

การวิเคราะห์พฤติกรรมของรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า  
ด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว



นายพงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

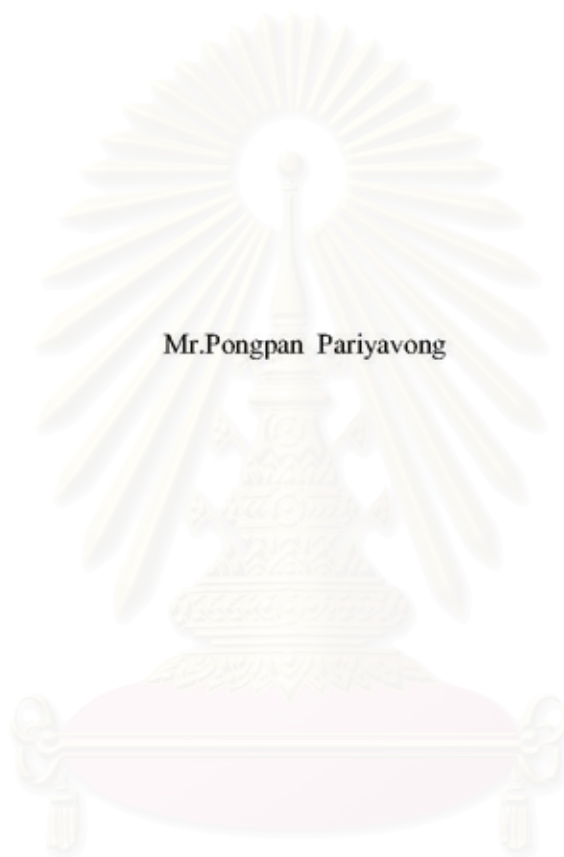
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF GROUNDING ELECTRODE BEHAVIOUR UNDER LIGHTNING IMPULSE CURRENT  
BASED ON PER UNIT LENGTH IMPEDANCE METHOD



Mr.Pongpan Pariyavong

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Electrical Engineering  
Department of Electrical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic year 2007  
Copyright of Chulalongkorn University



พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์: การวิเคราะห์พฤติกรรมของรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว (ANALYSIS OF GROUNDING ELECTRODE BEHAVIOUR UNDER LIGHTNING IMPULSE CURRENT BASED ON PER UNIT LENGTH IMPEDANCE METHOD)

ที่ปรึกษา : อาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา, 191 หน้า

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นรายงานการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่แตกต่างจากพฤติกรรมด้านความถี่ต่ำ เมื่อระบบรากสายดินมีคุณสมบัติทรานเซียนต์ที่ไม่ดี จะทำให้เกิดแรงดันสูงตรงจุดต่อลงดินและแรงดันช่วงก้ำวที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและอุปกรณ์ในระหว่างที่มีกระแสฟ้าผ่าไหลผ่านรากสายดิน การวิเคราะห์พฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดินพื้นฐานจะใช้แบบจำลองทฤษฎีสายส่งปรับปรุงที่อาศัยการแก้สมการ Telegrapher ด้วยเทคนิค FDTD ผลการจำลองได้ผ่านการยืนยันด้วยผลการทดลอง กระแสอิมพัลส์ที่ใช้ในการจำลองจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC ซึ่งประกอบด้วยกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu$ s และกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu$ s เมื่อความยาวของตัวนำเพิ่มขึ้นแรงดันไฟฟ้าตรงจุดปล่อยกระแสของรากสายดินจะมีค่าลดลงและมีแนวโน้มอิมพัลส์เมื่อความยาวถึงค่าๆหนึ่งที่เรียกว่าความยาวประสิทธิผลสำหรับรากสายดินเดี่ยวหรือขนาดประสิทธิผลสำหรับกราวด์กริด โดยค่าดังกล่าวจะลดลงตามค่าความต้านทานดินและเวลาหน่วงคลื่นของกระแสอิมพัลส์ รากสายดินแท่งแนวตั้งมีความสามารถกระจายกระแสดีกว่ารากสายดินแนวนอนตามผลการศึกษาที่ได้ในวิทยานิพนธ์นี้

การศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันช่วงก้ำวด้วยชุดการทดลองย่อส่วน รากสายดินทดสอบจะถูกติดตั้งอยู่ในสารละลายน้ำเกลือที่ง่ายต่อการปรับค่าความต้านทานและการวัดค่าแรงดันช่วงก้ำวรอบรากสายดิน เนื่องจากรากสายดินแต่ละประเภทมีค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ต่างกัน การวิเคราะห์ผลการทดลองจึงใช้ค่าแรงดันอิมพัลส์กระแส (V/I) แรงดันช่วงก้ำวจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้ง อย่างไรก็ตามการลดลงของแรงดันมีแนวโน้มอิมพัลส์เนื่องจากความยาวประสิทธิผล ลักษณะของรากสายดินก็มีผลต่อแรงดันช่วงก้ำว รากสายดินที่มีจำนวนกิ่งตัวนำมากหรือมีจำนวนรากสายดินแท่งแนวตั้งมากก็จะช่วยลดค่าแรงดันช่วงก้ำวลง ส่วนรากสายดินที่เป็นกราวด์กริดจะให้ค่าแรงดันช่วงก้ำวภายในพื้นที่ของกราวด์กริดต่ำกว่าพื้นที่ภายนอกกราวด์กริด

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต นาย นงต์นุ่น ปริยวงศ์  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [Signature]  
ปีการศึกษา 2550 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม [Signature]



## 4871819221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : EFFECTIVE LENGTH / GROUNDING SYSTEM / GROUNDING ELECTRODE

PONGPAN PARIYAVONG : ANALYSIS OF GROUNDING ELECTRODE BEHAVIOUR UNDER LIGHTNING IMPULSE CURRENT BASED ON PER UNIT LENGTH IMPEDANCE METHOD. THESIS ADVISOR : WEERAPUN RUNGSEEVIJITPRAPA, Dr.-Ing. 191 pp.

This thesis presents the study of grounding behavior under a lightning impulse current, which is different from low frequency behavior. If the transient performance of grounding is poor, high potential rise at the grounding connection point and step voltage will occur during the discharge process. Consequently, it's quite dangerous for human and equipment. The transient behavior analysis of basic grounding electrode was approached by improved transmission line model. Telegrapher's equations are solved using FDTD technique. The results of the simulation were reassured by experimental results. The simulated impulse currents according to IEC standard are first stroke impulse current of 10/350 μs and subsequent stroke impulse current of 0.25/100 μs. The voltage at injection point decreases with the increasing of grounding wire length. It tends to saturate when its length reaches a certain value, called as effective length of the grounding wire, or called as effective area of the grounding grid. These values are reduced by decreasing of soil resistance and front time of impulse current. The vertical grounding rod can distribute lightning current better than horizontal grounding wire according to results in this work.

The study of factors affecting on step voltage was carried out by scaling experiment. The testing grounding electrodes were installed in salt solution. The advantages of salt solution are the controllable resistivity and the convenience to measure step voltage around the testing electrode. Since different types of grounding electrodes provide different impulse impedances, the normalized voltage is used for evaluating the performance of grounding electrodes. The step voltage decreases with the increasing of grounding rod length. However it tends to saturate due to its effective length. The characteristics of grounding electrode will affect the step voltage, e.g. more number of branches or vertical grounding rods less the step voltage. The grounding grid will do the decreasing of the step voltage inside grounding grid area compared with outside grid area.

Department	Electrical Engineering	Student's signature	<i>Pongpan Pariyavong</i>
Field of study	Electrical Engineering	Advisor's signature	<i>W. Rungseevijitprapa</i>
Academic year	2007	Co-advisor's signature	

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. วีระพันธ์ รังสีวิจิตรประภา ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆอันเป็นประโยชน์รวมทั้งได้กรุณาตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เป็นที่เรียบร้อยจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านรวมทั้งกรรมการ อาจารย์ ดร. ธนพงศ์ สุวรรณศรี จากคณะวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสิรินธร ไทย-เยอรมัน (TGGS) ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นในการทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จเรียบร้อย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ไฟฟ้าแรงสูงทุกๆท่าน โดยเฉพาะคุณ วิทวัส งามประดิษฐ์ ที่ให้ความช่วยเหลือในอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลอง และเอกสารเกี่ยวกับมาตรฐาน IEC ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลังที่ให้ความสนับสนุนในอุปกรณ์ทดสอบต่างๆ และขอขอบคุณ Professor Nelson Theethayi ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์มากสำหรับการจำลองพฤติกรรมของ รากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยเทคนิค finite difference-time domain

สุดท้ายนี้ทางผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่คอยสนับสนุน และส่งเสริมในการเรียนต่อระดับปริญญาเอกมาโดยตลอด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความจำเป็นของระบบรากสายดิน .....	1
1.1.1 กรณีศึกษาอาคาร โทรคมนาคมของบริษัท WCS .....	3
1.1.2 กรณีศึกษาเสาส่งไฟฟ้า .....	7
1.1.3 กรณีศึกษาเคเบิลใต้ดิน .....	8
1.1.4 กรณีศึกษาแรงดันช่วงก้าว .....	9
1.2 วัตถุประสงค์ .....	13
1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์ .....	13
1.3.1 การพัฒนาโปรแกรมจำลองพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน ..	13
1.3.2 การออกแบบสร้างชุดการทดลองย่อส่วน .....	13
1.3.3 การออกแบบระบบรากสายดินด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว .....	15
1.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันช่วงก้าว .....	16
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	16
1.5 ขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์ .....	18
บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นของระบบรากสายดิน .....	19
2.1 ความต้านทานดิน .....	19
2.2 รูปร่างของรากสายดิน .....	22
2.2.1 รากสายดินแบบแผ่น (plates) .....	22
2.2.2 รากสายดินแท่งแนวตั้ง (vertical grounding rod) .....	23
2.2.3 รากสายดินแนวนอนแบบแถบหรือกลม (horizontal strip or wire) .....	25
2.3 ความลึกในการฝังรากสายดิน .....	27
2.4 พฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ไฟฟ้า .....	28



	หน้า
2.4.1 พฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดินเดี่ยว .....	30
2.4.2 พฤติกรรมทรานเซียนต์ของกราวด์กริด .....	32
บทที่ 3 ขนาดประสิทธิผลของรากสายดิน .....	36
3.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมของรากสายดิน .....	36
3.2 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน .....	40
3.3 ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด .....	44
บทที่ 4 แบบจำลองพฤติกรรมของระบบรากสายดิน .....	48
4.1 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีสายส่ง (transmission line approach) .....	48
4.2 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic approach) .....	51
4.3 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี hybrid (hybrid approach) .....	54
4.4 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีวงจร (circuit approach) .....	55
4.5 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีสายส่งปรับปรุง (improved transmission line approach) .....	59
บทที่ 5 การตรวจสอบแบบจำลอง .....	67
5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง .....	67
5.1.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของการจำลองรากสายดินเดี่ยว .....	67
5.1.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของการจำลองกราวด์กริด .....	68
5.2 การตรวจสอบแบบจำลองด้วยผลการทดลองจากงานวิจัยอื่น .....	70
5.3 การตรวจสอบแบบจำลองด้วยการทดลองย่อส่วน (scaling experiment) .....	73
5.3.1 หลักการทำการทดลองย่อส่วน .....	73
5.3.2 วิธีการทดลอง .....	75
5.3.3 ผลการทดลอง .....	76
5.3.4 การตรวจสอบผลการจำลองกับผลการทดลอง .....	82
5.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์กับความยาวของรากสายดิน ..	89
บทที่ 6 ผลการจำลองพฤติกรรมรากสายดิน .....	94
6.1 วิธีและเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลอง .....	94
6.2 ผลการจำลองพฤติกรรมรากสายดินแท่งแนวตั้ง .....	96
6.3 ผลการจำลองพฤติกรรมรากสายดินแนวนอน .....	103
6.4 ผลการจำลองพฤติกรรมกราวด์กริด .....	110
6.5 การวิเคราะห์การนำรากสายดินมาใช้งาน .....	117
6.5.1 การกระจายกระแสของรากสายดิน .....	117

	หน้า
6.5.2 อิทธิพลของความต้านทานดิน .....	123
6.5.3 อิทธิพลของเวลาหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ .....	124
บทที่ 7 อิทธิพลของรากสายดินต่อแรงดันช่วงก้าว .....	127
7.1 วิธีการทดลองแรงดันช่วงก้าว .....	127
7.2 อิทธิพลของความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้งต่อแรงดันช่วงก้าว .....	130
7.3 อิทธิพลของรูปร่างรากสายดินต่อแรงดันช่วงก้าว .....	132
7.3.1 อิทธิพลของรากสายดินแท่งแนวตั้ง .....	133
7.3.2 อิทธิพลของจำนวนกิ่งรากสายดิน .....	140
7.3.2 อิทธิพลของกราวด์กริด .....	144
7.3.4 อิทธิพลของรากสายดินเสริม .....	150
บทที่ 8 สรุปผลและข้อเสนอแนะ .....	155
8.1 สรุปผล .....	155
8.2 ข้อพิจารณาในการใช้รากสายดิน .....	156
8.3 ข้อเสนอแนะ .....	159
รายการอ้างอิง .....	160
ภาคผนวก.....	167
ภาคผนวก ก อุปกรณ์วัดที่ใช้ในการทดสอบ .....	168
ภาคผนวก ข ผลการทดลองแรงดันตรงจุดปล่อยกระแส .....	169
ภาคผนวก ค ผลการทดลองแรงดันช่วงก้าว .....	174
ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ .....	177
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	191



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างความต้านทานดิน .....	21
2.2 ค่าแฟกเตอร์ $\rho$ .....	24
2.3 ขนาดขั้นต่ำของรากสายดินประเภทอื่น .....	24
2.4 ค่าสัมประสิทธิ์ P, Q ของรากสายดิน .....	25
2.5 ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350 $\mu$ s และกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100 $\mu$ s .....	30
4.1 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์พฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดินด้วยทฤษฎีต่างๆ [72]	66
5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของการจำลองพฤติกรรมรากสายดินเดี่ยวเปรียบเทียบกับ การทดลองของ Gupta และ Thapar .....	70
5.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองกราวด์กริดกับผลการทดสอบของ Otero [73] .....	72
5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของการจำลองกับการทดลองย่อยส่วน .....	76
5.4 พารามิเตอร์ในการจำลองรากสายดินด้วยกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350 $\mu$ s .....	81
5.5 พารามิเตอร์ในการจำลองรากสายดินด้วยกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100 $\mu$ s .....	81
5.6 เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองรากสายดินที่กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350 $\mu$ s.....	85
5.7 เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองรากสายดินที่กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100 $\mu$ s .....	89
5.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองอิทธิพลของความยาวรากสายดินต่ออิมพัลส์อิมพีแดนซ์ ....	90
5.9 ผลการทดลองอิทธิพลของความยาวรากสายดินต่ออิมพัลส์อิมพีแดนซ์ .....	92
6.1 แรงดันไฟฟ้าวิกฤต .....	95
6.2 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแท่งแนวดิ่งภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350 $\mu$ s .....	102
6.3 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแท่งแนวดิ่งภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100 $\mu$ s .....	102
6.4 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350 $\mu$ s .....	109
6.5 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100 $\mu$ s.....	109
6.6 ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350 $\mu$ s .....	116
6.7 ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100 $\mu$ s .....	116
6.8 ผลการทดลองการกระจายกระแสของรากสายดินแนวนอน .....	120
6.9 ผลการทดลองการกระจายกระแสของรากสายดินแท่งแนวดิ่ง .....	120
6.10 เปรียบเทียบผลการจำลองรากสายดินแนวนอนยาว 100 cm และ 200 cm ภายใต้ กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นสั้น 0.25 $\mu$ s และกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นยาว 10 $\mu$ s .....	126
7.1 แรงดันช่วงก้าวสำหรับรากสายดินแท่งแนวดิ่งที่ความยาว 25, 35, 45 และ 50cm .....	131

ตารางที่	หน้า
7.2 แรงดันที่ผิวสารละลายของรากสายดินแบบ 3 แฉกและแบบ 3 ขาภายใต้ กระแสมัลส์หน้าคลื่น 8 $\mu$ s .....	135
7.3 แรงดันที่ผิวสารละลายของรากสายดินแบบ 3 แฉกและแบบ 3 ขาภายใต้ กระแสมัลส์หน้าคลื่น 1 $\mu$ s.....	138
7.4 แรงดันที่ผิวสารละลายของรากสายดิน 3 แฉกและ 4 แฉกภายใต้กระแสมัลส์ 8 $\mu$ s .....	142
7.5 แรงดันที่ผิวสารละลายของรากสายดิน 3 แฉกและ 4 แฉกภายใต้กระแสมัลส์ 1 $\mu$ s .....	142
7.6 แรงดันที่ผิวสารละลายของกราวด์กริดวงกลมและกราวด์กริดสี่เหลี่ยมภายใต้ กระแสมัลส์หน้าคลื่น 8 $\mu$ s .....	146
7.7 แรงดันที่ผิวสารละลายของกราวด์กริดวงกลมและกราวด์กริดสี่เหลี่ยมภายใต้ กระแสมัลส์หน้าคลื่น 1 $\mu$ s .....	149
7.8 ผลการทดลองแรงดันช่วงก้ำวสำหรับรากสายดินเสริม .....	152

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
1.1 โครงสร้างพื้นฐานของรากสายดิน .....	1
1.2 (a) เสาสัญญาณ (b) อาคารสื่อสารสัญญาณ (c) การต่อรากสายดินของเสาสัญญาณ (d) การเดินสายสัญญาณและรากสายดิน (e) อุปกรณ์สื่อสารสัญญาณ (f) จุดบริการทางไฟฟ้า .	4
1.3 โครงสร้างเสาสัญญาณ .....	5
1.4 (a) วงจรสมมูล (b) ความเหนี่ยวนำสุทธิในแต่ละท่อน (c) ความเหนี่ยวนำสุทธิทั้งหมด .....	7
1.5 การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านในระบบส่งไฟฟ้า.....	8
1.6 ความเสียหายของเคเบิลใต้ดินจากระแสไฟฟ้า (a) เคเบิล coaxial หุ้มฉนวนบรรจุน้ำในท่อ PVC (b) เคเบิล coaxial หุ้มฉนวนฝังดิน โดยตรง (c) เคเบิล coaxial เปลือยพร้อม neutral ฝังดิน	9
1.7 แรงดันช่วงก้าว.....	10
1.8 (a) ภาชนะบรรจุสารละลายน้ำเกลือพร้อม โครงสร้างยึดรากสายดินทดสอบ (b) รากสายดินแท่งแนวตั้ง.....	14
1.9 แนวทางในการออกแบบระบบรากสายดิน .....	17
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับความชื้น ในดิน .....	19
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับอุณหภูมิของผิวดิน .....	20
2.3 ตัวอย่างการปรับปรุงความต้านทานดินด้วยเกลือ .....	20
2.4 การกระจายความต้านทานดินรอบรากสายดินแท่งแนวตั้ง .....	22
2.5 ผลของระยะห่างต่อความต้านทานรากสายดิน .....	26
2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอิมพีแดนซ์ของรากสายดิน .....	27
2.7 ผลความถี่ต่อรากสายดิน .....	28
2.8 การติดตั้งรากสายดินทำมุม 30° .....	28
2.9 (a) รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าแรก 10/350 $\mu$ s และกระแสไฟฟ้าตาม 0.25/100 $\mu$ s (b) ส่วนประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้า .....	29
2.10 (a) การจำลองรากสายดินแนวนอนยาว 40 m (b) การกระจายของแรงดันบนรากสายดิน .	31
2.11 (a) การจำลองรากสายดินแนวนอนยาว 30 m และ 60 m (b) แรงดันทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้น	32
2.12 (a) กราฟกริดขนาด 20x20 m <sup>2</sup> (b) แรงดันที่เกิดขึ้นตรงจุด 1 และ 2 .....	33
2.13 (a) ขนาดพื้นที่กราวด์กริด (b) อิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของกราวด์กริด .....	34
2.14 รูปที่ 2.14 (a) กราวด์กริดที่มีจำนวนและขนาดช่องต่างๆ (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพัลส์ อิมพีแดนซ์กับขนาด sub-grid (c) แรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อยกระแส .....	35



