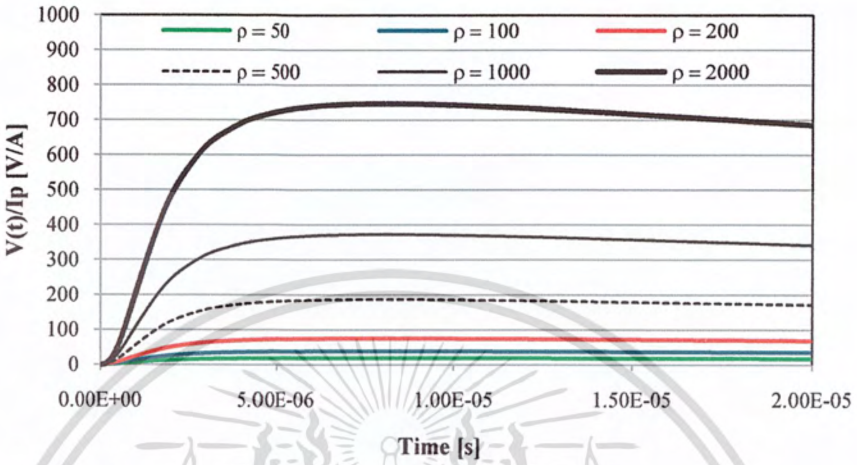


รูปที่ 4.1 วงจรสมมูลการวิเคราะห์แบบลำฟ้าผ่าแรก และลำฟ้าผ่าซ้ำ

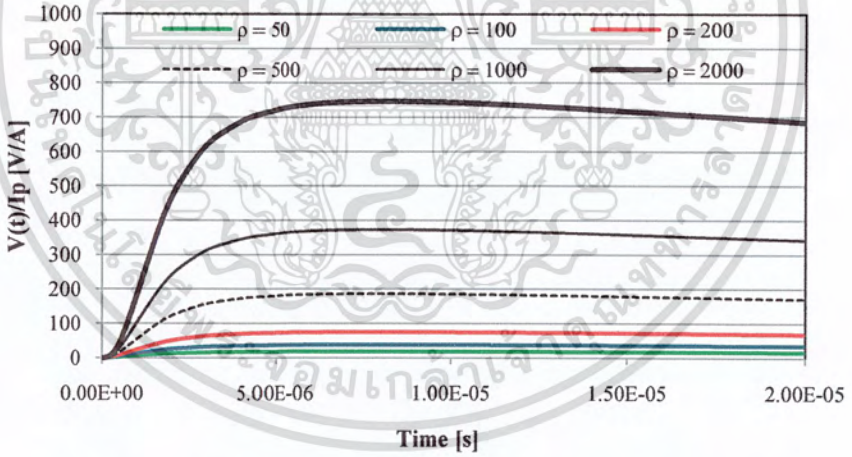
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่ง เมื่อกระแสลำฟ้าผ่าแรก (First stroke) ขนาดหนึ่งหน่วยไหลผ่าน และรัศมีของแท่งตัวนำ (a) = 0.0127 m

ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มที่ได้เมื่อความยาวของแท่งตัวนำเปลี่ยนไปเป็น 2.4 m และ 6 m เป็นไปตามรูปที่ 4.2 – 4.7

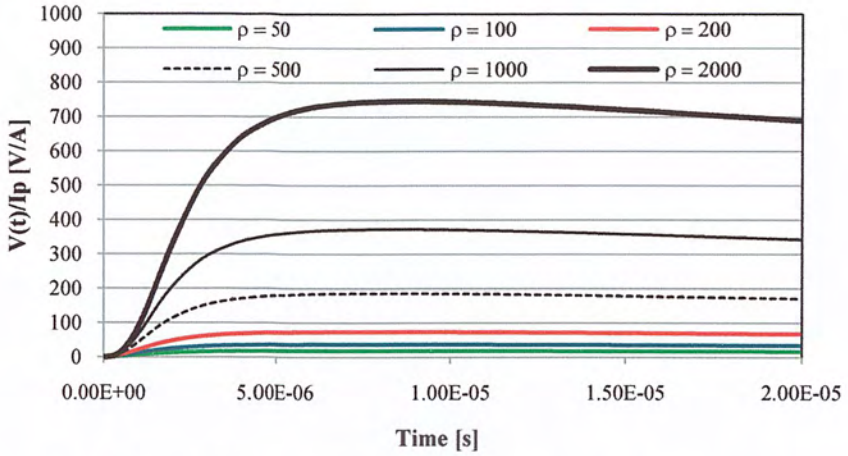


รูปที่ 4.2 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 5 F/m , C = 90.15 pF , μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω



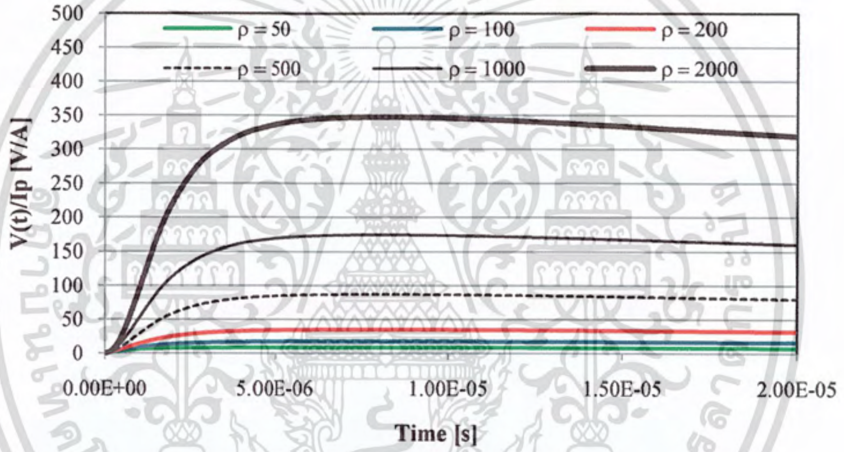
รูปที่ 4.3 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 10 F/m , C = 180.29 pF , μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



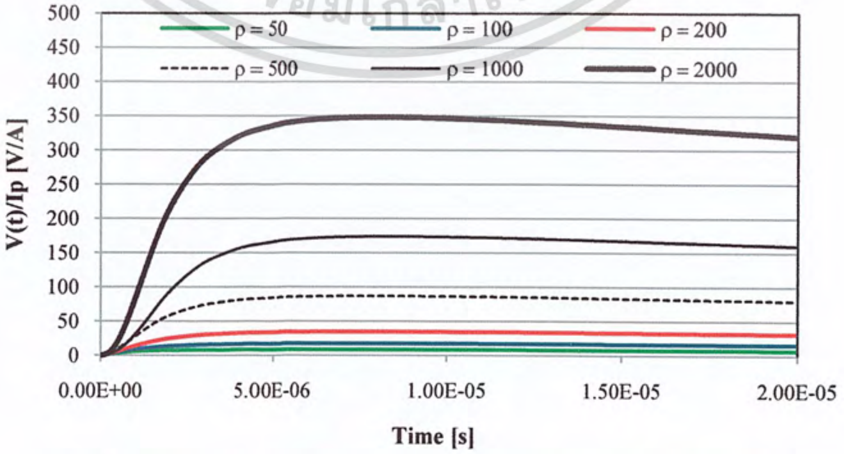
รูปที่ 4.4 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 50 F/m , C = 901.45 pF ,

μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω



รูปที่ 4.5 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 5 F/m , C = 237.82 pF ,

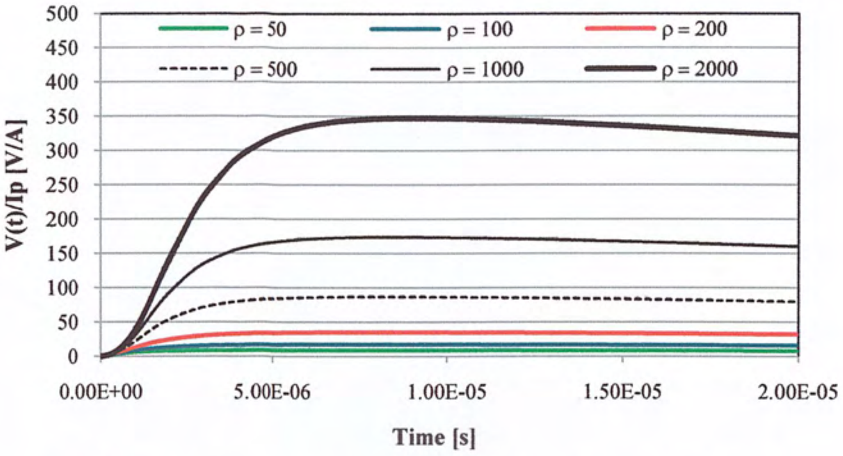
μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω



รูปที่ 4.6 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 10 F/m , C = 476.19 pF ,

μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω

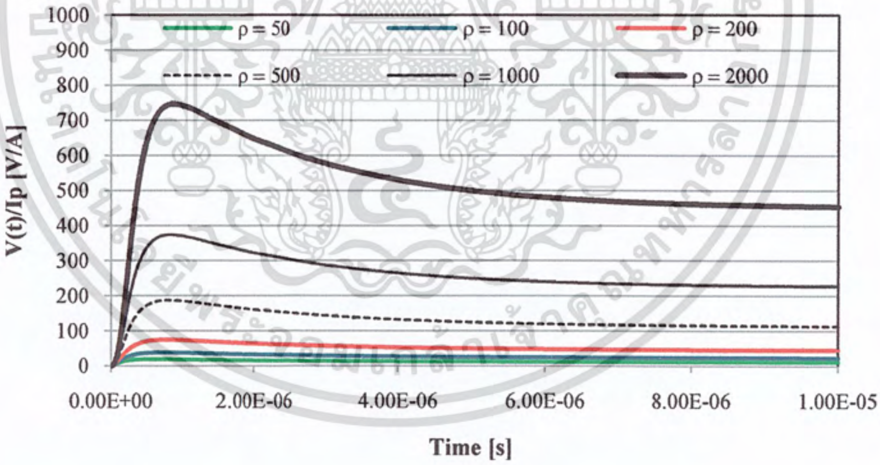
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 50 F/m , C = 2380.95 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω

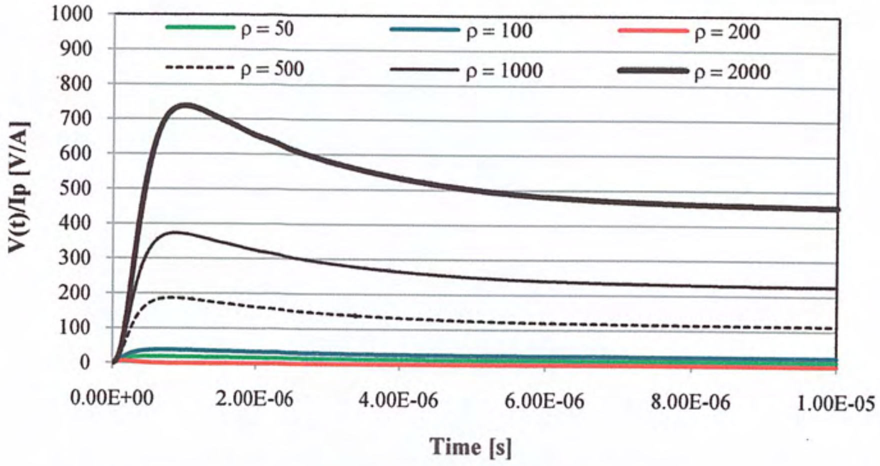
4.2.2 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่ง เมื่อกระแสลำฟ้าผ่าซ้ำ (Sub sequence stroke) ขนาดหนึ่งหน่วยไหลผ่าน และรัศมีของแท่งตัวนำ (a) = 0.0127 m

ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มที่ได้เมื่อความยาวของแท่งตัวนำเปลี่ยนไปเป็น 2.4 m และ 6 m เป็นไปตามรูปที่ 4.8 – 4.13



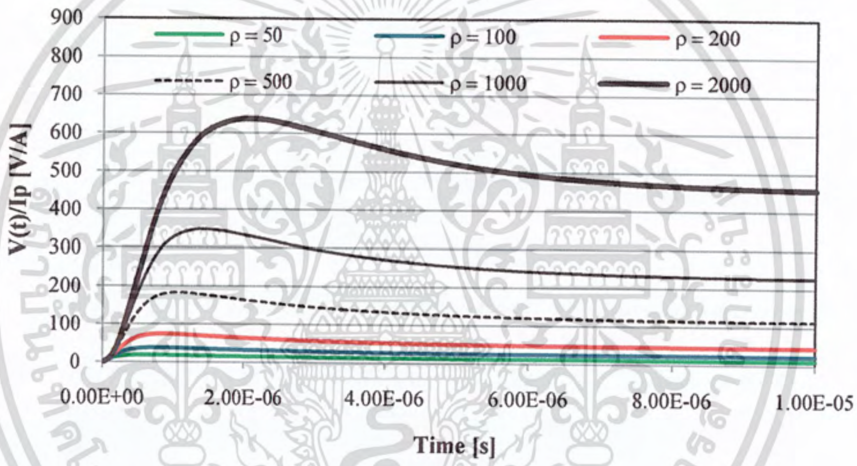
รูปที่ 4.8 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 5 F/m , C = 90.15 pF , μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



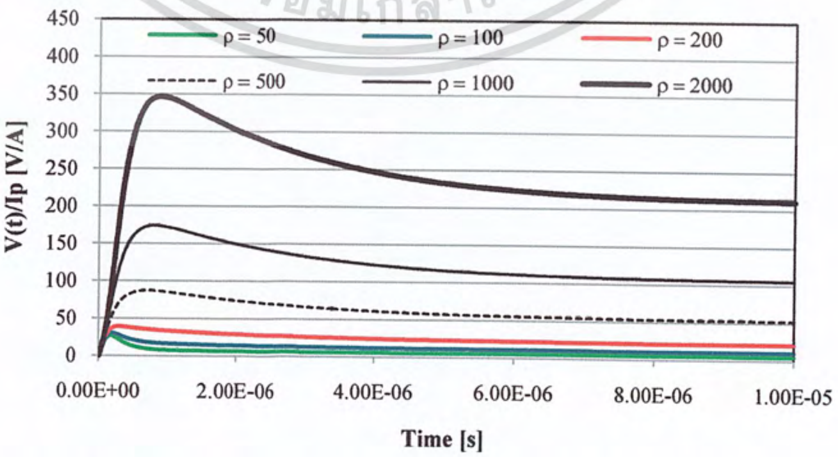
รูปที่ 4.9 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 10 F/m , C = 180.29 pF ,

μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω



รูปที่ 4.10 แท่งตัวนำยาว 2.4 m , ε_r = 50 F/m , C = 901.45 pF ,

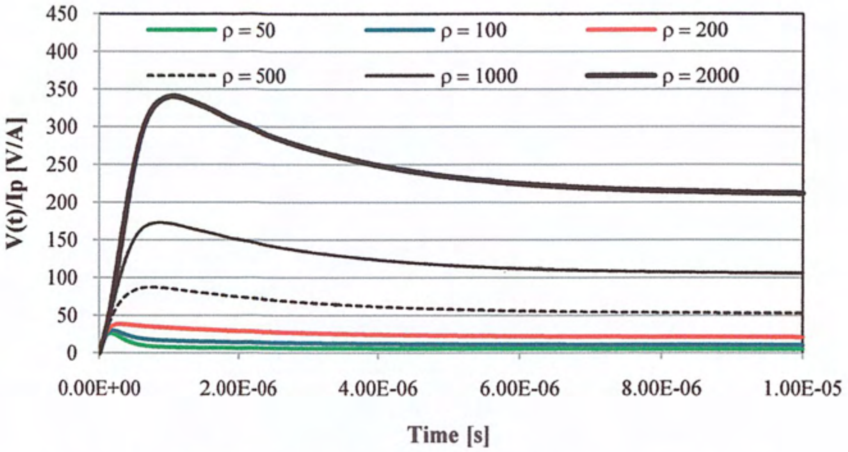
μ_r = 1 H/m , L = 2.36 μH เมื่อ R = 0.373ρ Ω



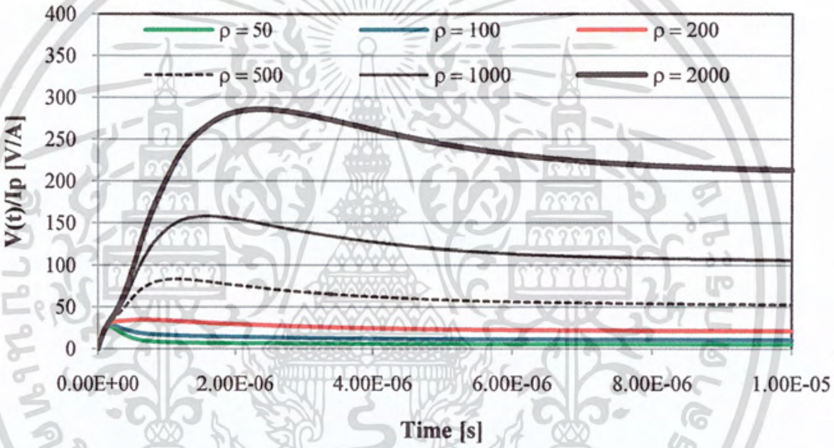
รูปที่ 4.11 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 5 F/m , C = 237.82 pF ,

μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 10 F/m , C = 476.19 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω

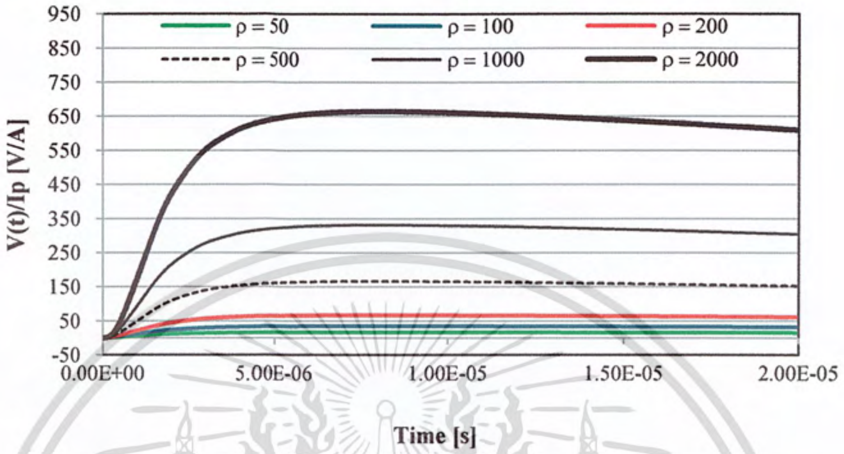


รูปที่ 4.13 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 50 F/m , C = 2380.95 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.85 μH เมื่อ R = 0.174ρ Ω

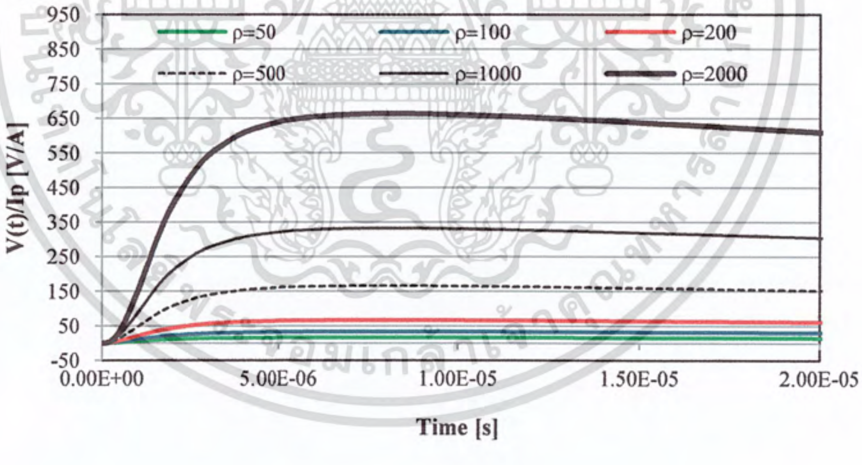
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวนอน เมื่อกระแสลำฟ้าผ่าแรก (First stroke) ขนาดหนึ่งหน่วยไหลผ่าน เมื่อฝังลึก (d) = 0.5 m และรัศมีของแท่งตัวนำ (a) = 0.0127 m

ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มที่ได้เมื่อความยาวของแท่งตัวนำเปลี่ยนไปเป็น 3 m, 6 m, 9 m และ 12 m เป็นไปตามรูปที่ 4.14 – 4.25

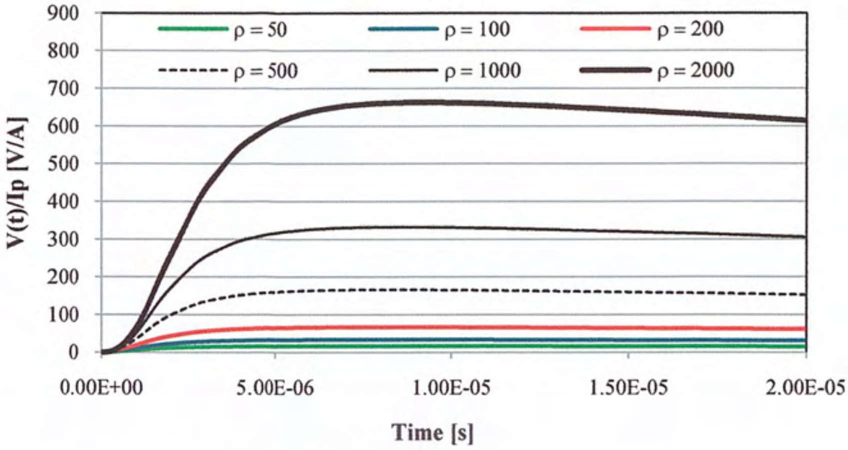


รูปที่ 4.14 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 5 F/m , C = 133.32 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω



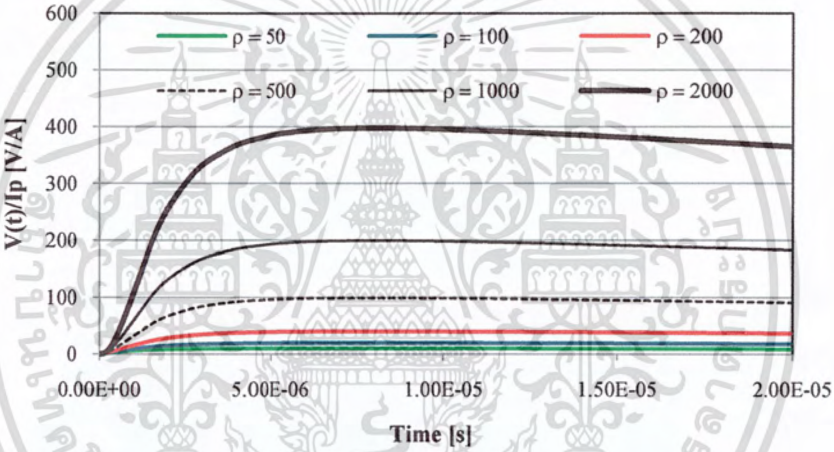
รูปที่ 4.15 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 10 F/m , C = 266.63 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



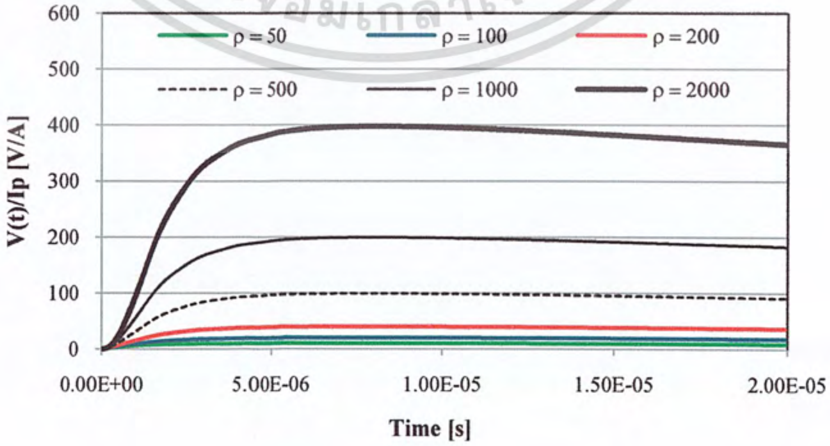
รูปที่ 4.16 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 50 F/m , C = 1333.17 pF ,

μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω



รูปที่ 4.17 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 5 F/m , C = 222.44 pF ,

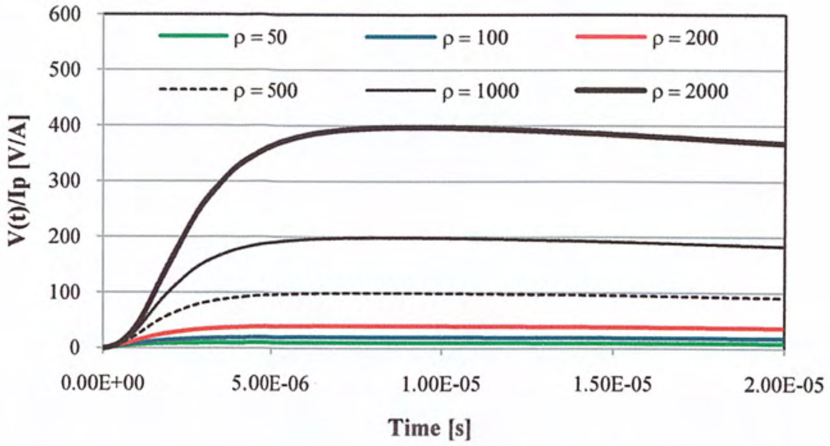
μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω



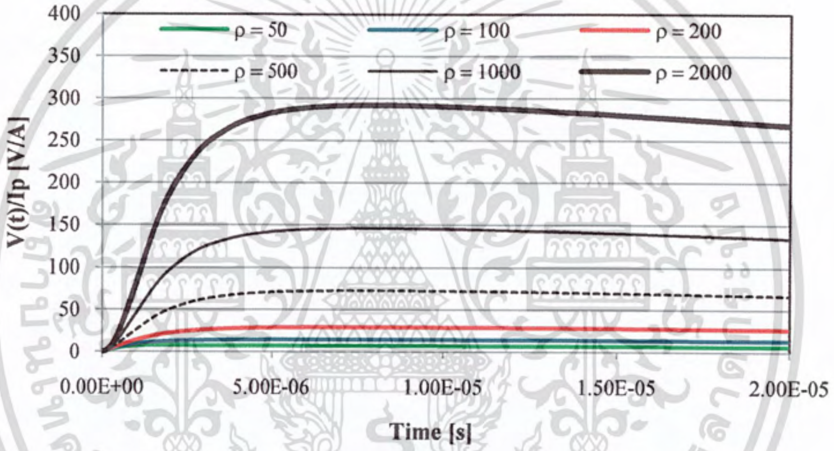
รูปที่ 4.18 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 10 F/m , C = 444.44 pF ,

μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω

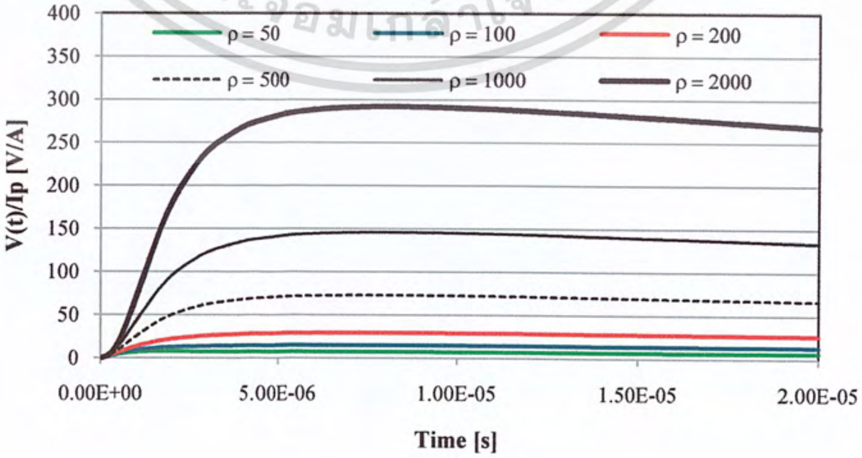
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 50 F/m , C = 2222.22 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω

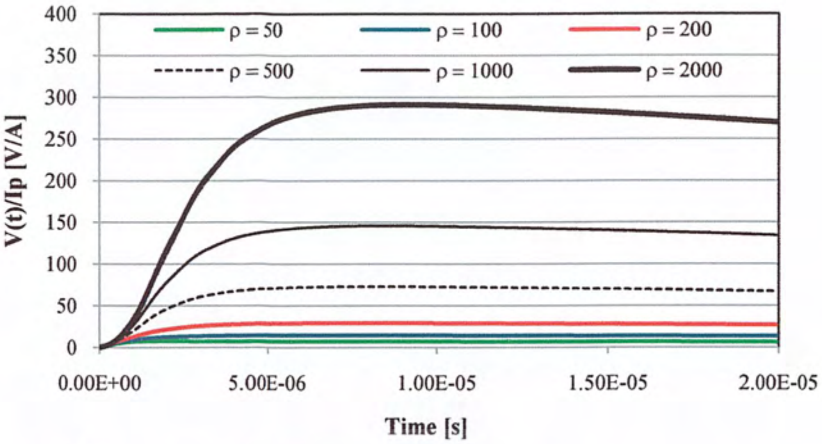


รูปที่ 4.20 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 5 F/m , C = 303.03 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω

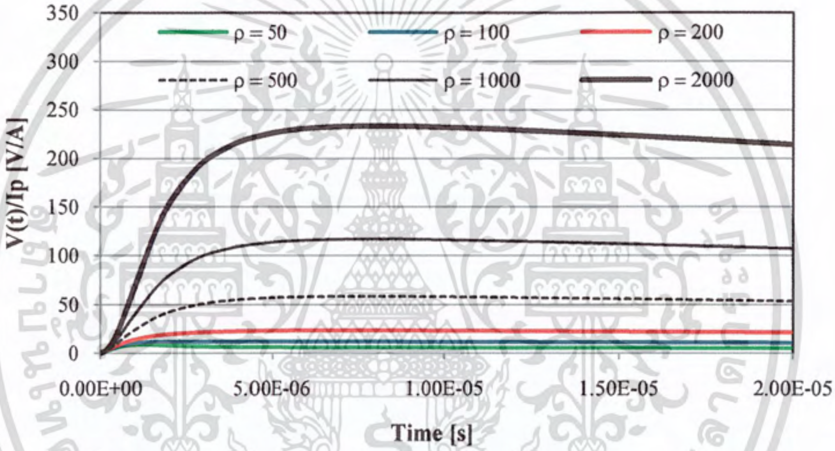


รูปที่ 4.21 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 10 F/m , C = 606.06 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω

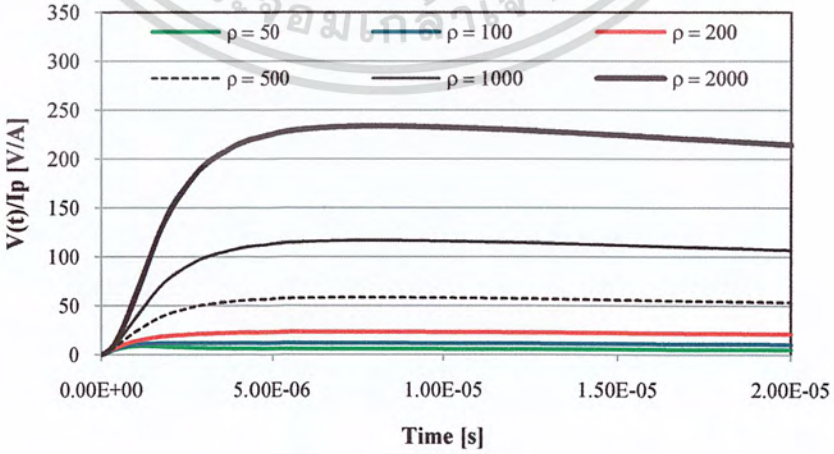
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 50 F/m , C = 3030.30 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω

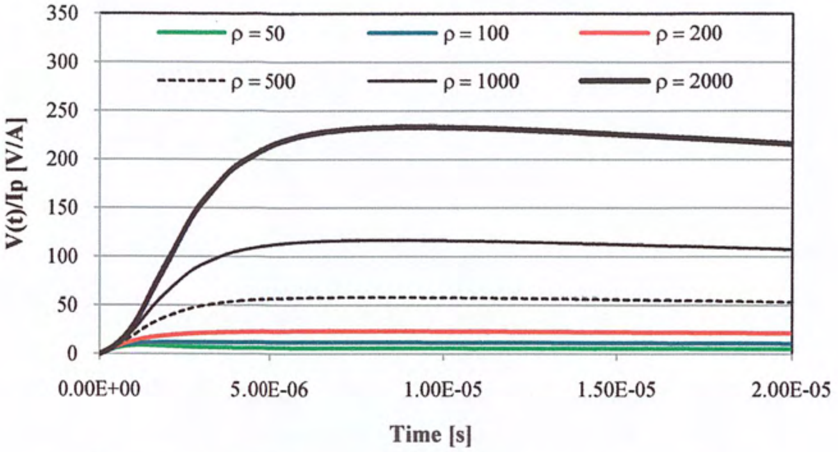


รูปที่ 4.23 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 5 F/m , C = 375 pF , μ_r = 1 H/m , L = 15.70 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω



รูปที่ 4.24 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 10 F/m , C = 758 pF , μ_r = 1 H/m , L = 15.70 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω

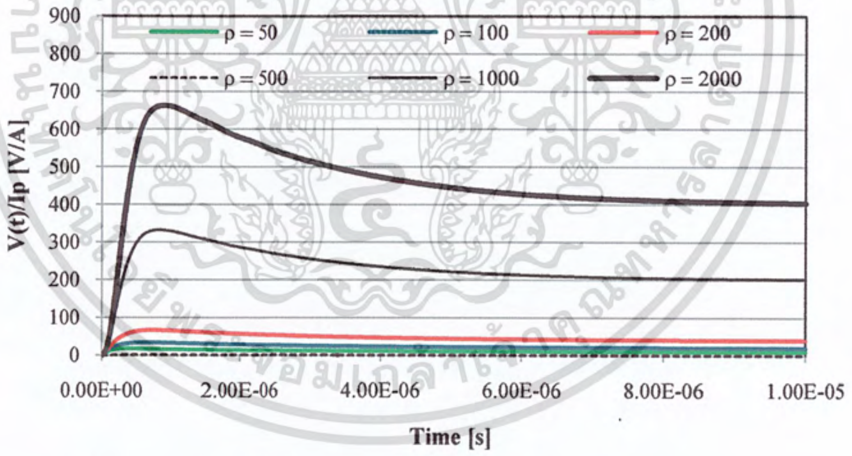
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 50 F/m , C = 3790 pF , μ_r = 1 H/m , L = 15.70 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω

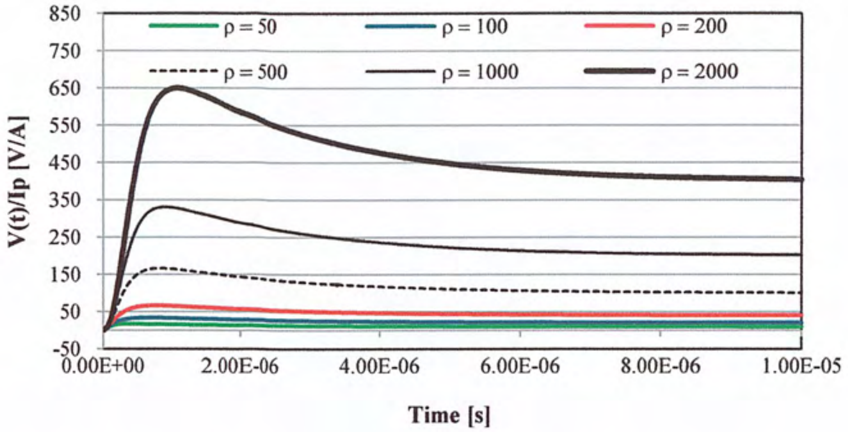
4.2.4 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวนอน เมื่อกระแสลำฟ้าผ่าซ้ำ (Sub sequence stroke) ขนาดหนึ่งหน่วยไหลผ่าน เมื่อฝังลึก (d) = 0.5 m และรัศมีของแท่งตัวนำ (a) = 0.0127 m

ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มที่ได้เมื่อความยาวของแท่งตัวนำเปลี่ยนไปเป็น 3 m, 6 m, 9 m และ 12 m เป็นไปตามรูปที่ 4.26 – 4.37

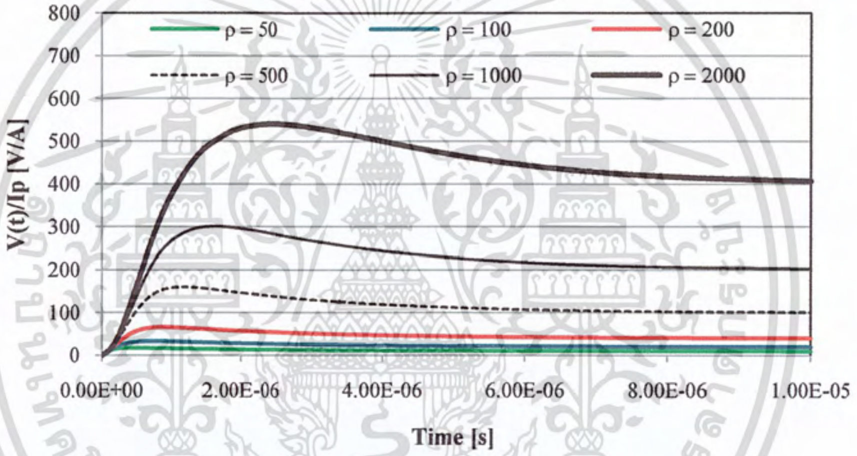


รูปที่ 4.26 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 5 F/m , C = 133.32 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω

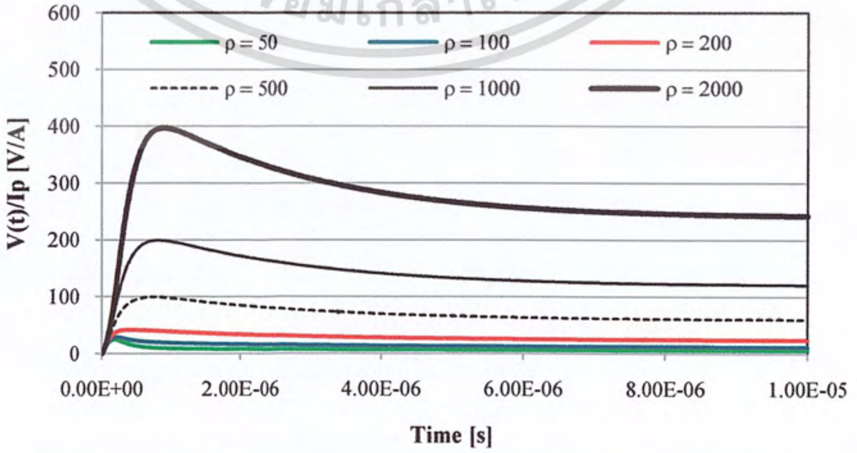
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 10 F/m , C = 266.63 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω

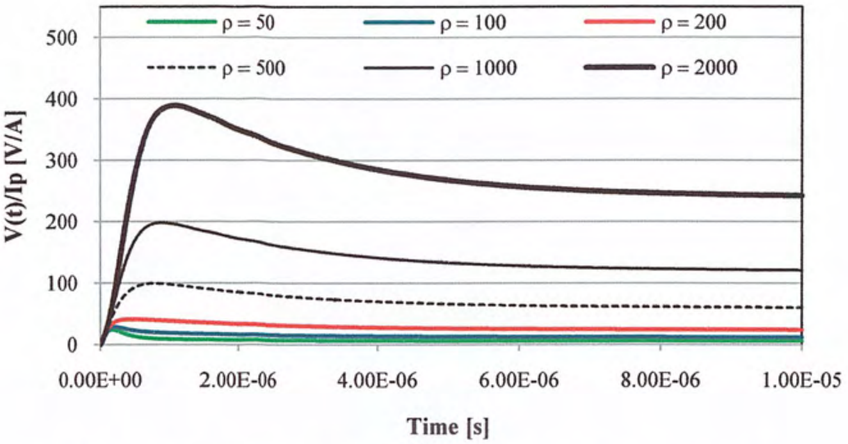


รูปที่ 4.28 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 50 F/m , C = 1333.17 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω

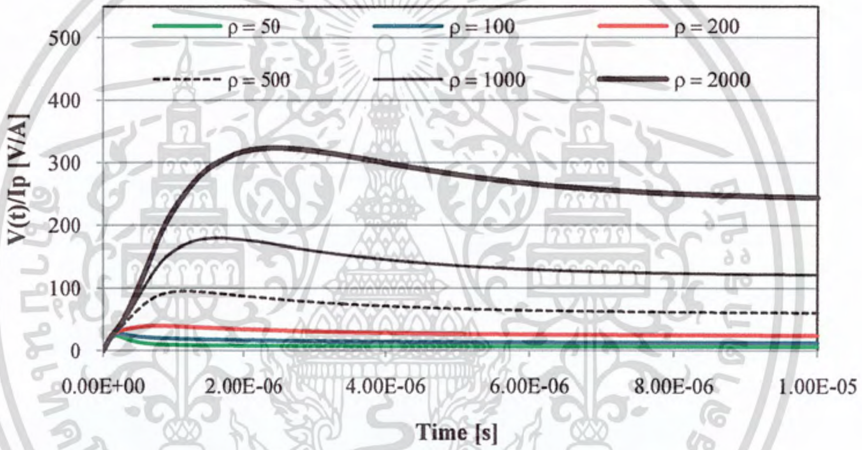


รูปที่ 4.29 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 5 F/m , C = 222.44 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω

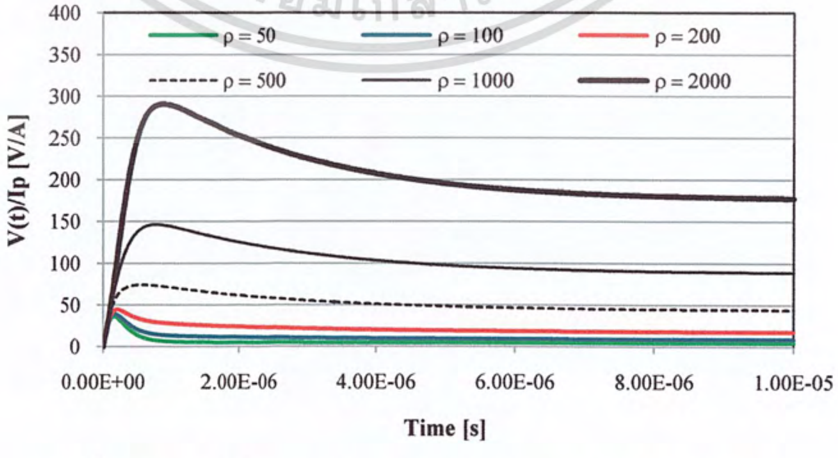
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 10 F/m , C = 444.44 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω

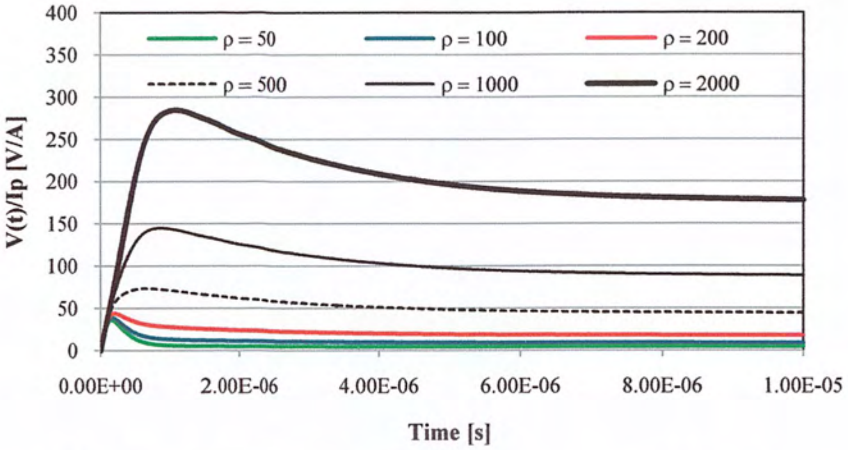


รูปที่ 4.31 แท่งตัวนำยาว 6 m , ε_r = 50 F/m , C = 2222.22 pF , μ_r = 1 H/m , L = 7.024 μH เมื่อ R = 0.199ρ Ω



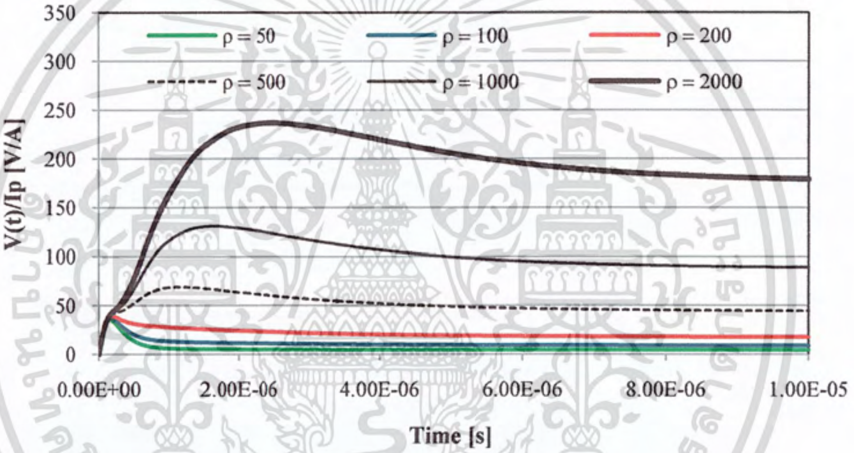
รูปที่ 4.32 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 5 F/m , C = 303.03 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



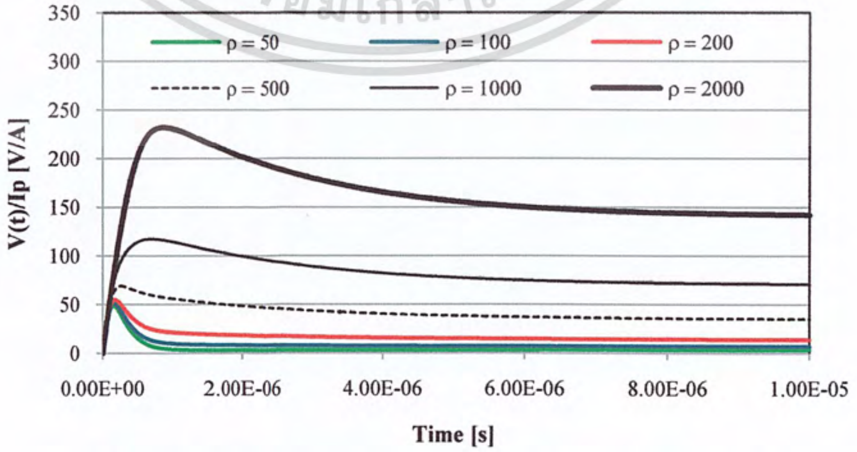
รูปที่ 4.33 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 10 F/m , C = 606.06 pF ,

μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω



รูปที่ 4.34 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 50 F/m , C = 3030.30 pF ,

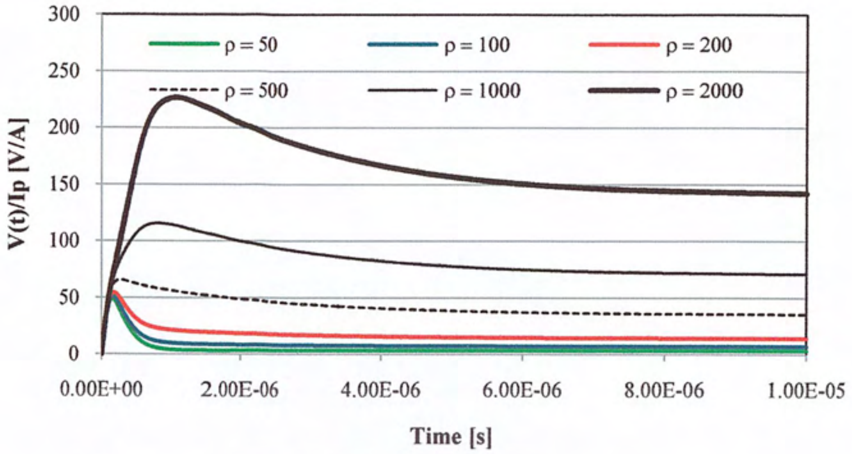
μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω



รูปที่ 4.35 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 5 F/m , C = 379 pF ,

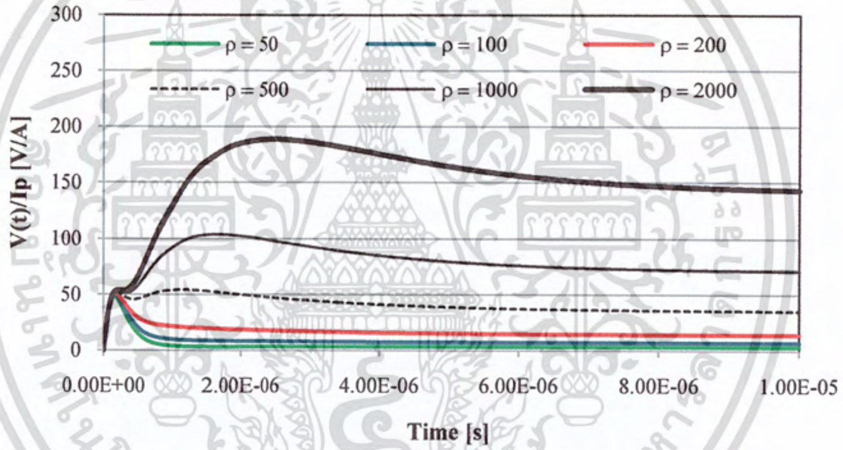
μ_r = 1 H/m , L = 15.7 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 10 F/m , C = 758 pF ,

μ_r = 1 H/m , L = 15.7 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω



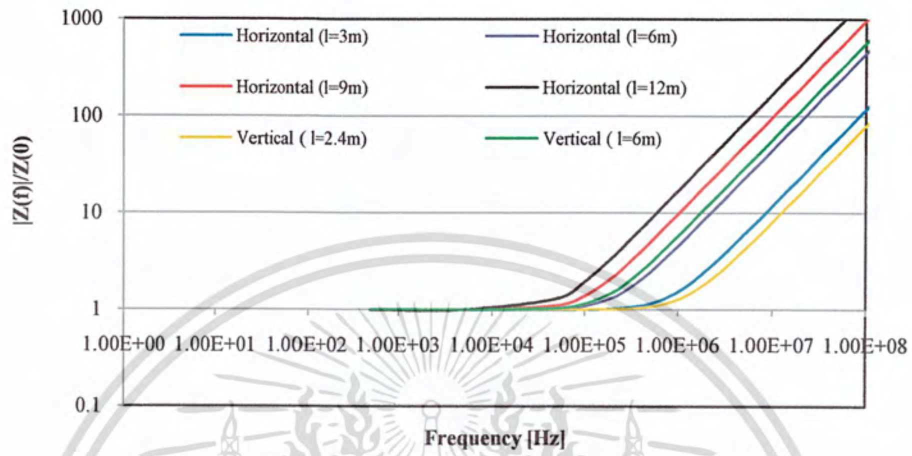
รูปที่ 4.37 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 50 F/m , C = 3790 pF ,

μ_r = 1 H/m , L = 15.7 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω

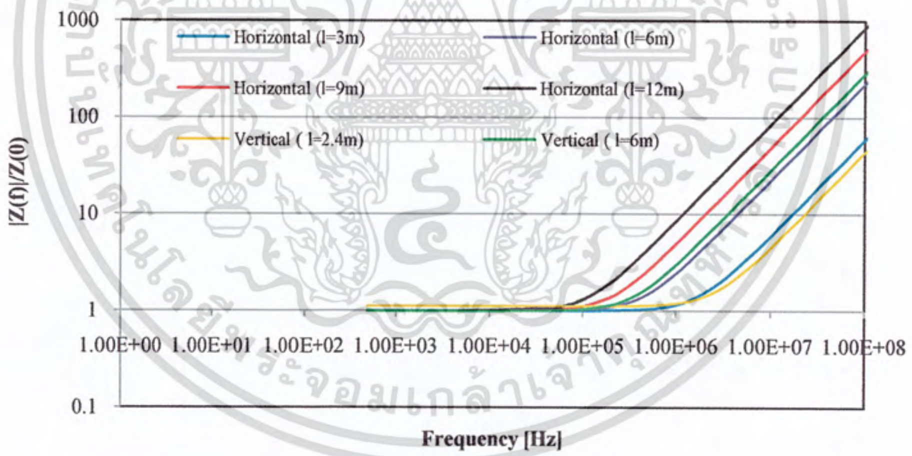
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลของความถี่กับขนาดและมุมของอิมพีแดนซ์ของแท่งตัวนำ

เมื่อพิจารณาผลของความยาวของแท่งตัวนำต่อลงดิน แท่งตัวนำต่อลงดินที่มีความยาวมากขึ้นจะมีค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความถี่ต่ำลง เนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของแท่งตัวนำต่อลงดิน

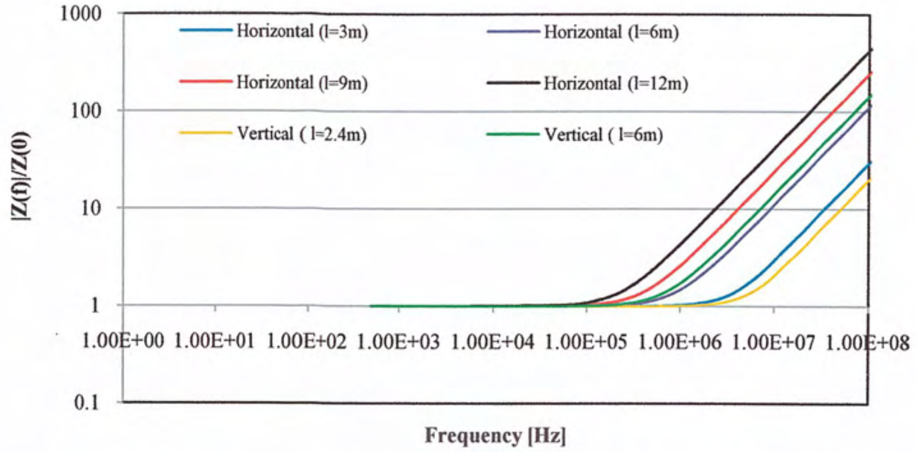


รูปที่ 4.38 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 50 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

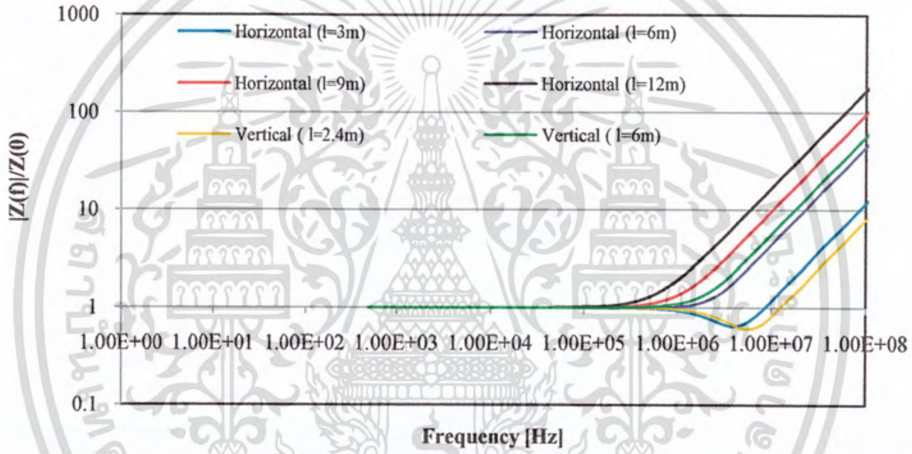


รูปที่ 4.39 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 100 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

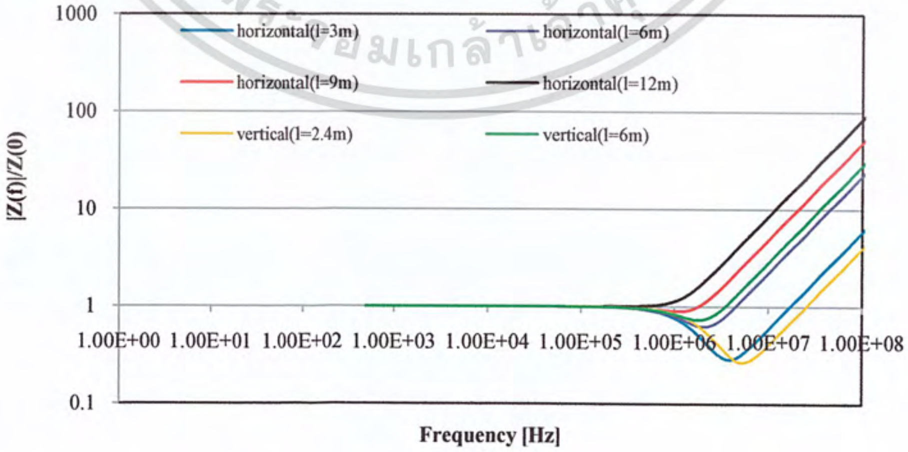
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 200 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

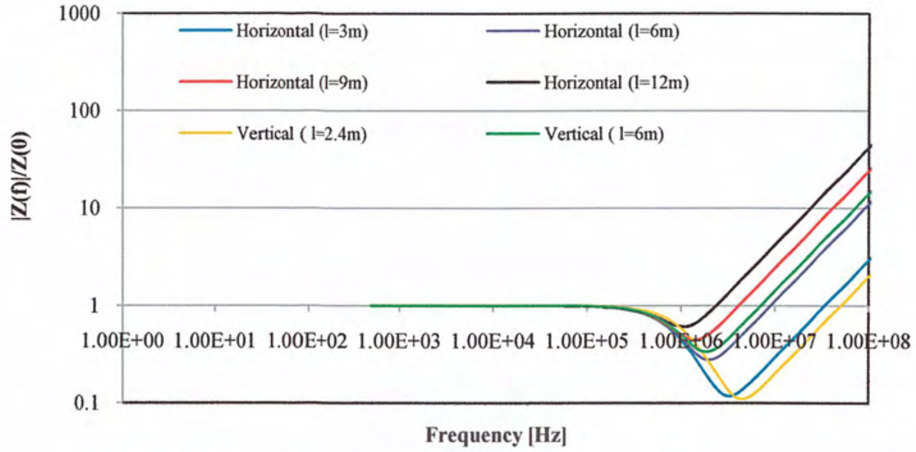


รูปที่ 4.41 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 500 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

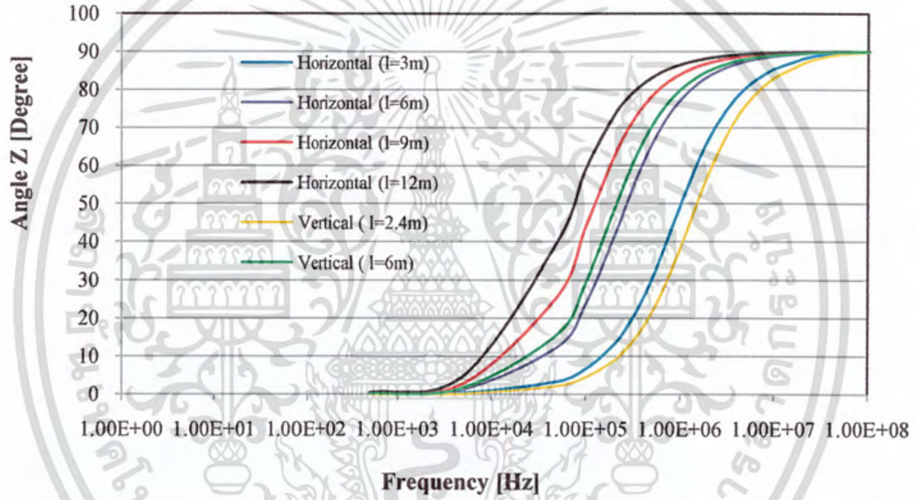


รูปที่ 4.42 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 1000 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