ภาพประกอบที่	หน้า
3.1 ตัวอย่างค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ของระบบรากสายดิน .....	36
3.2 อิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความถี่ของรากสายดินแท่งแนวดิ่งความยาว 6 m .....	37
3.3 บริเวณพฤติกรรมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของรากสายดิน [27] .....	38
3.4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของรากสายดินแท่งแนวดิ่งความยาว 6 m ติดตั้งในดิน ที่มีความต้านทานดิน (a) 30 $\Omega$ .m (b) 300 $\Omega$ .m .....	39
3.5 ค่าอนุพันธ์ระหว่างอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินเทียบกับความยาว .....	41
3.6 การจำลองหาความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน (a) แนวดิ่ง (b) แนวนอน .....	43
3.7 พื้นที่ประสิทธิผลของกราวด์กริดตามแนวคิดของ Gupta และ Thapar .....	44
3.8 การจำลองหาขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด .....	47
4.1 (a) และ (b) วงจรสมมูลคานทฤษฎีวงจรของ Meliopoulos et.al .....	56
4.2 แบบจำลองอิลิเมนต์ของทฤษฎีวงจร .....	57
4.3 (a) วงจรสมมูลกราวด์กริดแบบจัตุรัส (b) กราวด์กริด $N$ แถว $M$ คอลัมน์ .....	58
4.4 รากสายดินเดี่ยวฝังในดิน half space homogeneous .....	60
4.5 (a) แบบจำลองรากสายดินในรูป discrete (b) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ในแต่ละอิลิเมนต์ .....	63
5.1 การจำลองพฤติกรรมรากสายดินเดี่ยวของ Greev (a) รากสายดินแนวนอน (b) รากสายดินแท่งแนวดิ่ง.....	68
5.2 การจำลองพฤติกรรมกราวด์กริดของ (a) Otero (b) Yaqing และ Nelson .....	69
5.3 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองของ Gupta และ Thapar (a) รูปคลื่นกระแส (b) รูปคลื่นแรงดัน .....	71
5.4 เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดสอบของ Otero (a) รูปคลื่นกระแส (b) รูปคลื่นแรงดัน .....	72
5.5 (a) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จริง (b) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จำลอง .....	74
5.6 วงจรทดสอบ.....	75
5.7 ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ .....	75
5.8 กระแสอิมพัลส์ 1/45 $\mu$ s .....	76
5.9 (a) ตัวอย่างรากสายดินทดสอบในการทดลองย่อยส่วน (b) การทดลองย่อยส่วนของรากสายดิน ทดสอบ 1= สารละลายน้ำเกลือ, 2=รากสายดินทดสอบ, 3=อิเล็กโทรดปล่อยกระแส, 4=หัววัด แรงดันตามผิว, 5=เคเบิลวัดแรงดันตรงจุดปล่อยกระแส.....	77
5.10 ผลการทดลองกราวด์กริด (a) ขนาด 10cm x 10cm และ (b) ขนาด 20cm x 20cm.....	78

ภาพประกอบที่	หน้า
5.11 ผลการทดลองรากสายดินแนวนอนความยาว (a) 10 cm (b) 20 cm (c) 30 cm.....	79
5.12 ผลการทดลองรากสายดินแท่งแนวตั้งความยาว (a) 30 cm (b) 40 cm (c) 50 cm .....	80
5.13 ผลการจำลองภายใต้กระแสไฟฟ้าค่าแรก 10/350 $\mu$ s ของกราวด์กริดขนาด (a) 100cm x 100cm และ (b) 200cm x 200cm .....	82
5.14 ผลการจำลองภายใต้กระแสไฟฟ้าค่าแรก 10/350 $\mu$ s ของรากสายดินแนวนอนความยาว (a) 100 cm (b) 200 cm (3) 300 cm .....	83
5.15 ผลการจำลองภายใต้กระแสไฟฟ้าค่าแรก 10/350 $\mu$ s ของรากสายดินแท่งแนวตั้งความยาว (a) 300 cm (b) 400 cm (3) 500 cm .....	84
5.16 ผลการจำลองภายใต้กระแสไฟฟ้าค่าตาม 0.25/100 $\mu$ s ของกราวด์กริดขนาด (a) 2.5cm x 2.5cm และ (b) 5cm x 5cm .....	86
5.17 ผลการจำลองภายใต้กระแสไฟฟ้าค่าตาม 0.25/100 $\mu$ s ของรากสายดินแนวนอนความยาว (a) 2.5 cm (b) 5 cm (c) 7.5 cm .....	87
5.18 ผลการจำลองภายใต้กระแสไฟฟ้าค่าตาม 0.25/100 $\mu$ s ของรากสายดินแท่งแนวตั้งความยาว (a) 7.5 cm (b) 10 cm (c) 12.5 cm .....	88
5.19 ผลการทดลองรากสายดินแท่งแนวตั้งความยาว (a) 10 cm (b) 30 cm (c) 55 cm .....	91
5.20 การระบายกระแสของรากสายดินแท่งแนวตั้ง .....	92
5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์และความยาวของรากสายดิน.....	93
6.1 ผลการจำลองรากสายดินแนวนอนที่ความต้านทานดิน 500 $\Omega$ .m .....	95
6.2 ผลการจำลองรากสายดินแนวนอนที่ความต้านทานดิน 600 $\Omega$ .m .....	96
6.3 อิทธิพลของความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้งต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสสำหรับ ความต้านทานดิน 50 $\Omega$ .m ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) 10/350 $\mu$ s และ (b) 0.25/100 $\mu$ s ....	97
6.4 อิทธิพลของความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้งต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสสำหรับ ความต้านทานดิน 100 $\Omega$ .m ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) 10/350 $\mu$ s และ (b) 0.25/100 $\mu$ s ....	98
6.5 แบบจำลองสายส่งแบบกระจายพารามิเตอร์ .....	99
6.6 อิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้ง ภายใต้กระแสไฟฟ้าค่าแรก 10/350 $\mu$ s สำหรับความต้านทานดิน (a) 50 - 90 $\Omega$ .m (b) 100 - 500 $\Omega$ .m .....	100
6.7 อิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้ง ภายใต้กระแสไฟฟ้าค่าตาม 0.25/100 $\mu$ s สำหรับความต้านทานดิน (a) 50 - 90 $\Omega$ .m (b) 100 - 500 $\Omega$ .m .....	101



ภาพประกอบที่	หน้า
6.8 อิทธิพลของความยาวรากสายดินแนวนอนต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแส สำหรับ ความต้านทานดิน 50 $\Omega$ .m ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) รูปคลื่น 10/350 $\mu$ s และ (b) รูปคลื่น 0.25/100 $\mu$ s .....	104
6.9 อิทธิพลของความยาวรากสายดินแนวนอนต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสสำหรับ ความต้านทานดิน 100 $\Omega$ .m ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) 10/350 $\mu$ s และ (b) 0.25/100 $\mu$ s ...	105
6.10 การเคลื่อนที่ของคลื่นที่ออกจากรากสายดิน ไปยัง remote earth .....	106
6.11 อิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความยาวรากสายดินแนวนอน ภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350 $\mu$ s สำหรับความต้านทานดิน (a) 50 - 90 $\Omega$ .m (b) 100 - 500 $\Omega$ .m .....	107
6.12 อิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความยาวรากสายดินแนวนอน ภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100 $\mu$ s สำหรับความต้านทานดิน (a) 50 - 90 $\Omega$ .m (b) 100 - 500 $\Omega$ .m .....	108
6.13 อิทธิพลของขนาดกราวด์กริดต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสสำหรับความต้านทานดิน 50 $\Omega$ .m ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) 10/350 $\mu$ s และ (b) 0.25/100 $\mu$ s .....	111
6.14 อิทธิพลของขนาดกราวด์กริดต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสที่ความต้านทานดิน 100 $\Omega$ .m ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) 10/350 $\mu$ s และ (b) 0.25/100 $\mu$ s .....	112
6.15 การกระจายกระแสบนท่อนตัวนำของกราวด์กริด .....	113
6.16 อิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับขนาดกราวด์กริดภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350 $\mu$ s สำหรับ ความต้านทานดิน (a) 50 - 90 $\Omega$ .m (b) 100 - 500 $\Omega$ .m .....	114
6.17 อิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับขนาดกราวด์กริดภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100 $\mu$ s สำหรับ ความต้านทานดิน (a) 50 - 90 $\Omega$ .m (b) 100 - 500 $\Omega$ .m.....	115
6.18 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของรากสายดินแนวนอนความยาว (a) 30 cm (b) 25 cm .....	118
6.19 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของรากสายดินแท่งแนวตั้งความยาว (a) 10 cm (b) 15 cm.....	119
6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวตัวนำกับค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินแนวนอน และรากสายดินแท่งแนวตั้งภายใต้ค่าความต้านทาน 190 $\Omega$ .cm .....	120
6.21 ผลการจำลองเปรียบเทียบการกระจายกระแสระหว่างรากสายดินแนวนอนกับรากสายดิน แท่งแนวตั้งที่ฝังในดิน (a) ความต้านทานดิน 50 $\Omega$ .m (b) ความต้านทานดิน 500 $\Omega$ .m ...	122
6.22 การกระจายกระแสของรากสายดินแนวนอนกับรากสายดินแท่งแนวตั้ง .....	123
6.23 อิทธิพลของค่าความต้านทานดินต่อรากสายดินแท่งแนวตั้ง .....	123
6.24 อิทธิพลของค่าความต้านทานดินต่อรากสายดินแนวนอน .....	124
6.25 ผลการจำลองภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 0.25 $\mu$ s ของรากสายดินแนวนอนยาว (a) 100 cm (b) 200 cm .....	125

ภาพประกอบที่	หน้า
7.1 แผนภาพการทดลองแรงดันช่วงก้ำว .....	128
7.2 รากสายดินทดสอบสำหรับการศึกษาแรงดันช่วงก้ำว .....	129
7.3 รากสายดินทดสอบสำหรับการศึกษาอิทธิพลของรากสายดินเสริม .....	129
7.4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ระยะห่าง 5 cm ของรากสายดินแท่งแนวตั้ง ความยาว (a) 25cm (b) 35cm .....	130
7.5 ผลการทดลองการกระจายแรงดันของรากสายดินแท่งแนวตั้ง .....	132
7.6 แนวหัววัดแรงดันของรากสายดินทดสอบ.....	132
7.7 ผลการทดลองรากสายดินแบบ 3 ขาภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8 $\mu$ s ที่ระยะห่าง 10 cm (a) แนว 0° (b) แนว 60° .....	133
7.8 ผลการทดลองรากสายดินแบบ 3 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8 $\mu$ s ที่ระยะห่าง 15 cm (a) แนว 0° (b) แนว 60° .....	134
7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายแรงดันบนผิวสารละลายกับระยะห่างของ รากสายดินแบบ 3 แฉกและแบบ 3 ขาภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8 $\mu$ s .....	135
7.10 ผลการทดลองรากสายดินแบบ 3 ขาภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 1 $\mu$ s ที่ระยะห่าง 5 cm (a) แนว 0° (b) แนว 60° .....	136
7.11 ผลการทดลองรากสายดินแบบ 3 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 1 $\mu$ s ที่ระยะห่าง 5 cm (a) แนว 0° (b) แนว 60° .....	137
7.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายแรงดันบนผิวสารละลายกับระยะห่างสำหรับ รากสายดินแบบ 3 แฉกและรากสายดินแบบ 3 ขาภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 1 $\mu$ s .	138
7.13 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันช่วงก้ำวระหว่างรากสายดินแบบ 3 ขาและรากสายดินแบบ 3 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) หน้าคลื่น 8 $\mu$ s และ (b) หน้าคลื่น 1 $\mu$ s .....	139
7.14 ผลการทดลองรากสายดินแบบ 4 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8 $\mu$ s ที่ระยะห่าง 10 cm (a) แนว 0° (b) แนว 45° .....	140
7.15 ผลการทดลองรากสายดินแบบ 4 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 1 $\mu$ s ที่ระยะห่าง 10 cm (a) แนว 0° (b) แนว 45° .....	141
7.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันบนผิวสารละลายกับระยะห่างของรากสายดิน แบบ 3 แฉกและรากสายดินแบบ 4 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์ 8 $\mu$ s .....	143
7.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันบนผิวสารละลายกับระยะห่างของรากสายดิน แบบ 3 แฉกและรากสายดินแบบ 4 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์ 1 $\mu$ s .....	143

ภาพประกอบที่	หน้า
7.18 ผลการทดลองกราวด์กริดวงกลมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8 $\mu$ s ที่ระยะห่าง 15 cm (a) แนว 0° (b) แนว 45° .....	144
7.19 ผลการทดลองกราวด์กริดสี่เหลี่ยมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8 $\mu$ s ที่ระยะห่าง 15 cm (a) แนว 0° (b) แนว 45° .....	145
7.20 (a) การกระจายแรงดันที่ผิวสารละลายกับระยะห่างของกราวด์กริดภายใต้กระแส อิมพัลส์หน้าคลื่น 8 $\mu$ s (b) เปรียบเทียบความยาวตัวนำรอบกราวด์กริดวงกลมและ กราวด์กริดสี่เหลี่ยม.....	146
7.21 ผลการทดลองกราวด์กริดวงกลมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 1 $\mu$ s ที่ระยะห่าง 15 cm (a) แนว 0° (b) แนว 45° .....	147
7.22 ผลการทดลองกราวด์กริดสี่เหลี่ยมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 1 $\mu$ s ที่ระยะห่าง 15 cm (a) แนว 0° (b) แนว 45° .....	148
7.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายแรงดันบนผิวสารละลายกับระยะห่างสำหรับ กราวด์กริดวงกลมและกราวด์กริดสี่เหลี่ยมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 1 $\mu$ s .....	149
7.24 (a) รากสายดินเสริม (b) การวัดแรงดันช่วงก้ำวสำหรับรากสายดินเสริม .....	150
7.25 ผลการทดลองรากสายดินเสริมที่ระยะ 5 cm แนว 45° (a) ความยาว 10 cm (b) ความยาว 15 cm .....	151
7.26 แรงดันช่วงก้ำวรอบรากสายดินหลักสำหรับรากสายดินเสริมความยาว (a) 10 cm (b) 13 cm (c) 15 cm .....	153
7.27 เปรียบเทียบแรงดันช่วงก้ำวในแนว 0° สำหรับรากสายดินเสริม ความยาว 10 cm, 13 cm และ 15 cm .....	154
8.1 การใช้งานรากสายดินแท่งแนวตั้งและรากสายดินแนวนอน .....	158
8.2 การจัดเรียงรากสายดินแบบกราวด์กริดสี่เหลี่ยมเสริมด้วยรากสายดินแท่งแนวตั้ง .....	159



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1. บทนำ

#### 1.1. ความจำเป็นของระบบกราวด์สายดิน

ระบบกราวด์สายดินคือ การเชื่อมต่อของโลหะที่ฝังอยู่ในดิน โครงสร้างพื้นฐานของระบบกราวด์สายดินแสดงดังรูปที่ 1.1 ได้แก่ กราวด์สายดินแนวนอน (horizontal grounding wire) กราวด์สายดินแท่งแนวตั้ง (vertical grounding rod) และกราวด์กริด (grounding grid) หรือเป็น โครงสร้างแบบอื่นที่เกิดจากการรวมกันของโครงสร้างพื้นฐานดังกล่าว



รูปที่ 1.1 โครงสร้างพื้นฐานของกราวด์สายดิน

ในกรณีที่ระบบมีชิลด์ป้องกันสิ่งรบกวนจากภายนอกได้อย่างสมบูรณ์แล้ว ระบบกราวด์สายดินก็จะไม่จำเป็น อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการแยกสิ่งรบกวนออกจากระบบเป็นไปได้ยาก เนื่องจากระบบต้องมีการเชื่อมต่อกับภายนอกได้แก่แหล่งจ่ายไฟ หรือระบบสื่อสาร ดังนั้นเมื่อมีเหตุการณ์ฟ้าผ่าเกิดขึ้น ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่จุดนั้นเทียบกับดินเพิ่มขึ้น จนอาจทำให้เกิดการถ่ายเทพลังงานไปยังระบบอื่นๆที่เชื่อมต่อถึงกันทางไฟฟ้า ส่งผลให้ระบบเหล่านั้นได้รับความเสียหาย การลดผลกระทบดังกล่าวสามารถทำได้โดยการออกแบบระบบกราวด์สายดินให้มีประสิทธิภาพ ในด้านการป้องกันฟ้าผ่าและความเข้ากันได้ทางสนามแม่เหล็ก (electromagnetic compatibility, EMC)

นอกจากนี้ระบบกราวด์สายดินยังมีความสำคัญอย่างมากในการป้องกันอันตรายให้กับบุคคลที่ไปสัมผัสส่วนที่เป็นโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้า ในขณะที่เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วหรือเกิดการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า และยังช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากแรงดันช่วงก้าว (step voltage) และแรงดันสัมผัส (touch

voltage) ในขณะที่มีกระแสฟ้าผ่าไหลผ่าน ซึ่งความสามารถในการป้องกันจะขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของระบบรากสายดิน ระบบรากสายดินที่ออกแบบไม่ดี จะทำให้การกระจายกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดินทำได้ไม่เต็มที่ จนอาจทำให้เกิดอันตรายกับบุคคลและอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่กับระบบรากสายดินได้

ในการติดตั้งระบบรากสายดิน มาตรฐานต่างๆ ได้ให้คำแนะนำถึงค่าความต้านทานดินที่เหมาะสม และบริษัทเอกชนก็นำค่าดังกล่าวมาเป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อใช้ในการออกแบบสร้างระบบรากสายดินดังตัวอย่าง

1. มาตรฐาน IEEE Green Book [1] ของสหรัฐอเมริกา กำหนดค่าความต้านทานดินของระบบรากสายดินในสถานีไฟฟ้าย่อยควรมีค่าน้อยกว่า  $1 \Omega$  และค่าความต้านทานดินของระบบรากสายดินสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมควรอยู่ในช่วง  $2-5 \Omega$  หรือน้อยกว่า
2. มาตรฐาน NEC 250.56 [2] กำหนดค่าความต้านทานดินของระบบรากสายดินควรมีค่าน้อยกว่า  $25 \Omega$
3. สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) [3] และ IEC 62305-3 [4] ได้แนะนำความต้านทานดินของระบบรากสายดินควรมีค่าต่ำกว่า  $10 \Omega$
4. WCS [5] บริษัทผู้ให้บริการโทรศัพท์เคลื่อนที่ ได้กำหนดค่าความต้านทานดินของระบบรากสายดินสำหรับอาคารควบคุมลูกข่าย (Base Station Controller, BSC) มีค่าไม่เกิน  $5 \Omega$  และสำหรับอาคารลูกข่าย (Base Transceiver Station, BTS) มีค่าไม่เกิน  $10 \Omega$

ปัจจุบันการก่อสร้างอาคารมีความทันสมัยมากขึ้น ทำให้การใช้โครงสร้างอาคารเพื่อช่วยให้ค่าความต้านทานดินต่ำทำได้ยาก เนื่องจากการก่อสร้างจะแยกเป็นส่วนๆ ออกจากกัน โดยโครงสร้างเหล็กของอาคารอาจไม่มีการเชื่อมต่อถึงกันทางไฟฟ้า ระบบท่อประปาจากเดิมที่เป็นโลหะก็มีการเปลี่ยนมาใช้เป็นท่อ PVC แทน ดังนั้นเพื่อให้ระบบรากสายดินมีความต้านทานต่ำลง จึงมีการติดตั้งระบบรากสายดินให้ลึกและใช้รากสายดินที่ยาวขึ้น อย่างไรก็ตามยังพบว่าในขณะที่เกิดพายุฝนฟ้าคะนองอย่างรุนแรง อาคารส่วนใหญ่โดยเฉพาะอาคารโทรคมนาคมที่มีการติดตั้งเสาสัญญาณ ยังมีปัญหาเกี่ยวกับเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทำงานผิดพลาดหรือได้รับความเสียหาย รวมทั้งความเสียหายของเคเบิลใต้ดินที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับระบบรากสายดิน ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในตัวอย่างกรณีศึกษา

การพิจารณาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน พารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ กระแสฟ้าผ่า ลักษณะของกระแสฟ้าผ่าโดยปกติใช้เวลาในการเพิ่มค่าจาก 0 ถึงค่ายอดซึ่งเรียกว่าเวลาหน้าคลื่นจะอยู่ในระดับ  $\mu s$  (จาก 0.1 ถึง  $10 \mu s$ ) จากนั้นจึงค่อยลดลง โดยเวลาที่ใช้ลดลงถึงครึ่งหนึ่งของค่ายอดเรียกว่าเวลาหลังคลื่นจะอยู่ในช่วง 20 ถึง  $1000 \mu s$  โดยทั่วไป [6] ค่า  $di/dt$  ของกระแสฟ้าผ่าจะมีค่าประมาณ  $110 \text{ kA}/\mu s$  ค่ายอดกระแสมีค่าประมาณ 15-30 kA และอาจมีค่าสูงสุดได้ถึง