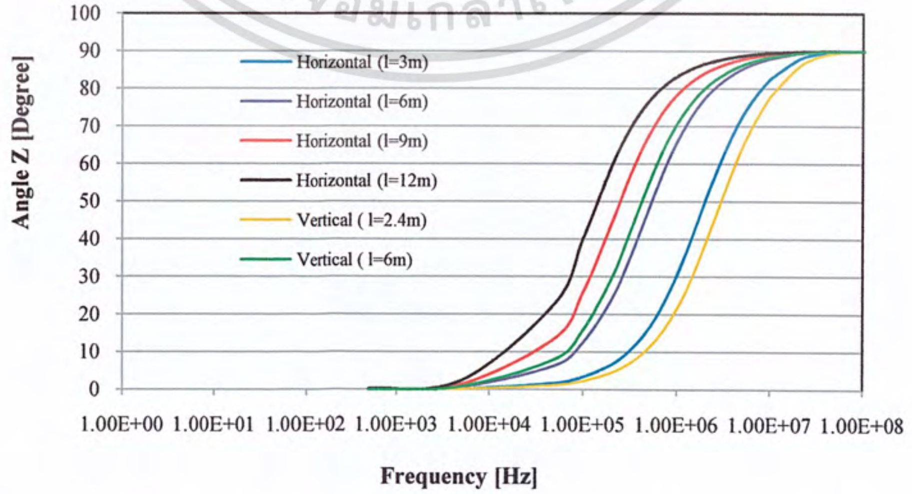
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.43 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 2000 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

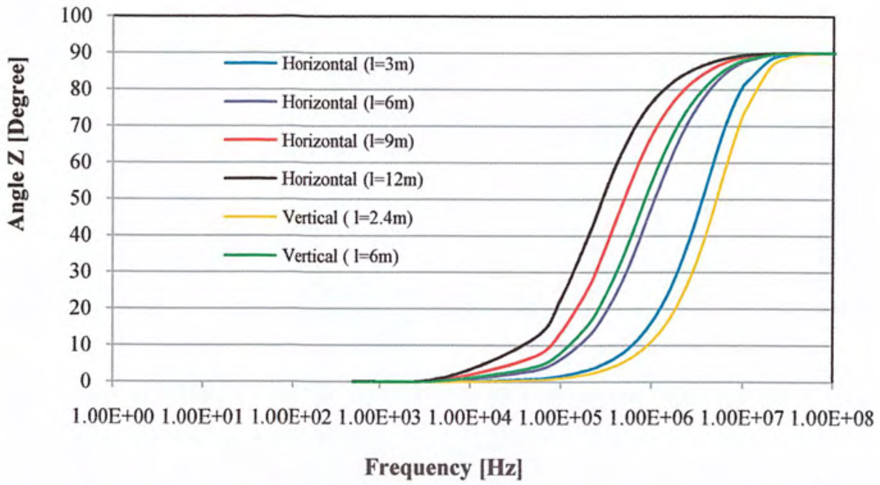


รูปที่ 4.44 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 50 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

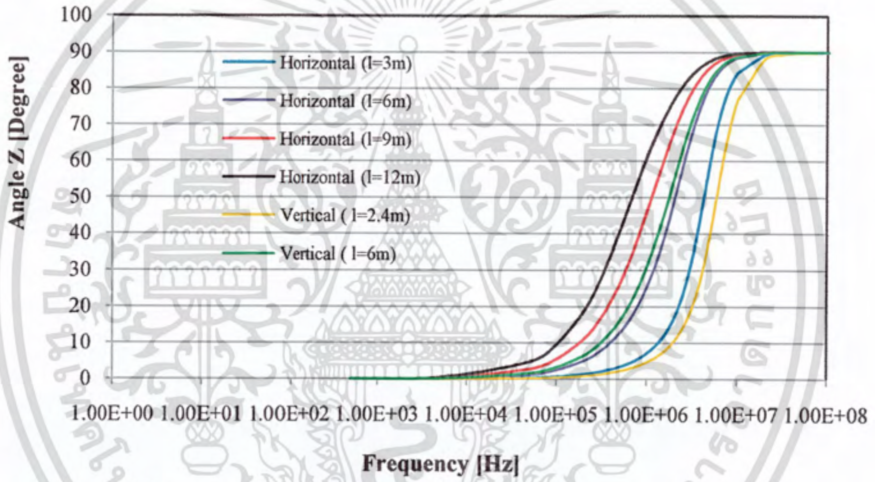


รูปที่ 4.45 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 100 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

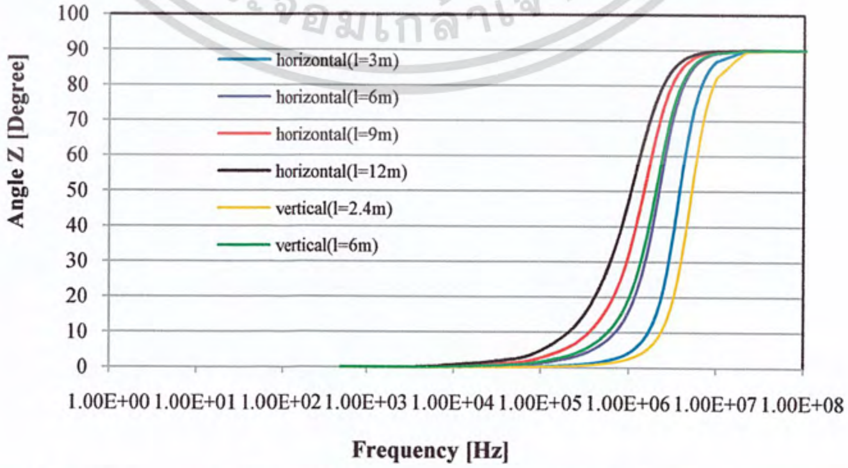
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.46 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 200 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

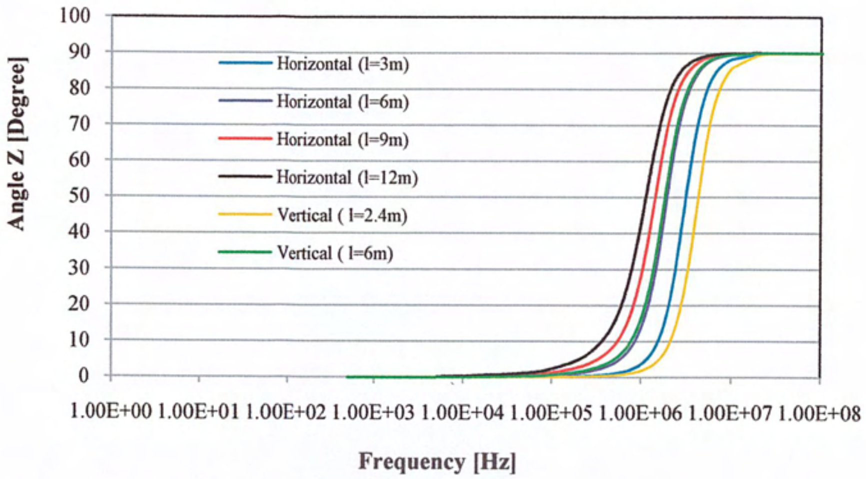


รูปที่ 4.47 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 500 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m



รูปที่ 4.48 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 1000 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 2000 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองผ่านโปรแกรม EMTP/ATPDraw เมื่อป้อนแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าแบบลำฟ้าผ่าแรก (First Stroke) และลำฟ้าผ่าซ้ำ (Subsequent Stroke) จะเห็นได้ว่าที่ย่านความถี่ต่ำหรือเวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่ามีค่าช้า ค่าความต้านทาน (R) มีผลมากที่สุดต่อระบบต่อลงดิน โดยค่าความต้านทานต่ำๆจะทำให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มของระบบต่อลงดินมีค่าต่ำและแปรผันตรงกับความต้านทานอย่างเดียว แต่ที่ความถี่สูงหรือเวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่าเร็ว จะไม่สามารถคิดผลของความต้านทาน (R) เพียงอย่างเดียวได้แม้ว่าค่าความต้านทานจะต่ำแล้วก็ตาม แต่ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุไฟฟ้า (C) ด้วย เนื่องจากจะมีผลต่อแรงดันสภาวะชั่วครู่ จึงต้องให้ความสำคัญแล้วนำมาพิจารณาร่วมด้วยเพื่อความถูกต้องของการออกแบบระบบต่อลงดิน

เมื่อพิจารณาผลของความยาวของแท่งตัวนำต่อลงดิน แท่งตัวนำต่อลงดินที่มีความยาวมากขึ้นจะมีค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความถี่ต่ำลง เนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของแท่งตัวนำต่อลงดิน

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและปฏิบัติโครงงานทั้งหมดพบอุปสรรคและปัญหาที่เกิดขึ้นดังนี้

1. สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ความต้านทาน (R), ความจุไฟฟ้า (C) และความเหนี่ยวนำ (L) มีความซับซ้อนและต้องใช้เงื่อนไขอื่นๆร่วมในการพิสูจน์ที่มาของสูตร จึงต้องมีความชำนาญในการคำนวณทางคณิตศาสตร์มากพอสมควรเพื่อความรวดเร็วและถูกต้อง
2. หลักการวิเคราะห์แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่งและแนวนอนมีหลักคิดที่แตกต่างกันและมีวิธีคิดที่เป็นวิธีเฉพาะทำให้ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมจึงทำให้ใช้เวลาในการวิเคราะห์ที่ช้ากว่ากำหนดเวลาการปฏิบัติโครงงานที่คาดไว้
3. ในการจำลองผ่านโปรแกรม EMTP/ATPDraw ควรมีความรู้ความเข้าใจที่ดีถึงวิธีการใช้โปรแกรมเพื่อสามารถดำเนินงานได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง จึงต้องมีการศึกษาและฝึกใช้งานโปรแกรมก่อน
4. การปฏิบัติโครงงานนี้เป็นการศึกษาภายใต้เงื่อนไขในการพิจารณาดินชั้นเดียวแต่เพื่อความถูกต้องที่มากขึ้น เราสามารถนำความรู้ที่ได้จากโครงงานนี้ไปใช้พัฒนาต่อได้โดยพิจารณาที่ดินสองชั้นหรือหลายชั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] สำรวย สังข์สะอาด, **"วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง"**, พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพ, สนพ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549

[2] ชวลิต ฤกษ์ดี และคณะ, **"การศึกษาและออกแบบสร้างกับดักฟ้าผ่า"**, ปริญญานิพนธ์, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549

[3] พีรวุฒิ ยุทธโกวิท, **"พฤติกรรมพลวัตรของระบบกราวด์ต่อกระแสฟ้าผ่า"**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[4] Farhad Rachidi, Wasyl Janischewskyj, **"Current and Electromagnetic Field Associated With Lightning – Return Strokes to Tall Towers"**, IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, vol.43, No.3, August 2001

[5] จีรพัฒน์ นวอนุรักษ์, **"การพัฒนาโปรแกรมสำหรับออกแบบกราวด์กริดของสถานีไฟฟ้าตามมาตรฐาน IEEE 80-2000"**, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ISBN 974-14-3428-6, 2549

[6] อภินันต์ สามพันธ์, **"การวิเคราะห์ระบบลงดินของเสาส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาดินเป็นแบบชั้นเดียวและสองชั้น"**, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550

[7] T.Takashima, T.Nakae, R.Ishibashi, **"High Frequency Characteristics of Impedances to Ground and Field Distributions of Ground Electrodes"**, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, April 1981

[8] Alberto De Conti, Silverio Visacro, **"Revision, Extension, and Validation of Jordan's Formula to Calculate the Surge Impedance of Vertical Conductors"**, IEEE Transaction on electromagnetic compatibility, vol.48, No.3, August 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
เปเปอร์ พฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดิน

พฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดิน
Transient Characteristic of Grounding Electrodes

กาญจนา พลอยคำ คมสัน สว่างเรือง จตุพร นิ่มนวลพานิช จักรพงษ์ แซ่ด่าน
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร/โทรสาร. 0-2329-8550

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดิน เมื่อเกิดกระแสฟ้าผ่าไหลลงดินที่ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์ระบบต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่ากรณีพิจารณาดินชั้นเดียว ซึ่งมีรูปแบบการติดตั้งแท่งตัวนำลงดิน2 รูปแบบ คือ แท่งตัวนำลงดินที่วางตัวในแนวดิ่ง (Vertical Ground Rod) และแท่งตัวนำลงดินที่วางตัวในแนวนอน (Horizontal Ground Rod) โดยทำการจำลองแบบด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านโปรแกรม EMTP/ATPDraw ซึ่งพิจารณาผลของพฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ที่เกิดขึ้นต่อระบบต่อลงดินที่มีโมเดลของดินประกอบด้วย ความต้านทาน (R) ความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุไฟฟ้า (C) โดยวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้จากรูปคลื่นแรงดัน รูปคลื่นกระแส และกราฟขนาดและมุมของอิมพิแดนซ์ ที่ความถี่ตั้งแต่ 0 Hz -10 MHz ได้ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ต่ำค่าความต้านทาน (R) มีผลมากที่สุดต่อระบบต่อลงดินแต่ที่ความถี่สูงเราไม่สามารถคิดผลของความต้านทาน (R) เพียงอย่างเดียวได้ ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความเก็บประจุ (C)ด้วย ซึ่งสามารถนำผลที่ได้มาเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าให้มีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : ระบบต่อลงดิน, สภาวะชั่วครู่, แท่งตัวนำลงดิน

Abstract

This paper presents the results of the study of transient characteristic of grounding electrodes when a lightning current flows into the electrode. The main objective is to study and analyze the grounding electrode of a lightning protection system in case of considering a 1-layer soil, which has two types of installation forms of a vertical ground rod and a horizontal ground rod. The results are simulated by using EMTP/ATPDraw program which considers transient behavior that occurs on the grounding electrode. The grounding electrodes in the soil are modeled by resistance (R), inductance (L), and capacitance (C). From the simulation results composing voltage waveforms, current waveforms, magnitude and angle of impedance in the frequency domain in a range from 0 Hz to 10 MHz, show that the resistance (R) is the most effective to grounding system in a low frequency range but in a high frequency range the effect of inductance (L) and capacitance (C) has to be taken into account in analysis. The analysis results can be adapted for being the methods of development of the grounding system for lightning protection system in an effective way.

KEYWORD : Grounding Systems, Transient, Grounding Electrodes

1.บทนำ

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถสร้างความเสียหายเป็นอย่างมาก ถ้าเกิดฟ้าผ่าลงสู่ระบบไฟฟ้า จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในระบบนั้นๆ อีกทั้งฟ้าผ่ามีการเปลี่ยนแปลงของกระแสสูงทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายไปรบกวนระบบ เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในระบบวงจร ไฟฟ้าเป็นแรงดันเสิร์จ และเป็นแรงดันเกินวิ่งไปตามสายไฟเข้าไปสู่อุปกรณ์ใช้ไฟฟ้าก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวต่อแรงดันสภาวะชั่วครู่ (Transient) ส่วนกระแสฟ้าผ่าที่ไหลลงสู่ดินก็อาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในบริเวณนั้น อันเนื่องมาจาแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส [1]

จากเหตุผลดังกล่าวจึงจำเป็นที่จะต้องมีเส้นทางให้กระแสฟ้าผ่าไหลลงสู่ดินได้อย่างสะดวกและรวดเร็วเพื่อลดผลกระทบของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นโดยการออกแบบแท่งกราวด์ต่อลงดินให้เหมาะสมเพื่อช่วยลดแรงดันสัมผัสและแรงดันช่วงก้าว ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาโดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์พฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ที่มีผลต่อระบบต่อลงดินของระบบป้องกันฟ้าผ่าโดยพิจารณาเป็นดินชั้นเดียว เมื่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ρ) ค่าความซึมซาบได้ของสนามไฟฟ้า (ε) และค่าความซึมซาบได้ของสนามแม่เหล็ก (μ_0) ต่างๆกัน และทำการวิเคราะห์ผลของกระแสฟ้าผ่าแบบรูปคลื่นลำฟ้าผ่าแรก (first stroke) และ ลำฟ้าผ่าซ้ำ (subsequent stroke)

2. พฤติกรรมชั่วครู่ของแท่งกราวด์ต่อลงดิน [2]

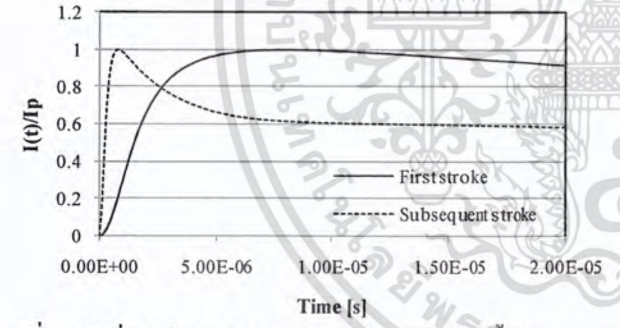
ระบบต่อลงดินทำหน้าที่ควบคุมแรงดันเกินที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าหรือกระแสผิดพร่อง มิให้อันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานหรืออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า นอกจากนั้นระบบต่อลงดินถูกใช้ทั้งในระบบไฟฟ้ากำลังและระบบสื่อสารเพื่อใช้เป็นระดับแรงดันอ้างอิง พฤติกรรมของระบบต่อลงดินในย่านความถี่ต่ำหรือความถี่พลังงานนั้นตลอดจนการออกแบบถูกเข้าใจอย่างดีเป็นอย่างกว้างขวาง อย่างไรก็ตามในกรณีที่กระแสฟ้าผ่าไหลผ่านระบบต่อลงดิน พฤติกรรมของระบบต่อลงดินจะมีลักษณะเป็นพลวัตรและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่อนข้างมีความแตกต่างจากพฤติกรรมในย่านความถี่ต่ำเนื่องจากกระแสฟ้าผ่ามีองค์ประกอบเชิงความถี่ในย่านความถี่ต่ำมากใกล้ย่านกระแสตรงไปถึงความถี่สูงระดับสิบเมกกะเฮิรตซ์ ดังรูปที่ 1 โดยค่าเวลายอดคลื่น (t_{peak}) ของลำฟ้าผ่าฟ้าซ้ำ จะเร็วกว่าค่า ของลำฟ้าผ่าแรก ซึ่งค่า เวลายอดคลื่น ของลำฟ้าผ่าแรก เท่ากับ 8 μs และค่าเวลายอดคลื่นของลำฟ้าผ่าซ้ำเท่ากับ 0.8μs และในบางกรณีประสิทธิภาพในการป้องกันของระบบต่อลงดินอาจถูกลดทอนในกรณีเมื่อกระแสฟ้าผ่าไหลผ่านเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพในย่านความถี่ต่ำหรือความถี่พลังงาน โดยองค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพการป้องกันของระบบต่อลงดิน คือ

1) ขนาด ตำแหน่งและรูปทรงของระบบต่อลงดิน
2) คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดินที่ติดตั้งระบบต่อลงดิน
3) ขนาดและรูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่า

กระแสฟ้าผ่ามีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมพลวัตรของระบบต่อลงดิน กรณีที่กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นสั้นประสิทธิภาพเชิงพลวัตรของระบบต่อลงดินจะแย่ลงเนื่องจากผลของพฤติกรรมความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductive Behavior) กล่าวคือ ค่ายอดของกระแสและแรงดันไม่ได้เกิดขึ้นที่เวลาเดียวกัน และที่ขนาดกระแสค่ายอดที่เท่ากันของกระแสฟ้าผ่าและกระแสความถี่ต่ำ ค่าแรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากกระแสฟ้าผ่าจะมีค่าสูงกว่าแรงดันเกินที่เกิดจากกระแสที่ความถี่ต่ำอย่างมากเนื่องจากพฤติกรรมความเหนี่ยวนำ และกรณีที่กระแสอิมพัลส์ค่าสูงประสิทธิภาพเชิงพลวัตรของระบบต่อลงดินจะถูกปรับปรุงเนื่องจากดินเกิดการดีสชาร์จบางส่วนหรือเกิดไอออไนเซชันในดิน (Soil Ionization)



รูปที่ 1 รูปคลื่นลำฟ้าผ่าแรก (First Stroke) และลำฟ้าผ่าซ้ำ (Subsequent Stroke)

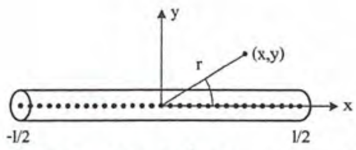
3. แบบจำลองสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดิน

แบบจำลองของแท่งตัวนำต่อลงดินในการศึกษานี้จะประกอบด้วย ค่าความต้านทาน ค่าความจุไฟฟ้า และค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

3.1 ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากกระแสในแท่งตัวนำที่วางอยู่ในดินที่มีระยะเป็นอนันต์ [3]

สมมติว่าตัวนำวางตามแกน x ระหว่าง x = - l/2 และ x = l/2 แล้วให้กระแส I_0 เข้าที่จุดกลางแท่งตัวนำ และให้กระแสบนตัวนำที่ระยะ x = u คือ I(u)

สมมติว่าศักย์เนื่องจากกระแสในส่วนตัวนำ du เสมือนว่าเป็นแหล่งกำเนิดจุด (Point Source) ที่แกนตัวนำ ดังรูป



รูปที่ 2 ศักย์ไฟฟ้าในแท่งตัวนำเมื่อพิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดจุด

เมื่อ a คือ รัศมีแท่งตัวนำ (m)
l คือ ความยาวแท่งตัวนำ (m)
d คือความลึกที่ฝังแท่งตัวนำ (m)

จะได้ศักย์เนื่องจากกระแสรั่วไหลตามผิวตัวนำทั้งหมดคือ

$$V(x,y) = \frac{I\rho}{4\pi r} \quad (1)$$

เมื่อ

$$I = \frac{I_0}{l}dx\,,\ r = \sqrt{x^2+y^2} \quad (2)$$

พิจารณา x = x - u

จะได้

$$\int dV(x,y) = \int_{-l/2}^{l/2} \frac{I_0\rho}{4\pi l}\frac{1}{\sqrt{(x-u)^2+y^2}}du \quad (3)$$

ศักย์เฉลี่ย

$$V_{av} = \frac{1}{l}\int V(x,y)dx \quad (4)$$

ค่าความต้านทานของตัวนำในดินอนันต์ได้คือ

$$R(l,a) = \frac{V_{av}}{I_0} \quad (5)$$

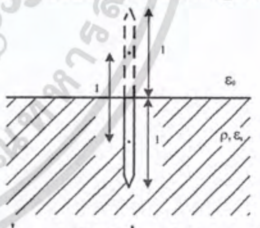
$$R(l,a) = \frac{\rho}{2\pi l}\left[ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right] \quad (6)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของแท่งตัวนำที่วางตัวอยู่ในดิน โดยที่ดินมีระยะอนันต์

จาก $Q = CV, V = PQ, P = \frac{1}{C}$

$$P(l,a) = \frac{1}{c(l,a)} = \frac{1}{2\pi\varepsilon l}\left[ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right] \quad (7)$$

3.2 พิจารณาแท่งตัวนำที่วางในแนวดิ่ง (Vertical grounding electrodes)



รูปที่ 3 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวดิ่ง

ความต้านทาน R

หากหลักดินที่วางตัวในแนวดิ่ง เราจะพิจารณาบนสมมติฐานเสมือนว่าแบ่งครึ่งแท่งตัวนำ ทำให้ความยาวของแท่งตัวนำเป็นครึ่งหนึ่ง นั่นคือ l=l/2 จะได้ความต้านทานของแท่งตัวนำเป็น 2 เท่าของแท่งตัวนำความยาว l ที่วางตัวอยู่ในดินที่มีระยะเป็นอนันต์ ถ้าหากปักแท่งตัวนำที่มีความยาว l จะได้ความต้านทานของแท่งตัวนำเป็น 2 เท่าของแท่งตัวนำที่มีความยาว 2l ที่วางตัวในดินที่มีระยะเป็นอนันต์

$$R_v(l,a) = \frac{\rho}{2\pi l}\left[\ln\left\{\frac{2l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{2l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{2l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{2l}\right)^2}\right] \quad (8)$$

ค่าความจุไฟฟ้า C [4]

$$\frac{1}{C_v(l,a)} = P_v(l,a) = P(l,a) + P(l,l)\left(\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_0}{\varepsilon_s+\varepsilon_0}\right) \quad (9)$$

$$P_v(l,a) = \left[\frac{1}{2\pi\varepsilon l}\left[ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right]\right] + \left[\left(\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_0}{\varepsilon_s+\varepsilon_0}\right)\left[ln\left\{\frac{l}{l}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{l}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{l}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{l}{l}\right)^2}\right]\right] \quad (10)$$

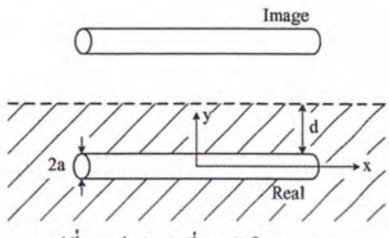
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเหนี่ยวนำ L [5]

$$L_v(l,a) = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left[\ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right] \quad (11)$$

3.3 พิจารณาแท่งตัวนำที่วางในแนวนอน (Horizontal grounding electrodes)

ความต้านทาน R



รูปที่ 4 แท่งตัวนำที่วางตัวในแนวราบ

$$R_H = R(l,a) + R(l,2d) \quad (12)$$

$$R_H = \left[\frac{\rho}{2\pi l}\left[\ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right]\right] + \left[\frac{\rho}{2\pi l}\left[\ln\left\{\frac{l}{2d}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{2d}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{2d}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{2d}{l}\right)^2}\right]\right] \quad (13)$$

ค่าความจุไฟฟ้า C

$$\frac{1}{C_H(l,a)} = P_H(l,a) = P(l,a) + P(l,2d)\left(\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_0}{\varepsilon_s+\varepsilon_0}\right) \quad (14)$$

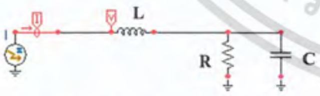
$$P_H(l,a) = \left[\frac{1}{2\pi\varepsilon l}\left[\ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right]\right] + \left[\left(\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_0}{\varepsilon_s+\varepsilon_0}\right)\left[\ln\left\{\frac{l}{2d}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{2d}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{2d}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{2d}{l}\right)^2}\right]\right] \quad (15)$$

ความเหนี่ยวนำ L

$$L_H(l,a) = \frac{\mu_0 l}{2\pi}\left[\ln\left\{\frac{l}{a}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right)\right\}+\frac{a}{l}-\sqrt{1+\left(\frac{a}{l}\right)^2}\right] \quad (16)$$

4. การทดลองและวิเคราะห์ผล

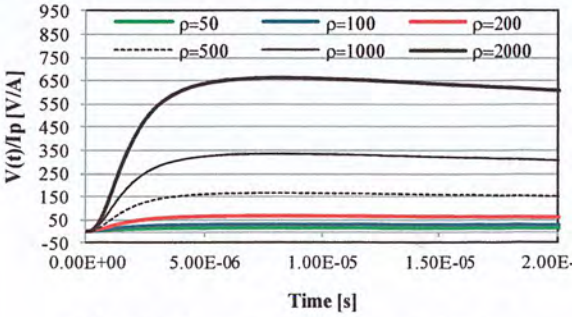
จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์นำค่าที่ได้มาจำลองผลผ่านทางโปรแกรม EMTP/ATPDraw แล้วทำการวิเคราะห์รูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าแบบลำฟ้าผ่าแรก และ ลำฟ้าผ่าซ้ำ เพื่อดูพฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของระบบต่อลงดิน



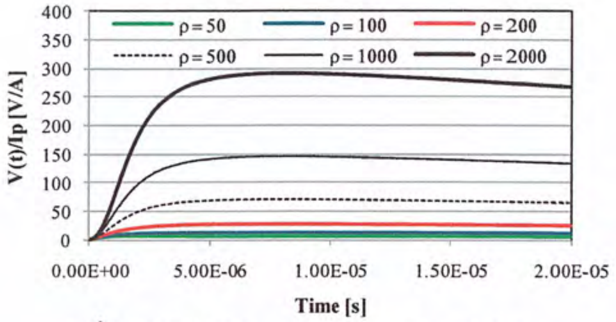
รูปที่ 5 วงจรสมมูลการวิเคราะห์แบบ First Stroke และ Subsequent Stroke

4.1 วิเคราะห์แบบลำฟ้าผ่าแรกของแท่งตัวนำลงดินแนวนอน

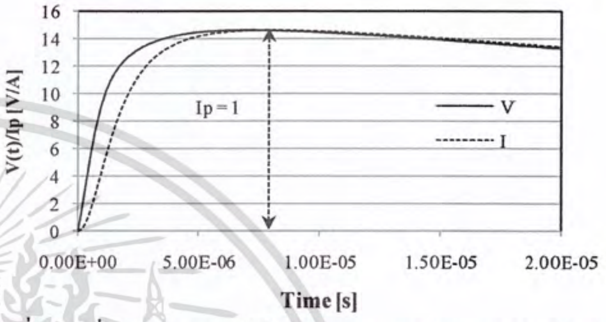
ฝังลึก d = 0.5 m, a = 0.0127 m



รูปที่ 6 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 10 F/m , C = 266.63 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω



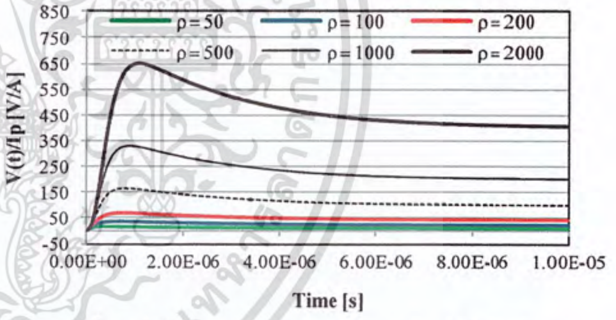
รูปที่ 7 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 10 F/m , C = 606.06 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω



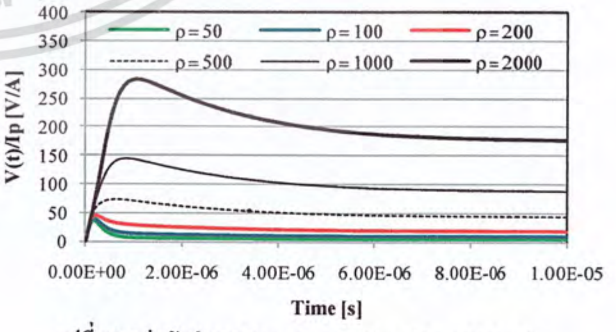
รูปที่ 8 รูปคลื่น V(t)/Ip ของแท่งตัวนำยาว 9 m , ρ = 100 Ωm , ε_r = 10 F/m

4.2 วิเคราะห์แบบลำฟ้าผ่าซ้ำของแท่งตัวนำลงดินแนวนอน

ฝังลึก d = 0.5 m, a = 0.0127 m

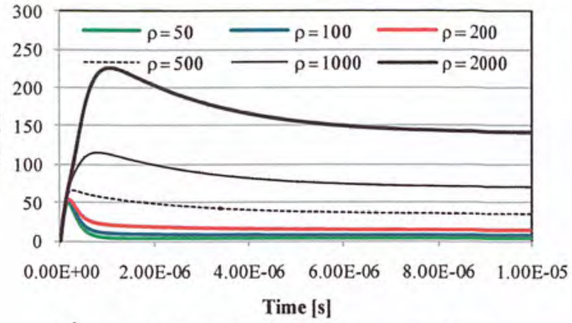


รูปที่ 9 แท่งตัวนำยาว 3 m , ε_r = 10 F/m , C = 266.63 pF , μ_r = 1 H/m , L = 3.096 μH เมื่อ R = 0.332ρ Ω

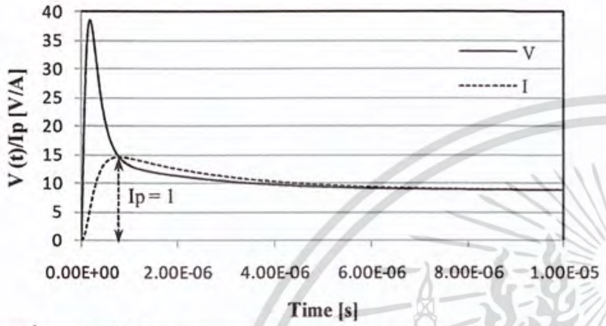


รูปที่ 10 แท่งตัวนำยาว 9 m , ε_r = 10 F/m , C = 606.06 pF , μ_r = 1 H/m , L = 11.25 μH เมื่อ R = 0.146ρ Ω

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



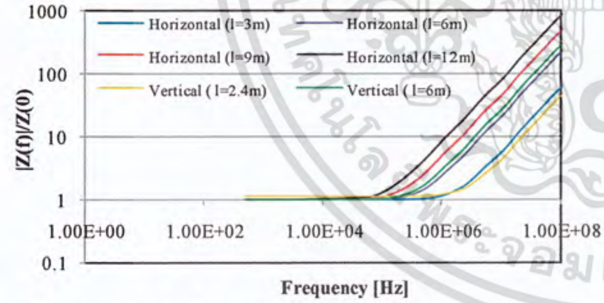
รูปที่ 11 แท่งตัวนำยาว 12 m , ε_r = 10 F/m , C = 758 pF , μ_r = 1 H/m , L = 15.7 μH เมื่อ R = 0.117ρ Ω



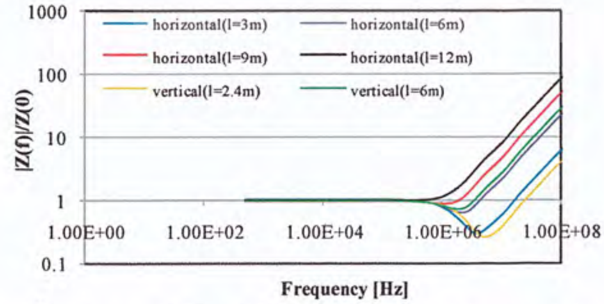
รูปที่ 12 รูปคลื่น V(t)/Ip ของแท่งตัวนำยาว 9 m, ρ = 100 Ωm, ε_r = 10 F/m

4.3 วิเคราะห์ผลของความถี่กับขนาดและมุมของอิมพีแดนซ์ของแท่งตัวนำ

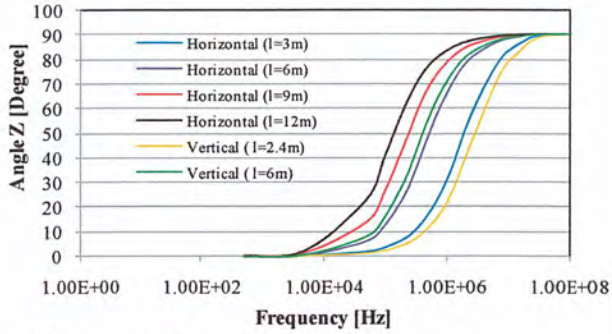
เมื่อพิจารณาผลของความยาวของแท่งตัวนำต่อลงดิน แท่งตัวนำต่อลงดินที่มีความยาวมากขึ้นจะมีค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความถี่ต่ำลง เนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำและค่าความจุไฟฟ้าของแท่งตัวนำต่อลงดิน โดยพิจารณาจากรูปที่ 13 ถึงรูปที่ 15



รูปที่ 13 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 100 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m



รูปที่ 14 ขนาดของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 1000 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m



รูปที่ 15 มุมของอิมพีแดนซ์ที่ ρ = 100 Ωm , ε_r = 10 F/m , μ_r = 1 H/m

5. สรุป

จากการวิเคราะห์ผลการจำลองผ่านโปรแกรมEMTP/ATPDraw เมื่อป้อนแหล่งจ่ายเป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าแบบลำฟ้าผ่าแรกและลำฟ้าผ่าซ้ำ จะเห็นได้ว่าที่ย่านความถี่ต่ำหรือเวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่ามีค่าช้า ค่าความต้านทาน (R) มีผลมากที่สุดต่อระบบต่อลงดินแต่ที่ความถี่สูงหรือเวลาหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่าเร็ว จะไม่สามารถคิดผลของความต้านทาน (R) เพียงอย่างเดียวได้ ต้องคำนึงถึงผลกระทบจากค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าความจุไฟฟ้า (C) ด้วย เนื่องจากจะมีผลต่อแรงดันสภาวะชั่วครู่ จึงต้องให้ความสำคัญแล้วนำมาพิจารณาร่วมด้วยเพื่อความถูกต้องของการออกแบบระบบต่อลงดิน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล และ ดร.พีรวุฒิ ยุทธโกวิท ที่ให้คำแนะนำในการทำโครงงาน ขอบคุณนายปุณยวีร์ ทองเขียว และนักศึกษาปริญญาโทในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูง ที่ให้คำแนะนำในการทำงานโครงงานนี้ จึงเสร็จสมบูรณ์ได้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] สำรวย สังข์สะอาด, "วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง", พิมพ์ครั้งที่ 3, กรุงเทพ, สนพ. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549

[2] Farhad Rachidi, Wasyl Janischewskyj, "Current and Electromagnetic Field Associated With Lightning – Return Strokes to Tall Towers", IEEE Transactions on electromagnetic compatibility, vol.43, No.3, August 2001

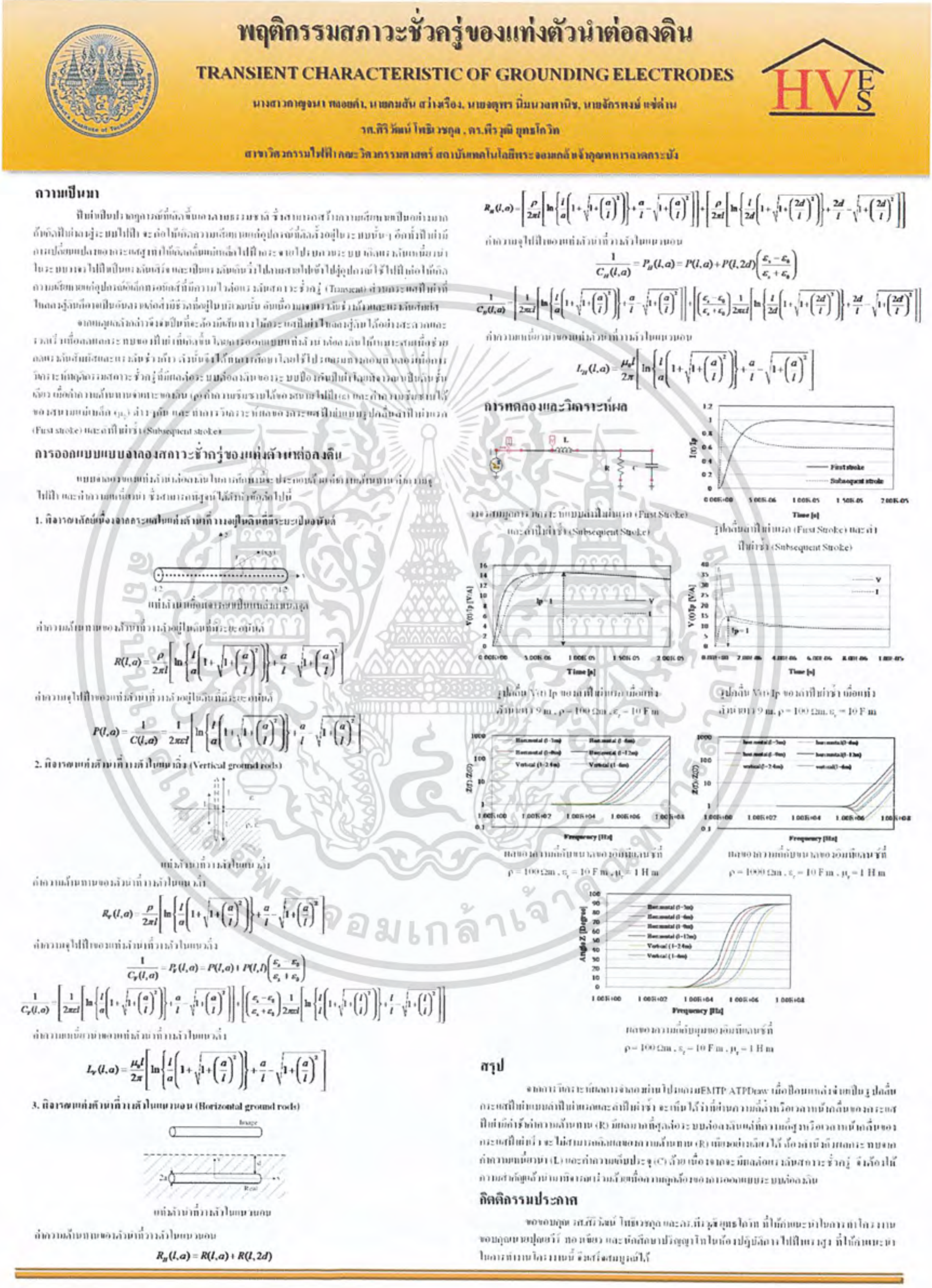
[3] อภินันต์ สามพันธ์, "การวิเคราะห์ระบบลงดินของเสาส่งไฟฟ้าโดยพิจารณาดินเป็นแบบชั้นเดียวและสองชั้น", คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550

[4] T.Takashima, T.Nakae, R.Ishibashi, "High Frequency Characteristics of Impedances to Ground and Field Distributions of Ground Electrodes", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, April 1981

[5] Alberto De Conti, Silverio Visacro, "Revision, Extension, and Validation of Jordan's Formula to Calculate the Surge Impedance of Vertical Conductors", IEEE Transaction on electromagnetic compatibility, vol.48, No.3, August 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
โปสเตอร์ พฤติกรรมสภาวะชั่วครู่ของแท่งตัวนำต่อลงดิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เปเปอร์ Current and Electromagnetic Field Associated With Lightning–Return Strokes to Tall Towers

356 IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 43, NO. 3, AUGUST 2001

Current and Electromagnetic Field Associated With Lightning–Return Strokes to Tall Towers

Farhad Rachidi, Wasyl Janischewskyj, *Fellow, IEEE*, Ali M. Hussein, *Senior Member, IEEE*, Carlo Alberto Nucci, Silvia Guerrieri, Behzad Kordi, and Jen-Shih Chang, *Senior Member, IEEE*

***Abstract*—In this paper, an analysis of electric and magnetic fields radiated by lightning first and subsequent return strokes to tall towers is presented. The contributions of the various components of the fields, namely, static, induction, and radiation for the electric field, and induction and radiation for the magnetic field are illustrated and discussed. It is shown in particular that the presence of a tower tends, in general, to increase substantially the electric and magnetic field peaks and their derivatives. This increase is mainly caused by the presence of two oppositely propagating current wavefronts originating from the tower top and by the very high-propagation velocity of current pulses within the tower (practically at the speed of light), and depends essentially on the wavefront steepness of the channel-base current. Because of the last factor, the increase of the field magnitudes is found to be significantly higher for subsequent return strokes, which are characterized by much faster risetimes compared to first return strokes. Furthermore, the presented results are shown to be consistent with recent experimental observations of current in lightning strokes to the Toronto CN Tower and of the associated electric and magnetic fields measured 2 km away. These findings partially explain the fact that subsequent return strokes characterized by lower current peaks but higher front steepnesses and return stroke speeds may result in higher field peaks. The results obtained in this study have important implications in electromagnetic compatibility. It is found that lightning strikes to tall metallic objects (towers, rods, etc.) lead to increased electromagnetic field disturbances. Also, subsequent return strokes are to be considered an even more important source of electromagnetic interferences than first return strokes. Indeed, electromagnetic fields from subsequent strokes are characterized by faster fronts and additionally, they may reach greater peaks than first strokes. Lastly, findings of this study emphasize the difficulty of extracting reliable lightning return stroke current information from remote electromagnetic field measurements using oversimplified formulae.**

***Index Terms*—Lightning, lightning electromagnetic pulse, lightning at tall structures, lightning-return stroke current.**

Manuscript received April 20, 2000; revised December 10, 2000. This paper was supported in part by the Swiss National Science Foundation, in part by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, and in part by the Italian Ministry of University and Scientific Research. This paper was presented in part at the 24th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Birmingham, U.K., September 1998.

F. Rachidi is with the Swiss Federal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, Lausanne 1015, Switzerland.

W. Janischewskyj is with the University of Toronto, Department of Electrical and Computer Engineering, Toronto, ON M5S 3G4, Canada.

A. M. Hussein is with the Ryerson Polytechnic University, Department of Electrical and Computer Engineering, Toronto, ON M5S 3G4, Canada.

C. A. Nucci and S. Guerrieri are with the University of Bologna, Department of Electrical Engineering, Bologna 40136, Italy.

B. Kordi is with the Shahed University, Tehran 15875-5794, Iran.

J.-S. Chang is with the McMaster University, Department of Engineering Physics, Hamilton, ON L8S 4MI, Canada.

Publisher Item Identifier S 0018-9375(01)07130-7.

I. Introduction

INFORMATION about lightning current parameters either comes from direct measurements, using, for example tall instrumented towers, or is based on quantification of lightning electromagnetic fields from which lightning currents are inferred adopting some empirical [1], [2] or theoretical [3] relations. Experimental observations and theoretical investigations have shown that the presence of an elevated strike object, such as a tall tower, could affect substantially lightning currents and their radiated electromagnetic fields (e.g., [4]–[14]). Accurate knowledge of lightning electromagnetic fields is essential for achieving an efficient insulation design of electric-power networks and for determining electromagnetic compatibility requirements of telecommunication systems, as many lightning-caused disturbances are due to lightning electromagnetic fields (e.g., lightning-induced overvoltages [15]).

In this paper, an analysis of electric and magnetic fields radiated by lightning return strokes to a tall tower is presented. Using the modified transmission line (MTL) model[1] Reference [16], [17], recently extended to take into account the presence of an elevated strike object [9], radiated electric and magnetic field waveforms are computed and analyzed. In the analysis, two channel-base current waveshapes, corresponding respectively to typical first and subsequent return strokes, are utilized. The effect of the presence of the tower on the magnitude and shape of 2-km distant fields is investigated, and the contributions of various field components, namely, static, induction and radiation for the electric field, and induction and radiation for the magnetic field are illustrated and discussed. Finally, electromagnetic compatibility implications of the theoretical findings are considered, and some explanations are given on recent experimental observations of lightning flashes to the CN Tower.

II. Computation of Radiated Electric and Magnetic Fields

A. Electromagnetic Field Radiated by a Vertical Antenna Above Ground

In our computations, we consider both, the lightning-return stroke channel and the elevated strike object, as vertical antennas above a perfectly conducting ground. At a general point in free space, the expressions for the vertical electric and azimuthal magnetic-field components, originated by a vertical

[1]The MTL model proposed in [16], [17] has been recently referred to as the MTLE model [18].

0018-9375/01$10.00 © 2001 IEEE

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:38 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dipole of infinitesimal length dz' along the z axis and at a height z' [19] are given by

$$dE_z(r, \phi, z, z', t) = \frac{dz'}{4\pi\varepsilon_o}\left[\frac{2(z-z')^2 - r^2}{R^5}\int_{R/c}^{t} i(z', \tau - R/c)\,d\tau + \frac{2(z-z')^2 - r^2}{cR^4}\, i(z', t - R/c) - \frac{r^2}{c^2R^3}\frac{\partial i(z', t-R/c)}{\partial t}\right] \quad (1)$$

$$dH_\phi(r, \phi, z, z', t) = \frac{dz'}{4\pi}\left[\frac{r}{R^3}\, i(z', t - R/c) + \frac{r}{cR^2}\frac{\partial i(z', t-R/c)}{\partial t}\right] \quad (2)$$

in which r, ϕ, z are the cylindrical coordinates of the observation point, R is the distance between the dipole and the observation point, $R = \sqrt{r^2 + (z'-z)^2}$, $i(z', t)$ is the dipole current, c is the speed of light, and, ε_o is the permittivity of free space. The first term in (1) is the electrostatic field, the second the electric induction or intermediate field, and the third the electric radiation field. In (2), the first term is the magnetic induction and the second the radiation field.

B. Lightning Return Stroke Model Including the Presence of an Elevated Strike Object

The problem of lightning-return strokes to tall towers was the subject of numerous recent studies (e.g., [4]–[14], [20], [21]). Different lightning-return stroke models, which, in their original forms, assume the return stroke to start at ground level, have been extended to take into account the presence of an elevated strike object [6], [9]–[11], [20]–[22]. In the present analysis, we will use the extended MTL model as described in [9]. For convenience, the main features of such a model are here summarized. As the leader descends toward the ground and reaches and attaches to an elevated object, an abrupt potential change generates a wave front (return stroke) that propagates toward the cloud. The current pulse $i_o(t)$ associated with the return-stroke phase starts at the top of the elevated object and propagates upward at the return stroke velocity v and with an exponentially-decreasing current amplitude, in accordance with the MTL model. Simultaneously, a similar current pulse $i_o(t)$ is assumed to be injected by the lightning channel at the top of the object. The object is modeled as an ideal transmission line characterized by a height h and reflection coefficients ρ_t and ρ_g, at its top and ground respectively. These reflection coefficients are assumed to be constant and independent of frequency.[2] The "noncontaminated"[3] return-stroke current pulse $i_o(t)$ travels downward the object at the speed of light and is first reflected at the bottom of the object (and part of it is transmitted to ground).[4] The reflected wave travels upward and is reflected at the top of the object (and part of it is transmitted to the lightning channel). This multiple-reflection process along the elevated strike object, assumed lossless, continues until the energy of the pulse dissipates in the ground and in the lightning channel [see (3)]. Concerning the current distribution in the lightning channel above the strike object, we assume that it can be described by the MTL return stroke current model, in that the current pulse $i_o(t)$ propagates upward in the channel with exponentially decreasing amplitude. This attenuation is not viewed as due to losses in the channel but is rather to take account of the effect of the distribution of charge stored in the corona sheath of the leader and subsequently discharged during the return stroke phase [25]. Clearly, the expression of the spatial-temporal distribution of the current along the channel has also to account for the portions of the pulses refracted into the channel following the multiple reflections at the ground and at the object top [see (4)].[5]

The expressions for the current distribution along the elevated strike object and the lightning return stroke channel, as derived in [9], [11], are given by

$$i(z,t) = \sum_{n=0}^{\infty}\left[\rho_g^n \rho_t^n i_o\left(t - \frac{h-z}{c} - \frac{2nh}{c}\right) + \rho_g^{n+1}\rho_t^n i_o\left(t - \frac{h+z}{c} - \frac{2nh}{c}\right)\right], \quad \text{for } 0 \le z \le h \quad (3)$$

$$i(z,t) = i_o\left(t - \frac{z-h}{v}\right)\exp\left(-\frac{z-h}{\lambda}\right) + \sum_{n=0}^{\infty}\left[\rho_g^n \rho_t^{n-1}(1+\rho_t) i_o\left(t - \frac{z-h}{c} - \frac{2nh}{c}\right)\right], \quad \text{for } z > h \quad (4)$$

where

- ρ_t and ρ_g — reflection coefficients at the top of the object and at ground, respectively;
- $i_o(t)$ — "noncontaminated" return-stroke current pulse at the top of the object [11];
- λ — decay constant of the MTL model [16], [17].

In the above expressions, possible reflections of the upward-propagating current pulses at the return-stroke wavefront [22], [23] are ignored, even though it is shown by Shostak *et al.* [26] that a better agreement with experimental data is found when considering such reflections.

Electromagnetic fields computed using the extended MTL model have been compared with experimental data and a satisfactory agreement has been found [9].

C. Non-Contaminated Channel-Base Current and Return Stroke Speed

In this study, we have considered two channel-base current waveforms corresponding, respectively, to typical first and

[2]Note that the reflection at ground level can be considered also in absence of any elevated strike object for return strokes initiating at ground level [23].

[3]Free of reflections from the struck object.

[4]While ground is assumed to be perfectly conducting for field computation (an approximation which is reasonable for the vertical electric and azimuthal magnetic fields [24]), its finite conductivity is taken into account when determining current reflections.

[5]Note that the MTL model can be seen also as the result of the contribution of a number of current sources distributed along the channel [25]. Each of these distributed sources delivers charges moving downward as the return stroke wavefront reaches its altitude. In this paper, however, we have disregarded for simplicity the reflections of these source contributions at the object top, an assumption that we consider will not alter qualitatively the obtained results, as it will be shown later.

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:38 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE I
PARAMETERS OF THE TWO HEIDLER'S FUNCTIONS USED TO REPRODUCE THE CHANNEL BASE CURRENT WAVESHAPE

	I_{01} (kA)	τ_{11} (μs)	τ_{21} (μs)	N_1	I_{02} (kA)	τ_{12} (μs)	τ_{22} (μs)	N_2
First Stroke	28	1.8	95	2	-	-	-	-
Subsequent Stroke	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

subsequent return strokes, based on observations of Berger *et al.*[6] [27].

The "noncontaminated" channel base currents are reproduced by means of a sum of two Heidler's functions [28]. The first return stroke channel base current is characterized by a peak value of 30 kA and a maximum steepness of 12 kA/μs, whereas the subsequent return stroke current has a peak value of 12 kA and a maximum steepness of 40 kA/μs. Note that recent experimental data from triggered lightning indicate values for the maximum steepness of about twice as large. However, the main results of this study remain qualitatively unchanged adopting a larger value than 40 kA/μs. The parameters of the Heidler's functions are given in Table I. Fig. 1 presents both channel base current waveforms and their time derivatives.

The values adopted for first and subsequent return stroke speed within the lightning channel, are, respectively, 1.7×10^8 m/s and 1.9×10^8 m/s, corresponding to the average values for natural lightning over the bottom 500 m of the channel [29]. The decay constant λ in the MTL model is assumed to be equal to 2 km, a value which has been determined using experimental data [17].

III. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

A. Lightning Return Stroke Initiated at Ground Level

Consider first the case of a return stroke initiated at ground level. Fig. 2(a) and (b) represents the first and the subsequent stroke vertical electric field computed at 2 km from the lightning channel. Such a value has been used since the distance from the CN tower to the E and H field measuring systems is 2 km (see [30]). The contributions of the static, induction and radiation components of the field are also included. It can be seen that the first stroke field [Fig. 2(a)] is characterized by a fast rising part mainly due to the radiation component, followed by a ramp increase due to the static term. The rapid decrease of the radiation term for the subsequent stroke field is responsible for the initial first peak [Fig. 2(b)].

Fig. 3(a) and (b) represents the azimuthal magnetic field waveforms for the same distance. The induction and radiation terms are separately included. In case of the magnetic field, the waves for both the first and the subsequent stroke show an increase to a peak and then a gradual decay, although for the subsequent stroke the peak is more pronounced and occurs at an earlier instant of time. For both waveforms, the typical azimuthal H field is characterized by a fast rising part, again due to the radiation term, followed by a slight "hump" resulting from the induction component. The zero crossing of the radiation term occurring at about 15 μs, is responsible for the faster decay of the total magnetic field in comparison to that of the induction term.

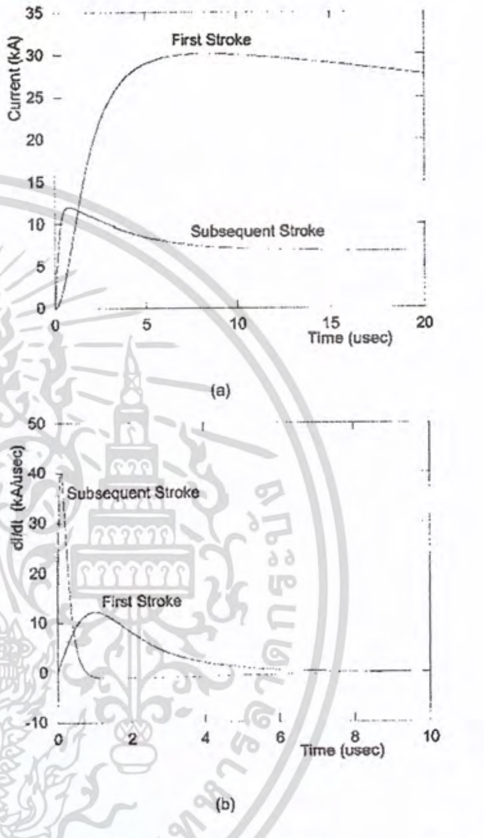


Fig. 1. (a) Idealized channel base current. (b) Current derivative for typical first and subsequent strokes.

It can also be seen in Figs. 2 and 3 that the contribution of the radiation term to the total electric and magnetic field is more significant for the subsequent stroke. This is essentially due to

[6] It is worth noting that Berger's data are also obtained using instrumented towers. Hence, even though the various reflections are not discernible in measurement records due to the relatively short instrumented tower, some contamination might yet occur (see [11]). However, despite the above, in this study, we consider the Berger's current waveshapes as reference and exempt from tower contamination.

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:38 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

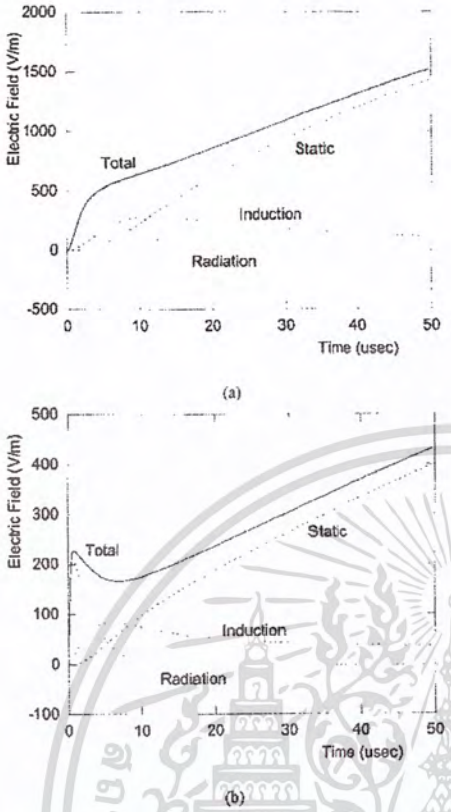


Fig. 2. Vertical electric field at 2 km from the lightning channel. Return stroke initiated at ground level. (a) First return stroke. (b) Subsequent return stroke.

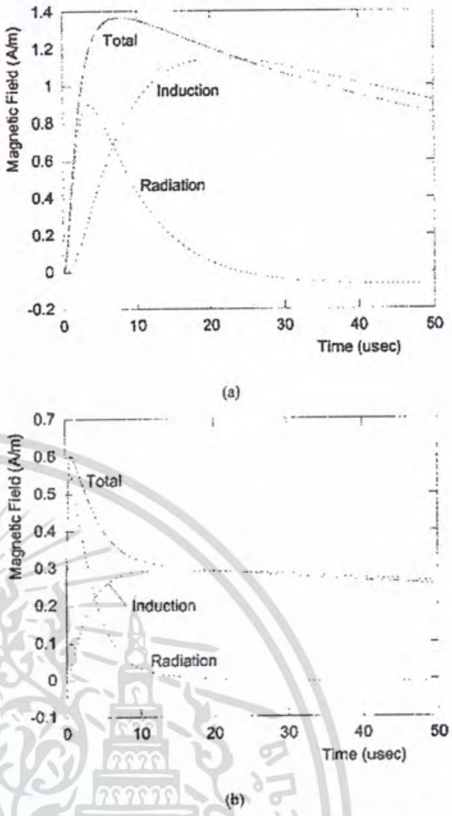


Fig. 3. Azimuthal magnetic field at 2 km from the lightning channel. Return stroke initiated at ground level. (a) First return stroke. (b) Subsequent return stroke.

the fact that subsequent strokes are characterized by faster return stroke speeds and higher front steepnesses of the current waveform.