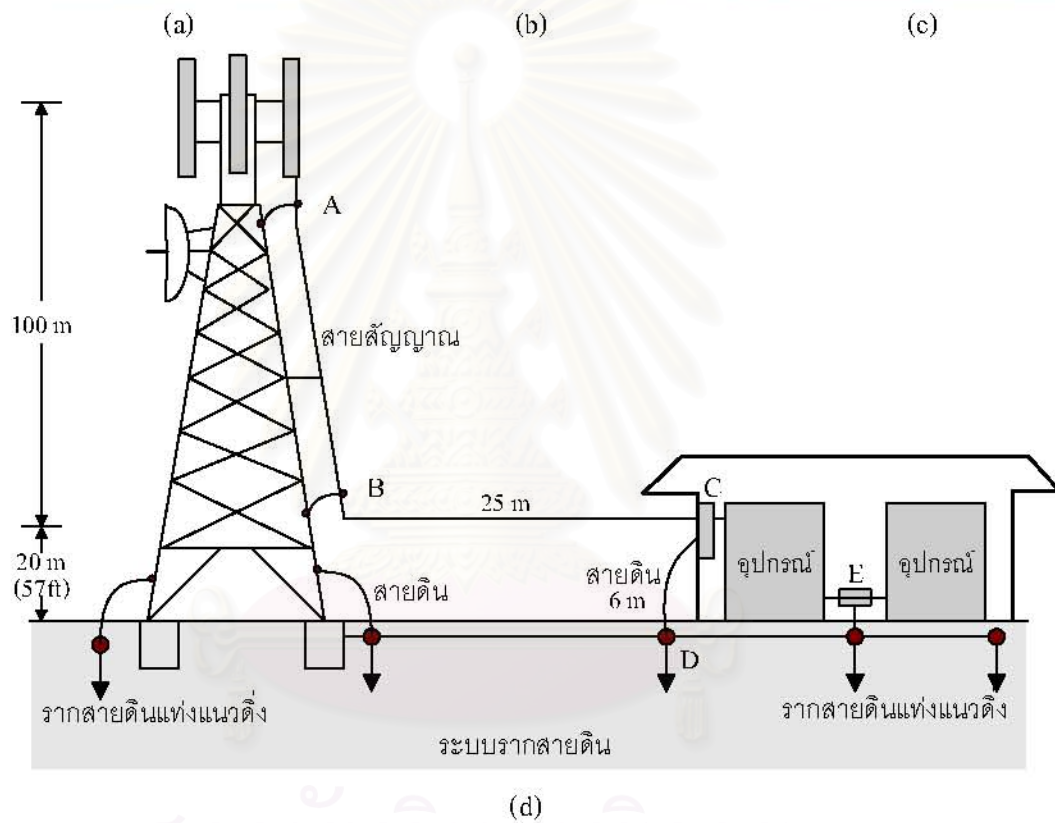
250 kA (โอกาสเกิดอยู่ที่ 0.1%) จากข้อมูลของกระแสฟ้าผ่าดังกล่าวได้ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลแหล่งจ่ายกระแสเพื่อใช้ในการจำลองวิเคราะห์หาผลตอบสนองทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินในงานวิจัย [7] พบว่าคุณสมบัติของรากสายดินที่มีต่อกระแสอิมพัลส์ขนาดสูงจะแตกต่างอย่างมากกับคุณสมบัติของรากสายดินที่มีต่อกระแสความถี่ต่ำ เนื่องจากความเหนี่ยวนำในระบบรากสายดินจะส่งผลมากกว่าความต้านทาน และเมื่อขนาดกระแสสูง ก็อาจทำให้จุดต่อลงดินมีแรงดันไฟฟ้าสูงมากพอจนทำให้ดินที่อยู่โดยรอบรากสายดินแตกตัวเป็นตัวนำ (soil ionization)

ความเสียหายจากกระแสฟ้าผ่าแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือผลกระทบทางตรง (direct lightning) จากกระแสฟ้าผ่าที่ผ่าลงมาตรงๆที่จะเกิดไม่บ่อยเมื่อเทียบกับผลกระทบทางอ้อม (indirect lightning) ได้แก่การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นก่อนฝนตก แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แพร่กระจายออกจากลำกระแสฟ้าผ่า และแรงดันที่สูงขึ้นของระบบรากสายดิน (ground potential rise, GPR) เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของระบบรากสายดินมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต และทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายหรือทำงานผิดพลาด เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนเข้ามายังส่วนประกอบที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ความไวสูง

### 1.1.1 กรณีศึกษาอาคารโทรคมนาคมของบริษัท WCS

รูปที่ 1.2 (a) แสดงโครงสร้างเสาสัญญาณชนิด self support ความสูง 100 m โดยมีการวางสายนำสัญญาณ coaxial ที่มีแกนเป็นทองแดงและห่อหุ้มด้วยซิลด์ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 inch ยาว 125 m จากงานสายอากาศมายังอาคาร โทรคมนาคม (b) เนื่องจากมีการใช้เสาสัญญาณมาเป็นส่วนหนึ่งของระบบป้องกันฟ้าผ่า ดังนั้นพื้นฐานของเสาสัญญาณ (c) จึงมีการเชื่อมต่อเข้ากับระบบรากสายดินด้านล่างของเสาที่ต่อไปยังระบบรากสายดินของอาคาร เพื่อให้ศักย์ไฟฟ้าของระบบรากสายดินทั้งสองเท่ากัน สำหรับการป้องกันแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากกระแสฟ้าผ่าบนสายนำสัญญาณจะทำโดยการเชื่อมต่อซิลด์ของสายนำสัญญาณเข้ากับโครงสร้างเสาที่จุด A และ B และมีการเชื่อมซิลด์ของสายเข้ากับระบบรากสายดินก่อนเข้าอาคารด้วยดังรูป (d) ส่วนในรูป (e) แสดงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งอยู่ภายในอาคาร โทรคมนาคม ที่มีการเชื่อมต่อเข้ากับระบบรากสายดินตรงจุดบริการทางไฟฟ้า E (main electric service) ดังรูป (f)

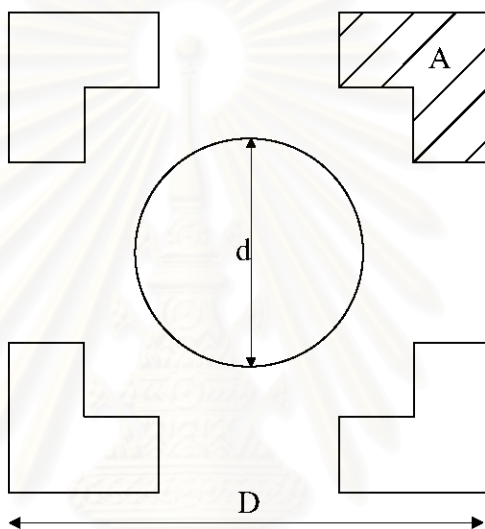
ตามข้อกำหนดของระบบรากสายดิน ตัวนำที่ใช้จะเป็นทองแดงขนาดพื้นที่หน้าตัด  $50 \text{ mm}^2$  ฟิงท์ความลึก 0.75 m การเชื่อมตัวนำทองแดงใช้วิธีการหลอมรวมแบบ exothermic และเพื่อให้ได้ความต้านทานที่ต่ำกว่า  $5 \Omega$  จึงมีการคอรากสายดินแท่งแนวตั้งลงไปในดินที่ความลึก 150 m จำนวน 4 จุดแล้วเชื่อมแต่ละจุดให้ถึงกันด้วยตัวนำทองแดง จากประวัติของสถานีพบว่าในขณะที่เกิดพายุฝนฟ้าคะนองอย่างรุนแรง อาคารดังกล่าวยังประสบปัญหาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ถูกรบกวนจนทำงานผิดพลาดหรือได้รับความเสียหาย



รูปที่ 1.2 (a) เสาสัญญาณ (b) อาคารสื่อสารสัญญาณ (c) การต่อรากสายดินของเสาสัญญาณ (d) การเดินสายสัญญาณและรากสายดิน (e) อุปกรณ์สื่อสารสัญญาณ (f) จุดบริการทางไฟฟ้า

ความเสียหายดังกล่าวเกิดขึ้นจากผลกระทบทางอ้อมของกระแสฟ้าผ่า ทำให้พฤติกรรมของ รากสายดินเปลี่ยนไป ซึ่งในการออกแบบก่อสร้างระบบรากสายดินไม่ได้คำนึงถึง เพื่อให้เข้าใจถึง ความเสียหายที่เกิดขึ้น จะอธิบายได้ด้วยการคำนวณค่าแรงดันเหนี่ยวนำบนรากสายดินเนื่องจากผล ของความเหนี่ยวนำจากส่วนต่างๆ ได้แก่เสาสัญญาณ สายสัญญาณ สายเชื่อมลงสู่ระบบรากสายดิน และ รากสายดินแท่งแนวตั้ง โดยไม่คิดผลของความต้านทานเนื่องจากมีผลน้อย

1. ค่าความเหนี่ยวนำของเสาสัญญาณ ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามโครงสร้างของเสาสัญญาณ จากรูปที่ 1.3 แสดงเสาสัญญาณที่ทำจากเหล็ก การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำจะทำโดยการพิจารณา เป็นทรงกระบอกเดี่ยวขนาดมิติ  $d$  [8] ดังสมการที่ (1.1)



รูปที่ 1.3 โครงสร้างเสาสัญญาณ

$$L = 0.2 \times l \times \left( \ln \frac{4.l}{d} \right) \mu\text{H} \quad (1.1)$$

เมื่อ

A = พื้นที่หน้าตัดของเสาต้นเดียว

D = ระยะห่างระหว่างเสา

$$d = 1.83D^4 \sqrt{\frac{d'}{D}} \quad \text{และ} \quad d' = \sqrt{\frac{4.A}{\pi}}$$

เสาสัญญาณช่วงความสูง 100 m ระยะห่างระหว่างเสา 10 m พื้นที่หน้าตัดเสา 90 cm<sup>2</sup> มีค่า ความเหนี่ยวนำ 85  $\mu\text{H}$  และช่วงความสูง 20 m มีค่าความเหนี่ยวนำ 14.5  $\mu\text{H}$

2. สายสัญญาณ โคแอกเชียลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 inch มีค่าความเหนี่ยวนำประมาณ 2  $\mu\text{H}/\text{m}$  [8] ดังนั้นสายสัญญาณช่วง AB จะมีค่าความเหนี่ยวนำ 200  $\mu\text{H}$  และสายสัญญาณช่วง BC จะมีค่าความเหนี่ยวนำ 12  $\mu\text{H}$



3. สายตัวนำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.162 inch ที่เชื่อมต่อมายังระบบรากสายดินมีค่าความเหนี่ยวนำประมาณ 1.6  $\mu\text{H}/\text{m}$  [9] ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำของสายตัวนำตรงจุดเชื่อมของฐานเสาสัญญาณกับระบบรากสายดิน และตรงจุดเชื่อม C กับระบบรากสายดินจะมีค่า 10  $\mu\text{H}$

4. ค่าความเหนี่ยวนำของรากสายดินแท่งแนวตั้ง (vertical grounding rod) จะเปลี่ยนแปลงไปตามความยาว ซึ่งประมาณได้ดังสมการ [10]

$$L = 2l \ln\left(\frac{4l}{d}\right) \cdot 10^{-7} \quad (1.2)$$

เมื่อ

$l$  คือความยาว

$d$  คือเส้นผ่าศูนย์กลาง

รากสายดินแท่งแนวตั้งเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.625 inch (16 mm) ความยาว 150 m จะมีค่าความเหนี่ยวนำ 316  $\mu\text{H}$  เมื่อนำมาขนานกัน 4 แท่งจะได้ค่าความเหนี่ยวนำสุทธิ 79  $\mu\text{H}$

รูปที่ 1.4 (a) แสดงวงจรสมมูลการเชื่อมต่อกันของตัวนำ ที่ไม่คิดผลของตัวนำแนวระดับที่เชื่อมระหว่างรากสายดิน (b) คือความเหนี่ยวนำสุทธิในแต่ละท่อน และ (c) คือความเหนี่ยวนำสุทธิทั้งหมด ถ้าหากเราสมมติว่ามีกระแสฟ้าผ่าลงที่ยอดเสาสัญญาณเท่ากับ 15 kA ด้วยเวลาหน้าคลื่น 0.25  $\mu\text{s}$  จะได้ค่า  $di/dt$  เท่ากับ 60 kA/ $\mu\text{s}$  แรงดัน ไฟฟ้าตกคร่อมความเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1.3)

$$V = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (1.3)$$

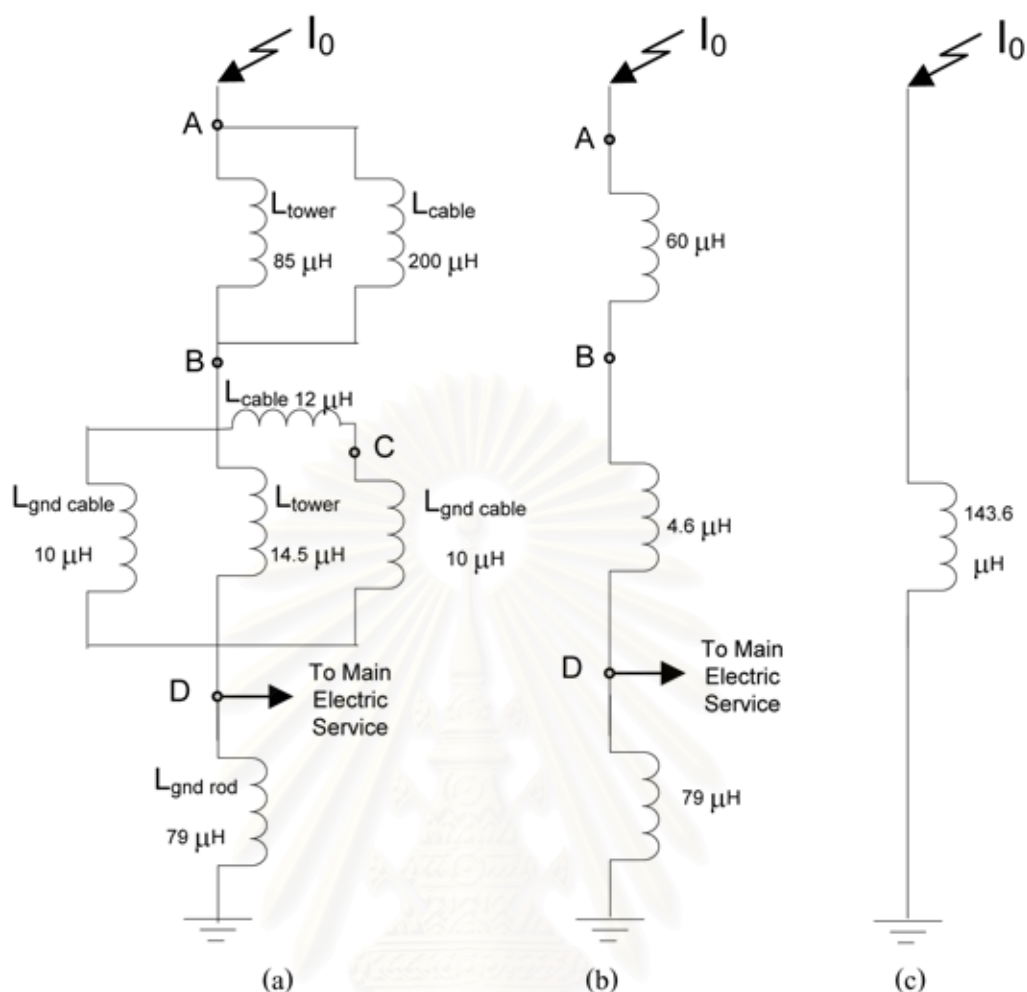
ขนาดแรงดัน ไฟฟ้าตกคร่อมตรงยอดเสาสัญญาณ

$$V = 143.6 \times 60 = 8.6 \text{ kV}$$

ขนาดแรงดัน ไฟฟ้าตกคร่อมจุด D

$$V = 79 \times 60 = 4.7 \text{ kV}$$

จากการอธิบายข้างต้น ได้แสดงถึง การออกแบบสร้างระบบรากสายดินด้วยการคำนึงถึงค่าความต้านทานดินต่ำเพียงอย่างเดียว จะยังไม่สามารถป้องกันสิ่งมีชีวิตหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่ออยู่กับระบบรากสายดินตรงจุดบริการทาง ไฟฟ้า เนื่องจากกระแสฟ้าผ่าจะทำให้มีแรงดันทรานเซียนต์ขนาดสูงเกิดขึ้น การแก้ปัญหาดังกล่าวในเบื้องต้นสามารถทำได้โดยการติดตั้งกับดักเซอร์จ (surge arrester) ตรงตำแหน่งที่มีการเชื่อมต่อทาง ไฟฟ้ากับภายนอกเช่น สายสัญญาณและจุดบริการทาง ไฟฟ้า (main electric service) อย่างไรก็ตามการแก้ปัญหาดังกล่าวเสียค่าใช้จ่ายสูงและยังไม่ได้แก้ที่ต้นเหตุของปัญหาในเรื่องการออกแบบสร้างระบบรากสายดิน ทำให้ระบบรากสายดินทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพในขณะที่มีกระแสฟ้าผ่าไหลผ่าน ซึ่งถ้าไม่ได้รับการแก้ไขอย่างถูกต้อง ปัญหา ดังกล่าวก็จะเกิดกับสถานีที่จะถูกสร้างขึ้นอีกในอนาคต

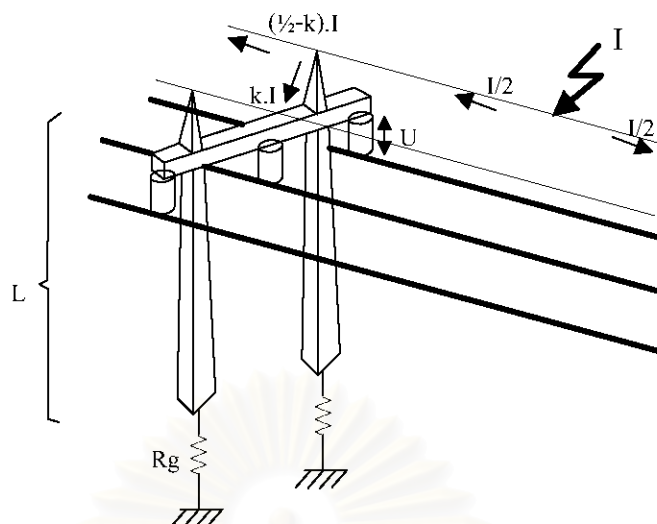


รูปที่ 1.4 (a) วงจรสมมูล (b) ความเหนี่ยวนำสุทธิในแต่ละท่อน (c) ความเหนี่ยวนำสุทธิทั้งหมด

### 1.1.2 กรณีศึกษาเสาส่งไฟฟ้า

สำหรับเสาส่งไฟฟ้าที่มีสายดินแขวนอยู่ด้านบน (overhead ground wire) เพื่อล่อฟ้าดังรูปที่ 1.5 ในขณะที่เกิดฟ้าผ่าลงบนสายดิน ถ้าระบบรากสายดินมีการก่อสร้างไม่เหมาะสมกับพฤติกรรมทรานเซียนต์เช่น การทำให้ความต้านทานกระแสตรงต่ำโดยการตอกรากสายดินแห่งแนวโค้งยาวมากเกินไป ส่งผลให้ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำมีค่าสูง ดังนั้นขณะที่กระแสฟ้าผ่าวิ่งไปบนสายดินและแบ่งไหลลงสู่เสาส่งด้วยอัตราส่วน  $k$  เกิดเป็นแรงดันไฟฟ้าสูง  $U$  ตกคร่อมระหว่างสายดินกับสายไฟฟ้าที่แขวนอยู่ก็ปลายข้างหนึ่งของฉนวนตามสมการที่ (1.4) เมื่อแรงดันดังกล่าวมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤตอิมพัลส์ (impulse flashover voltage) ของฉนวน ก็จะทำให้เกิดการกระโดดข้ามของแรงดันระหว่างสายทั้งสอง (back flashover) เกิดเป็นรูปคลื่นแรงดันหน้าคลื่นชัน (steep-fronted wave voltage surge) วิ่งไปบนสายเฟส ทำให้ระบบป้องกันเห็นว่าเป็นความผิดปกติรบกวนในระบบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า [11]





รูปที่ 1.5 การไหลของกระแสฟ้าผ่าในระบบส่งไฟฟ้า

$$U = k \cdot (I \cdot R_g + L \cdot \frac{dI}{dt}) + V_{peak} \quad (1.4)$$

เมื่อ

$R_g$  = ความต้านทานการต่อลงดินของเสาส่งไฟฟ้า

$L$  = ความเหนี่ยวนำเสาส่งไฟฟ้า

$\frac{dI}{dt}$  = อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสฟ้าผ่า

$V_{peak}$  = ค่ายอดแรงดันของระบบไฟฟ้า

ตัวอย่างเช่นเมื่อเกิดฟ้าผ่าลงบนสายส่งของระบบไฟฟ้า 24 kV ที่มีค่ายอดแรงดันของระบบ

ไฟฟ้า  $V_{peak} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \times 24 = 20$  kV และมีอัตราส่วน  $k = 0.6$ ,  $\frac{dI}{dt} = 20$  kA/ $\mu$ s,  $L = 11$   $\mu$ H (1  $\mu$ H/m),

$R_g = 3$   $\Omega$  จะได้แรงดันไฟฟ้า

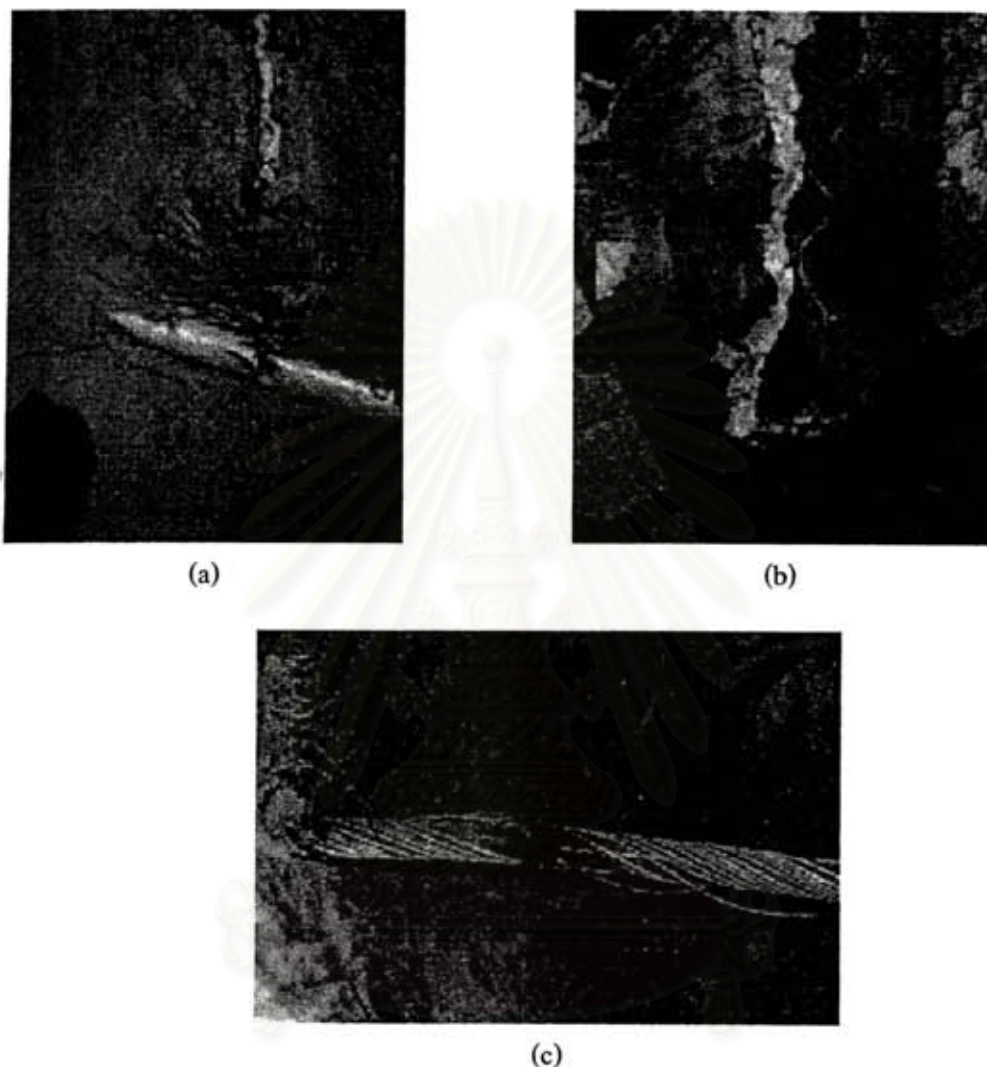
$$U = 0.6 \times (3 \Omega \times 20 \text{ kA} + 11 \mu\text{H} \times 20 \text{ kA}/\mu\text{s}) + 20 \text{ kV} = 202 \text{ kV}$$

ในกรณีนี้แรงดันไฟฟ้า  $U$  จะมีค่ามากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤตอิมพัลส์ ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการกระโดดข้ามของแรงดันได้

### 1.1.3 กรณีศึกษาเคเบิลใต้ดิน

ระบบรากสายดินที่มีการออกแบบสร้างอย่างไม่เหมาะสม เมื่อมีกระแสฟ้าผ่าไหลผ่านระบบรากสายดิน จะทำให้การกระจายกระแสฟ้าผ่าออกจากระบบรากสายดินไม่สม่ำเสมอ จนอาจทำให้ความต่างศักย์ในบริเวณโดยรอบรากสายดินมีค่าสูงเกินกว่าค่าวิกฤต ทำให้เกิดการแตกตัวของ

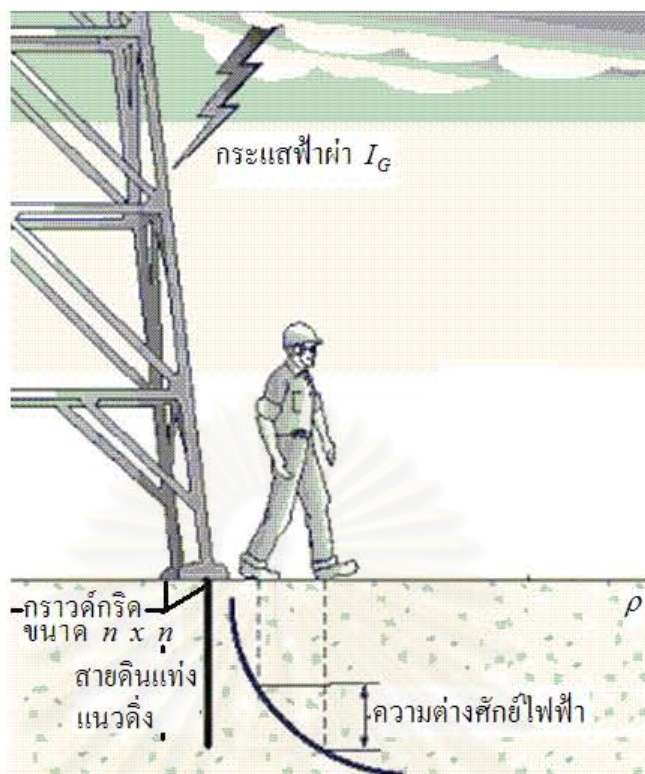
ดินในขณะที่มีกระแสฟ้าผ่าไหลผ่าน ส่งผลให้เคเบิลได้ดินที่ติดตั้งอยู่ในบริเวณใกล้เคียงได้รับความเสียหายดังรูปที่ 1.6 [12]



รูปที่ 1.6 ความเสียหายของเคเบิลได้ดินจากกระแสฟ้าผ่า (a) เคเบิล coaxial หุ้มฉนวนบรรจุในท่อ PVC (b) เคเบิล coaxial หุ้มฉนวนฝังดิน (c) เคเบิล coaxial เปลือยพร้อม neutral ฝังดิน โดยตรง

#### 1.1.4 กรณีศึกษาแรงดันช่วงก้าว

กระแสฟ้าผ่าที่ไหลผ่านระบบรากสายดิน ถ้ามองจากจุดต่อกับรากสายดินแท่งแนวตั้ง (vertical grounding rod point) ออกไปจะพบว่าค่าความต้านทานรอบ ๆ จุดต่อกับรากสายดินที่ระยะห่างออกไปมีลักษณะเป็นวงชั้นหรือ earth shell ค่าความต้านทานแต่ละวงชั้นที่ห่างออกไปจากจุดต่อกับรากสายดินมีค่าลดลง นั่นคือศักย์ไฟฟ้าที่ปรากฏตามผิวดินจะมีค่าไม่เท่ากันเกิดเป็นแรงดันช่วงก้าว (step voltage) ที่เป็นอันตรายโดยตรงต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในบริเวณนั้นดังรูปที่ 1.7



รูปที่ 1.7 แรงดันช่วงก้าว

แรงดันช่วงก้าวภายใต้ระบบรากสายดินแบบกราวด์กริดที่มีความยาวตัวนำทั้งหมด  $L$  พื้นที่  $A$  ฝังที่ความลึก  $h$  สามารถคำนวณ [13] ได้ดังสมการที่ (1.5)

$$E_s = \frac{\rho \cdot I_G \cdot K_s \cdot K_t}{L} \quad (1.5)$$

เมื่อ

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left( \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{W'}{D} \right), \quad K_t = 0.94 + 0.047n$$

$$D = \sqrt{\frac{A}{N}}$$

$$W' = 0.5 + 0.9 \log_e \frac{n-1}{2}$$

ในสมการที่ (1.5) จะสังเกตเห็นว่ายังไม่ได้พิจารณาถึงอิทธิพลของรากสายดินรูปแบบอื่น และรากสายดินเสริมซึ่งจะมีผลต่อแรงดันช่วงก้าว

จากกรณีศึกษาทั้งหมดพบว่าการทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมของรากสายดินภายใต้กระแสฟ้าผ่าเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบระบบรากสายดิน เพราะการกำหนดเพียงความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงให้มีค่าต่ำ และการเชื่อมต่อตัวนำของระบบรากสายดินอย่างมีคุณภาพ (exothermic



welding) จะยังไม่ครอบคลุมการป้องกันอันตรายให้กับสิ่งมีชีวิตและระบบไฟฟ้าได้ครบทุกช่องทาง เพราะพฤติกรรมของรากสายดินเปลี่ยนแปลงไป การป้องกันแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สายเกี่ยวเข้ามาจึงทำได้ไม่เต็มที่ รวมทั้งยังทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงตรงผิวดิน ในต่างประเทศมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับกระแสฟ้าผ่าและระบบรากสายดิน โดย [14] เป็นงานวิจัยที่เน้นศึกษาพฤติกรรมด้านความถี่ต่ำของระบบรากสายดิน ส่วน [15] เป็นการศึกษาคุณสมบัติทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินด้วยการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพบว่าบางครั้งค่าอิมพีแดนซ์จะมากกว่าค่าความต้านทาน ส่งผลให้การป้องกันผลกระทบจากฟ้าผ่าของระบบรากสายดินทำได้ไม่ดี ซึ่งสอดคล้องกับกรณีศึกษาที่ได้กล่าวไป

ดังนั้นคุณสมบัติของระบบรากสายดินทั้งด้านความถี่ต่ำและความถี่สูงจึงมีความสำคัญต่อการป้องกันอันตรายและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้า ลักษณะของระบบรากสายดินที่ดีสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของระบบรากสายดินต้องมีค่าต่ำ เพื่อป้องกันอันตรายให้กับบุคคลที่ไปสัมผัสกับส่วนที่เป็นโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้า โดยบังเอิญ ถ้าหากส่วนนั้นมีแรงดันไฟฟ้าเนื่องจากมีกระแสรั่วไหลหรือเกิดจากการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า นอกจากนี้การมีความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงต่ำ ก็ยังช่วยป้องกันอันตรายให้กับอุปกรณ์หรือระบบไฟฟ้าเมื่อมีกระแสลัดวงจรลงดิน
2. อิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของระบบรากสายดินต้องมีค่าต่ำ เพื่อช่วยลดผลการ breakdown หรือความเสียหายที่เกิดกับระบบไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ไฟฟ้า และลดอันตรายจากแรงดันช่วงก้ำวและแรงดันสัมผัส
3. ค่าอิมพีแดนซ์ของ return path สำหรับกระแสฟ้าผ่าต้องมีค่าต่ำ เพราะเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินและแรงดันเกิน
4. มีการออกแบบอย่างเหมาะสม เพื่อให้ต้นทุนการก่อสร้างต่ำ ถ้าผู้ออกแบบสามารถทราบถึงการลงทุนในส่วนที่ให้ผลได้ไม่คุ้มกับค่าใช้จ่าย ในขณะที่คุณสมบัติการป้องกันยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ก็จะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง

เพื่อให้การออกแบบสร้างระบบรากสายดินมีประสิทธิภาพในการป้องกันอันตรายจากกระแสฟ้าผ่าและมีความคุ้มค่ากับการลงทุน ในวิทยานิพนธ์นี้จะได้ศึกษาถึงรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบรากสายดิน โดยเฉพาะพฤติกรรมรากสายดินที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้กระแสฟ้าผ่ารวมทั้งปัจจัยที่มีผลต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผิวดินหรือแรงดันช่วงก้ำวดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงความรู้เบื้องต้นที่เกี่ยวข้องกับระบบรากสายดิน ได้แก่ ความต้านทานดิน รูปร่างของรากสายดินแบบต่างๆ ความลึกในการฝังรากสายดิน และพฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดินเดี่ยวและกราวด์กริดภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีส่วนประกอบของความถี่สูง โดยค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของระบบรากสายดินจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำ ส่งผลให้

การกระจายกระแสไฟฟ้าภายในระบบรากสายดินไม่สม่ำเสมอ และการใช้งานระบบรากสายดินทำได้ไม่เต็มที่ โดยเฉพาะเมื่อความยาวรากสายดินมีค่ามากขึ้น ค่าขดแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสจะมีแนวโน้มอิ่มตัวเมื่อความยาวถึงค่าๆหนึ่งที่เรียกว่าความยาวประสิทธิผลสำหรับรากสายดินเดี่ยวหรือขนาดประสิทธิผลสำหรับกราวด์กริด

บทที่ 3 จะเป็นการศึกษาถึงวิธีการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบรากสายดินที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้กระแสแอมพลีตส์ไฟฟ้า แนวคิดของความยาวประสิทธิผลของรากสายดินเดี่ยวและขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดที่กล่าวถึงในงานวิจัยต่างๆ และจะได้นำเสนอวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวเพื่อคำนวณค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินเดี่ยวและวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยพื้นที่เพื่อคำนวณขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีและแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน โดยจะอธิบายถึงพื้นฐานของแต่ละทฤษฎี ได้แก่ ทฤษฎีสายส่ง ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ทฤษฎี Hybrid ทฤษฎีวงจร และทฤษฎีสายส่งปรับปรุงซึ่งคำนวณหาค่าแรงดันและกระแสบนรากสายดินด้วยเทคนิค finite-difference time-domain (FDTD) รวมทั้งเปรียบเทียบแบบจำลองที่ได้จากแต่ละทฤษฎี สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินโดยใช้ทฤษฎีสายส่งปรับปรุง

บทที่ 5 การตรวจสอบแบบจำลอง จะกล่าวถึงรายละเอียดการตรวจสอบผลของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากงานวิจัยอื่นและจากห้องปฏิบัติการ ซึ่งการทดลองด้วยขนาดเท่ากับของจริงจะมีข้อจำกัดได้แก่ขนาดพื้นที่ในการทดสอบและขนาดเครื่องกำเนิดกระแสแอมพลีตส์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีการทดลองย่อส่วน (scaling experiment) โดยในบทนี้จะได้อธิบายถึงทฤษฎีการทดลองย่อส่วน การนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัย และผลการทดลองย่อส่วนของรากสายดินพื้นฐานแบบต่างๆ จากนั้นจะนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

บทที่ 6 เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน โดยเฉพาะการหาค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนและรากสายดินแทงแนวตั้งด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว รวมทั้งขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยพื้นที่ ภายใต้รูปคลื่นกระแสแอมพลีตส์ไฟฟ้ามาตรฐาน ได้แก่กระแสไฟฟ้าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  และกระแสไฟฟ้าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  รวมถึงการวิเคราะห์การนำรากสายดินมาใช้งาน โดยพิจารณาจากความสามารถกระจายกระแสของรากสายดิน และอิทธิพลของความต้านทานดินและเวลาน้ำกลืนของกระแสแอมพลีตส์ที่มีต่อพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน

บทที่ 7 การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันช่วงก้ำวได้แก่ ความยาวรากสายดินแทงแนวตั้ง ลักษณะของรากสายดิน และรากสายดินเสริม สำหรับลักษณะของรากสายดินจะพิจารณาผลของรูปร่างที่เป็นแบบ 3 แฉกปกติ, แบบ 3 ขาซึ่งเป็นรากสายดินแบบ 3 แฉกเสริมด้วยรากสายดินแทงแนวตั้ง รากสายดินแบบ 4 แฉกและกราวด์กริดแบบวงกลมและแบบสี่เหลี่ยม



บทที่ 8 สรุปผลการศึกษาได้แก่ ข้อจำกัดของการกำหนดค่าความต้านทานดิน ผลจากความยาวประสิทธิผลของรากสายดินและขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด และปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันช่วงก้าว ข้อควรพิจารณาเพิ่มเติมในการออกแบบระบบรากสายดิน รวมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาการวิจัยพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อนำเสนอแนวคิดที่ใช้วิเคราะห์ความยาวประสิทธิผลและขนาดประสิทธิผล
- 2) เพื่อวิเคราะห์หาค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนและรากสายดินแท่งแนวตั้ง และขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด
- 3) เพื่อวิเคราะห์การนำรากสายดินแนวนอน รากสายดินแท่งแนวตั้ง และกราวด์กริดมาใช้งานให้มีประสิทธิภาพในการป้องกันผลกระทบจากกระแสฟ้าผ่า
- 4) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของลักษณะและรูปร่างของรากสายดินที่มีต่อแรงดันช่วงก้าว

## 1.3 ขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์

การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ การพัฒนาโปรแกรมจำลองพฤติกรรมของระบบรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า การออกแบบสร้างชุดการทดลองย่อยส่วน การวิเคราะห์พฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว และการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันช่วงก้าว

### 1.3.1 การพัฒนาโปรแกรมจำลองพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน

ทฤษฎีที่นำมาใช้ศึกษาเปรียบเทียบ เพื่อพัฒนาเป็น โปรแกรมจำลองพฤติกรรมของระบบรากสายดิน ได้แก่ รากสายดินแนวนอน รากสายดินแท่งแนวตั้ง และกราวด์กริด ภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าประกอบด้วย ทฤษฎีสายส่ง และทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วย โดยจะพิจารณาถึงข้อจำกัด และความถูกต้องของผลการคำนวณ หลังจากเลือกทฤษฎีและสร้างเป็น โปรแกรมจำลองได้แล้ว ก็ต้องทำการตรวจสอบแบบจำลองก่อนนำแบบจำลองไปใช้งาน การตรวจสอบจะแบ่งเป็นการตรวจสอบกับผลการทดลองจากงานวิจัยอื่นและตรวจสอบกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

### 1.3.2 การออกแบบสร้างชุดการทดลองย่อยส่วน

สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ การทดลองด้วยขนาดที่เท่ากับของจริง จะมีข้อจำกัดหลายอย่างได้แก่ การควบคุมตัวแปรต่างๆโดยไม่ไปกระทบกับตัวแปรอื่นซึ่งจะทำได้ยาก ขนาดพื้นที่ในการทดสอบ และขนาดเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีการทดลองย่อยส่วน ซึ่งมีหลายงานวิจัย [16-19] ที่ได้ นำทฤษฎีนี้มาใช้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะนำการ



ทดลองย่อยส่วนมาใช้ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญคือขนาดเครื่องกำเนิดกระแสพัลส์ที่ไม่สามารถนำมาทดสอบกับดินจริงที่มีความต้านทานสูงได้ จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนมาใช้สารละลายน้ำเกลือจำลองแทนดิน การใช้สารละลายน้ำเกลือยังมีข้อดีคือ การติดตั้งรอกสายดินทดสอบ การวัดแรงดัน และการควบคุมความต้านทานทำได้ง่ายและสะดวก

กระแสพัลส์ทดสอบที่ใช้ในการทดลองย่อยส่วนจะอ้างอิงตามมาตรฐาน IEC [20] ที่ประกอบด้วยกระแสฟ้าผ่าแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตามรูปคลื่น 0.25/100  $\mu\text{s}$  เพื่อให้การทำการทดลองย่อยส่วนมีความถูกต้องและสะดวกในการศึกษา กระแสพัลส์ทดสอบควรมีเวลานำคลื่นสั้นซึ่งในการทำวิจัยนี้จะเลือกที่ 1  $\mu\text{s}$

เนื่องจากยังไม่เคยมีการทำการทดลองย่อยส่วนมาก่อน จึงต้องมีการสร้างอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นในการทดลองได้แก่

1. ภาชนะบรรจุสารละลายน้ำเกลือที่ใช้แทนดินติดตั้งบนฐานที่มีล้อเพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้ายพร้อมโครงสร้างยึดรอกสายดินทดสอบและเคเบิลวัดคังรูป 1.8 (a)
2. หัวโพรบวัดแรงดันอิมพัลส์
3. รอกสายดินทดสอบแบบต่างๆเช่นรอกสายดินแท่งแนวตั้ง คังรูปที่ 1.8 (b)
4. สารละลายน้ำเกลือที่มีความเข้มข้นหรือความต้านทานของสารละลายที่เหมาะสม
5. การปรับปรุงวงจรเครื่องกำเนิดกระแสพัลส์เพื่อให้ได้กระแสพัลส์ที่ต้องการ



(a)



(b)