It is worth mentioning that the contribution of the various components of the electric and magnetic fields depends strongly on the distance to the observation point. At closer observation points (less than a few hundred meters), the radiation term contribution to the field magnitude is small compared to contributions from the static and induction terms. However, at distances beyond some tens of kilometers, the contribution of the radiation term will become predominant and the static and induction terms will have a negligible effect [31].

B. Lightning Return Stroke to a Tall Tower

Elevated Strike Object: Consider an elevated strike object characterized by a height of 553 m above ground, corresponding to the actual height of the CN Tower [32]. In this paper, the tower is modeled as a single, uniform and lossless transmission line (as described in Section II B). Such an assumption does not alter the conclusions of our analysis, although it has been shown that for a more accurate representation of the tower, three or four transmission line sections in cascade are to be considered [10], [33]. The reflection coefficients at the bottom and at the top of the tower are assumed to be 0.48 and −0.50, respectively. These values have been derived analyzing the fine structure of the lightning return stroke current measured at 474 m above ground level [10].

Current and Current Derivative Along the Tower: Fig. 4 shows the waveforms of current and current derivative evaluated at the top (553 m), the middle (276.5 m), and the base of the tower (0 m), starting from the typical first return stroke current[7] presented in Fig. 1, as the "noncontaminated current" at the top of the object and taking into account reflections at its two extremities.

It can be seen that moving toward the ground, the current experiences a higher peak value and a shorter time to its peak due to the contribution of the reflected wave at the ground level.

[7]Note that in the case of lightning strikes to a tall tower, the adopted first and subsequent stroke current waveshapes represent, respectively, slow front and fast front strokes.

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:38 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

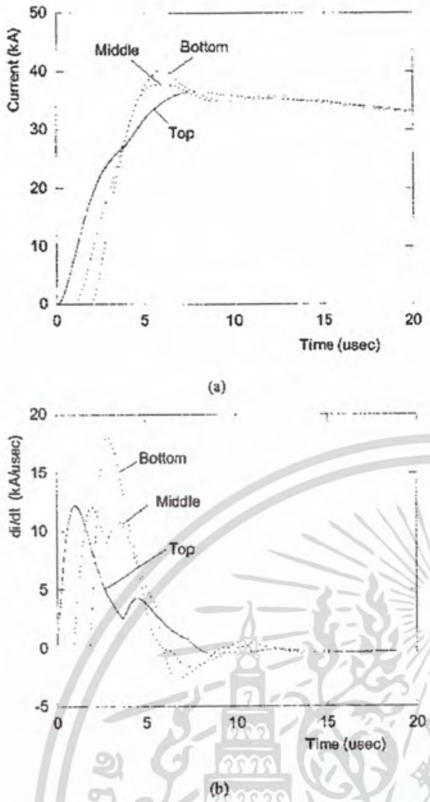


Fig. 4. (a) Current; and (b) current derivative along the strike object for a typical first return stroke.

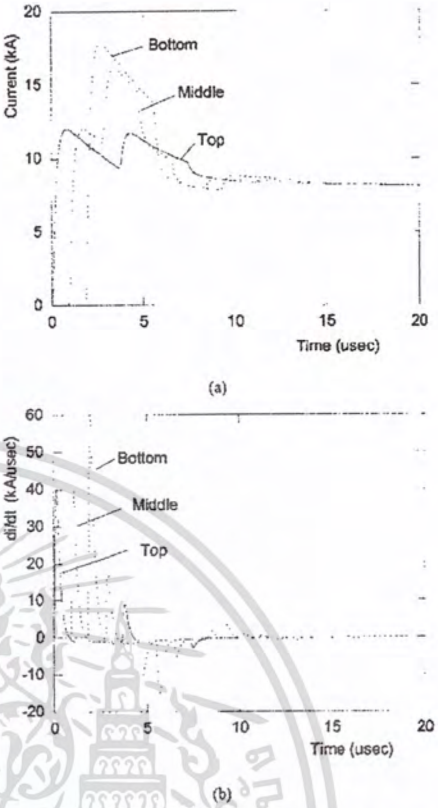


Fig. 5. (a) Current; and (b) current derivative along the strike object for a typical subsequent return stroke.

Fig. 5 presents similar results, using the typical subsequent return stroke current. It can be seen that in case of subsequent strokes, both the current and the current time derivative are more significantly affected by the presence of the tower. Furthermore, since the time to current peak is shorter than the wave traveling time along the tower, the current reflections can be clearly distinguished on the waveforms.

The main parameters of the current waveform at various observation points along the tower are summarized in Table II. It can be seen that the current peak value and maximum steepness at the bottom of the tower are 30% to 50% larger than those associated with the injected current. Furthermore, for the first stroke, the time to current peak decreases as the observation point moves toward the ground while for the subsequent stroke, it remains constant and equal to the time to peak of the injected current. This result can be explained considering that for the first stroke, the propagation time along the tower is smaller than the risetime of the injected current. The situation is reversed for the subsequent stroke where the propagation time along the tower is larger than the risetime of the injected current.

Electromagnetic Fields: Figs. 6 and 7 present the waveforms of the first and subsequent return stroke vertical electric field and azimuthal magnetic field at 2 km from the tower. In the same figures, the contributions of various electromagnetic field components (static, induction and radiation) are also illustrated. Note that current reflections along the tower can be identified, especially on the radiation term of the subsequent stroke field.

A comparison between Figs. 2, 3 and Figs. 6, 7 shows that, for both first and subsequent return strokes, the presence of the tower results in a significant increase of the electromagnetic field peak, and also in the appearance of subsidiary peaks. For the subsequent return stroke, however, the effect of the tower is much more pronounced [compare Figs. 2(b), 3(b) with Figs. 6(b), 7(b)]. For the considered case, the peak field associated with tower strokes is about 2 times (for the first stroke) to 3 times (for the subsequent stroke) as large as that corresponding to return strokes initiated at ground level. Furthermore, it can be seen that the radiation term of both electric and magnetic fields, responsible for the initial peak, is the one most affected by the presence of the tower.

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:38 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE II
PARAMETERS OF LIGHTNING RETURN STROKE CURRENT ALONG THE TOWER

	Peak Value (kA)		Maximum Steepness (kA/μs)		Time to peak (μs)	
	First	Subsequent	First	Subsequent	First	Subsequent
'Non-contaminated' channel-base current*	30	12	12	40	8	0.8
Tower top	37	12	12	40	8	0.8
Middle	38	16	12	40	5	0.8
Bottom	40	18	18	60	4	0.8

* See also note 3.

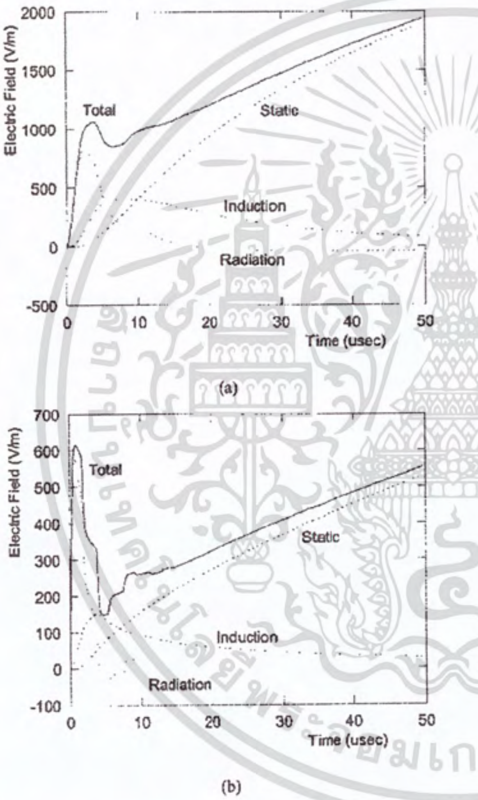


Fig. 6. Vertical electric field at 2 km from the 553 m high tower. (a) First return stroke. (b) Subsequent return stroke.

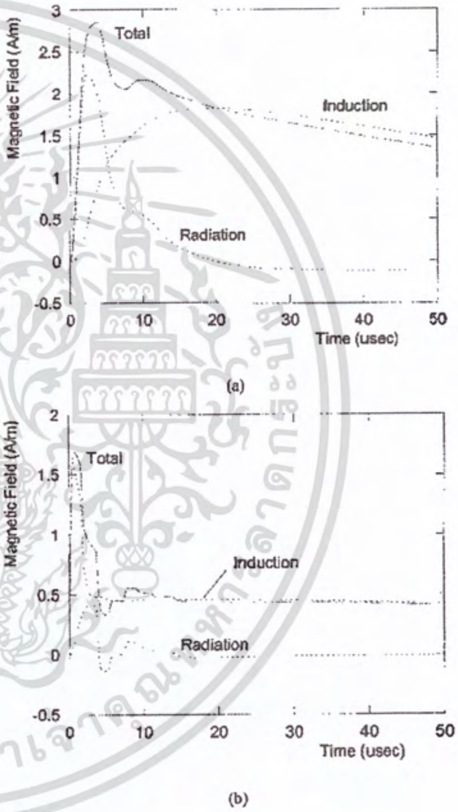


Fig. 7. Azimuthal magnetic field at 2 km from the 553 m high tower. (a) First return stroke. (b) Subsequent return stroke.

Table III A and B summarizes the main parameters of the electric and magnetic field waveforms for both lightning strike to ground and to the tower. It can be seen that the presence of the tower affects also the values for the maximum steepness. Note further that, in accordance with the results of Table II, the time to peak of subsequent stroke fields is not affected by the

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:38 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE III
(A) PARAMETERS OF LIGHTNING RETURN STROKE "NON CONTAMINATED" CHANNEL BASE CURRENT AND THE CORRESPONDING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS AT 2 km. LIGHTNING STRIKE TO GROUND. (B) PARAMETERS OF LIGHTNING RETURN STROKE "NON CONTAMINATED" CHANNEL BASE CURRENT AND THE CORRESPONDING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS AT 2 km. LIGHTNING STRIKE TO THE TOWER

Waveform	Peak Value			Maximum Steepness			Time to peak (μsec)	
	Units	First	Subsequent	Units	First	Subsequent	First	Subsequent
Current	kA	30	12	kA/μs	12	40	8	0.8
E-Field	V/m	-	230	kV/m/μs	0.21	0.76	-	0.8
H-Field	A/m	1.4	0.6	A/m/μs	0.6	2	8	0.8

Waveform	Peak Value			Maximum Steepness			Time to peak (μsec)	
	Units	First	Subsequent	Units	First	Subsequent	First	Subsequent
'Non-contaminated' channel-base current*	kA	30	12	kA/μs	12	40	8	0.8
E-Field	V/m	1100	600	kV/m/μs	0.6	2	4	0.8
H-Field	A/m	2.9	1.7	A/m/μs	1.7	5.6	4	0.8

* See also note 3.

tower and is determined by the time to peak of the originating current. On the other hand, the presence of the tower results in a decrease by a factor of two in the time to peak of first stroke fields.

The contribution of the tower to the total electric field caused by a subsequent stroke is presented in Fig. 8. This figure shows that the tower, which in this case represents the bottom 553 m of the radiating antenna, has therefore a dominant effect upon the electromagnetic field at 2 km.

Similar results have been presented by Diendorfer [20] who extended the DU model [34] to take into account the presence of an elevated strike object. Although Diendorfer did not consider reflections at the top and at the bottom of the strike object, and while the strike objects considered in his study were not taller than 20 m, the theoretical results showed that the increase in the field peak and in the field derivative peak was more appreciable for lightning return stroke currents with faster risetimes. For a 20 m high strike object and a current 10%–90% risetime of 0.25 μs, an increase in the field peak by a factor of 2.4 was observed [20].

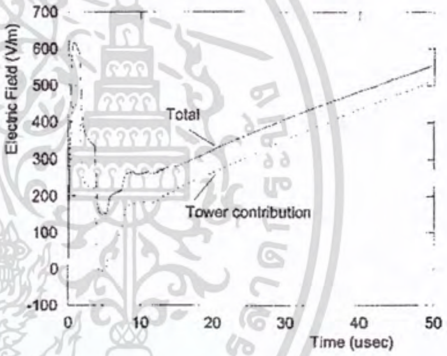


Fig. 8. Contribution of the tower to the vertical electric field calculated at 2 km from the tower (subsequent stroke).

IV. FIRST VERSUS SUBSEQUENT RETURN STROKE ELECTROMAGNETIC FIELD PEAK

Computed results presented in Section III have shown that the presence of the tower tends in general to increase the electromagnetic field peak and maximum steepness. This increase depends essentially on the wavefront steepness of the channel-base current, and it has been found to be significantly higher for subsequent return strokes, which are characterized by shorter rise times compared to first return strokes. This finding is in agreement with recent experimental observations of lightning strikes to the CN Tower presented in [30], [35]. It is found in [30] that subsequent return stroke magnetic field peak is on average greater than that of first return stroke. This is illustrated in Figs. 9 and 10, in which two sets of simultaneous data (current derivative, current, E field, H field) corresponding to the first (Fig. 9) and to the third stroke (Fig. 10) of the same flash to the CN Tower are presented. It can be seen that despite a smaller peak current, the subsequent stroke electric and magnetic fields are larger than those from the first stroke.

The values of the average ratio of subsequent to first magnetic field peak to subsequent to first current peak are re

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:38 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

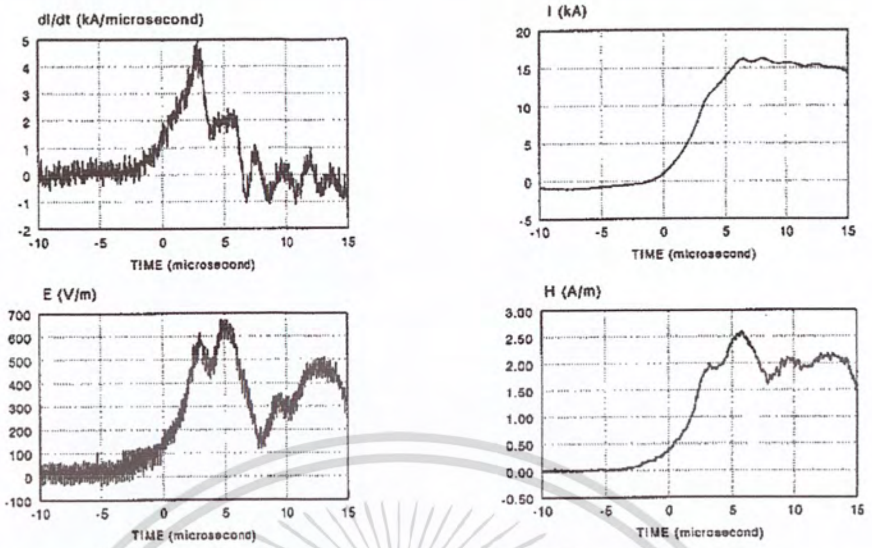


Fig. 9. Lightning current derivative (top left), lightning current (top right), vertical electric field at 2 km (bottom left), azimuthal magnetic field at 2 km (bottom right). First return stroke of a CN Tower lightning flash recorded on August 8, 1996.

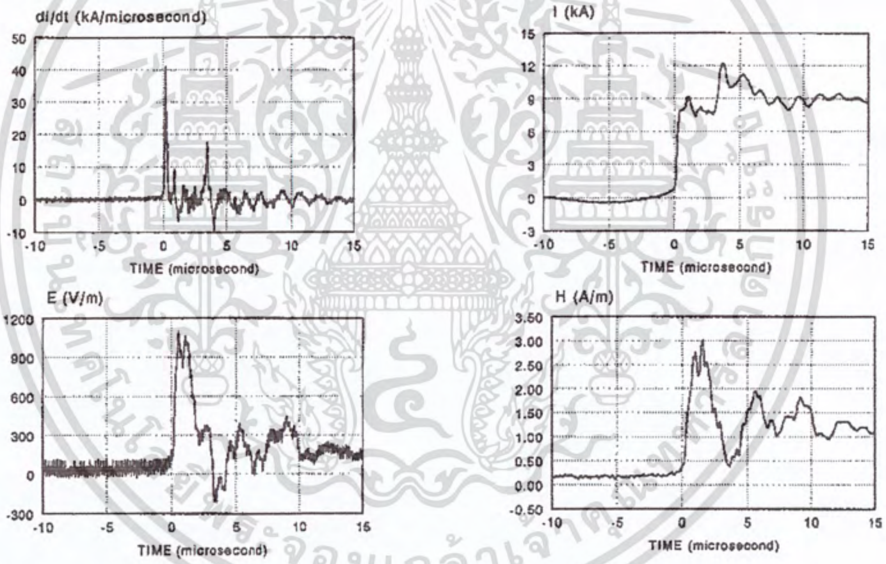


Fig. 10. As in Fig. 9. Third return stroke.

ported in Table IV. Although the comparison between computed results in Section III and experimental data in [30], [35] should be considered as only qualitative, it can be seen, however, that the computed value of the ratio of the field peaks to current peaks $(H_s/H_f)/(I_s/I_f) = 1.5$, agrees reasonably well with the value 1.67 which is obtained from measured fields and currents.

Similar observations, showing that the subsequent stroke field peak might be greater than the first stroke peak, have been made on natural lightning in Florida [36]. In [36], electric

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:38 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE IV
RATIO OF SUBSEQUENT TO FIRST MAGNETIC FIELD PEAK H_s/H_f TO SUBSEQUENT TO FIRST CURRENT PEAK I_s/I_f

	$(H_s/H_f)/(I_s/I_f)$
Average measured (CN Tower [30,35])	1.67
Computed, return stroke initiated at ground	1.1
Computed, taking into account the presence of the elevated strike object	1.5

field waveforms from 46 multiple stroke flashes were analyzed and it has been found that 15 flashes (33%) had at least one subsequent stroke whose initial electric field peak was greater than that of the first return stroke.

Subsequent stroke field peak greater than the first stroke peak is generally attributed to subsequent stroke current peak greater than the first stroke peak (e.g., [36], [37]). Indeed, although on average first return stroke current peaks are higher than subsequent stroke ones, observed lightning data in Switzerland [38] and in Canada [35] have shown that a nonnegligible number of flashes contain subsequent strokes with higher current peaks than those of their first strokes.

> Five (15%) of the 33 negative downward multiple stroke flashes striking instrumented towers in Switzerland contained one or two subsequent strokes with return stroke peak currents greater than their respective first stroke peak currents. The percentage of subsequent strokes with greater current peaks than the first stroke peak was about 7% (8 strokes out of 115) [36], [38].
>
> Data recorded at the CN Tower in Toronto (about ten times as high as the towers used in Switzerland) have shown that 40% of subsequent strokes had current peaks ranging from one to four times the value of the first stroke peak [35].

On the other hand, it is important to realize that even a subsequent return stroke with a lower current peak than the first, could result in a greater field peak. This can be due to several factors. One of these, is the fact that the subsequent return stroke velocity is in general greater than the first return stroke speed [29]. The electromagnetic field radiated by the lightning channel depends strongly on the value of the return stroke velocity and a larger value for the return stroke velocity results in a greater electromagnetic field peak. The other factor is the steepness of the current wavefront. Since subsequent strokes are associated with shorter risetimes than first return strokes, their increased steepness will make a larger contribution to the electromagnetic field. Finally, the mere presence of an elevated strike object increases the electromagnetic field and that influence is larger for currents with steeper wavefronts, as shown by the results obtained in the present study.

V. Peak Current Estimates Using Remote Electromagnetic Field Data

Lightning channel base currents are established by direct measurements using either instrumented towers (e.g., [4], [5], [7], [27], [38]–[41]) or artificially initiated lightning by small rockets (e.g., [42]–[45]). Estimates of various lightning current parameters can also be obtained from the measurements of lightning electromagnetic fields assuming one or more empirical [1], [2] or theoretical [3] relations between electromagnetic field and lightning current.

The indirect estimation of lightning current parameters from measured fields has grown in importance in the last years due to the widespread dispersion of the lightning location systems (LLS). The basic aim of such systems is to provide density maps of lightning flashes. However, more recently, LLS have also been used to estimate lightning current parameters (e.g., [37]) using empirical formulae in which return stroke current peaks are assumed to be simply proportional to the remote electric and/or magnetic field peaks. Because of the enormous amount of data they can provide and the possibility of obtaining local statistical data, it is expected that LLS will become more and more important in the near future. However, the discussion given in Section IV supports the concept already presented in [6], [11] that such simple relations assuming a direct proportionality between currents and fields are not sufficient to extract reliable lightning current statistics. There are several reasons which make the application of this type of relations worth of more careful investigations. It is not only the peak value of the lightning current, but also the parameters discussed in the previous section, namely, the steepness of the current wavefront and the return stroke velocity, along with other parameters such as the tortuosity of the lightning channel trajectory [46], that are affecting the corresponding electromagnetic field. Furthermore, the presence of an elevated strike object influences profoundly the magnitude of the electromagnetic field, since lightning current propagates within an elevated strike object at practically the speed of light, and this must be taken into account when current data directly measured from instrumented towers are used to calibrate LLS performances relevant to lightning current statistics.

VI. Conclusions

In this paper, an analysis of the electric and magnetic fields radiated by lightning return strokes to tall towers has been presented. Electric and magnetic field waveforms corresponding to typical first and subsequent strokes have been computed and analyzed making use of the MTL model extended to take into account the presence of an elevated strike object. The effect of the presence of a tower on the magnitude and shape of the fields has been investigated. The contributions of the various components of the fields, namely, static, induction and radiation for the electric field, and induction and radiation for the magnetic field have been illustrated and discussed. It was shown in particular that the radiation term of the electromagnetic field is the one most affected by the presence of the tower. Furthermore, it was found that the presence of the tower tends, in general, to increase substantially electromagnetic field peaks and their

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:38 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

derivatives. This increase is mainly caused by the presence of two oppositely propagating current wavefronts originating from the tower top and by the very high velocity (practically speed of light) of current propagation within the tower, and depends essentially on the wavefront steepness of the channel-base current. For that reason, the electromagnetic field peak has been found to be significantly higher for subsequent return strokes, which are characterized by faster risetimes compared with first return strokes.

The obtained results have been shown to be consistent with recent experimental observations of lightning strokes to the CN Tower and they qualitatively explain the fact that, because of other parameters, subsequent return strokes with lower current peaks could result in higher field peaks. This observation is to be taken into account when data from tall instrumented towers are used to calibrate LLS performances relevant to lightning current statistics.

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to thank the Swiss Defense Agency for providing them with electromagnetic-field measuring equipment, Dr. V. Shostak for his helpful contributions to the manuscript, and Prof. V. Rakov for his valuable comments.

REFERENCES

[1] J. C. Willett, J. C. Bailey, V. P. Idone, R. E. Orville, A. Eybert-Berard, and L. Barret, "Submicrosecond intercomparison of radiation fields and currents in triggered lightning return strokes based on the transmission-line model," *J. Geophys. Res.*, vol. 94, no. D11, pp. 13 275–13 286, 1989.

[2] V. A. Rakov, R. Thottappillil, and M. A. Uman, "On the empirical formula of Willett relating lightning return stroke peak current and peak electric field," *J. Geophys. Res.*, vol. 97, no. D11, pp. 11 527–11 533, 1992.

[3] F. Rachidi and R. Thottappillil, "Determination of lightning currents from far electromagnetic fields," *J. Geophys. Res*, vol. 98, no. D10, pp. 18 315–18 321, 1993.

[4] B. N. Gorin and A. V. Shkilev, "Measurements of lightning currents at the Ostankino tower" (in Russian), *Elektrichestvo*, vol. 8, pp. 64–65, 1984.

[5] O. Beierl, "Front shape parameters of negative subsequent strokes measured at the Peissenberg tower," in *Proc. 21st Int. Conf. Lightning Protection*, Berlin, Sept. 21–25, 1992.

[6] W. Janischewskyj, A. M. Hussein, V. Shostak, P. Dziurewicz, and W. A. Chisholm, "Analysis of electromagnetic fields from lightning strokes to the Toronto CN Tower and from lightning in the surrounding area," in *Proc. CIGRE Symp. Power System Electromagnetic Compatibility*, Lausanne, Switzerland, Oct. 18–20, 1993, Paper 100-08.

[7] E. Montandon and B. Beyeler, "The lightning measuring equipment on the Swiss PTT telecommunications tower at St. Chrischona, Switzerland," in *Proc. 22nd Int. Conf. Lightning Protection*, Budapest, Hungary, Sept. 19–23, 1994.

[8] H. Motoyama, W. Janischewskyj, A. M. Hussein, R. Rusan, W. A. Chisholm, and J. S. Chang, "Electromagnetic field radiation model for lightning strokes to tall structures," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, pp. 1624–1632, July 1996.

[9] S. Guerrieri, F. Heidler, C. A. Nucci, F. Rachidi, and M. Rubinstein, "Extension of two return stroke models to consider the influence of elevated strike objects on the lightning return stroke current and the radiated electric field," in *Proc. Int. Conf. EMC*, Sept. 1996.

[10] R. Rusan, W. Janischewskyj, A. M. Hussein, and J. S. Chang, "Comparison of measured and computed electromagnetic fields radiated from lightning strikes to the Toronto CN Tower," in *Proc. 23rd Int. Conf. Lightning Protection (ICLP)*, Florence, Italy, Sept. 23–27, 1996, pp. 297–303.

[11] S. Guerrieri, C. A. Nucci, F. Rachidi, and M. Rubinstein, "On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, pp. 1543–1555, Oct. 1998.

[12] F. Fuchs, "On the transient behavior of the telecommunication tower at the mountain Hoher Peissenberg," in *Proc. 24th Int. Conf. Lightning Protection*, Birmingham, U.K., Sept. 1998.

[13] G. Diendorfer, M. Mair, W. Schultz, and W. Hadrian, "Lightning current measurements in Austria—Experimental setup and first results," in *Proc. 25th Int. Conf. Lightning Protection*, Rhodes, U.K., Sept. 18–22, 2000.

[14] V. A. Rakov, "Transient response of a tall object to lightning," IEEE Trans. Electromagn. Compat., 2001, submitted for publication.

[15] C. A. Nucci, "Lightning induced voltages on overhead power lines. Part II: Coupling models for the evaluation of the induced voltages," *Electra*, no. 162, pp. 121–145, 1995.

[16] C. A. Nucci, C. Mazzetti, F. Rachidi, and M. Ianoz, "On lightning return stroke models for LEMP calculations," in *Proc. 19th Int. Conf. Lightning Protection*, Graz, Apr. 1988.

[17] C. A. Nucci and F. Rachidi, "Experimental validation of a modification to the transmission line model for LEMP calculations," in *Proc. 8th Int. Symp. Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, March 7–9, 1989, pp. 389–394.

[18] V. Rakov and M. A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 40, pp. 403–426, Nov. 1998.

[19] M. A. Uman, D. K. McLain, and E. P. Krider, "The electromagnetic radiation from a finite antenna," *Amer. J. Phys.*, vol. 43, pp. 33–38, 1975.

[20] G. Diendorfer, "Effect of an elevated strike object on the lightning electromagnetic fields," in *Proc. 9th Int. Symp. Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, Mar. 1991, pp. 235–238.

[21] F. Rachidi, M. Ianoz, C. A. Nucci, and C. Mazzetti, "Modified Transmission Line Model for LEMP calculations. Effect of the return stroke velocity decreasing and elevated strike objects on close fields," in *Proc. 9th Int. Conf. Atmospheric Electricity*, St. Petersburg, Russia, June 1992.

[22] W. Janischewskyj, V. Shostak, and A. M. Hussein, "Comparison of lightning electromagnetic field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower: I magnetic field," in *Proc. 24th Int. Conf. Lightning Protection (ICLP)*, Birmingham, U.K., Sept. 1998, pp. 245–251.

[23] F. Heidler and Ch. Hopf, "Lightning current and lightning electromagnetic impulse considering current reflection at the earth's surface," in *Proc. 22nd Int. Conf. Lightning Protection*, Budapest, Hungary, 1994, Paper R4-05.

[24] F. Rachidi, C. A. Nucci, M. Ianoz, and C. Mazzetti, "Influence of a lossy ground on lightning induced voltages on overhead lines," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 38, Aug. 1996.

[25] F. Rachidi and C. A. Nucci, "On the Master, Lin, Uman, Standler and the modified transmission line lightning return stroke current models," *J. Geophys. Res.*, vol. 95, pp. 20 389–20 394, Nov. 1990.

[26] V. Shostak, W. Janischewskyj, A. M. Hussein, J. S. Chang, and B. Kordi, "Return stroke current modeling of lightning striking a tall tower accounting for reflections within the growing channel and for upward-connecting discharges," in *Proc. Int. Conf. Atmospheric Electricity (ICAE)*, Guntersville, AL, June 1999.

[27] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "Parameters of lightning flashes," *Electra*, no. 41, 1975.

[28] F. Heidler, "Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP- Berechnung," in *Proc. 18th Int. Conf. Lightning Protection*, Munich, Sept. 16–20, 1985, paper 1.9, pp. 63–66.

[29] D. M. Mach and W. D. Rust, "Photoelectric return stroke velocity and peak current estimates in natural and triggered lightning," *J. Geophys. Res.*, vol. 94, no. D11, pp. 13 237–13 247, 1989.

[30] M. Abdel Rahman, W. Janischewskyj, A. M. Hussein, F. Rachidi, and J. S. Chang, "Statistical analysis of magnetic field due to CN Tower multistroke flashes," in *Proc. 24th Int. Conf. Lightning Protection*, Birmingham, U.K., Sept. 1998.

[31] C. A. Nucci, C. Mazzetti, F. Rachidi, and M. Ianoz, "Analyze du champ électromagnétique dû à une décharge de foudre dans les domaines temporel et fréquentiel," *Ann. Télécommun.*, vol. 43, no. 11/12, 1988.

[32] W. Janischewskyj, A. M. Hussein, V. Shostak, I. Rusan, J. X. Li, and J. S. Chang, "Statistics of lightning strikes to the Toronto Canadian National tower (1978–1995)," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, pp. 1210–1221, July 1997.

[33] W. Janischewskyj, A. M. Hussein, and V. Shostak, "Propagation of lightning current within the CN Tower," in *Proc. Int. CIGRE Colloq. Insulation Coordination*, Toronto, Canada, Sept. 1997, paper 33-2.10.

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:38 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[34] G. Diendorfer and M. A. Uman, "An improved return stroke model with specified channel-base current," *J. Geophys. Res.*, vol. 95, no. D9, pp. 13621–13644, 1990.