รูปที่ 1.8 (a) ภาชนะบรรจุสารละลายน้ำเกลือพร้อม โครงสร้างยึดรอกสายดินทดสอบ

(b) รอกสายดินแท่งแนวตั้ง

หลังจากสามารถสร้างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$  ได้ก็จะเริ่มทำการทดลอง ย่อส่วนกับรากสายดินทดสอบแต่ละแบบซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกัน ทำให้ได้ค่ากระแสและแรงดัน ไม่เท่ากันแม้ว่าจะใช้แรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่ระดับเดียวกัน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ก็จะทำนอัมพลไลซ์ค่ายอดแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสด้วยค่ายอดกระแสอิมพัลส์ ด้วยวิธีนี้สามารถใช้ค่าที่ได้เป็นค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นตรงจุดปล่อยกระแส นำผลการทดลองและพารามิเตอร์ต่างๆจากการทดลองไปปรับเป็นค่าจริงด้วยอัตราส่วนที่สอดคล้องกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ต้องการศึกษาเพื่อใช้ตรวจสอบเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลอง โดยกระแสฟ้าผ่าแรกรูปคลื่น  $10/350 \mu\text{s}$  จะได้อัตราส่วน  $n = 10$  และกระแสฟ้าผ่าตามรูปคลื่น  $0.25/100 \mu\text{s}$  จะได้อัตราส่วน  $n = 0.25$

### 1.3.3 การออกแบบระบบรากสายดินด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว

ระบบรากสายดินมีความสำคัญต่อการป้องกันผลกระทบที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่า แต่เพราะพฤติกรรมของระบบรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าจะแตกต่างจากพฤติกรรมของระบบรากสายดินภายใต้กระแสตรงหรือกระแสความถี่ต่ำ ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มความยาวรากสายดิน เพื่อให้ความต้านทานลดลง แต่ขณะที่ความยาวมากขึ้นค่าความเหนี่ยวนำของรากสายดินก็จะมีค่ามากขึ้นซึ่งไปจำกัดการไหลของกระแสบนรากสายดิน ทำให้การลดลงของค่ายอดแรงดันหรือค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นบนรากสายดินมีแนวโน้มอ้อมตัวเมื่อความยาวถึงค่าๆหนึ่งที่เรียกว่า ความยาวประสิทธิผลสำหรับรากสายดินเดี่ยว หรือขนาดประสิทธิผลสำหรับกราวด์กริด ดังนั้น เพื่อให้การป้องกันผลกระทบจากกระแสฟ้าผ่าและการใช้งานระบบรากสายดินเกิดประสิทธิภาพสูงสุด ในวิทยานิพนธ์จะได้ศึกษาถึงความยาวประสิทธิผลของรากสายดินพื้นฐานที่ค่าความต้านทานดินค่าต่างๆภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรกรูปคลื่น  $10/350 \mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตามรูปคลื่น  $0.25/100 \mu\text{s}$  เพื่อเปรียบเทียบกัน โดยการจำลองหาค่าแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นตรงจุดปล่อยกระแสบนรากสายดินตัวนำทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $16 \text{ mm}$  ( $5/8 \text{ inch}$ ) ภายใต้กระแสฟ้าผ่าที่จำลองด้วยฟังก์ชัน double exponential  $I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$  เมื่อ  $\alpha = 2,100$   $\beta = 370,000$  สำหรับรูปคลื่นกระแส  $10/350 \mu\text{s}$  และ  $\alpha = 7,000$   $\beta = 13,500,000$  สำหรับรูปคลื่นกระแส  $0.25/100 \mu\text{s}$

นำผลการจำลองที่ได้มาหาค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์โดยการหารค่ายอดแรงดันด้วยค่ายอดกระแส จากนั้นนำค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์มาทำ curve fitting กับความยาวรากสายดินทดสอบด้วย power function ดังสมการที่ (1.5 a) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์  $a$ ,  $b$  และ  $c$

$$Z = aL^b + c \quad (1.5 a)$$

ความยาวประสิทธิผล ( $L_e$ ) ของรากสายดินที่สอดคล้องกับรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์และค่าความต้านทานดินสามารถคำนวณด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวดังสมการ (1.5 b) และขนาด

ประสิทธิภาพ ( $L_e$ ) ของกราวด์กริดด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยพื้นที่ดังสมการ (1.5 c) ภายใต้เงื่อนไขที่สนามไฟฟ้ารอบตัวนำมีค่าไม่เกินค่าสนามไฟฟ้าวิกฤต เพื่อให้การกระจายกระแสและแรงดันของรากสายดินเป็นไปอย่างสม่ำเสมอไม่เกิดการแตกตัวของดิน

$$l_e = \left| \frac{c}{a(b-1)} \right|^{1/b} \quad (1.5 b)$$

$$L_e = \left| \frac{2c}{a(b-2)} \right|^{1/b} \quad (1.5 c)$$

อย่างไรก็ตามเพราะผลของความเหนียวนำที่มีอยู่ในตัวนำ จึงยังทำให้แรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าสูงอยู่ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการจัดเรียงรากสายดินที่เหมาะสมเพื่อช่วยลดค่าแรงดันดังกล่าว

#### 1.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันช่วงก้าว

ผลกระทบของกระแสฟ้าผ่าต่อสิ่งมีชีวิตที่สำคัญคือแรงดันสัมผัส และแรงดันช่วงก้าว โดยผลของแรงดันสัมผัสสามารถลดลงได้ด้วยการออกแบบระบบรากสายดินให้มีประสิทธิภาพ ดังกล่าวแล้วในข้อ 1.3.3 ส่วนการลดผลของแรงดันช่วงก้าวในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆที่มีต่อแรงดันช่วงก้าวได้แก่ ความยาวรากสายดินแท่งแนวดิ่ง รูปร่างรากสายดิน และรากสายดินเสริม

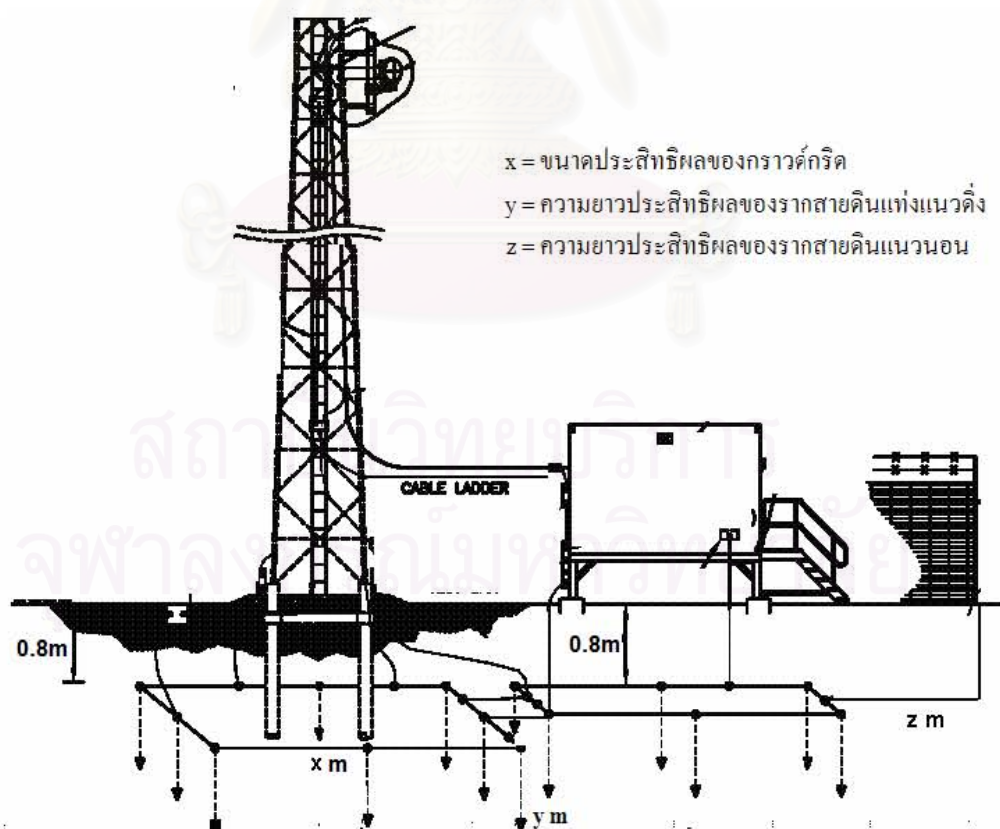
สำหรับการทดลองเพื่อวิเคราะห์ถึงอิทธิพลของรูปร่างรากสายดินที่มีต่อแรงดันช่วงก้าว จะต้องมีการประกอบสร้างห้วัดแรงดันและเคเบิลวัดจำนวน 3 ชุด เพื่อใช้วัดการกระจายแรงดันรอบรากสายดิน จากผลการศึกษาจะช่วยให้เราทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างรากสายดินกับลักษณะของแรงดันช่วงก้าวที่เกิดขึ้นรอบรากสายดิน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบรากสายดินในความต้านทานดินค่าต่างๆ ได้อย่างเหมาะสมและคุ้มค่างรูปที่ 1.9
- 2) เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับสิ่งมีชีวิตหรืออุปกรณ์ไฟฟ้าอันเนื่องมาจากผลของกระแสฟ้าผ่า
- 3) พัฒนาความรู้ความเข้าใจถึงข้อกำหนดของระบบรากสายดินทั้งของมาตรฐานต่างประเทศได้แก่ IEEE, BS, IEC และ NEC และข้อกำหนดขององค์กรต่างๆภายในประเทศ
- 4) พัฒนาความรู้ความเข้าใจถึงพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า



- 5) ทำให้เข้าใจถึงข้อจำกัดของการพิจารณาเฉพาะค่าความต้านทานของระบบรากสายดินดินเพียงอย่างเดียว
- 6) ทำให้เข้าใจถึงข้อจำกัดของแต่ละทฤษฎีและแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน
- 7) ทำให้เข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันช่วงก้ำว และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบสร้างระบบรากสายดินเพื่อลดอันตรายจากแรงดันช่วงก้ำว
- 8) ทำให้เข้าใจถึงอิทธิพลของรากสายดินเสริมที่มีต่อแรงดันช่วงก้ำว
- 9) สามารถนำแนวคิดความยาวประสิทธิผลของรากสายดินเดี่ยวและขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบระบบรากสายดิน
- 10) สามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปพัฒนาเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินลักษณะอื่น
- 11) สามารถนำชุดการทดลองย่อส่วนมาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน
- 12) ทำให้เข้าใจถึงแนวคิดการทดลองย่อส่วน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการศึกษาและวิจัยอื่นที่การทดลองในสภาพจริงมีข้อจำกัด



รูปที่ 1.9 แนวทางในการออกแบบระบบรากสายดิน

### 1.5 ขั้นตอนในการทำวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาถึงลักษณะและการใช้งานรากสายดินพื้นฐานแบบต่างๆ
- 2) ศึกษาเงื่อนไขที่จำเป็นเพิ่มเติมนอกจากการกำหนดค่าความต้านทานของรากสายดินให้มีค่าต่ำเพียงอย่างเดียว เพื่อให้การออกแบบระบบรากสายดินมีประสิทธิภาพในการป้องกันผลกระทบจากฟ้าผ่า เช่นค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ ความสามารถในการกระจายกระแสของรากสายดิน การจัดเรียงรากสายดิน เป็นต้น
- 3) ศึกษาและเปรียบเทียบทฤษฎีที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า
- 4) พัฒนาแบบจำลองที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมของรากสายดินพื้นฐานภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า
- 5) ศึกษาและนำเสนอแนวคิดที่ใช้วิเคราะห์หาค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน แนวนอนและรากสายดินแท่งแนวตั้ง รวมทั้งแนวคิดขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด
- 6) ศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของเวลาหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีต่อค่าความยาวประสิทธิผล
- 7) ศึกษาเปรียบเทียบอิทธิพลของความต้านทานดินที่มีต่อค่าความยาวประสิทธิผล
- 8) ศึกษา พัฒนา และประกอบสร้างชุดการทดลองย่อส่วน
- 9) นำการทดลองย่อส่วนมาประยุกต์ใช้กับการศึกษาพฤติกรรมของรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า

## บทที่ 2

### ความรู้เบื้องต้นของระบบรากสายดิน

การเชื่อมต่อเข้ากับระบบรากสายดินของอุปกรณ์ คือการเตรียมเส้นทางเดินให้กับกระแสรั่วหรือกระแสลัดสัมผัสขนาดสูงไหลลงสู่ดิน โดยไม่ทำอันตรายกับสิ่งมีชีวิตและอุปกรณ์ในบริเวณนั้น เส้นทางเดินของกระแสไฟฟ้ารั่วควรมีค่าความต้านทานไม่เกินค่าที่ออกแบบไว้ และเส้นทางเดินของกระแสลัดสัมผัสควรมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ไม่สูงเกินไป ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติการกระจายกระแสของระบบรากสายดินได้แก่

1. ความต้านทานดิน
2. รูปร่างของรากสายดิน
3. ความลึกในการฝังรากสายดิน
4. พฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินต่อกระแสฟ้าผ่า

#### 2.1 ความต้านทานดิน

ค่าความต้านทานดินจะขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของดิน [8] คือ

1. เปลี่ยนแปลงตามความชื้นของดิน สำหรับดินส่วนใหญ่ถ้าหากมีความชื้นในดินสูงกว่า 30% จะทำให้ได้ค่าความต้านทานดินมีค่าต่ำเพียงพอ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับค่าความต้านทานดิน

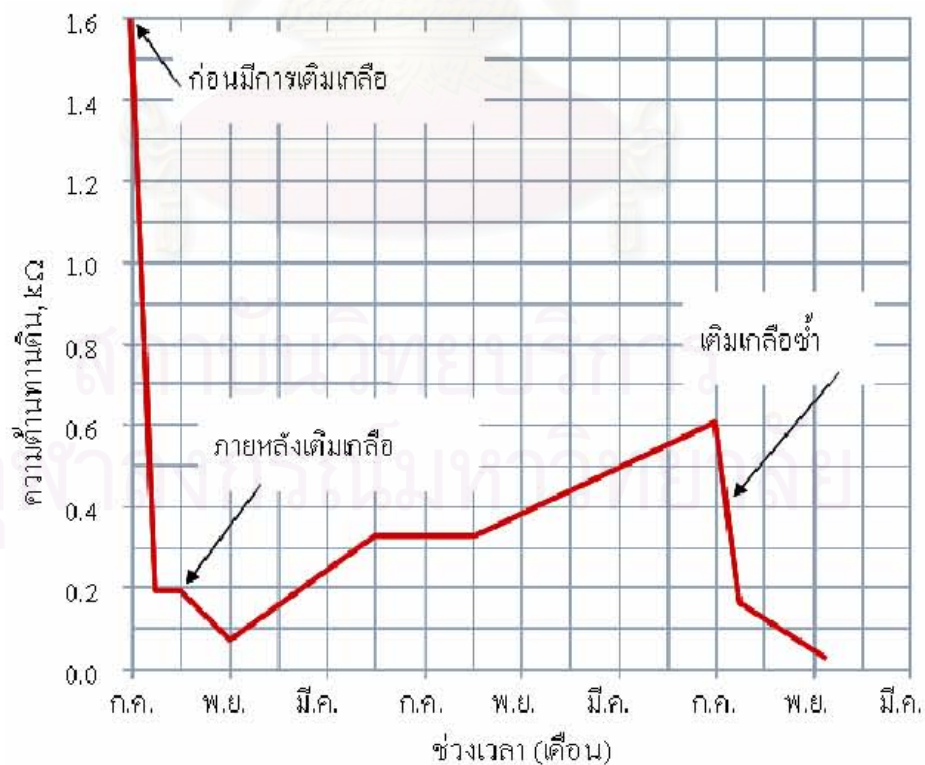


2. เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของผิวดิน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานดินต่ำลง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานดินกับอุณหภูมิของผิวดิน

3. เปลี่ยนแปลงตามปริมาณเกลือดังรูปที่ 2.3 ซึ่งวิธีการเติมเกลือลงในระบบรากสายดินเป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจในการปรับปรุงความต้านทานดิน



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการปรับปรุงความต้านทานดินด้วยเกลือ

ดินแต่ละประเภทจะมีความต้านทานดินที่แตกต่างกันดังตารางที่ 2.1 [21] อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวจะเปลี่ยนแปลงบ้างตามฤดูกาล ในการติดตั้งระบบรากสายดินจึงควรมีการตรวจสอบความต้านทานดินอีกครั้งเพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการนำกระแสและลักษณะของชั้นดิน

ในดินที่มีความต้านทานดินสูง เรามักใช้วัสดุที่มีความต้านทานต่ำมาคั่นระหว่างรากสายดินกับดิน โดยความต้านทานของรากสายดินแห่งแนวตั้งยาว  $L$  ที่เติมเต็มด้วยวัสดุที่มีความต้านทานต่ำสามารถประมาณ ได้ดังสมการที่ (2.1)

$$R = \frac{1}{2\pi L} \left[ (\rho - \rho_c) \left( \log_e \left[ \frac{8L}{D} \right] - 1 \right) + \rho_c \left( \log_e \left[ \frac{8L}{d} \right] - 1 \right) \right] \quad (2.1)$$

เมื่อ

$\rho$  คือ ความต้านทานดิน,  $\Omega \cdot m$

$\rho_c$  คือ ความต้านทานวัสดุ infill,  $\Omega \cdot m$

$d$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางกลางรากสายดิน, m

$D$  เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางรวมหลังจากเติมเต็มด้วยวัสดุความต้านทานต่ำ, m

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างความต้านทานดิน

ประเภทของดิน	เงื่อนไขของฤดูกาล		
	ปกติหรือฝนตกมากกว่า 250 mm ต่อปี	ฝนแล้งหรือฝนตกน้อยกว่า 250 mm ต่อปี	ดินแข็ง
Alluvium and lighter clays	-	-	1 to 5
Clays (excluding alluvium)	5 to 20	10 to 100	1 to 5
Marls (e.g. Keuper marl)	10 to 30	50 to 300	-
Porous limestone (e.g. chalk)	30 to 100	-	-
Porous sandstone (e.g. Keuper sandstone and clay shales)	30 to 300	-	-
Quartzites, compact and crystalline limestone (e.g. carboniferous sediments, marble, etc.)	100 to 1000	-	-
Clay slates and slaty shales	300 to 3000	1000 upwards	30 to 100
Fissile slates, schists, gneiss and igneous rocks	1000 upwards	-	-

สิ่งที่มักพบเสมอเกี่ยวกับสภาพดินคือ ในบริเวณเดียวกันอาจมีสภาพดินที่แตกต่างกัน จึงควรมีการตรวจวัดความต้านทานดินหลายจุดเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้อง สำหรับพื้นที่ขนาดใหญ่ ควรตรวจวัดสภาพดินอย่างน้อย 10 จุด ถ้าพบว่าค่าความต้านทานของการต่อลงดินสูงกว่าที่กำหนด จำเป็นต้องหาวิธีลดค่าความต้านทานลง อาจใช้วิธีการเพิ่มความนำจำเพาะของดินหรือเพิ่มพื้นที่สัมผัสดินของรอกสายดินซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดในการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องเลือกใช้ให้เหมาะสม ในประเทศไทยอุณหภูมิส่วนใหญ่สูงกว่าศูนย์องศา การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงมีผลกระทบไม่มากนักอาจตัดทิ้งไปได้ ยกเว้นบางสถานที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าปกติเช่น ยอดเขาสูง

วิธีการลดความต้านทานดิน โดยการปรับปรุงสภาพดินสำหรับบริเวณที่มีความต้านทานดินสูงสามารถทำได้ 3 วิธี

1) เพิ่มสารเคมีประเภทเกลือลงในดินเช่น Sodium Chloride, Copper Sulfate และ Magnesium Sulfate โดย Magnesium Sulfate เป็นสารที่ก่อให้เกิดการกัดกร่อนน้อยที่สุด การเพิ่มสารเกลือลงในดินทำได้ 3 วิธีคือ วิธีการขุดวางรอกสายดิน วิธีการทาบโดยการขุดหน้าดินบริเวณด้านบนของรอกสายดินออกแล้วเทสารเกลือลงไปทำให้เกลือสัมผัสกับรอกสายดินโดยตรง แล้วจึงกลบดินทับซึ่งวิธีนี้จะมีการกัดกร่อนสูงกว่าวิธีแรก และวิธีใช้กระบอกบรรจุสารเคมี เมื่อสารเคมีลดลงสามารถเปิดฝาเพื่อเติมสารเคมีได้ วิธีนี้จะเห็นผลช้ากว่าสองวิธีแรกแต่สามารถใช้ได้ยาวนานกว่า

2) ใช้แหล่งน้ำที่ใกล้เคียงต่อเชื่อมเข้ากับระบบรอกสายดิน

3) เชื่อมต่อระบบท่อน้ำใต้ดิน (ถ้ามี) หรือถังบ่อ โลหะที่ฝังอยู่ใต้ดินเข้าเป็นส่วนหนึ่งของระบบรอกสายดิน

## 2.2 รูปร่างของรอกสายดิน

รูปร่างของรอกสายดินจะมีผลต่อค่าความต้านทานและค่าอิมพีแดนซ์ของรอกสายดิน รูปร่างพื้นฐานของรอกสายดินแบ่งได้เป็น 3 ชนิด [21] คือรอกสายดินแบบแผ่น (plates), รอกสายดินแนวตั้ง (vertical grounding rod) และ รอกสายดินแนวนอนแบบแถบหรือกลม (horizontal grounding strip or wire)

### 2.2.1 รอกสายดินแบบแผ่น (plates)

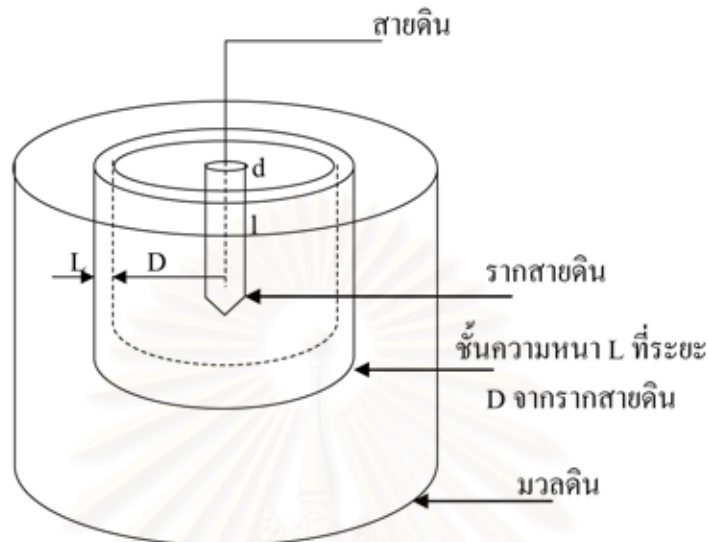
รอกสายดินแบบแผ่นขนาดพื้นที่  $A$  ( $m^2$ ) ฝังในดินที่มีความต้านทานดิน  $\rho$  ( $\Omega \cdot m$ ) จะมีค่าความต้านทานของรอกสายดิน โดยประมาณดังสมการที่ (2.2)

$$R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{2A}} \quad (2.2)$$



### 2.2.2 รากสายดินแท่งแนวตั้ง (vertical grounding rod)

รากสายดินแท่งแนวตั้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $d$  ยาว  $l$  ดังรูปที่ 2.4 มีค่าความต้านทานดั่งสมการที่ (2.3)



รูปที่ 2.4 การกระจายความต้านทานดินรอบรากสายดินแท่งแนวตั้ง

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[ \log_e \left( \frac{8l}{d} \right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

รากสายดินแท่งแนวตั้งที่ขนานกัน  $n$  แท่งจะสามารถคำนวณค่าความต้านทานรวมได้ดั่งสมการที่ (2.4) และค่าความเหนี่ยวนำรวมดั่งสมการที่ (2.5)

$$R_n = R \left( \frac{1 + \lambda a}{n} \right) \quad (2.4)$$

$$L = 2l \cdot \ln \left( \frac{4l}{d} \right) \cdot 10^{-7} \quad (2.5)$$

$$\text{เมื่อ } a = \frac{\rho}{2\pi \cdot R \cdot s}$$

$R$  คือ ความต้านทานของรากสายดิน 1 แท่ง,  $\Omega$

$s$  คือ ระยะห่างระหว่างรากสายดิน, m

$\lambda$  คือ ค่าคงที่

$n$  คือ จำนวนรากสายดิน

สมการดังกล่าวได้จากสมมติฐานที่ระยะห่างระหว่างรากสายดินต้องมีค่าสั้นกว่าความยาวของรากสายดิน โดยค่า  $\lambda$  จะขึ้นกับการวางตัวของรากสายดินดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ค่าแฟกเตอร์  $\lambda$

จำนวนรากสายดิน (n) ที่ติดตั้งบนแต่ละด้าน	$\lambda$ (ไม่มีวัตถุวางกลาง)	$\lambda$ (มีวัตถุวางกลาง)
2	1.00	2.71
3	1.66	4.51
4	2.15	5.48
5	2.54	6.14
6	2.87	6.63
7	3.15	7.03
8	3.39	7.36
9	3.61	7.65
10	3.81	7.90

รากสายดินแท่งแนวตั้งมักจะเป็นจะแบบกลมตันทำจากทองแดงหรือสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใช้คือ 9 mm, 12.5 mm และ 15 mm หรือทำจากเหล็กกล้าวงไนซ์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm ความยาวของรากสายดินแท่งแนวตั้งโดยทั่วไปอยู่ที่ 1.2 m สำหรับรากสายดินขนาด 9 mm และความยาว 1.2 m หรือ 1.5 m สำหรับรากสายดินขนาด 15 mm ขนาดขั้นต่ำของรากสายดินประเภทอื่นจะต้องสอดคล้องกับค่าที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ขนาดขั้นต่ำของรากสายดินประเภทอื่น

ประเภทของรากสายดิน	พื้นที่หน้าตัด ( $\text{mm}^2$ )	เส้นผ่าศูนย์กลางหรือความหนา (mm)
Copper strip	50	3
Hard drawn or annealed copper rods or solid wires for driving or laying in grounds	50	8
Copper-clad or galvanized steel rods for harder ground	153	14
Stranded copper	50	3 per strand

### 2.2.3 รากสายดินแนวนอนแบบแถบหรือกลม (horizontal strip or wire)

รากสายดินแนวนอนแบบแถบหรือแบบกลมมีประโยชน์มากในดินที่มีความต้านทานดินที่ผิวต่ำ ขนาดรากสายดินแบบแถบปกติไม่ควรเกิน 25 mm x 3 mm สำหรับรากสายดินประเภทอื่นจะต้องมีขนาดที่สอดคล้องกับตารางที่ 2.3 ความต้านทานของรากสายดินแบบแถบหรือแบบกลม ความยาว  $L$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.6)

$$R = \frac{\rho}{P \cdot \pi L} \left[ \log_e \left( \frac{2L^2}{wh} \right) + Q \right] \quad (2.6)$$


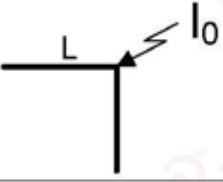
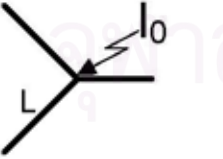
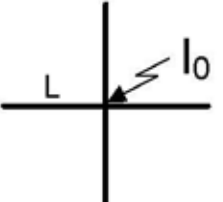
เมื่อ

$h$  คือความลึกของรากสายดิน, m

$w$  คือความกว้างของรากสายดินแบบแถบหรือเส้นผ่าศูนย์กลางของรากสายดินแบบกลม, m

$P, Q$  คือสัมประสิทธิ์การจัดเรียงตัวของรากสายดินมีค่าดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าสัมประสิทธิ์  $P, Q$  ของรากสายดิน

การจัดเรียงตัวของรากสายดิน	P	Q	
		ตัวนำแบบแถบ	ตัวนำแบบกลม
รากสายดินเดี่ยว 	2	-1	-1.3
รากสายดินแนวนอน 2 เส้นแบบ 90° 	4	0.5	0.9
รากสายดินแนวนอน 3 เส้นแบบ 120° 	6	1.8	2.2
รากสายดินแนวนอน 4 เส้นแบบ 90° 	8	3.6	4.1



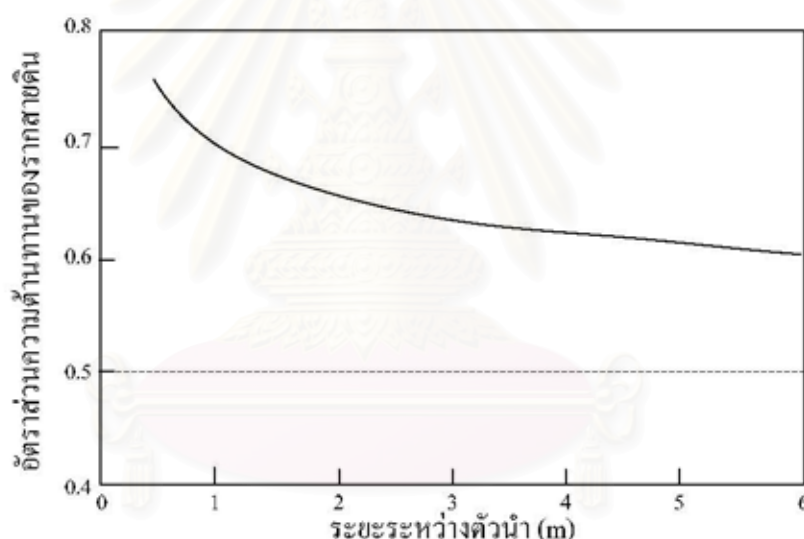
ความหนาของรากสายดินแบบแถบมักจะไม่เกิน 1 ใน 8 ของความกว้าง จึงทำให้ความต้านทานดินจะมีค่าขึ้นอยู่กับความยาวของรากสายดินแบบแถบเท่านั้น ส่วนความลึกและขนาดรากสายดินจะมีผลน้อย ผลของระยะระหว่างตัวนำของรากสายดินสำหรับรากสายดินยาว 20 เมตร แสดงดังตัวอย่างรูปที่ 2.5 จากกราฟพบว่าระยะห่างจะมีผลต่อความต้านทานน้อยลงเมื่อระยะระหว่างตัวนำมีค่าเกิน 15% ของความยาว ค่าความเหนี่ยวนำของรากสายดินแนวนอนคำนวณได้ดังสมการที่ (2.7)

$$L = 2l \cdot \left[ \ln \left( \frac{2l}{a} \right) - 1 \right] \times 10^{-7} \quad (2.7)$$

เมื่อ

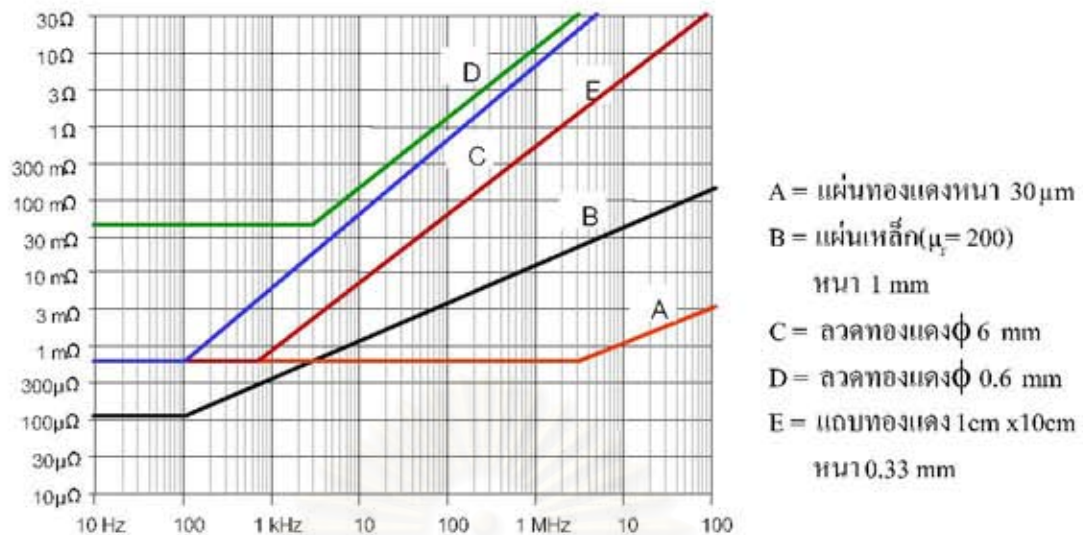
$l$  = ความยาวรากสายดิน

$a$  = รัศมีรากสายดิน



รูปที่ 2.5 ผลของระยะห่างต่อความต้านทานรากสายดิน

รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอิมพีแดนซ์ของรากสายดินประเภทต่างๆ โดยความต้านทานจะมีผลมากในกรณีของความถี่ต่ำ ส่วนปริมาณจลนภาพของรากสายดินจะมีมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้น



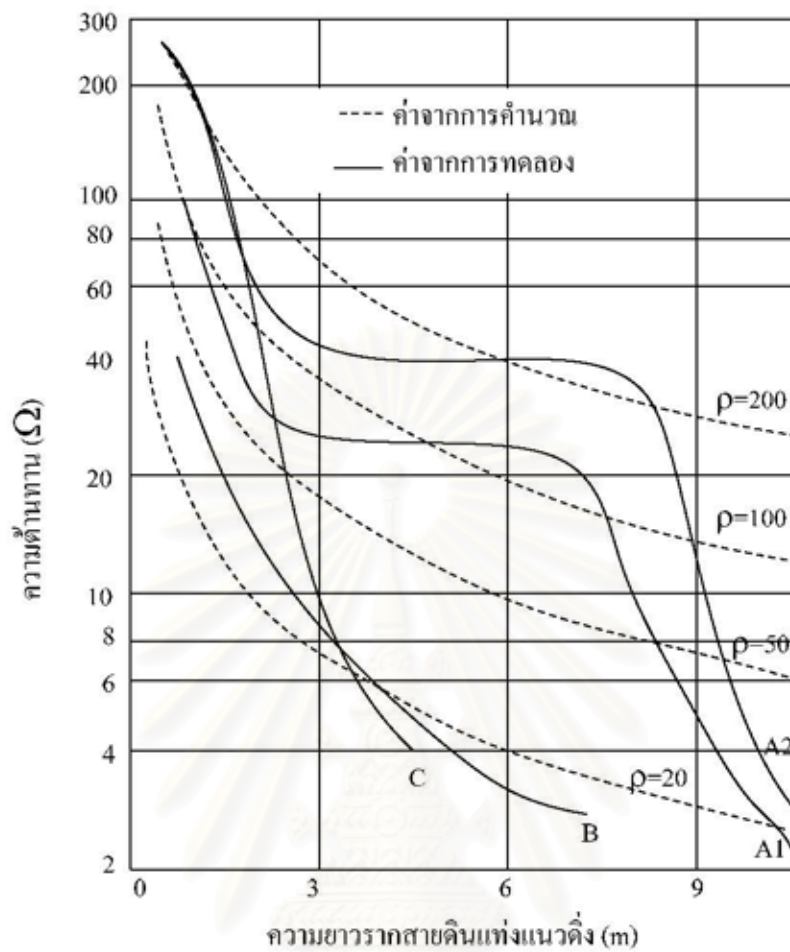
รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอิมพีแดนซ์ของรากสายดิน

## 2.3 ความลึกในการฝังรากสายดิน

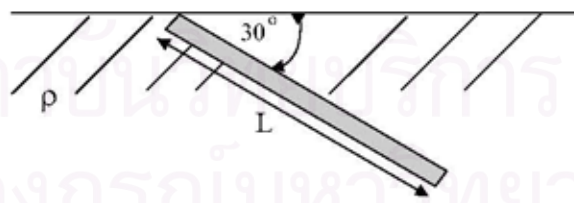
การฝังรากสายดินให้มีประสิทธิภาพ จะต้องทำให้ค่าความต้านทานของรากสายดินลดลงตามความลึก ซึ่งระดับความลึกที่เหมาะสมจะมีค่าแตกต่างกันตามลักษณะของดิน ตัวอย่างสภาพดิน [21] แสดงดังรูปที่ 2.7 กราฟ A1 และกราฟ A2 แทนความลึกในการฝังรากสายดิน จากกราฟพบว่าความลึกที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6 - 9 m ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าความต้านทานลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากที่ความลึกนี้เป็นชั้นดินเหนียวที่วางตัวอยู่ใต้ชั้นบนที่เป็นชั้นทรายและกรวด ในทำนองเดียวกับกราฟ C ความลึกที่เหมาะสมจะอยู่ที่ 1.5 m เพราะเป็นช่วงของการเปลี่ยนแปลงชั้นดินจากดินกรวดเป็นดินเหนียว ส่วนกราฟ B การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานยังไม่ชัดเจนเนื่องจากค่าความต้านทานดินเปลี่ยนแปลงไม่มาก อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยอื่นอีกที่มีผลต่อความลึกในการฝังรากสายดินคือ

1. ความต้านทานเฉลี่ยของชั้นดินที่อยู่ลึกลงไป
2. การเพิ่มขึ้นของกำลังงานที่ใช้และค่าใช้จ่ายในการฝังรากสายดิน

ในกรณีที่ไม่สามารถออกรากสายดินให้ลึกได้ มาตรฐาน [13] แนะนำให้ติดตั้งรากสายดินเอียงทำมุม  $30^\circ$  กับแนวระดับดังรูปที่ 2.8 เพื่อให้ได้ความยาวของรากสายดินที่ฝังลงไปดินเพิ่มขึ้นและยังเป็นการช่วยเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างรากสายดินกับดิน



รูปที่ 2.7 ผลความลึกต่อรากสายดิน

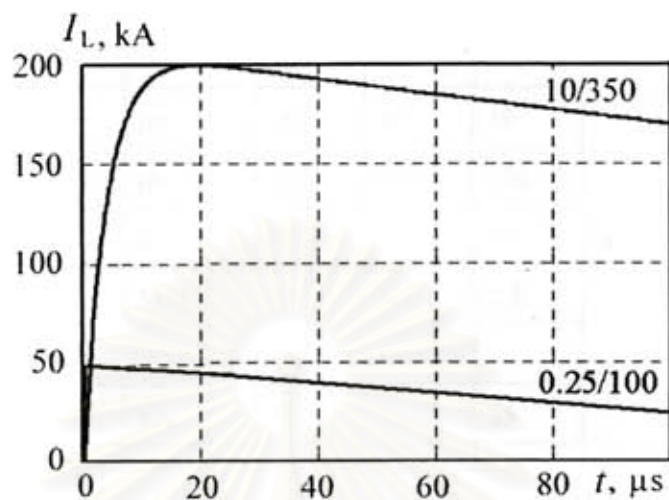
รูปที่ 2.8 การติดตั้งรากสายดินทำมุม  $30^\circ$ 

#### 2.4 พฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า

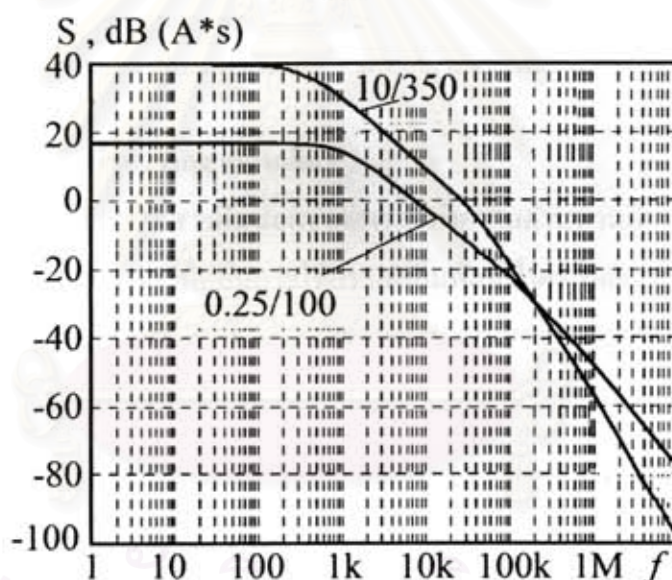
กระแสอิมพัลส์ขนาดสูงที่มีผลมากต่อระดับการป้องกันของระบบรากสายดินคือกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งมาตรฐาน IEC [20] ได้แบ่งกระแสฟ้าผ่าออกเป็น กระแสฟ้าผ่าแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตามรูปคลื่น 0.25/100  $\mu\text{s}$  ดังรูปที่ 2.9 (a) โดยรูปคลื่นกระแส 0.25/100  $\mu\text{s}$  จะมีส่วนประกอบของความถี่สูงมากกว่ารูปคลื่นกระแส 10/350  $\mu\text{s}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (b) ผลของ



ส่วนประกอบความถี่สูงจะทำให้อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำภายในรากสายดินมีค่าสูงขึ้นตลอดความยาว ทำให้การกระจายกระแสบนรากสายดินมีค่าไม่สม่ำเสมอ



(a)



(b)

รูปที่ 2.9 (a) รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$

(b) ส่วนประกอบความถี่ของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

นอกจากนี้มาตรฐาน IEC ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  เพื่อเป็นค่าอ้างอิงในการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าดังตารางที่ 2.5 เช่นถ้าใช้ระดับป้องกันขั้นสูงสุดคือระดับที่ I จะต้องออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าให้สามารถรองรับกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  ขนาด 200 kA และรองรับกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  ขนาด 50 kA เป็นต้น