[35] W. Janischewskyj, A. M. Hussein, and J. S. Chang, "Characteristics of CN Tower multistroke flashes," in *Proc. 10th Int. Symp. High Voltage Engineering*, Montreal, Canada, Aug. 1997, pp. 29–34.

[36] R. Thottappillil, V. A. Rakov, and M. A. Uman, "Lightning subsequent-stroke electric field peak greater than the first stroke peak and multiple ground terminations," *J. Geophys. Res.*, vol. 97, no. D7, pp. 7503–7509, May 20, 1992.

[37] K. L. Cummins, E. P. Krider, and M. D. Malone, "The US national lightning detection network and applications to cloud-to-ground lightning data by electric power utilities," *IEEE Transactions Electromagn. Compat.*, vol. 40, pp. 465–480, Nov. 1998.

[38] K. Berger, "Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano in den Jahren 1963–1971," *Bull. SEV*, vol. 63, pp. 1403–1422, 1972.

[39] E. Garbagnati and G. B. Lo Piparo, "Parameter von Blitzstromen," *ETZa)*, vol. 103, no. 2, 1982.

[40] A. J. Eriksson, "Lightning and tall structures," *Trans. South Afr. IEE*, pt. 8, vol. 69, pp. 238–252, 1978.

[41] A. M. Hussein, W. Janischewskyj, J. S. Chang, V. Shostak, W. A. Chisholm, P. Dzurevych, and Z. I. Kawasaki, "Simultaneous measurement of lightning parameters for strokes to the Toronto Canadian National Tower," *J. Geophys. Res.*, vol. 100, no. D5, pp. 8853–8861, 1995.

[42] J. C. Willett, V. P. Idone, R. E. Orville, C. Leteinturier, A. Eybert-Berard, L. Barret, and E. P. Krider, "An experimental test of the "transmission-line model" of electromagnetic radiation from triggered lightning return strokes," *J. Geophys. Res.*, vol. 93, no. D4, pp. 3867–3878, 1988.

[43] J. C. Willett, J. C. Bailey, V. P. Idone, R. E. Orville, A. Eybert-Berard, and L. Barret, "Submicrosecond intercomparison of radiation fields and currents in triggered lightning return strokes based on the transmission-line model," *J. Geophys. Res.*, vol. 94, no. D11, pp. 13 275–13 286, 1989.

[44] C. Leteinturier, C. Weidman, and J. Hamelin, "Current and electric field derivatives in triggered lightning return strokes," *J. Geophys. Res.*, vol. 95, no. D1, pp. 811–828, Jan. 1990.

[45] E. P. Krider, C. Leteinturier, and J. C. Willett, "Submicrosecond fields radiated during the onset of first return strokes in cloud-to-ground lightning," *J. Geophys. Res.*, vol. 101, no. D1, pp. 1589–1597, Jan. 20, 1996.

[46] W. Janischewskyj, V. Shostak, A. M. Hussein, and W. Chisholm, "Estimation of lightning location system accuracy using CN Tower lightning data," in *23rd Int. Conf. Lightning Protection (ICLP)*, Florence, Italy, Sept. 23–27, 1996, pp. 215–223.

Wasyl Janischewskyj (F'77) was born in Prague, Czechoslovakia, in 1925. He received the B.A.Sc. and M.A.Sc. degrees in electrical engineering from the Ukrainian Technical-Husbandry Institute, Regensburg, Germany, the Technical University of Hanover, Hanover, Germany and the University of Toronto, in 1952 and 1954, respectively, and the Honorary Doctorate Degree from he National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine, in 1998.

From 1955 to 1959, he was with the Aluminum Laboratories Ltd., Kingston, ON, Canada. Since 1959, he has been with the University of Toronto, Toronto, ON, Canada, where he has been a Lecturer, a Professor, the Assistant Chairman, and later the Associate Dean, and since 1990, Professor Emeritus. From 1960 to 1965, he was with Ontario Hydro, Toronto, ON, Canada, including the Coldwater Project, and has been on sabbatical leaves at the University of Liverpool, Liverpool, U.K., the High Voltage Institute of the Technical University of Munich, Munich, Germany, the Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, the High Voltage Laboratory of Electricite de France, Clamart, France, and Trench Electric, Toronto, ON, Canada. He has authored and co-authored some 150 papers in the areas of electric-power transmission, corona, electromagnetic interference, lightning and power system stability.

He is involved with many International Technical Committees including IEC TC42, CIGRE SC 33 and 36, EPRI, IEEE, COMPIMERA, Canadian Electricity Association and Canadian Standards Association, and is a member of the IEEE Power Engineering Society, IEEE Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Working Group on Lightning Performance of Distribution Lines, and the IEEE Electromagnetic Compatibility Society, a member and a former Chairman of the IEEE Subcommittee on Corona and Field Effects, and a Registered Professional Engineer in the Province of Ontario, Canada.

Farhad Rachidi was born in Geneva, Switzerland, in 1962. He received the M.S. and the Ph.D. degrees, both in electrical engineering, from the Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, in 1986 and 1991, respectively.

He worked at the Power Systems Laboratory of the Swiss Federal Institute of Technology until 1996. In 1997, he joined the Lightning Research Laboratory of the University of Toronto, Toronto, Canada and from April 1998 until September 1999, he was with Montena EMC, Rossens, Switzerland. He is currently "Maître d'Enseignement et de Recherche" at the Swiss Federal Institute of Technology. His research interests concern EMC and in particular lightning and EMP interactions with transmission lines. Dr. Rachidi is author or coauthor of more than 80 scientific papers published in reviewed journals and presented at international conferences.

He is a member of the CIGRE Working Groups 33.01 "Lightning" and 36.07 "Power Quality Indices and Objectives," and of IEEE Working Group on Lightning Performances of Distribution Lines, the Scientific Committee of the International Conference on Lightning Protection, and Chairman of the tutorials and workshops of the International Zurich Symposium on EMC.

Ali M. Hussein (M'80–SM'90) received the B.Sc. degree from Alexandria University, Alexandria, Egypt, in 1967, the M.Sc. degree from Ain-Shams University, Cairo, Egypt, in 1972, and the Ph.D. degree from the University of Toronto, Toronto, Canada, in 1979, all in electrical engineering.

From 1967 to 1974, he was an Assistant Lecturer and Demonstrator at Ain-Shams University. From 1979 to 1980, he was a Research Associate at the National Research Council of Canada, Ottawa, Canada. From 1980 to 1982, he was an Assistant Professor at Riyadh University, Riyadh, Saudi Arabia. From 1982 to 1986, he was a Research Associate at the Electrical Engineering Department of the University of Toronto. From 1986 to 1988, he was a member of the Scientific Staff, the Electromagnetics Technology Division, Bell-Northern Research, Ottawa, Canada. Since 1989, he has been a Professor at Ryerson University, Toronto, Canada, and an Adjunct Associate Professor at the University of Toronto. Dr. Hussein has authored and co-authored over 90 publications in the areas of Microwave Ferrites, Microwave Acoustics, Electromagnetic Field computations and, more recently, measurement and analysis of fast transients (Microgap Discharge, Electromagnetic Pulse, and Lightning Discharge).

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:33 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Carlo Alberto Nucci was born in Bologna, Italy, in 1956. He received the degree with honors, and the Ph.D. degree, both in in electrical engineering, from the University of Bologna, Bologna, Italy, in 1981 and 1986, respectively.

In 1982, he joined the Power Electrical Engineering Institute, University of Bologna, as a Researcher, and becam an Associate Professor in 1992, and a full Professor in Power Systems, in 2000. He is author or co-author of more than 100 scientific papers published on reviewed journals or presented at international conferences. He has been responsible for several International projects supported from the Italian side by the National Research Council (the Italian National Science Foundation) and involving foreign universities, such as the Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, (Power network laboratory), the University of Florida, Gainesville, the University of Illinois, Urbana Champaign, and the University of Sydney, Sydney, Australia. His research interests concern power systems transients and dynamics, with particular reference to lightning and nuclear EMP impact on power lines and to voltage collapse, power station simulators and the study of power components including medium voltage capacitors and traction batteries.

He is member of the IEEE Working Group "Lightning" performance of Distribution lines, of the CIGRE Working group 33.01 "Lightning" (of which he is also secretary) and has been member of some technical committees of the Italian Electrical Commission in charge of producing technical standards.

Silvia Guerrieri was born in Modena, Italy, in 1968. She received a degree with honors in electrical engineering and the Ph.D. degree from the University of Bologna, Bologna, Italy, in 1993 and 1997, respectively.

Her doctoral work includes research at the Power Systems Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland, and participation in the 1995 Triggered Lightning Campaign, Camp Blanding, FL, coordinated by the University of Florida, Gainesville. From April 1997, she is with University of Modena and Reggio Emilia, Modena, Italy. Her main scientific interest concerns lightning and nuclear electromagnetic pulse effects on power systems. She is author or co-author of about 20 scientific papers published on reviewed journals or presented at international conferences.

Behzad Kordi was born in Tehran, Iran in 1969. He received the B.S., M.S., and Ph.D. (*with distinction*) degrees in electrical engineering from Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran, in 1992, 1995, and 2000, respectively.

He joint the Lightning Studies Group of the University of Toronto, Toronto, Canada in 1996 where he was awarded a Graduate Research Grant from the Electrical and Computer Engineering Department. Dr. Kordi has recently joined Shahed University, Tehran, Iran as an *Assistant Professor* and is also collaborating with the Electromagnetics Lab of Amirkabir University. His research interest focuses on numerical methods in electromagnetics and various electromagnetic compatibility (EMC) topics, especially lightning and EMP.

Dr. Kordi was the recipient of the Amirkabir University of Technology Student of the Year *Award* in 1995.

Jen-Shih Chang (M'90–SM'96) received B. Eng. and M. Eng. degrees in electrical engineering from the Musashi Institute of Technology, Tokyo, Japan, and the Ph.D. degree in Experimental Space Sciences from York University, Toronto, Canada.

During 1973–1974, he was a Researcher at the Centre de Recherches en Physique de l'Environnement (CNRS), France. From 1975 to 1979, he was a project Scientist/Assistant Professor with the Department of Physics and Center for Research in Experimental Space Sciences, York University, York, U.K.. From 1979 to 1986, he was an Assistant/Associate Professor with the Department of Engineering Physics, McMaster University, Hamilton, ON, Candada. During 1985 to 1996, he was a visiting professor with the Musashi Institute of Technology, Tokyo, Japan; Tokyo Denki University, Tokyo, Japan; Tokyo University, Tokyo, Japan; University of Seville, Seville, Spain; Joseph Fourier University, Grenoble, France; University of Poitiers, Poitiers, France; Oita University, Oita, Japan; and Tokyo University of Agriculture and Technology, Tokyo, Japan. Since 1987, he has been a Professor at Mc Master University, and is involved in research on applied electrostatics, lightning, air pollution control, solid and liquid waste destruction plasma technologies.

Dr. Chang is currently the chair of IEEE DEIS Electrohydrodynamics Technical Committee.

Authorized licensed use limited to: IEEE Xplore. Downloaded on January 21, 2009 at 04:33 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

เปเปอร์ High Frequency Characteristics of Impedances to Ground and Field Distributions of Ground Electrodes

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, April 1981 1893

HIGH FREQUENCY CHARACTERISTICS OF IMPEDANCES TO GROUND AND FIELD DISTRIBUTIONS OF GROUND ELECTRODES

T. Takashima
Faculty of Technology
Kanazawa University
Kanazawa, Japan

T. Nakae
Kanazawa Institute of Technology
Kanazawa, Japan

R. Ishibashi
Faculty of Technology
Kanazawa University
Kanazawa, Japan

Abstract - High frequency characteristics of impedances to ground and field distributions of ground electrodes are calculated by the current simulation method together with the method of images. Numerical calculations concerning some typical electrodes are shown. An expression for approximating impedances to ground from corresponding dc resistances is proposed and errors are estimated.

1. INTRODUCTION

Calculations concerning ground electrodes have been studied [1]-[5]. In these calculations, only conduction currents in the earth have been taken account. But, when high frequency currents such as are contained within the wave front of a lightning surge are injected into a ground electrode, and the conductivity of the earth around the electrode is low, it is strictly necessary to take account of displacement currents in the air and in the earth. Under these conditions, the impedance rather than the dc resistance needs to be used as the circuit element from the ground electrode to the earth, in the circuit consideration.

In this paper, high frequency characteristics of impedances to the earth and field distributions of ground electrodes are calculated by the current simulation method together with the method of images. First the methods employed here are described. Next numerical calculations concerning some typical electrodes are shown. Finally an expression for approximating impedances to the earth from correspontiny dc resistances is proposed and errors of approximate impedances are estimated.

2. METHOD OF ANALYSIS

2.1 Alternating Current Sources in a Homogeneous Medium

(a) Point current source

An alternating current point source $I = I_0 exp(j\omega t)$ is located in a homogeneous medium with conductivity κ and permittivity ε. The source injects current I into the surrounding medium. Now we shall consider the field caused by the injected current. Let $\vec{J}$ be the current density at a point of view, r the distance from the current source to the point of view. Then, by Gauss's law, we have

$$I = 4\pi r^2 \vec{J}\cdot\vec{a}_r \tag{1}$$

which results in

$$\vec{J} = \frac{I}{4\pi r^2}\vec{a}_r \tag{2}$$

where $\vec{a}_r$ is the unit vector in the r direction. Supposing the electric field intensity is $\vec{E} = E_0 exp(j\omega t)\vec{a}_r$ we have

$$\vec{J} = \kappa\vec{E} + \varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} = (\kappa + j\omega\varepsilon)\vec{E} \tag{3}$$

From Eq. (2) and (3), we have

$$\vec{E} = \frac{I}{4\pi r^2(\kappa + j\omega\varepsilon)}\vec{a}_r \tag{4}$$

Then, from $d\vec{r} = dr\cdot\vec{a}_r$, the potential V at the point of view is

$$V = -\int_{\infty}^{r}\vec{E}\cdot d\vec{r} = \frac{I}{4\pi(\kappa + j\omega\varepsilon)r} \tag{5}$$

(b) Linear current source

An ac linear source of length ℓ is coincident with the x axis with its center at the origin as shown in Fig. 1. The total current I is uniformly distributed along the line and injected into the surrounding medium. Then the potential at any point (x, y, z) is given by [6]

$$V = \frac{1}{4\pi(\kappa + j\omega\varepsilon)}\frac{I}{\ell}\,log\left[\frac{\sqrt{(x+\ell/2)^2+y^2+z^2}+(x+\ell/2)}{\sqrt{(x-\ell/2)^2+y^2+z^2}+(x-\ell/2)}\right] \tag{6}$$

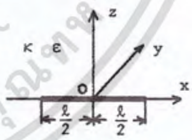


Fig. 1. An alternating current linear source of length ℓ.

(c) Ring current source

An ac ring source of radius a is coincident with the x-y plane with its center at the origin. The total current I is distributed uniformly around the ring and injected into the surrounding medium. Then the potential at any point (x, y, z) is given by

$$V = \frac{I}{4\pi(\kappa + j\omega\varepsilon)}\frac{2}{\pi}\frac{K(k)}{\sqrt{(r+a)^2+z^2}} \tag{7}$$

where K(k) is the complete elliptic integral of the first kind and

$$k^2 = \frac{4ar}{(r+a)^2+z^2}$$

and

$$r^2 = x^2+y^2$$

80 SM 654-4 A paper recommended and approved by the IEEE Substations Committee of the IEEE Power Engineering Society for presentation at the IEEE PES Summer Meeting, Minneapolis, Minnesota, July 13-18, 1980. Manuscript submitted January 17, 1980; made available for printing May 1, 1980.

© 1981 IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(d) Disc current source

An ac disc source of radius a and infinitesimal thickness is coincident with the x-y plane with its center at the origin. The current distribution on the disc is expressed by [7]

$$J = \frac{I}{4\pi a\sqrt{a^2-r^2}} \tag{8}$$

where r is the distance from the disc center. Then the potential at any point (x, y, z) is given by

$$V = \frac{I}{4\pi(\kappa+j\omega\varepsilon)a}\,\arctan\left[\frac{\sqrt{2}\,a}{\sqrt{s^2+\sqrt{(s^2)^2+(2az)^2}}}\right] \tag{9}$$

where $s^2 = x^2+y^2+z^2-a^2$

2.2 Method of Images

An ac point source is located at a distance h from a plane boundary as shown in Fig. 2(a). We shall now seek the field by the method of images. In medium 2 we seek the field as in Fig. 2(b), and in medium 1 we seek the field as in Fig. 2(c). We take the following boundary conditions into consideration in determining images I' and I".

$$J_{1n} = J_{2n}$$

and

$$E_{1t} = E_{2t}$$

where J_{1n} and J_{2n} are the normal components of the current density, as well as E_{1t} ant E_{2t} are the tangential components of the field intensity. Then we can determine the images as follows.

$$I' = \frac{(\kappa_2+j\omega\varepsilon_2)-(\kappa_1+j\omega\varepsilon_1)}{(\kappa_1+j\omega\varepsilon_1)+(\kappa_2+j\omega\varepsilon_2)}\,I \tag{10}$$

$$I'' = \frac{2(\kappa_1+j\omega\varepsilon_1)}{(\kappa_1+j\omega\varepsilon_1)+(\kappa_2+j\omega\varepsilon_2)}\,I \tag{11}$$

2.3 Current Simulation Method

Now we shall consider a method for calculating the field caused by an actual ground electrode where current is injected. Because the current distribution on the electrode is not uniform, we calculate the distribution by the current simulation method together with the method of images discussed above. The current simulation method is analogous to the charge simulation method [8]. Alternating current sources I_j (j = 1, 2, ··· n) are located in the electrode, and potentials of the contour points i (i = 1, 2, ··· n) on the electrode are assumed to be V_i. Then we have the following simultaneous equations.

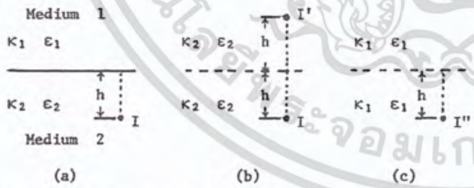


Fig. 2. An alternating current point source. (a) Configuration of media and source. (b) Images representing the field in medium 2. (c) An image representing the field in medium 1.

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{i1} \cdots Z_{ij} & \cdots & Z_{in} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_j \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \tag{12}$$

Since the contour points on the electrode are equipotential, $V_1 = V_2 = \cdots = V_n$. The coefficient Z_{ij} denotes the effects of both I_j and its image on the contour point i. Solution of Eq. (12) gives the current distribution on the electrode.

3. NUMERICAL CALCULATIONS FOR SOME ELECTRODES

We shall calculate potentials and field intensities on the earth's surface and also impedances to ground concerning some typical ground electrodes. The coordinate system is chosen such that the earth's surface is coincident with the x-y plane. Permittivity of the air is ε_1, that of the earth ε_2, conductivity of the earth κ_2 and angular frequency of injected current ω. It is noticed that the potentials and intensities discussed here are expressed by complex numbers. The impedance to the earth, Z, is calculated by

$$Z = \frac{V}{I} = R_c + jX_c \tag{13}$$

where I is the total current injected into the electrode and V is the potential of the electrode.

3.1 Vertical Linear Electrode

A linear wire electrode of radius r_0 and length ℓ is buried vertically below the earth's surface as shown in Fig. 3. The field is simulated by a column of about thirty linear current sources along the axis of the electrode. Figure 3 shows the distribution of the absolute value of potential, $|V|$, and of field intensity in the x direction, $|Ex|$, along the x axis on the earth's surface, when the total injected current is 1+j0 (A). We see in Fig. 3 that the three curves of $|V|$ are approximately proportional to each other along the vertical axis. That is, at any x, when $\omega\varepsilon_2/\kappa_2 = 1.0$ the potential is about 0.63 times the potential when $\omega\varepsilon_2/\kappa_2 = 0$ (that is, when direct current is injected), and when $\omega\varepsilon_2/\kappa_2 = 3.0$ the potential is about 0.26 times the potential when $\omega\varepsilon_2/\kappa_2 = 0$. Such proportional relation is valid for all potential and field intensity curves, and is here termed *result A*.

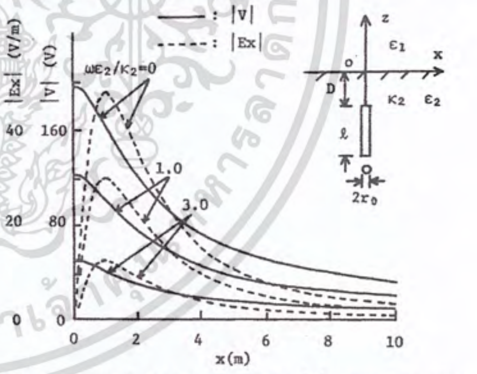


Fig. 3. Distribution of potential $|V|$ and intensity $|Ex|$ along the x axis on the earth's surface. κ_2=0.0005(mho/m), $\varepsilon_1/\varepsilon_2$=1/4, D=1(m), ℓ=1.5(m), r_0=0.007(m).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

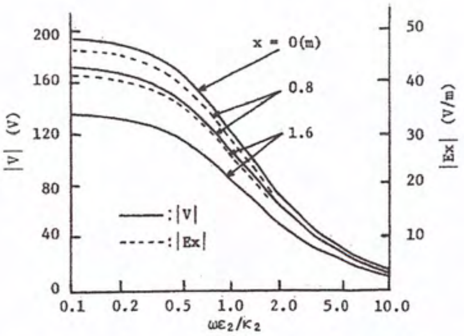


Fig. 4. Variation of $|V|$ and $|Ex|$ on the earth's surface in relation to $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$. κ_2=0.0005(mho/m), $\varepsilon_1/\varepsilon_2$=1/4, D=1(m), ℓ=1.5(m), r_0=0.007(m).

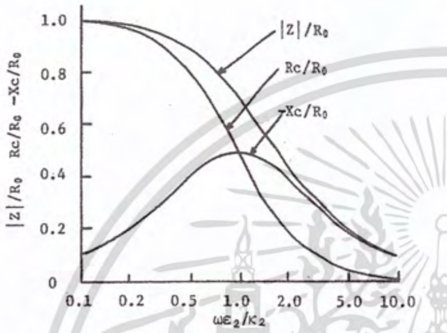


Fig. 5. Variation of $|Z|/R_0$, Rc/R_0 and Xc/R_0 in relation to $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$. κ_2=0.0005(mho/m), $\varepsilon_1/\varepsilon_2$=1/4, D=1(m), ℓ=1.5(m), r_0=0.007(m).

Table 1. Z, $|Z|/R_0$ and $|V|/V_0$ of a Vertical Linear Electrode

(a)

ℓ(m)	$\varepsilon_1/\varepsilon_2$	$\omega\varepsilon_2/\kappa_2$	Z(Ω)	$\|Z\|/R_0$	$\|V\|/V_0$
1.5	1/4	0.0	1106-j0	1.000	1.000
		1.0	542-j552	0.700	≃0.625
		3.0	107-j327	0.311	≃0.258
3.0	1/4	0.0	505-j0	1.000	1.000
		1.0	246-j252	0.697	0.628~0.626
		3.0	49-j149	0.309	0.260~0.258

(b)

ℓ(m)	$\varepsilon_1/\varepsilon_2$	$\omega\varepsilon_2/\kappa_2$	Z(Ω)	$\|Z\|/R_0$	$\|V\|/V_0$
1.5	1/2	0.0	1106-j0	1.000	1.000
		1.0	535-j549	0.693	≃0.555
		3.0	106-j323	0.308	≃0.217
1.5	1/8	0.0	1106-j0	1.000	1.000
		1.0	547-j552	0.703	≃0.664
		3.0	109-j329	0.313	≃0.284

κ_2 = 0.0005(mho/m), r_0 = 0.007(m), D = 1(m).

Figure 4 shows variation of $|V|$ and $|Ex|$ on the earth's surface in relation to $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$. Figure 5 shows variation of $|Z|/R_0$, Rc/R_0 and Xc/R_0 in relation to $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$, where Z, Rc and Xc are concerned with Eq. (13), and R_0 is the dc resistance to the earth.

Table 1 shows Z, $|Z|/R_0$ and $|V|/V_0$ in relation to $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$, where V_0 is the potential when $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$ = 0. We see in Table 1 that, as $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$ increases, $|V|/V_0$ decreases more than $|Z|/R_0$. This is termed *reault B*.

3.2 Horizontal Linear Electrode

A linear wire electrode of radius r_0 and of length ℓ is buried horizontally below the earth's surface as shown in Fig. 6. The field is simulated by four rows of linear current sources in the electrode, where each row consists of about thirty linear current sources.

Figure 6 shows the distribution of $|V|$ and $|Ex|$ along the x axis on the earth's surface, when the total injected current is 1+j0 (A). We see in Fig. 6 that *result A* is valid. Table 2 shows Z, $|Z|/R_0$ and $|V|/V_0$ in relation to $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$. We see in Table 2 that *result B* is also valid.

3.3 Three Ring Electrodes

A set of three ring-shaped wire electrodes is buried horizontally below the earth's surface as shown in Fig. 7(a). The three rings are equipotential. The field is simulated by four ring current sources in each ring electrode.

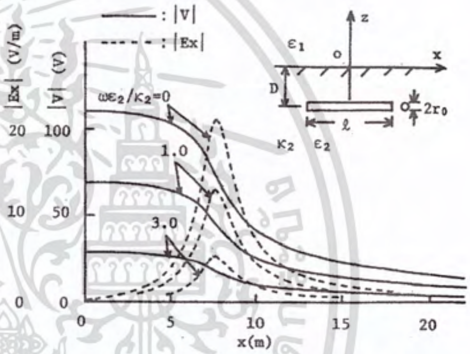


Fig. 6. Distribution of $|V|$ and $|Ex|$ along the x axis on the earth's surface. κ_2= 0.0005(mho/m), $\varepsilon_1/\varepsilon_2$=1/4, D=1(m), ℓ=15(m), r_0=0.007(m).

Table 2. Z, $|Z|/R_0$ and $|V|/V_0$ of a Horizontal Linear Electrode

ℓ(m)	$\omega\varepsilon_2/\kappa_2$	Z(Ω)	$\|Z\|/R_0$	$\|V\|/V_0$
1.5	0.0	1134-j0	1.000	1.000
	1.0	551-j565	0.696	≃0.625
	3.0	108-j333	0.308	≃0.258
15	0.0	193.8-j0	1.000	1.000
	1.0	88.5-j96.0	0.674	0.627~0.623
	3.0	16.8-j54.2	0.293	0.259~0.258

$\varepsilon_1/\varepsilon_2$ = 1/4, κ_2 = 0.0005(mho/m), D = 1(m), r_0 = 0.007(m).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 7(b) shows the distribution of $|V|$ and $|Ex|$ on the earth's surface, when the total injected current is 1+j0 (A). We see in Fig. 7(b) that *result A* is valid here. Table 3 shows Z, $|Z|/R_0$ and $|V|/V_0$ in relation to $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$. We see in Table 3 that *result B* is valid.

3.4 Disc Electrode

A disc electrode of thickness t and of radius a is buried horizontally below the earth's surface as shown in Fig. 8. The field is simulated by twenty cocentric disc current sources in two groups of ten each, with cocenters in the electrode at $z = -D+u$ and $z = -D-u$ on the z axis, where u is less than t/2.

Figure 8 shows the distribution of $|V|$ and $|Ex|$ on the earth's surface, when the total injected current is 1+j0 (A). Table 4 shows Z, $|Z|/R_0$ and $|V|/V_0$ in relation to $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$. *Results A* and *B* are again valid here.

3.5 Discussion

Comparing Tables 1(a), 2, 3 and 4 with one another, we find the following matters. As $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$ increases, the ratios $|V|/V_0$ decrease similarly independently of electrodes of various forms, lengths or radii. On the other hand, as $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$ increases, the ratios $|Z|/R_0$ decrease differently; among electrodes of similar form, when length ℓ or radius a is greater, $|Z|/R_0$ more decreases; between electrodes of the same radius a, $|Z|/R_0$ of the disc electrode decreases more than $|Z|/R_0$ of the three ring electrodes.

Though the grid electrode is widely used [2]-[4], because of its complexity, it is not considered here. But it may be expected that characteristics of $|V|/V_0$ and $|Z|/R_0$ of the grid electrode is intermediate between these characteristics of the three ring electrodes and the disc electrode, because the conductor's density of the grid electrode is intermediate between the conductor's densities of the three ring electrodes (a scattered electrode) and the disc electrode (a crowded electrode).

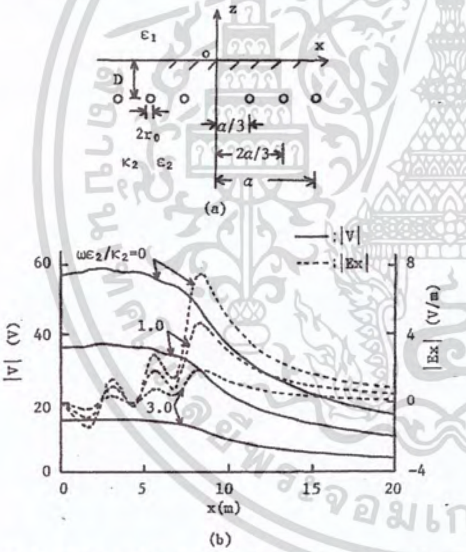


Fig. 7. A set of three ring electrodes. (a) Configuration of the electrodes. (b) Distribution of $|V|$ and $|Ex|$ on the earth's surface. κ_2=0.0005(mho/m), $\varepsilon_1/\varepsilon_2$=1/4, D=1(m), a=7.5(m), r_0=0.007(m).

4. APPROXIMATION OF IMPEDANCE TO GROUND

As shown above, the impedances to the earth can be precisely calculated by the current simulation method together with the method of images. However, because we have ample knowledge of the dc resistances to the earth, it is very useful that we can approximate the impedances from the corresponding dc resistances. Then we shall derive an expression for the approximation. Furthermore we shall estimate errors of the approximate impedances.

Table 3. Z, $|Z|/R_0$ and $|V|/V_0$ of Three Ring Electrodes

a(m)	$\omega\varepsilon_2/\kappa_2$	Z(Ω)	$|Z|/R_0$	$|V|/V_0$
	0.0	441-j0	1.000	1.000
0.75	1.0	204-j218	0.679	≃0.625
	3.0	39-j125	0.297	≃0.258
	0.0	68.7-j0	1.000	1.000
7.5	1.0	29.1-j33.8	0.649	0.629~0.624
	3.0	5.3-j18.2	0.275	0.260~0.257

$\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1/4$, $\kappa_2 = 0.0005$(mho/m), D = 1(m), $r_0 = 0.007$(m).

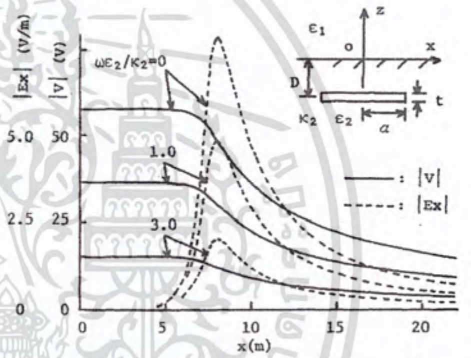


Fig. 8. Distribution of $|V|$ and $|Ex|$ on the earth's surface. κ_2=0.0005(mho/m), $\varepsilon_1/\varepsilon_2$=1/4, D=1(m), a=7.5(m), t=0.014(m).

Table 4. Z, $|Z|/R_0$ and $|V|/V_0$ of a Disc Electrode

a(m)	$\omega\varepsilon_2/\kappa_2$	Z(Ω)	$|Z|/R_0$	$|V|/V_0$
	0.0	397-j0	1.000	1.000
0.75	1.0	182-j197	0.676	≃0.625
	3.0	35-j112	0.295	≃0.258
	0.0	57.5-j0	1.000	1.000
7.5	1.0	23.4-j28.2	0.637	0.631~0.623
	3.0	4.1-j14.8	0.267	0.262~0.257

$\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1/4$, $\kappa_2 = 0.0005$(mho/m), D = 1(m), t = 0.014(m).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 Approximate Expression

First we assume two situations where currents $I'exp(j\omega t)$ and $I_0 exp(j\omega_0 t)$ are injected into the same electrode individually. Next we assume that currents in both situations do not flow into the air but flow only into the earth. We also assume that

$$I' = I_0 \quad (14)$$

and in the earth

$$\vec{J}' = \vec{J}_0 \quad (15)$$

From Eq. (3) we have

$$\vec{E}' = \frac{\vec{J}'}{\kappa_2 + j\omega\varepsilon_2} \quad (16)$$

$$\vec{E}_0 = \frac{\vec{J}_0}{\kappa_2 + j\omega_0\varepsilon_2} \quad (17)$$

If we assume

$$\omega_0\varepsilon_2/\kappa_2 << 1 \quad (18)$$

then Eq. (17) results in

$$\vec{E}_0 = \vec{J}_0/\kappa_2 \quad (19)$$

From Eq. (15), (16) and (19) we have

$$\frac{\vec{E}'}{\vec{E}_0} = \frac{E'}{E_0} = \frac{\kappa_2}{\kappa_2 + j\omega\varepsilon_2} \quad (20)$$

Let the impedances in both situations be Z' and Z_0, and the potentials of the electrode be V' and V_0 respectively. Then we have

$$Z' = V'/I' \quad (21)$$

$$Z_0 = V_0/I_0 \quad (22)$$

From Eq. (14), (20), (21) and (22), we have

$$\frac{Z'}{Z_0} = \frac{V'}{V_0} = \frac{E'}{E_0} = \frac{\kappa_2}{\kappa_2 + j\omega\varepsilon_2} \quad (23)$$

which results in

$$Z' = \frac{\kappa_2}{\kappa_2 + j\omega\varepsilon_2} Z_0 = \frac{\kappa_2}{\kappa_2 + j\omega\varepsilon_2} R_0 \quad (24)$$

where Z_0 is equal to the dc resistance R_0, because Z_0 is derived from Eq. (22) and (18). Thus, if we know ω, κ_2 and ε_2, we can approximate the impedance from the corresponding dc resistance R_0, that is, get the approximate impedance Z', by Eq. (24).

4.2 Estimation of Error

We shall now consider the error of the approximate impedance Z'. Z' is expressed as

$$Z' = |Z'| \angle -\theta' \quad (25)$$

The exact impedance Z is expressed as

$$Z = |Z| \angle -\theta \quad (26)$$

Both θ' and θ are positive here. Then

$$\text{Error of } |Z'| = \frac{|Z'|-|Z|}{|Z|} \times 100\ (\%) \quad (27)$$

$$\text{Error of } \theta' = \frac{\theta'-\theta}{\theta} \times 100\ (\%) \quad (28)$$

define the error.

In the following we shall estimate the errors of the approximate impedances for the electrodes discussed in the section 3.

(a) Horizontal Linear electrode

We shall estimate the errors for a linear wire electrode buried horizontally. Figure 9 shows an example of the errors. In Fig. 9 the errors of $|Z'|$ are positive and those of θ' negative. Consequently it is clear from Eq. (27) and (28) that $|Z'|$ is greater than $|Z|$ and θ' less than θ.

We also see in Fig. 9 that four error curves of $|Z'|$ are roughly proportional to each other along the vertical axis. That is, at any $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$, when $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ = 1/3, 1/6 and 1/8 the errors are respectively 1.3, 0.67 and 0.5 times the errors when $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ = 1/4. Such proportional relation is found among the error curves of θ'. Furthermore, whatever variables and parameters were chosen instead of the variable $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$ and the parameter $\varepsilon_1/\varepsilon_2$, such roughly proportional relations as shown in Fig .9 have been found, though they are not shown here. Then, for simple representation of the errors, we shall try to represent both errors of $|Z'|$ and θ' with two kinds of tables, Table 5 and Table 6. Table 5 shows normalized errors which are normalized at $\omega\varepsilon_2/\kappa_2 = 1$. Table 6 shows percent errors at $\omega\varepsilon_2/\kappa_2 = 1$.

Now we shall estimate the errors from these tables. For example, from Tables 5 and 6(a), the error of $|Z'|$ when $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1/6$ and $\omega\varepsilon_2/\kappa_2 = 2$ is estimated as

$$2.2\ (\%) \times 1.45 \simeq 3.2\ (\%)$$

As another example, the error of θ' when $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1/3$, $\omega\varepsilon_2/\kappa_2 = 0.5$ and D = 0.5(m) is estimated as follows. From Table 6(b), when $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1/4$, $\omega\varepsilon_2/\kappa_2 = 1$ and D = 0.5(m) the error is -4.7(%). Next, from Table 6(a), if $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1/4$ the error is -3.3(%) and if $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1/3$ the error is -4.1(%). Consequently, using the above proportional relation, when $\varepsilon_1/\varepsilon_2 = 1/3$, $\omega\varepsilon_2/\kappa_2 = 1$ and D = 0.5(m) the error is estimated as

$$-4.7\ (\%) \times \{-4.1(\%)/(-3.3(\%))\} \simeq -5.8\ (\%)$$

Finally, from Table 5, the error is estimated as

$$-5.8\ (\%) \times 1.5 \simeq -9\ (\%)$$

(b) Other electrodes

Generally the errors for a linear wire electrode buried vertically are very small, that is, about a third of those of the same electrode buried horizontally.

Tables 7 and 8 show normalized and percent errors for a set of three ring-shaped wire electrodes.

Tables 9 and 10 show normalized and percent errors for a disc electrode.

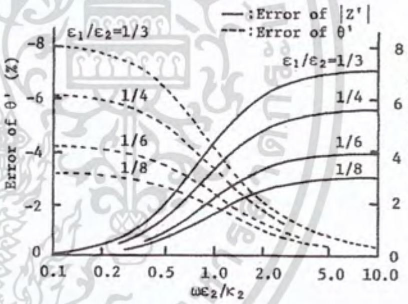


Fig. 9. Errors of $|Z'|$ and θ' in relation to $\omega\varepsilon_2/\kappa_2$. κ_2=0.0005(mho/m), D=1(m), ℓ=5(m), r_0=0.007(m).

Table 5. Normalized Errors of $|Z'|$ and θ' for a Horizontal Linear Electrode

$\omega\varepsilon_2/\kappa_2$	0.1	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	10.0
Normalized error of $\vert Z'\vert$	0.02	0.19	0.45	1.00	1.45	1.59	1.70
Normalized error of θ'	1.85	1.71	1.50	1.00	0.52	0.34	0.09

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(c) Discussion

It may be expected that the errors for the grid electrode are intermadiate between the errors for the three ring electrodes and the disc electrode, from the same reason as described in the end of the section 3.5.

Table 6. Errors of $|Z'|$ and θ' for a Horizontal Linear Electrode

(a)

$\varepsilon_1/\varepsilon_2$ *	1/3	1/4	1/6	1/8
Error of $\lvert Z'\rvert$ (%)	4.4	3.3	2.2	1.7
Error of θ' (%)	-4.1	-3.3	-2.4	-1.9

(b)

D (m) *	0.5	1.0	2.0
Error of $\lvert Z'\rvert$ (%)	4.8	3.3	2.1
Error of θ' (%)	-4.7	-3.3	-2.1

(c)

ℓ (m) *	1.5	5	15
Error of $\lvert Z'\rvert$ (%)	1.7	3.3	5.0
Error of θ' (%)	-1.7	-3.3	-4.9

(d)

r_0 (m) *	0.0035	0.005	0.007
Error of $\lvert Z'\rvert$ (%)	3.0	3.2	3.3
Error of θ' (%)	-3.0	-3.2	-3.3

* The non-specified parameters are taken as: $\omega\varepsilon_2/\kappa_2=1$, $\kappa_2=0.0005$(mho/m), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=1/4$, $\ell=5$(m), $r_0=0.007$(m), D=1(m).

Table 7. Normalized Errors of $|Z'|$ and θ' for Three Ring Electrodes

$\omega\varepsilon_2/\kappa_2$	0.1	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	10.0
Normalized error of $\lvert Z'\rvert$	0.02	0.18	0.43	1.00	1.51	1.66	1.80
Normalized error of θ'	1.70	1.60	1.43	1.00	0.55	0.36	0.10

Table 8. Errors of $|Z'|$ and θ' for Three Ring Electrodes

(a)

$\varepsilon_1/\varepsilon_2$ *	1/3	1/4	1/6	1/8
Error of $\lvert Z'\rvert$ (%)	9.8	7.3	4.8	3.6
Error of θ' (%)	-8.8	-7.1	-5.1	-4.0

(b)

D (m) *	0.5	1.0	2.0
Error of $\lvert Z'\rvert$ (%)	8.8	7.3	5.3
Error of θ' (%)	-8.5	-7.1	-5.2

(c)

a (m) *	0.75	1.25	2.5	7.5	25
Error of $\lvert Z'\rvert$ (%)	4.1	5.6	7.3	8.9	9.7
Error of θ' (%)	-4.1	-5.5	-7.1	-8.6	-9.3

* The non-specified parameters are taken as: $\omega\varepsilon_2/\kappa_2=1$, $\kappa_2=0.0005$(mho/m), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=1/4$, $a=2.5$(m), $r_0=0.007$(m), D=1(m).

5. CONCLUSIONS

When high frequency current is injected into a ground electrode and the conductivity of the earth around the electrode is low, the impedance rather than the dc resistance needs to be used as the circuit element from the electrode to the earth, in the circuit consideration. High frequency characteristics of the impedances to the earth as well as the field distributions of some typical electrodes are calculated by the current simulation method together with the method of images.

The following results are found from numerical calculations. As the frequency of injected current increases, the potentials and field intensities on the earth's surface in the vicinity of the electrode decrease in a similar degree independently of the distance from the electrode (*result A*). Furthermore, as the frequency increases, the potentials and intensities decrease more than the impedance decreases (*result B*).

An expression for approximating the impedances to the earth from the corresponding dc resistances is proposed and errors of the approximate impedances for various configurations of some typical electrodes are estimated. It should be possible to estimate errors for an arbitrary configuration of the electrodes using these data.

REFERENCES

[1] H. B. Dwight, "Calculation of Resistances to Ground." Electrical Engineering, vol. 55, pp. 1319-1328, December 1936.

[2] F. Dawalibi and D. Mukhedkar, "Multi Step Analysis of Interconnected Grounding Electrodes." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-95, pp. 113-119, January/February 1976.

Table 9. Normalized Errors of $|Z'|$ and θ' for a Disc Electrode

$\omega\varepsilon_2/\kappa_2$	0.1	0.3	0.5	1.0	2.0	3.0	10.0
Normalized error of $\lvert Z'\rvert$	0.02	0.18	0.43	1.00	1.50	1.66	1.79
Normalized error of θ'	1.71	1.60	1.43	1.00	0.54	0.36	0.10

Table 10. Errors of $|Z'|$ and θ' for a Disc Electrode

(a)

$\varepsilon_1/\varepsilon_2$ *	1/3	1/4	1/6	1/8
Error of $\lvert Z'\rvert$ (%)	11.5	8.6	5.7	4.2
Error of θ' (%)	-10.3	-8.3	-6.0	-4.7

(b)

D (m) *	0.5	1.0	2.0
Error of $\lvert Z'\rvert$ (%)	10.3	8.6	6.3
Error of θ' (%)	-9.8	-8.3	-6.2

(c)

a (m) *	0.75	1.25	2.5	7.5	25
Error of $\lvert Z'\rvert$ (%)	4.6	6.4	8.6	11.0	12.3
Error of θ' (%)	-4.6	-6.2	-8.3	-10.4	-11.6

* The non-specified parameters are taken as: $\omega\varepsilon_2/\kappa_2=1$, $\kappa_2=0.0005$(mho/m), $\varepsilon_1/\varepsilon_2=1/4$, $a=2.5$(m), $t=0.014$(m), D=1(m).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[3] J. G. Sverak, "Optimized Grounding Grid Design Using Spacing Technique." IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-95, PP. 362-374, January/February 1976.

[4] J. Nahman and S. Skuletich, "Resistances to Ground and Mesh Voltages of Ground Grids." Proc. IEE, vol. 126, pp. 57-61, January 1979.

[5] E. D. Sunde, Earth Conduction Effects in Transmission Systems. New York: Dover Publications, 1968.

[6] ibid., p. 70.

[7] T. Takuma, "Charge Simulation Method Including Disc-Charges." The Transactions of The Institute of Electrical Engineers of Japan, vol. 97-A, pp. 411-416, August 1977.

[8] H. Steinbigler, "Digitale Berechnung Elektrischer Felder." Elektrotechnische Zeitschrift Ausgabe A, ETZ-A, Bd. 90, H. 25, S. 663-666, Dezember 1969.

Discussion

F. Dawalibi (Safe Engineering Services Ltd., Montreal, Canada): The authors should be congratulated for a timely and well written paper.

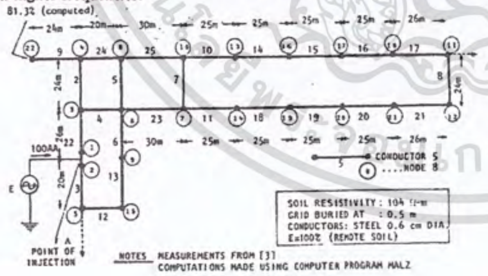
The reactance of grounding grids is of considerable importance to utility engineers involved with grounding problems. The IEEE Committee in charge of revising Guide 81 [1] has recognized this and has decided to devote part II of the revised guide to the measurement of grid "impedance". This paper will be of great interest to the committee during the preparation of part II. It should be noted however that this special attention to the reactance of grounding grids is directed primarily at the power frequency inductive component, and not at the capacitance which intervene only at high frequencies and high values of soil resistivities. I will elaborate on this later but before, I must stress that this paper is definitely a significant step forward in the understanding of all parameters which could have significant effects on ground electrode performance. The analytical methods introduced in this paper should prove very useful in surge performance studies of grounding installations.

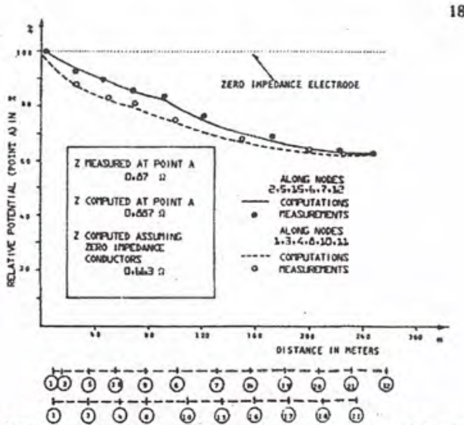
Recently my company has introduced the authors concept, as described originally in an earlier paper by the authors [2], into an existing grounding analysis program (MALZ). This addition however, was made while voltage drop in the conductors of the ground electrode and injection nodes are taken into consideration, unlike the authors methodology which assumes that the electrode is an equipotential surface and current density distribution is not modified by the nature, number and location of the overhead vertical connections feeding the fault current into the electrode. This is certainly true at low frequencies and when the resistive component of the electrode is large compared to the reactance (and thus the capacitance) value.

However, when estensive grids buried in low resistivity soils are involved, or when surge current (high frequency) is applied, the reactance should be considered (inductance and capacitance). Unfortunately, the assumptions:

- Equipotential grid
- Distribution of current densities independent of the overhead vertical connectors

are not valid any more. This is well illustrated by the following figure based on MALZ computations and field measurements conducted at 50 HZ [3]. Despite the fact that steel conductors were used, the effects shown at 50 HZ illustrate what could be expected when copper is used at higher frequencies.





Other investigations have shown that, the capacitance of practical grid buried in most soils will have some effects only at very high frequencies. In these cases the capacitance of the overhead connectors is also an important factor, and should not be neglected. In all cases however, the grid performance is influenced by the inductance of all conductors.

In fact, it is only at the MHZ range that capacitance effects start to play a noticeable role. A paper on this subject is under preparation.

The authors comments on this discussion will be greatly appreciated.

REFERENCES

[1] IEEE Guide No. 81, "IEEE Recommended Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials", 1980. Submitted for approval.

[2] T. Takashima, T. Nakae, R. Ishibashi, "Calculation of Complex Fields in Conducting Media", IEEE Trans. Vol. EI-15, No. 1, Feb. 1980, pp. 1-7.

[3] A. I. Yacobs, D. I. Petrov, "On Allowing for the Longitudinal Impedance of Horizontal Elements in Large Earthing" Elektrichestvo, No. 1, pp. 13-18, Jan. 1974.

Manuscript received July 17, 1980.

R. Verma, (The Shawinigan Engg. Co. Ltd., Montreal, Canada): It is interesting to read a paper on high frequency impedances of grounding grids. The effect of displacement currents is pronounced only at high frequencies coupled with very high resistive soils, where the capacitive time constant (RC) exceeds the wave-front time of an impulse. The displacement currents are parallel to the conduction currents and the sum of these currents flows through the self inductance of the grounding grid [1, 2, 3] based on its grounding resistance (R), capacitance (C) and the self inductance (L). Reference to these publications is non-existant in the present paper. More references can also be found in [1]. The main factor in controlling the impulse impedance is the inductance of the grounding grids. As a matter of fact, the currents in electrode and ground form a magnetic field and it is the strongest where the current is most concentrated namely around the electrode. Therefore, the inductance of the electrode or grid is mainly governed by the distribution of the currents in the electrode or grid and appears in the equivalent circuit, viz L in series with parallel combination of R and C. The impulse impedance derived from this equivalent circuit, for an impulse input, has higher value to begin with and diminishes finally to steady state (i.e. power frequency) grounding resistance [1, 2]. Omission of inductive part gives rise to an equivalent circuit R in parallel with C, leading to impulse impedance being less than dc resistance, as reported in the paper.

The authors' comments on above discussion will be appreciated.

REFERENCES

[1] R. Verma and D. Mukhedkar, "Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grids", paper F-79-630-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Presented, IEEE-PES Summer Meeting, 1979.
[2] R. Rudenberg, "Electric Shock Waves in Power Systems", HarvardUniversity Press, Cambridge, Mass. 1968, pp. 273-277.
[3] "Guide for Safety in A.C. Substations Grounding", IEEE Standard #80, 1961, pp. 59.

Manuscript received August 25 , 1980.

T. Takashima, T. Nakae, and R. Ishibashi: We wish to thank Messrs. Dawalibi and Verma for their thoughtful comments, which undoubtedly will benefit the future work on this subject.

We agree with the discussers that the ground electrode performance is influenced by the inductance of conductors.

When the influence of electrode inductance is taken account, as Mr. Dawalibi comments, our assumptions are not valid any more. Then the proposed method should be modified; a potential V_i in Eq. (12) should be set up as a potential when voltage drop in the conductor of electrode is taken account. This potential naturally would be influenced by the nature, number and location of the overhead vertical connections.

Mr. Verma comments that the impulse impedance has higher value to begin with and diminishes finally to steady state grounding resistance. However, an actual survey on the impedance of vertical electrodes with connections at frequencies between 400 kHz and 7 MHz [1] has shown that, as the frequency increases, the impedance simply decreases, and in some cases impedances are less than dc resistances. These results support our result that displacement currents (i.e. capacitance effects) play an important role at high frequencies.

The calculated results and the conclusions in this paper should be reexamined by a modified method where the inductance of all conductors is taken account.

REFERENCE

[1] K. Okumura, "High-Frequency Characteristics of Earthing Impedances to Ground on Power Systems." *Research Reports of Shibaura Institute of Technology,* Vol. 21, pp. 45-48, 1977.

Manuscript received November 17, 1980.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

เปเปอร์ Revision,Extension,and Validation of Jordan's Formula to Calculate the Surge Impedance of Vertical Conductors

530 IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 48, NO. 3, AUGUST 2006

Revision, Extension, and Validation of Jordan's Formula to Calculate the Surge Impedance of Vertical Conductors

Alberto De Conti, Silvério Visacro, *Member, IEEE*, Amilton Soares, Jr., *Member, IEEE*, and Marco Aurélio O. Schroeder

***Abstract*—Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors is revised and extended to take into account systems with multiple conductors. Experimental data and the hybrid electromagnetic model are applied in order to validate the derived expressions. Additionally, Jordan's formula is successfully used in the representation of an actual tower as a multiconductor vertical system. The obtained results indicate the usefulness of the derived expressions if an engineering analysis of direct strikes over elevated strike objects is required.**

***Index Terms*—Electromagnetic transient analysis, lightning, numerical analysis, power transmission lines.**

I. Introduction

SEVERAL models have been proposed to estimate the surge impedance of vertical structures, following either a transmission line [1]–[6], a numerical electromagnetic [7], [8], or an experimental approach [9]–[12], although in some cases, more than one approach is used [13]–[16]. Jordan, in 1934, published one of the precursor works in this field [1]. Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors remained as the main reference to estimate the transient behavior of transmission towers subjected to lightning currents until the proposition of new theories in the 1960s (e.g., [2] and [3]). It was later found that Jordan's derivation contained a mistake and a correction was proposed [17].

Recently, the interaction of lightning with elevated strike objects has been attracting a lot of attention in the scientific community (e.g., [18]–[24]). As a consequence, the development of simplified models to simulate transients in vertical metallic structures has gained importance. In this context, the use of Jordan's corrected equation appears to be very promising, because it is very simple and physically consistent. However, to the best of the authors' knowledge, no experimental validation of Jordan's corrected equation is found in the literature. Furthermore, it is known that Jordan's formula enables the calculation of the surge impedance of a single vertical conductor. Its extension to take into account systems with several parallel conductors has yet to be proposed.

Manuscript received January 13, 2006; revised May 2, 2006. The work of A. De Conti was supported by CNPq-Brazil.

A. De Conti, S. Visacro, and A. Soares, Jr. are with the Lightning Research Center, Federal University of Minas Gerais (UFMG-CEMIG), Pampulha, 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brazil (e-mail: conti@cpdee.ufmg.br; LRC@cpdee.ufmg.br; soaresjr@cpdee.ufmg.br).

M. A. O. Schroeder is with the Federal Center of Technological Education (CEFET-MG), Academic Department of Electrical Engineering, Nova Gameleira, 30510-000 Belo Horizonte, MG, Brazil (e-mail: schroeder@des.cefetmg.br).

Digital Object Identifier 10.1109/TEMC.2006.879345

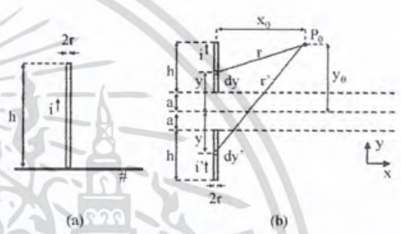


Fig. 1. Vertical conductor system. (a) Original system. (b) Equivalent representation.

In Sections II and III of this paper, Jordan's equation is revised and extended to allow the evaluation of systems composed of multiple vertical conductors. In Section IV, an indirect validation of Jordan's equation is presented. This validation takes as reference the hybrid electromagnetic model (HEM) presented in [25], which has been experimentally validated. Finally, a simple multiconductor transmission line model is proposed in Section V to represent an actual lightning measuring tower.

II. Revision of Jordan's Formula

In [1], Jordan introduced the following expression to represent the surge impedance of a vertical conductor:

$$Z = 60 \ln \frac{h}{r} + 90 \frac{r}{h} - 60. \quad (1)$$

Although the derivation of (1) is not entirely available in [1], one can suppose that Jordan applied the magnetic vector potential to calculate the inductance of a vertical cylinder with height h and radius r, positioned at ground level [see Fig. 1(a)]. If this hypothesis is true, the method of images was employed, and the system of Fig. 1(a) was equivalently represented as that in Fig. 1(b), where i is the current in the real conductor, i' is the current in the image conductor, and P_0 is a generic point with coordinates (x_0, y_0) where one wishes to calculate the magnetic vector potential $\vec{A}$. The parameter a is defined by Jordan [1] as the depth of true ground plane below the earth's surface, which is assumed to be, as in [5], conceptually equivalent to the complex skin depth p introduced by Deri *et al.* [26] to represent losses due to a finite ground conductivity.

0018-9375/$20.00 © 2006 IEEE

Authorized licensed use limited to: Doshisha University. Downloaded on April 6, 2009 at 02:00 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

According to the method of images, i and i' must have the same direction and sign, as illustrated in Fig. 1(b) [27]. Consequently, $\vec{A} = \vec{A}_r + \vec{A}_i$, where $\vec{A}_r$ is the magnetic vector potential associated with the real conductor, and $\vec{A}_i$ is the magnetic vector potential associated with the image conductor. Nevertheless, in the derivation of (1), Jordan considered the opposite sign for the current in the image conductor, and therefore, its contribution to the total magnetic vector potential became subtractive and not additive, as it should be. Consequently, the surge impedance given by (1) is underestimated. To evaluate the correct value of surge impedance of a vertical conductor following Jordan's approach, a new expression is then required.

Based on the system of coordinates of Fig. 1(b) and disregarding propagation effects, one can write the total magnetic vector potential at the generic point P_0 as

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 i}{4\pi}\left[\int_a^{a+h}\frac{dy}{\sqrt{(y_0-y)^2+x_0^2}} + \int_a^{a+h}\frac{dy}{\sqrt{(y_0+y)^2+x_0^2}}\right]\hat{y} \quad (2)$$

where the first integral in the right-hand side term corresponds to $\vec{A}_r$, the second integral corresponds to $\vec{A}_i$, and $\hat{y}$ is the unit vector in the y-axis direction. After solving the integrals in (2) and knowing that $dL = Ady/i$, one can write

$$dL = \frac{\mu_0}{4\pi}\left[\ln\frac{\sqrt{(h+a-y_0)^2+x_0^2}+(h+a-y_0)}{\sqrt{(a-y_0)^2+x_0^2}+(a-y_0)} + \ln\frac{\sqrt{(h+a+y_0)^2+x_0^2}+(h+a+y_0)}{\sqrt{(a+y_0)^2+x_0^2}+(a+y_0)}\right]dy_0 \quad (3)$$

where dL is the differential inductance element. Note that if $\vec{A} = \vec{A}_r - \vec{A}_i$ is incorrectly assumed, (3) becomes equal to the expression obtained by Jordan to represent dL [1].

To calculate the external per unit length inductance L of the vertical conductor, it is necessary to integrate (3) in the interval $a \le y_0 \le a+h$, at $x_0 = r$, and then to divide the result by h. To simplify, as in [1], an infinite ground conductivity is now assumed, making $a = 0$ in (3). As a result

$$L = \frac{\mu_0}{4\pi}\left\{2\ln\frac{2h+\sqrt{4h^2+r^2}}{r} + \frac{\mathrm{r}}{\mathrm{h}} - \frac{\sqrt{4h^2+r^2}}{h}\right\}. \quad (4)$$

Equation (4) can be further simplified if $h \gg r$. Also, if losses are neglected and a transverse electromagnetic (TEM) field structure is assumed, the surge impedance Z_S of the vertical conductor can be obtained simply by multiplying (4) by the speed of light, resulting in

$$Z_S = 60\ln\frac{4h}{r} - 60 \quad (5)$$

which is the same expression obtained by Takahashi [17] but in a slightly different derivation. Also, (5) is similar to the expression independently derived by Wagner and Hileman [2] to calculate the average surge impedance of a vertical cylinder that was later modified by Sargent and Darveniza [3], reaching the final form

$$Z_{\mathrm{WH}} = 60\ln\left(\sqrt{2}\frac{2h}{r}\right) - 60. \quad (6)$$

In the derivation of Wagner and Hileman [2], a step current was assumed to be injected at the top of a vertical cylinder, and as a consequence, only the first term in the right-hand side of (6) was obtained. Note that this term, which was derived from a more general expression that considered the time-varying nature of the surge impedance, is similar to the dominant term of (5). After identifying that the transient response of the vertical cylinder is dependent on the shape of the injected current, Sargent and Darveniza [3] extended the expression originally obtained by Wagner and Hileman [2] to consider the injection of a ramp-type current waveform and found the second term in the right-hand side of (6), which also appears in (5). Note that Z_S and Z_{WH} are simply related by $Z_S = Z_{\mathrm{WH}} + 21$.

Although a TEM field structure is not strictly valid to describe the propagation of surges along vertical cylinders, especially at points near the excitation point [22], previous works using this approach have succeeded quite well in reproducing voltages and currents obtained from real- or reduced-scale experiments (e.g., [6], [11], [13], and [15]). Also, a propagation speed equal to or very close to the speed of light has been observed in experiments involving towers and vertical cylinders (e.g., [10]–[12]), indicating that the relation $Z_S = cL$ used in the derivation of (5) can be considered a reasonable approximation. In actual towers, a propagation speed lower than the speed of light is usually attributed to the effect of slants and crossarms [4].

III. Extension of Jordan's Formula to Represent a Vertical Multiconductor System

In [6], Gutierrez *et al.* proposed the representation of transmission towers as vertical multiconductor systems, deriving expressions for the self and mutual surge impedance of vertical conductors with conical shape. A similar procedure was previously adopted by Ametani *et al.* [5] for a system of cylindrical conductors, but it appears that the derivation presented in [5] has also an error in the direction of the image current as it reduces to Jordan's original equation for the particular case of a single vertical conductor.

In Jordan's original work [1], no expressions regarding the mutual coupling in a set of n vertical conductors have been presented. In the modeling of elevated strike objects using Jordan's approach, one should therefore derive an expression for the mutual surge impedance of two vertical conductors.

To perform this, it suffices to integrate (3) along conductor B in Fig. 2 ($x_0 = d, 0 \le y_0 \le h, a = 0$), imagining conductor A as the current carrying conductor. Then, to obtain the mutual surge impedance Z_M between conductors A and B, it is necessary to divide the obtained expression by h and to multiply the

Authorized licensed use limited to: Doshisha University. Downloaded on April 6, 2009 at 02:00 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

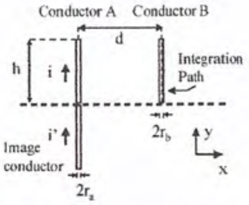


Fig. 2. Representation of two parallel vertical conductors.

result by the speed of light c, giving

$$Z_M = 60 \ln \frac{2h + \sqrt{4h^2 + d^2}}{d} + 30\frac{d}{h} - 60\sqrt{1 + \frac{d^2}{4h^2}} \quad (7)$$

where d is the distance from the center of conductor A to the center of conductor B. Equation (7) assumes $d \gg r_a, d \gg r_b$ and equal heights for both conductors.

IV. Validation

A. Introduction

To validate (5), the following procedure has been adopted. Firstly, the HEM developed by the authors [25] is used to reproduce the experimental results of Hara and coworkers [9], [10]. This step is done to illustrate the applicability of the HEM program to the analyzed case. Then, such code is employed in the simulation of a typical case regarding the evaluation of direct lightning strikes over vertical metallic structures. The obtained voltages and currents are compared with the ones predicted with (5) in a simple alternative transient program (ATP) model. The validation of (7) is presented in Section V.

B. Reproduction of Experimental Results With a HEM

In [9] and [10], Hara and coworkers conducted experiments dedicated to evaluate the surge impedance of vertical conductors. Such experiments comprised test objects with several heights, radii, and configurations. Voltage and current waveshapes obtained in some of the tested configurations have been later used to validate computational models based on the method of moments [7] and on the finite-difference time-domain (FDTD) technique [8]. In this section, the HEM presented in [25] is applied to reproduce voltage and current waveshapes obtained by Hara and coworkers in the cases illustrated in Fig. 3, corresponding to a single vertical conductor and to a system of four parallel conductors. The obtained results are illustrated in Fig. 4. As indicated in the figure, a good agreement is obtained between measured and calculated curves.

Based on the experimental curves illustrated in Fig. 4, Hara and coworkers [9], [10] defined the surge impedance Z of the evaluated vertical structures as being the ratio $v(t_p)/i(t_p)$, where t_p is the time when the instantaneous value of $v(t)$ is maximal. Note that $v(t)$ is the voltage drop in a 10-kΩ resistance connected between the top of the structure and the tip of the voltage measuring lead. The parameter $i(t)$ is the current at the top of the vertical structure. Table I compares the values of surge impedance obtained for the system of one conductor illustrated in Fig. 3(a) according to this definition, both for the experimental data presented by Hara and coworkers [9], [10] and for the calculations carried out in the HEM program. As indicated in Table I, the surge impedance value calculated with the HEM program is very close to the one experimentally obtained, with an error around 5%. This fact, plus the overall agreement of the curves in Fig. 4, confirm that the HEM can be successfully applied to evaluate lightning transients in vertical structures. For this reason, this model is later used in this paper as a reference for comparisons with a simplified model based on Jordan's approach.

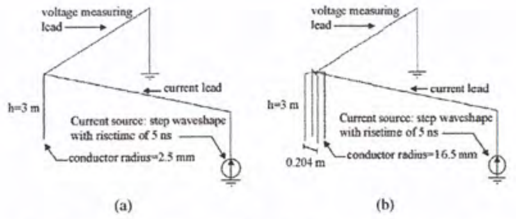


Fig. 3. Configurations evaluated by Hara and coworkers [9], [10] and reproduced by the HEM program [25]. (a) Single vertical conductor. (b) Four parallel conductors.

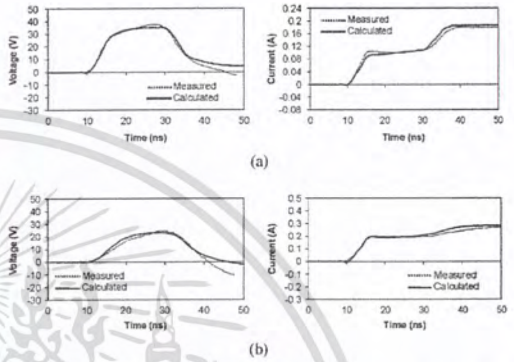


Fig. 4. Comparison of measured [9], [10] and calculated results obtained with the HEM program. (a) Single vertical conductor. (b) Four vertical conductors.

TABLE I
Comparison of Measured and Computed Surge Impedance

Configuration	Experiment [9, 10] (definition in the text)	HEM [25] (definition in the text)	Original Jordan's Formula (1)	Corrected Jordan's Formula (5)
Single conductor	360 Ω	341 Ω	365 Ω	449 Ω

Authorized licensed use limited to: Doshisha University. Downloaded on April 6, 2009 at 02:00 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

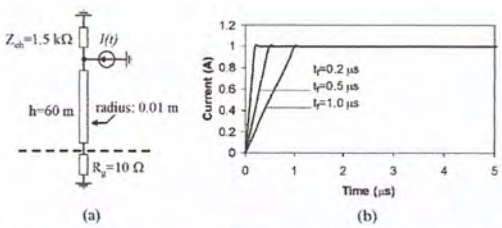


Fig. 5. Simplified representation of current injection at the top of a vertical conductor. (a) Simulated system. (b) Injected currents.

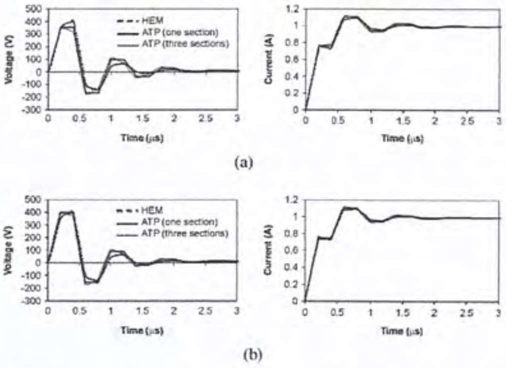


Fig. 6. Voltages and currents calculated at the top of a single vertical conductor, for the injection of a step current with front time of 0.2 μs. (a) Jordan's original formula (1). (b) Jordan's corrected formula (5).

C. Comparisons of Results Provided by the HEM Program to Results Obtained With Jordan's Equation

Surge impedance values directly calculated with (1) (Jordan's original equation) and (5) (Jordan's corrected equation) were included in Table I for comparisons with both the HEM program and the experimental data of Hara and coworkers [9], [10]. Interestingly, the value predicted by Jordan's original equation, which is in error, seems to present an excellent agreement with the experiment, whereas the value calculated with Jordan's corrected equation appears to be largely inconsistent. This result is misleading because the definition of voltage adopted in the derivation of Jordan's formula differs from the one employed by Hara and coworkers [9], [10] and by the HEM program to estimate the surge impedance of the single vertical conductor.[1] In Jordan's derivation, voltage is defined as the line integral of the electric field from the ground surface to the conductor top, which, in a quasi-static approach, is equivalent to the voltage drop in the inductance assumed to represent the vertical conductor. This definition is exactly the same as in [2] and [3], except for the fact that propagation effects were considered in the derivations presented in such papers. However, in the experiments of Hara and coworkers [9], [10] and in the calculations carried out in the HEM program, voltage is defined as the voltage drop in the 10-kΩ resistance connected between the top of the structure and the voltage lead. Also, in the experiments conducted in [9] and [10] and reproduced by the HEM program, there is an electromagnetic coupling between the measuring system, the test object, and the current lead that is not predicted by Jordan's equation. Thus, the excellent agreement between Jordan's original formula and the results of Hara and coworkers [9], [10] is probably a mere coincidence. Moreover, the validity of Jordan's corrected formula cannot be judged by simply comparing the values indicated in Table I.

In order to evaluate the use of Jordan's equations in the simulation of lightning transients in vertical conductors without considering the influence of the measuring system of Fig. 3, the simplified configuration illustrated in Fig. 5(a) was conceived. It consists of a 60-m vertical conductor connected to a grounding resistance of 10 Ω at its bottom and to a surge impedance of 1500 Ω at its top. These values were chosen to provide current reflection coefficients of about –0.5 and 1 at the top and at the bottom of the vertical conductor, respectively. These coefficient values follow the estimates of Rakov [18] concerning the behavior of elevated metallic structures struck by lightning.

A step current was assumed to be injected at the tower top. Three different front times were considered, namely $t_f = 0.2\ \mu$s, $t_f = 0.5\ \mu$s, and $t_f = 1.0\ \mu$s [see Fig. 5(b)]. The front times of 0.5 μs and 1.0 μs can be considered, respectively, lower and upper limits of typical front times associated with subsequent lightning strokes measured at short instrumented towers. This assumption is based on data collected at Mount San Salvatore [28] and at Morro do Cachimbo Station [29], which indicate, respectively, median values of about 0.75 and 0.8 μs for this parameter (the towers at both stations have heights comparable to the vertical conductor evaluated here). Conversely, the front time of 0.2 μs assumed for one of the injected currents can be considered an extreme case, as more than 95% of the front times measured at Morro do Cachimbo Station and at Mount San Salvatore are above this value [28], [29].

Simulations have been carried out in the HEM program and also in the ATP. In the latter, the vertical conductor was represented as an ideal transmission line with a propagation velocity of 3×10^8 m/s. In the former, it was represented as a series association of 30 electromagnetically coupled 2-m long vertical segments. The adopted surge impedance values were calculated according to (1) (original Jordan's equation) and (5) (corrected Jordan's equation) to provide a comparison of both. The obtained results are illustrated in Figs. 6–8. Note that in the ATP simulations, the vertical conductor was represented as either a single transmission line or as a cascade of three transmission lines with surge impedance values calculated at heights of 20, 40, and 60 m.

Analyzing Figs. 6–8, it is apparent that the application of Jordan's corrected equation leads to a better overall agreement with the predictions of the HEM program, in comparison with Jordan's original formula, regardless of the number of sections adopted in the ATP simulations. Note also that this agreement tends to improve as the front time of the injected current

[1]A discussion on possible definitions of voltage for tower transient analysis can be found in [21].

Authorized licensed use limited to: Doshisha University. Downloaded on April 6, 2009 at 02:00 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

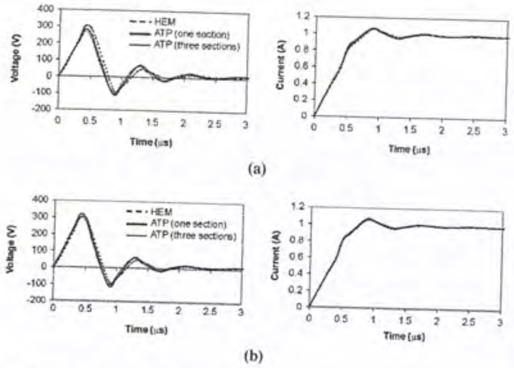


Fig. 7. Voltages and currents calculated at the top of a single vertical conductor for the injection of a step current with front time of 0.5 μs. (a) Jordan's original formula (1). (b) Jordan's corrected formula (5).

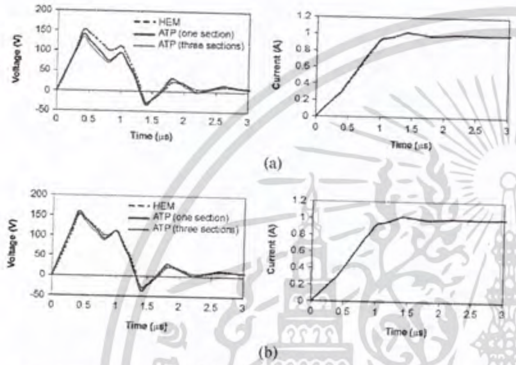


Fig. 8. Voltages and currents calculated at the top of a single vertical conductor for the injection of a step current with front time of 1.0 μs. (a) Jordan's original formula (1). (b) Jordan's corrected formula (5).

increases. This suggests that Jordan's corrected equation might lead to even better results if applied in the modeling of transmission towers subjected to direct strikes. In such a case, the impact of first strokes with very high amplitudes but relatively slow wavefronts ($\sim$5 μs [29]) is usually a major concern. The obtained results are also interesting because they allow an indirect validation of Jordan's corrected equation, which, although has been previously derived by Takahashi [17], has not been compared to any other computational method or experimental result.

Finally, if Fig. 6 is analyzed closely, one can observe that voltage waves calculated with the HEM program rise exponentially until the arrival of the reflected wave at 0.4 μs, whereas the ATP-calculated voltages rise steeply until 0.2 μs and then gradually decrease or keep a constant value until 0.4 μs, depending on the number of sections assumed to represent the vertical conductor. The same phenomenon was observed by Baba and Ishii [15] in comparisons between the NEC and the electromagnetic transients program (EMTP) calculations and by Wagner and Hileman [2] in comparisons between field and transmission line approaches to estimate the surge response of transmission towers. It can be explained by the fact that in the HEM program [25], in the NEC [15], and in the theoretical derivation of Wagner and Hileman [2], the transient behavior of the vertical cylinder due to a spherically expanding electromagnetic field is considered in the calculations, whereas in the transmission line approach used in the ATP model an average (constant) surge impedance is assumed to represent a whole section of the cylinder. A more accurate representation of the vertical conductor with the transmission line approach would be obtained if a time-varying surge impedance was considered [2], although such a definition would still depend on the adopted excitation waveshape [3], [21].

D. Application of Jordan's Equation to a Multiconductor Vertical System

After validating Jordan's corrected equation for the case of a single conductor, it remains necessary to evaluate the use of (7) in the simulation of a multiconductor vertical system. For this, the instrumented tower installed at Morro do Cachimbo Station, illustrated in Fig. 9(a), was chosen [29]. This choice is based on the importance of having an engineering model to study the contamination of lightning current waveshapes measured at this station (a model of such type is very convenient for evaluations with time-domain based lightning return-stroke models). Again, simulations have been carried out in the HEM program and in the ATP, following the schematics of Fig. 5(a) and the injected currents of Fig. 5(b). In the HEM program, the full representation of Fig. 9(a) was used as input data. In the ATP model, the simplified representation of Fig. 9(b) was used instead. This representation consists of three 63.5-m long parallel vertical conductors, with spacing of 0.5 m and radii of 20 mm. Details such as the 3.5-m long rod at the tower bottom, the pyramidal structures at the tower bottom and top, and the connecting structures spread out along the actual tower have been disregarded. Equation (5) was employed to obtain the self-surge impedance of the vertical conductors, whereas (7) was employed to estimate their mutual surge impedance for use in the ATP. Fig. 10 shows the obtained current waveshapes at tower bottom and at tower top.

As indicated in Fig. 10, current waveshapes obtained with the ATP model agree very well with those predicted by the HEM program at the tower top. The same results would be obtained if the three-conductor system illustrated in Fig. 9(b) was equivalently represented in the ATP as a single-phase transmission line with a surge impedance of about 380 Ω. At the tower bottom, an excellent agreement is obtained for $t_f = 1.0$ μs. For $t_f = 0.2$ μs and $t_f = 0.5$ μs, a good agreement is obtained at the first peak, followed by some discrepancies in the subsequent oscillations. Some of the existing discrepancies can be justified by the consideration of a strictly TEM field structure in the ATP representation. Also, the tower model implemented in the ATP does not take into account all the details of Morro do Cachimbo tower. This might lead to inaccuracies in the fine structure of

Authorized licensed use limited to: Doshisha University. Downloaded on April 6, 2009 at 02:00 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

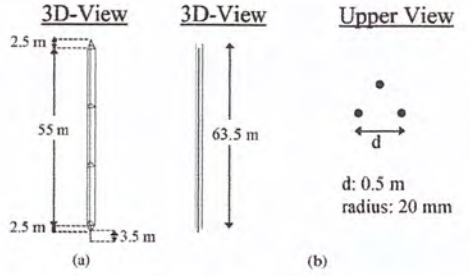


Fig. 9. Morro do Cachimbo Tower in full and simplified representations. (a) Morro do Cachimbo Tower. (b) Simplified representation in ATP.

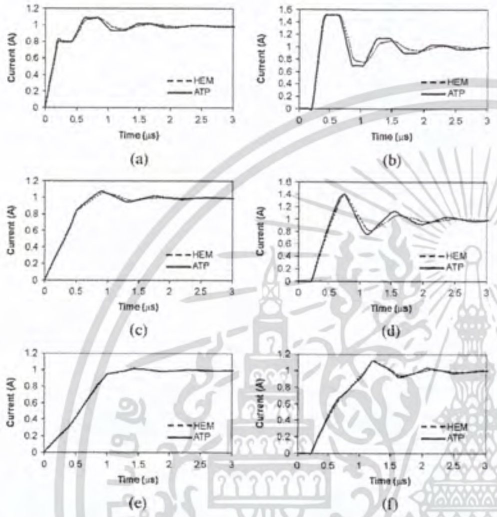


Fig. 10. Currents at tower top and tower base for the injection of step currents with different front times at the top of the structures illustrated in Fig. 9 according to the schematics of Fig. 5(a). (a) Tower top ($t_f = 0.2\ \mu s$). (b) Tower bottom ($t_f = 0.2\ \mu s$). (c) Tower top ($t_f = 0.5\ \mu s$). (d) Tower bottom ($t_f = 0.5\ \mu s$). (e) Tower top ($t_f = 1.0\ \mu s$). (f) Tower bottom ($t_f = 1.0\ \mu s$).

the calculated currents. Nevertheless, the overall agreement of current waveshapes calculated with the HEM program and the ATP model is considered to be quite good (not only in Fig. 10 but also in Figs. 6–8), indicating that the representation of a single vertical conductor or a group of vertical conductors as uniform transmission lines can lead to satisfactory results, at least in an engineering perspective. This conclusion is in line with the results obtained with reduced-scale models [13]. Note, however, that a more accurate description of the transient behavior of vertical conductors would require the consideration of a non-TEM field structure [21], [22], especially if the front time of the injected current is relatively short in comparison to the round trip time of the conductor [15]. Also, the interaction of other parts of the circuit (e.g., return-stroke channel, horizontal conductors, etc.) with the elevated strike object may be important in some cases [4], [15]. In such cases, the preliminary use of improved models or comparisons with experimental results is recommended to evaluate the quality of the adopted approximations.

As a final remark, if one compares current waveshapes calculated at the top and at the bottom of the simulated tower (see Fig. 10), significant differences are observed, especially for shorter wavefronts. As indicated in [24], differences of such magnitude would not be observed if an improved return-stroke model was applied instead of the very simplified channel representation considered here.

V. Conclusion

Jordan's equation to calculate the surge impedance of vertical conductors is revised, validated, and extended to allow the evaluation of multiconductor vertical systems in a transmission line approach. The performed analyses indicate that 1) Jordan's corrected equation is more than adequate to simulate electromagnetic transients in vertical conductors than Jordan's original equation, which is in error; 2) the representation of a vertical conductor as a uniform transmission line is able to give reasonable results if typical lightning parameters are chosen to simulate direct strikes to towers with dimensions like the one evaluated here; and 3) the proposed model to represent the tower installed at Morro do Cachimbo Station is able to provide fairly good results if applied in the study of lightning transients, either to estimate the effects of contamination of measured lightning currents or to calculate lightning electromagnetic fields in an engineering perspective.

References

[1] C. A. Jordan, "Lightning computations for transmission lines with overhead ground wires, Part II," *Gen. Electr. Rev.*, vol. 37, no. 4, pp. 180–186, 1934.
[2] C. F. Wagner and A. R. Hileman, "A new Approach to the calculation of the lightning performance of transmission line III—A simplified method: Stroke to tower," *AIEEE Trans. Part III*, vol. 79, pp. 589–603, Oct. 1960.
[3] M. A. Sargent and M. Darveniza, "Tower surge impedance," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-88, no. 5, pp. 680–687, May 1969.
[4] W. A. Chisolm, Y. L. Chow, and K. D. Srivastava, "Lightning surge response of transmission towers," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, no. 9, pp. 3232–3242, Sep. 1983.
[5] A. Ametani, Y. Kasai, J. Sawada, A. Mochizuki, and T. Yamada, "Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multiconductor tower model," in *Proc. Inst. Elect. Eng. Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 141, no. 4, Jul. 1994, pp. 339–345.
[6] J. A. Gutierrez, R. P. Moreno, J. L. Naredo, J. L. Bermudez, M. Paolone, C. A. Nucci, and F. Rachidi, "Nonuniform transmission tower model for lightning transient studies," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 2, pp. 490–496, Apr. 2004.
[7] M. Ishii and Y. Baba, "Numerical electromagnetic field analysis of tower surge response," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 12, no. 1, pp. 483–488, Jan. 1997.
[8] T. Noda and S. Yokoyama, "Thin wire representation in finite time domain surge simulation," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, no. 3, pp. 840–847, Jul. 2002.
[9] T. Hara, O. Yamamoto, M. Hayashi, and C. Uenosono, "Empirical formulas of surge impedance for single and multiple vertical cylinder," *Trans. Inst. Elect. Eng. Jpn.*, vol. 110-B, no. 2, pp. 129–137, 1990 (in Japanese).
[10] T. Hara and O. Yamamoto, "Modelling of a transmission tower for lightning surge analysis," *Proc. Inst. Elect. Eng. Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 143, no. 3, pp. 283–289, May 1996.

Authorized licensed use limited to: Doshisha University. Downloaded on April 6, 2009 at 02:00 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] M. Ishii, T. Kawamura, T. Kouno, E. Ohsaki, K. Shiokawa, K. Murotani, and T. Higuchi, "Multistory transmission tower model for lightning surge analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 6, no. 3, pp. 1327–1335, Jul. 1993.

[12] T. Yamada, A. Mochizuki, J. Sawada, T. Kawamura, A. Ametani, M. Ishii, and S. Kato, "Experimental evaluation of a UHV tower model for lightning surge analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 10, no. 1, pp. 393–402, Jan. 1995.

[13] J. L. Bermudez, F. Rachidi, W. A. Chisholm, M. Rubinstein, W. Janischewskyj, A. M. Hussein, V. Shostak, and J. S. Chang, "On the use of transmission line theory to represent a nonuniform vertically-extended object struck by lightning," presented at the IEEE Int. Symp. EMC, Boston, MA, Aug. 2003.

[14] H. Motoyama and H. Matsubara, "Analytical and experimental study on surge response of transmission tower," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 15, no. 2, pp. 812–819, Apr. 2000.

[15] Y. Baba and M. Ishii, "Numerical electromagnetic field analysis on lightning surge response of tower with shield wire," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 15, no. 3, pp. 1010–1015, Jul. 2000.

[16] A. Soares, Jr. and S. Visacro, "Simplified expressions for tower surge impedance based on application of a field-circuit modeling approach," in *Proc. 27th ICLP*, Avignon, France, 2004, pp. 487–491.

[17] H. Takahashi, "Confirmation of the error of Jordan's formula on tower surge impedance," *Trans. Inst. Elect. Eng. Jpn.*, vol. 114-B, pp. 112–113, 1994 (in Japanese).

[18] V. A. Rakov, "Transient response of a tall object to lightning," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 43, no. 4, pp. 654–661, Nov. 2001.

[19] F. Rachidi, V. A. Rakov, C. A. Nucci, and J. L. Bermudez, "Effect of vertically extended strike object on the distribution of current along the lightning channel," *J. Geophys. Res.*, vol. 107, no. D23, pp. 16-1–16-6, 2002.

[20] D. Pavanello, F. Rachidi, M. Rubinstein, J. L. Bermudez, and C. A. Nucci, "Electromagnetic field radiated by lightning to tall towers: Treatment of the discontinuity at the return-stroke wave front," *J. Geophys. Res.*, vol. 109, no. D6, D06114, 2004.

[21] L. Grcev and F. Rachidi, "On tower impedances for transient analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 3, pp. 1238–1244, Jul. 2005.

[22] Y. Baba and V. A. Rakov, "On the mechanism of attenuation of current waves propagating along a vertical perfectly conducting wire above ground: Application to lightning," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 47, no. 3, pp. 521–532, Aug. 2005.

[23] ——, "On the interpretation of ground reflections observed in small-scale experiments simulating lightning strikes to towers," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 47, no. 3, pp. 533–542, Aug. 2005.

[24] S. Visacro and F. H. Silveira, "Lightning current waves measured at short instrumented towers: The influence of sensor position," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32, no. 18, L18804, Sep. 2005.

[25] S. Visacro and A. Soares, Jr., "HEM—A model for simulation of lightning-related engineering problems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 1206–1208, Apr. 2005.

[26] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, and A. Castanheira, "The complex ground return plane: A simplified model for homogeneous and multi-layer return," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-100, no. 8, pp. 3686–3693, Aug. 1981.

[27] E. C. Jordan and K. G. Balmain, *Electromagnetic Waves and Radiating Systems*, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1968.

[28] R. B. Anderson and A. J. Eriksson, "Lightning parameters for engineering application," *Electra*, vol. 69, pp. 65–102, 1980.

[29] S. Visacro, A. Soares, Jr., M. A. O. Schroeder, L. C. L. Cherchiglia, and V. J. Souza, "Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station," *J. Geophy. Res.*, vol. 109, no. D1, D01105, 2004.

Alberto De Conti was born in Belo Horizonte, MG, Brazil, on August 3, 1975. He received the degree of technician in industrial electronics from the Federal Center of Technologic Education (CEFET-MG), Belo Horizonte, in 1994 and the B.Sc. and M.Sc. degrees in electrical engineering from the Federal University of Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, in 2000 and 2001, respectively. Currently, he is working toward the Ph.D. degree at the same institution, working as an Associate Researcher at the Lightning Research Center.

His current research interests include lightning, lightning performance of distribution lines, electromagnetic transients, electromagnetic modeling, and electromagnetic compatibility.

Silvério Visacro (M'00) was born in Belo Horizonte, MG, Brazil, on August 30, 1956. He received the B.Sc. degree in 1980 and the M.Sc. degree in 1984, both in electrical engineering, from the Federal University of Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte. In 1992, he received the Ph.D. degree from the Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.

Since 1980, he has been with the UFMG as Professor in applied electromagnetics. Currently, he is the Head of the Lightning Research Center: an institute created from a cooperation between the UFMG and the Minas Gerais State Power Company. He is the author or coauthor of more than 200 scientific papers published in journals and conferences proceedings. He is also the author of the books *Lightning: An Engineering Approach* and *Grounding and Earthing: Basic Concepts, Measurement and Instrumentation, Grounding Strategies* (Belo Horizonte, Brazil: Alphagraphics, 1997), both in Portuguese. His current research interests include electromagnetic modeling, lightning, and grounding.

Prof. Visacro is the Convener of Conference Internationale des Grands Reseaux Electriques's Task Force 4.4.06: Performance of Grounding Electrodes for Lightning Currents. He is also an Editor of the *Journal of Lightning Research*.

Amilton Soares, Jr. (S'97–M'01) was born in Belo Horizonte, MG, Brazil, on March 11, 1972. He received the B.Sc., M.Sc., and Dr.Sc. degrees in electrical engineering from the Federal University of Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, in 1994, 1996, and 2001, respectively.

He works as an Associate Researcher at the Lightning Research Center, Belo Horizonte, and in 2005, he joined the UFMG as a Professor. His current research interests include electromagnetic modeling, electromagnetic transients, and lightning performance of transmission lines.

Marco Aurélio O. Schroeder was born in Cataguases, Brazil, on November 13, 1968. He received the B.Sc. in electrical engineering from the Catholic University of Petropolis, Petropolis, Brazil, in 1991 and the M.Sc. and Dr.Sc. degrees in electrical engineering from the Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, in 1996 and 2001, respectively.

In 2001, he worked as an Associate Researcher at the Lightning Research Center. In 2002 and 2003, he worked at the University Center of Belo Horizonte. In 2003, he joined the Federal Center of Technological Education (CEFET-MG) as Professor and Researcher. His current research interests include electromagnetic modeling, electromagnetic transients, lightning current measurement, and electromagnetic compatibility.

Authorized licensed use limited to: Doshisha University. Downloaded on April 6, 2009 at 02:00 from IEEE Xplore. Restrictions apply.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาวกาญจนา พลอยคำ เกิดเมื่อวันที่ 21 ธันวาคม พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนาที่ตำบลจรเข้ร้อง อำเภอไชโย จังหวัดอ่างทอง สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนอ่างทองปัทมโรจน์วิทยาคม สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นายคมสัน สว่างเรือง เกิดเมื่อวันที่ 18 กันยายน พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนาที่ตำบลสระประดู่ อำเภอวิเชียรบุรี จังหวัดเพชรบูรณ์ สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นายจตุพร นิ่มนวลพานิช เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนาที่ตำบลห้วยจรเข้ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนกาญจนาภิเษกวิทยาลัย นครปฐม (พระตำหนักสวนกุหลาบมัธยม) สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

นายจักรพงษ์ แซ่ด่านเกิดเมื่อวันที่ 31 พฤษภาคม พ.ศ. 2531 ภูมิลำเนาที่ตำบลบ้านส้อง อำเภอเวียงสระ จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษามัธยมปลายจากโรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้