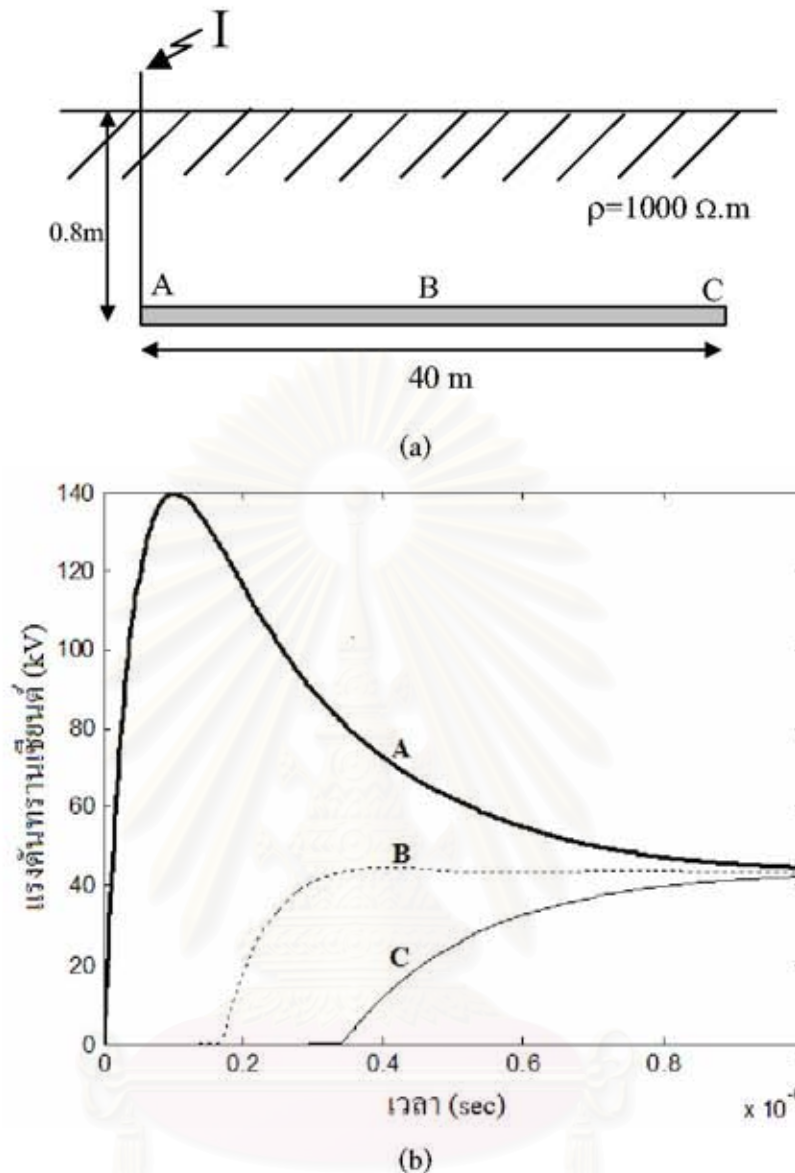
ตารางที่ 2.5 ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$

พารามิเตอร์	หน่วย	ระดับการป้องกัน		
		I	II	III-IV
กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350 $\mu\text{s}$				
ค่ายอดกระแส: I	kA	200	150	100
เวลาน้ำกลิ้ง: $T_F$	$\mu\text{s}$	10	10	10
เวลาหลังกลิ้ง: $T_H$	$\mu\text{s}$	350	350	350
ประจุอิมพัลส์: $Q_s$	C	100	75	50
พลังงาน: W/R	MJ/ $\Omega$	10	5.6	2.5
กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100 $\mu\text{s}$				
ค่ายอดกระแส: I	kA	50	37.5	25
เวลาน้ำกลิ้ง: $T_F$	$\mu\text{s}$	0.25	0.25	0.25
เวลาหลังกลิ้ง: $T_H$	$\mu\text{s}$	100	100	100
ค่าเฉลี่ยความชัน: $I/T_F$	kA/ $\mu\text{s}$	200	150	100

#### 2.4.1 พฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดินเดี่ยว

ในการออกแบบระบบรากสายดินนอกจากการลดค่าความต้านทานดินแล้ว ผู้ออกแบบควรต้องคำนึงถึงการลดค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยเฉพาะกระแสฟ้าผ่าตาม ซึ่งการเพิ่มความยาวรากสายดินแม้ว่าจะช่วยลดค่าความต้านทานของระบบรากสายดิน แต่ค่าความเหนียวน้ำก็จะเพิ่มขึ้นตามความยาว ทำให้การกระจายของแรงดันบนตัวนำไม่สม่ำเสมอเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่ง โดยค่ายอดแรงดันจะมีขนาดลดลงตลอดความยาวของตัวนำ และมีแนวโน้มอ้อมตัวเมื่อตัวนำมีความยาวถึงค่าๆหนึ่ง

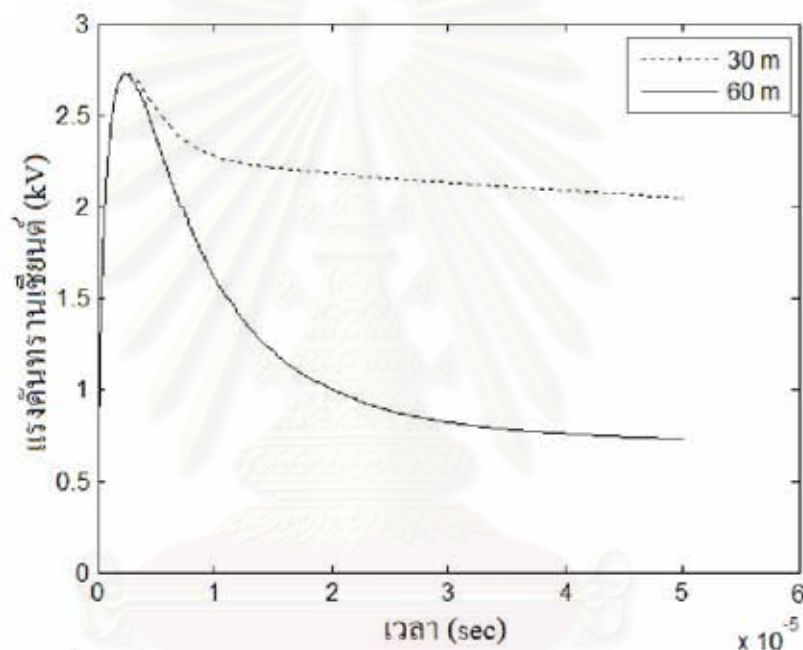
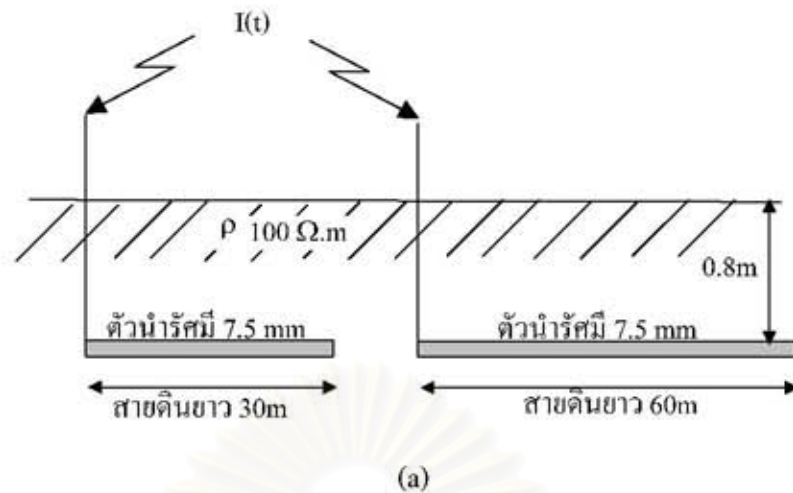
รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างการกระจายของแรงดัน [15] บนรากสายดินแนวนอนความยาว 40 m เส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm ฝังในดินที่มีค่าความต้านทาน 1000  $\Omega \cdot \text{m}$  ภายใต้รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$   $I(t) = 1 \cdot (e^{-7,000t} - e^{-13,500,000t})$  โดยตรงจุดปล่อยกระแส A จะมีค่ายอดแรงดันสูงสุด และตรงกึ่งกลางรากสายดิน B จะมีค่ายอดแรงดันที่ต่ำลง และ ตรงปลายรากสายดิน C จะมีค่ายอดแรงดันต่ำที่สุด จากผลการจำลอง ได้แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของค่าความเหนียวน้ำตามความยาวของตัวนำที่จะ ไปจำกัดการไหลของกระแสบนรากสายดิน ทำให้กระแสที่ไหลไปยังปลายตัวนำมีค่าลดลง



รูปที่ 2.10 (a) การจำลองรากสายดินแนวนอนยาว 40 m  
(b) การกระจายของแรงดันบนรากสายดิน

ความยาวรากสายดินนอกจากมีอิทธิพลต่อค่าอิมพีแดนซ์แล้ว ยังมีผลต่อรูปร่างของแรงดันทรานเซียนต์ดังรูปที่ 2.11 (a) แสดงการจำลองรากสายดินแนวนอนเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm ที่ฝังในดินที่มีความต้านทานดิน 100  $\Omega \cdot m$  ภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu s$   $I(t) = I_0(e^{-2100t} - e^{-370,000t})$  ที่ความยาวรากสายดิน 30 m และ 60 m ได้แรงดันทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้นตรงจุดปล่อยกระแสแสดงดังรูปที่ 2.11 (b) ค่ายอดแรงดันที่ได้ใกล้เคียงกันมาก แต่แรงดันทรานเซียนต์ช่วงความถี่ต่ำของรากสายดินสั้นจะมีค่าสูงกว่าและคงอยู่นานกว่ารากสายดินยาว ซึ่งอาจจะส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต่ออยู่ตรงจุดต่อลงดินได้รับความเสียหายได้





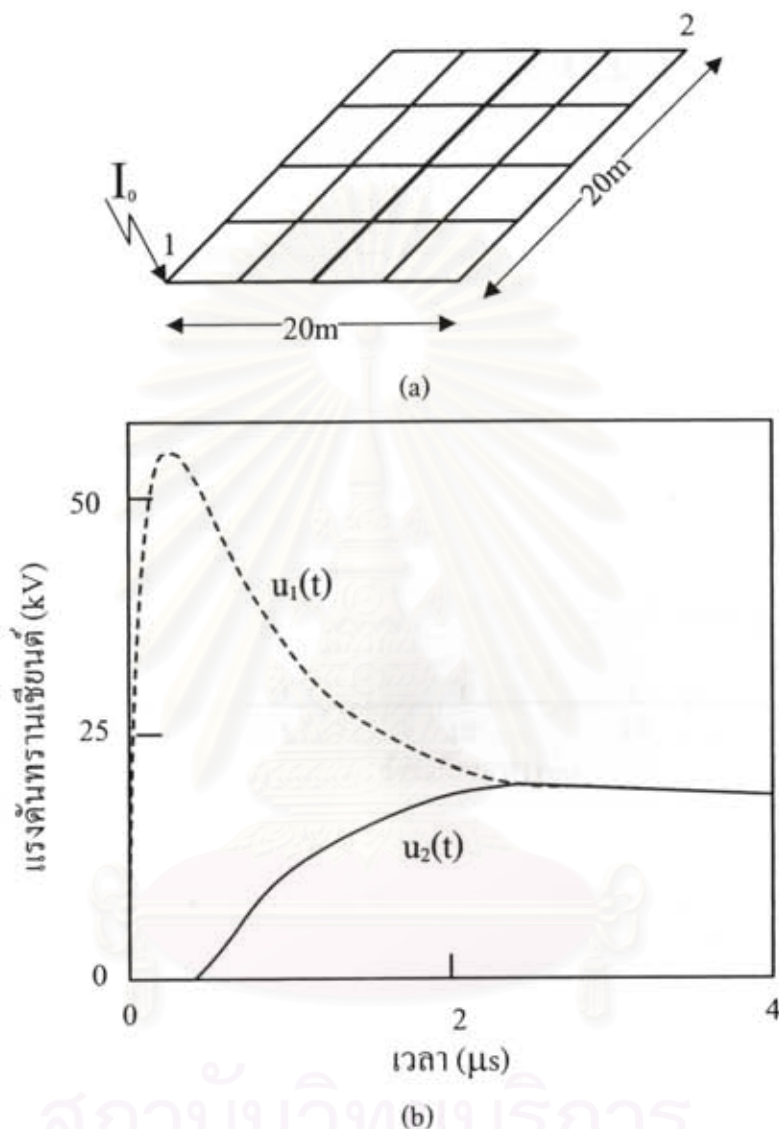
รูปที่ 2.11 (a) การจำลองรอกสายดินแนวนอนยาว 30 m และ 60 m และ  
(b) แรงดันทรานเซียนต์ที่เกิดขึ้น

#### 2.4.2 พฤติกรรมทรานเซียนต์ของกราวด์กริด

การศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรอกสายดิน นอกจากรอกสายดินเดี่ยวแล้วยังมีการศึกษาถึงพฤติกรรมของกราวด์กริดด้วย โดย Nahman และ Djordjevic [22] ได้ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของกราวด์กริด โดยการติดตั้งรอกสายดินแท่งแนวดิ่งเพิ่มเติมเข้าไปยังกราวด์กริด พบว่าการกระจายของแรงดันที่ผิวดินจะมีความสม่ำเสมอมากขึ้นหรือค่าแรงดันช่วงก้ำมีค่าลดลง

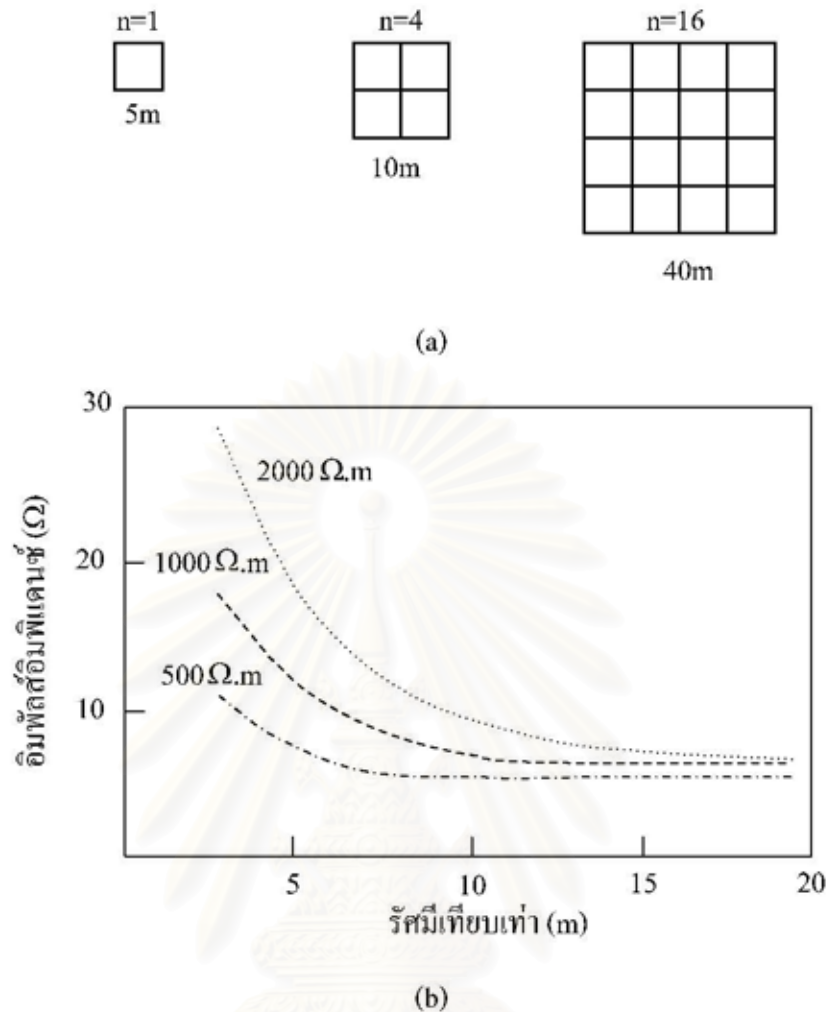
Gao และ He [23] ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดพื้นที่ จำนวนและขนาดช่อง (sub-grid) ที่มีผลต่อพฤติกรรมของกราวด์กริดภายใต้กระแสฮัลส์ฟ้าผ่า ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำภายในตัวนำของกราวด์กริดจะทำให้การกระจายกระแสฮัลส์ฟ้าผ่าและแรงดันไฟฟ้าบนกราวด์กริดมีค่าไม่

สมำเสมอด้งรูปที่ 2.12 (a) เป็นกราวด์กริดขนาด  $20 \times 20 \text{ m}^2$  ฝังในดินที่มีความต้านทานดิน  $500 \Omega \cdot \text{m}$   $\epsilon_r = 9$  ลึก  $0.8 \text{ m}$  โดยปล่อยกระแสอิมพัลส์  $2.6/50 \mu\text{s}$  ขนาด  $10 \text{ kA}$  ตรงมุมของกราวด์กริดที่จุด 1 ได้แรงดันที่เกิดขึ้นตรงจุด 1 และ 2 แสดงด้งรูปที่ 2.12 (b)



รูปที่ 2.12 (a) กราวด์กริดขนาด  $20 \times 20 \text{ m}^2$  (b) แรงดันที่เกิดขึ้นตรงจุด 1 และ 2

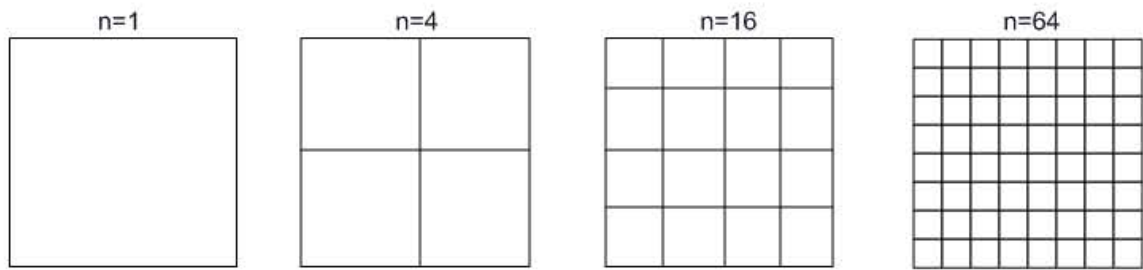
อิทธิพลของพื้นที่กราวด์กริดที่มีต่อพฤติกรรมทรานเซียนต์อธิบายด้งรูปที่ 2.13 (a) ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่กราวด์กริดจาก  $5 \times 5 \text{ m}^2$  ถึง  $40 \times 40 \text{ m}^2$  โดยมีขนาดแต่ละช่องของกราวด์กริดเท่ากันหมดคือ  $5 \times 5 \text{ m}^2$  ได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดกราวด์กริดและค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ที่ความต้านทานดินต่างๆ แสดงด้งรูปที่ 2.13 (b) เมื่อแกนนอนเป็นขนาดรัศมีเทียบเท่า (equivalent radius) ของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ของกราวด์กริด ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์จะมีค่าลดลงตามขนาดของกราวด์กริด และมีแนวโน้มอึดตัวเมื่อขนาดกราวด์กริดมีค่ามากขึ้นถึงค่าๆหนึ่ง เนื่องจากกราวด์กริดมีขนาดประสิทธิผล



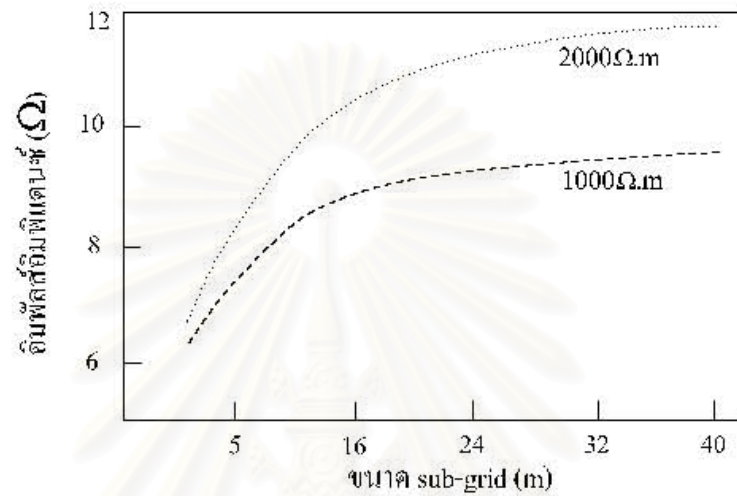
รูปที่ 2.13 (a) ขนาดพื้นที่กรวดกริด (b) อิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของกรวดกริด

จำนวนและขนาดช่อง (sub-grid) มีผลต่อพฤติกรรมทรานเซียนต์ของกรวดกริดดังแสดงในรูปที่ 2.14 (a) เป็นกรวดกริดที่มีพื้นที่เท่ากันคือ  $40 \times 40 \text{ m}^2$  แต่จะต่างกันที่จำนวน sub-grid เมื่อกำหนดให้  $n$  คือจำนวนของ sub-grid และ  $s$  คือขนาด sub-grid ของกรวดกริด จากกราฟในรูปที่ 2.14 (b) ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดของ sub-grid และมีแนวโน้มอิมพัลส์อิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้น ส่วนจำนวน sub-grid ก็มีผลต่อแรงดันอิมพัลส์ดังรูปที่ 2.14 (c) เมื่อขนาด sub-grid มีค่าน้อยกว่า 20 m ( $n=16$  และ  $n=64$ ) ค่าแรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อยกระแสจะลดลงมาก เพราะวกรวดกริดสามารถกระจายกระแสออกไปยังดินได้มากขึ้น นอกจากนี้ค่าแรงดันอิมพัลส์ช่วงความถี่ต่ำก็จะลดลงตามจำนวนของ sub-grid ทำให้อุปกรณ์ที่ต่ออยู่มีความปลอดภัยมากขึ้นเมื่อมีกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าไหลผ่านกรวดกริด

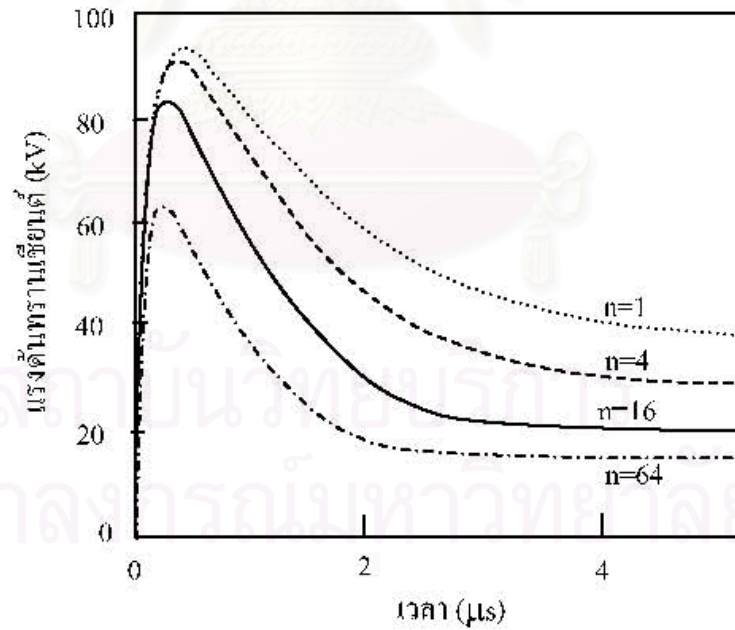




(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.14 (a) กราฟกริดที่มีจำนวนและขนาดช่องต่างๆ (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินพุตอิมพีแดนซ์กับขนาด sub-grid (c) แรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อยกระแส

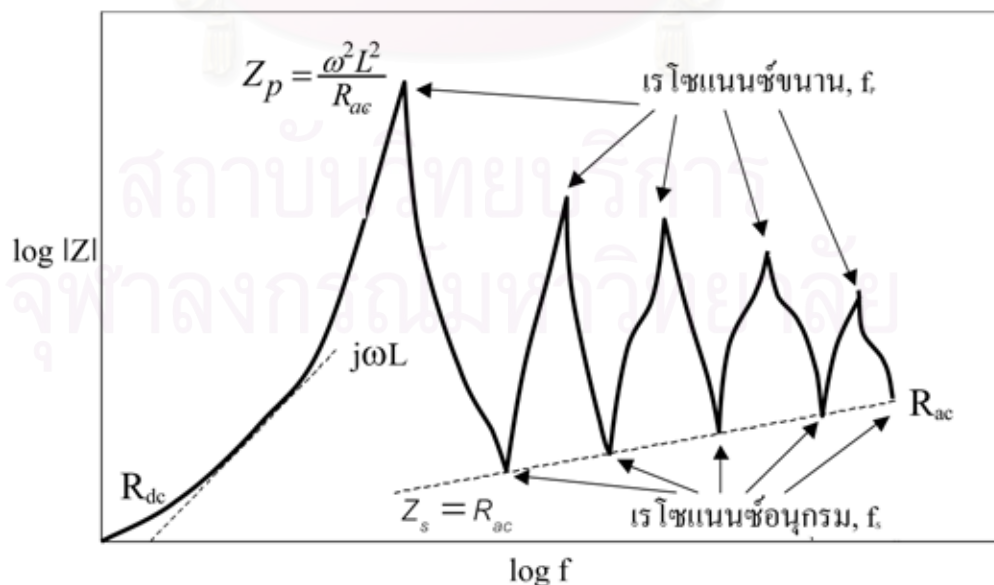
### บทที่ 3

#### ขนาดประสิทธิผลของรากสายดิน

การศึกษาขนาดประสิทธิผลของรากสายดิน จะเกี่ยวข้องอย่างมากกับพฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดิน ดังนั้นในบทนี้จะได้กล่าวถึงการวิเคราะห์พฤติกรรมของรากสายดิน เพื่อเป็นความรู้พื้นฐานในการทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปของรากสายดิน หลังจากนั้นจะกล่าวถึงการศึกษที่ผ่านมาเกี่ยวกับความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน และขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด รวมทั้งจะได้นำเสนอแนวคิดวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวเพื่อคำนวณหาค่าดังกล่าว

#### 3.1 การวิเคราะห์พฤติกรรมของรากสายดิน

พฤติกรรมของระบบรากสายดินจะถูกกำหนดด้วยค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของรากสายดิน ซึ่งประกอบด้วยส่วนปริมาณจริงและปริมาณจินตภาพ โดยค่าความต้านทานในส่วนปริมาณจริงจะมีผลมากในกรณีของความถี่ต่ำ ส่วนปริมาณจินตภาพจะมีผลมากขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น โดยเฉพาะบางความถี่ที่ขนาดอิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำ ( $j\omega L$ ) มีค่าเท่ากับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $1/j\omega C$ ) จึงทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้น โดยวงจรรากสายดินอาจจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงหรือต่ำก็ได้ขึ้นอยู่กับว่าเป็นเรโซแนนซ์แบบขนานหรืออนุกรมดังตัวอย่างกราฟ [8] ในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างค่าอิมพีแดนซ์กับความถี่ของระบบรากสายดิน

กรณีของรากสายดินที่เป็นเส้นลวดกลม เมื่อความยาวของรากสายดินน้อยกว่าความยาวคลื่น ( $l \ll \lambda$ ) ค่าอิมพีแดนซ์จะมีค่าขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำภายนอก ( $L_{ext}$ ) และความเหนี่ยวนำภายใน ( $L_{int}$ )

$$Z = R_{(ac \text{ or } dc)} + j\omega(L_{ext} + L_{int}) \quad (3.1)$$

$$R_{dc} = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad (3.2)$$

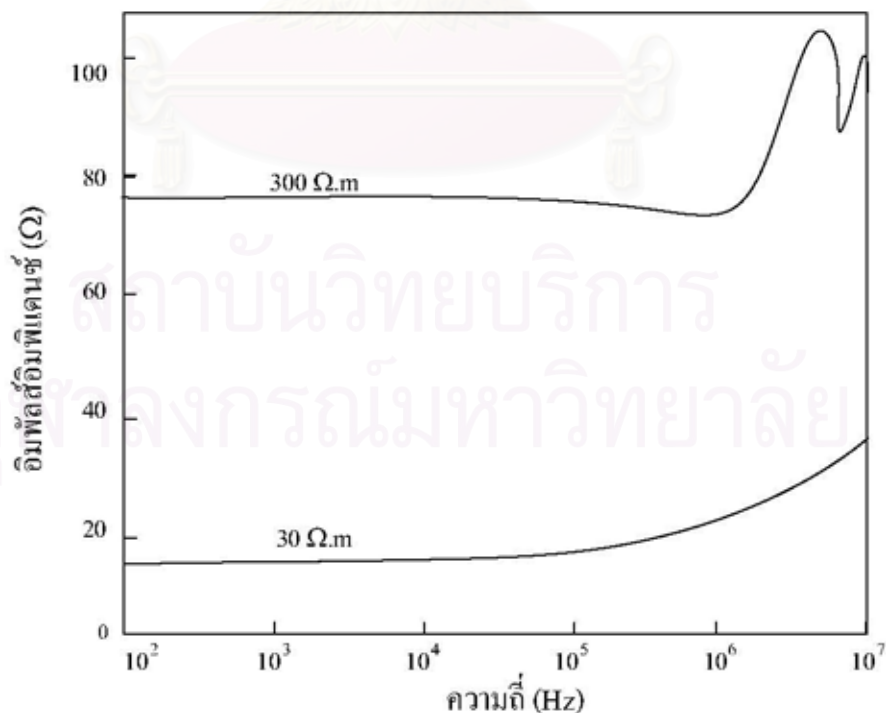
$$R_{ac} = R_{dc} \left( \frac{d}{4\delta} + \frac{1}{4} \right) \quad (3.3)$$

เมื่อ

$d$  = เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของเส้นลวดกลม (mm)

$$\delta = \text{skin depth} \approx \frac{0.066}{\sqrt{\sigma_r \mu_r f_{MHz}}} \text{ (mm)}$$

จากผลการจำลองด้วยกระแสอิมพัลส์ที่มีส่วนประกอบความถี่ต่างกัน Greev [27] ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความถี่ของรากสายดินแห่งแนวตั้งความยาว 6 m ติดตั้งในดินที่มีความต้านทานดิน 30  $\Omega \cdot m$  และ 300  $\Omega \cdot m$  ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของรากสายดินจะเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ โดยช่วงความถี่ต่ำค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ค่อนข้างคงที่ไม่ขึ้นกับความถี่ แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ ก็จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ โดยเฉพาะตรงความถี่เรโซแนนซ์ที่ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลงมาก

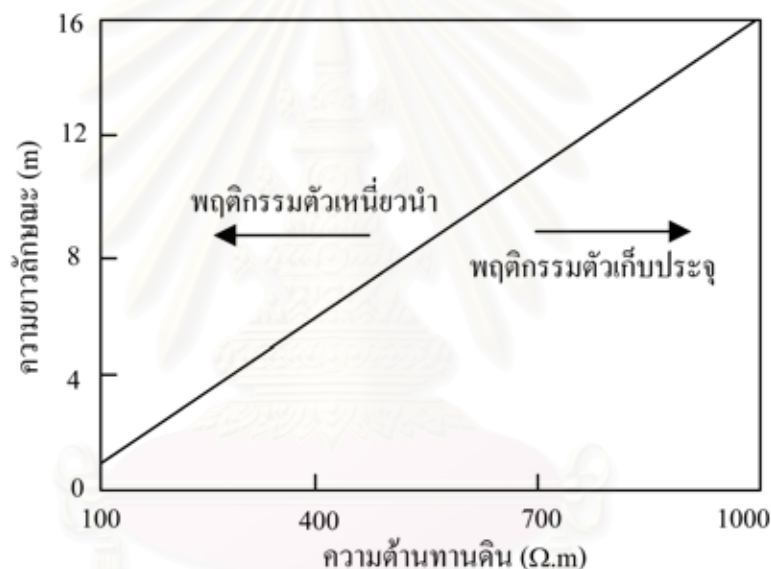


รูปที่ 3.2 อิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความถี่ของรากสายดินแห่งแนวตั้งความยาว 6 m



การที่ค่าอิมพีแดนซ์มีค่าค่อนข้างคงที่ตรงช่วงความถี่ต่ำ และจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ตรงช่วงความถี่สูง Greev [28] เรียกความถี่ตรงจุดเปลี่ยนช่วงนี้ว่าความถี่ลักษณะ (characteristic frequency  $F_c$ ) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความต้านทานดินและความยาวรากสายดิน โดยความถี่ลักษณะจะมีค่ามากเมื่อรากสายดินสั้นและค่าความต้านทานดินสูง

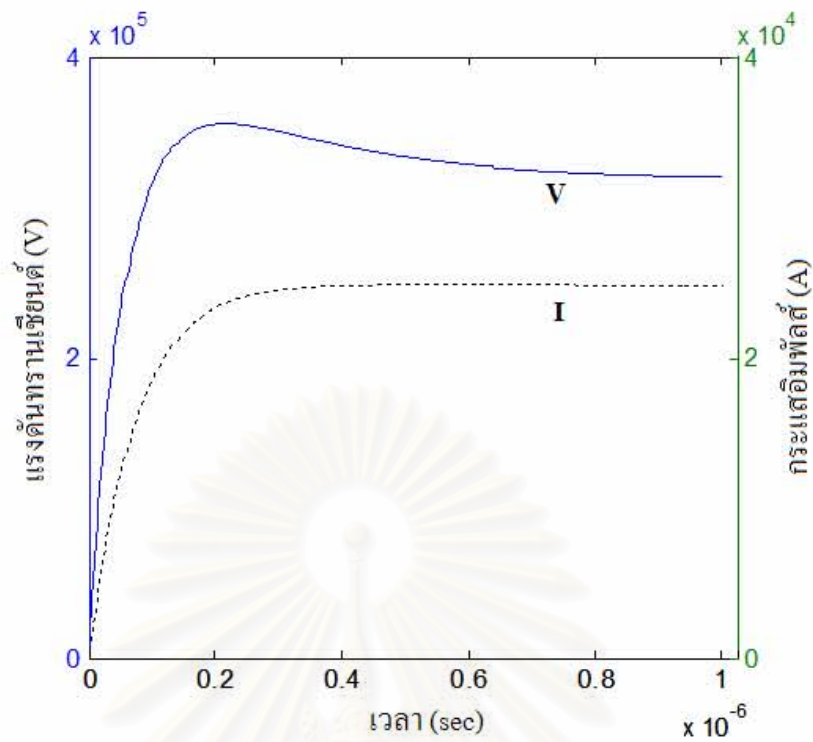
รูปที่ 3.3 แสดงรากสายดินที่จะมีพฤติกรรมเป็นตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานดิน ถ้าค่าความต้านทานดินมีค่าปกติที่ไม่สูงมาก รากสายดินก็จะมีพฤติกรรมเป็นตัวเหนี่ยวนำ ส่งผลให้การใช้งานรากสายดินภายใต้กระแสพัลส์มีข้อจำกัดที่ความยาวลักษณะ (characteristic length) หรือความยาวประสิทธิผลซึ่งเป็นความยาวตัวนำสูงสุดจากจุดปล่อยกระแสที่ทำให้รากสายดินยังสามารถกระจายกระแสไฟฟ้าผ่านสู่ดินได้เพิ่มขึ้นและแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าลดลง



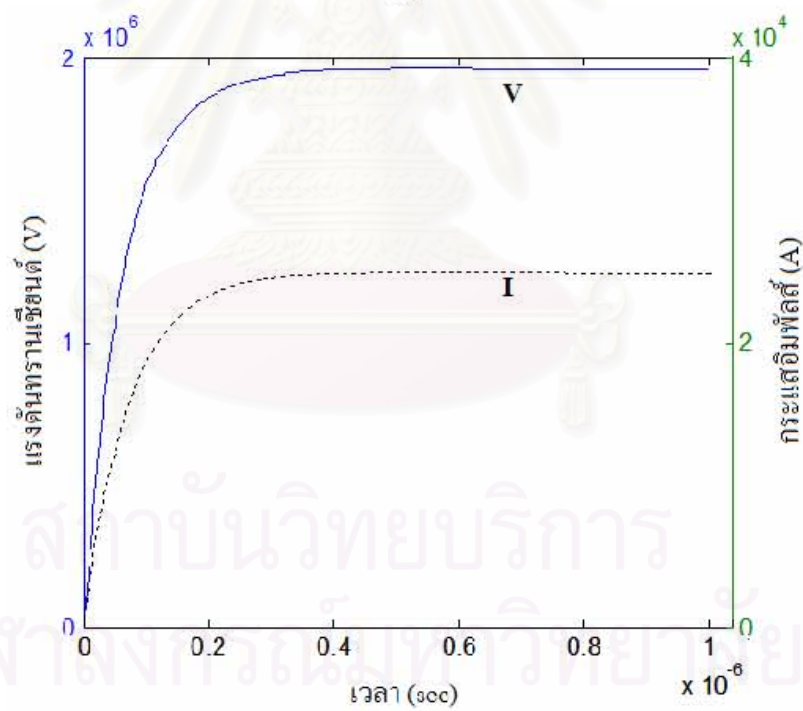
รูปที่ 3.3 บริเวณพฤติกรรมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุของรากสายดิน [27]

ตัวอย่างการวิเคราะห์พฤติกรรมของรากสายดินแท่งแนวตั้งที่มีความยาว 6 m ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 mm ภายใต้กระแสไฟฟ้าผ่านตาม  $0.25/100 \mu s$  ที่มีค่ายอดกระแส 25 kA แสดงดังรูปที่ 3.4 (a) เมื่อรากสายดินฝังในดินที่มีความต้านทาน 30  $\Omega.m$  และรูปที่ 3.4 (b) สำหรับรากสายดินที่ฝังในดินที่มีความต้านทาน 300  $\Omega.m$

จากผลการจำลองพบว่ารากสายดินที่ฝังในดินที่มีความต้านทานดิน 300  $\Omega.m$  จะให้ค่ายอดแรงดันทรานเซียนต์สูงกว่ารากสายดินที่ฝังในดินที่มีความต้านทานดิน 30  $\Omega.m$  โดยค่าแรงดันทรานเซียนต์ที่สูงจะส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมอยู่กับจุดต่อลงดินได้รับความเสียหายได้



(a)



(b)

รูปที่ 3.4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของรอกสายดินแท่งแนวตั้งความยาว 6 m  
ติดตั้งในดินที่มีความต้านทานดิน (a) 30  $\Omega \cdot m$  (b) 300  $\Omega \cdot m$

### 3.2 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน

ในอดีตการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับความยาวประสิทธิผลของรากสายดินยังมีไม่มาก เนื่องจากนักวิจัยจะเน้นการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า แต่ภายหลังจากที่แบบจำลองถูกพัฒนามีความถูกต้องมากขึ้น จึงเริ่มมีการนำแบบจำลองที่ได้มาศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ รวมถึงความยาวของรากสายดินที่มีผลต่อคุณสมบัติการป้องกันผลกระทบจากฟ้าผ่าของระบบรากสายดิน และจากผลการจำลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของความยาวรากสายดินจะส่งผลให้แรงดันบนตัวนำมีค่าลดลงและมีแนวโน้มอิ่มตัวเมื่อรากสายดินมีความยาวถึงค่าๆหนึ่ง หรือกล่าวได้ว่ารากสายดินมีความยาวประสิทธิผล

Mazzetti และ Vaca [29] ได้ให้ความหมายของความยาวประสิทธิผลว่าเป็นความยาวที่เพียงพอต่อการกระจายกระแสฟ้าผ่าลงสู่ดิน โดยความยาวประสิทธิผลมีแนวโน้มลดลงตามค่าความต้านทานดิน แต่ตามความหมายดังกล่าวยังไม่ได้ระบุถึงเงื่อนไขที่ใช้ในการคำนวณหาความยาวประสิทธิผล

He [30] ได้ศึกษาและวิเคราะห์ถึงขนาดทางกายภาพประสิทธิผลของระบบรากสายดินแบบต่างๆที่ขึ้นอยู่กับเสาส่งไฟฟ้าของประเทศจีน จากผลการจำลองพบว่าค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์จะลดลงตามขนาดของรากสายดิน และมีแนวโน้มอิ่มตัวเมื่อรากสายดินมีความยาวถึงค่าๆหนึ่ง ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์จะคำนวณได้จากผลคูณของสัมประสิทธิ์อิมพัลส์ (impulse coefficient) ของเสาแต่ละแบบกับค่าความต้านทานความถี่กำลังของระบบรากสายดิน (power frequency grounding resistance) การพิจารณาค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ด้วยวิธีดังกล่าวยังไม่ถูกต้อง เนื่องจากความต้านทานความถี่กำลังจะมีค่าลดลงเมื่อความยาวเพิ่มขึ้นแม้ว่าความยาวนั้นจะมีค่ามากกว่าความยาวประสิทธิผล ซึ่งแตกต่างจากคุณสมบัติของค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์

Farag [31] ได้นิยามความยาวประสิทธิผลสำหรับรากสายดินแนวนอนว่าเป็นความยาวจากจุดปล่อยกระแสที่มีค่าแรงดันลดลงเหลือ 3% ของค่าแรงดันทรานเซียนต์ตรงจุดปล่อยกระแส Lorentzou [32] ได้นิยามความยาวประสิทธิผลว่าเป็นความยาวจากจุดปล่อยกระแสที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ จากนั้นย้มนิยามดังกล่าวเป็นการบอกถึงเงื่อนไขทางทฤษฎีเพื่อคำนวณหาค่าสุดท้ายที่แรงดันทรานเซียนต์หรืออิมพัลส์อิมพีแดนซ์ลู่เข้าหา (asymptotic) แต่ในทางปฏิบัติการคำนวณค่าดังกล่าวจะทำได้ยาก

สำหรับการวิเคราะห์ความยาวประสิทธิผลด้วยแบบจำลองและสมการทางคณิตศาสตร์มีการนำเสนอในหลายงานวิจัยดังนี้

Greiv [27] เรียกความยาวประสิทธิผลว่าความยาวลักษณะ (characteristic length) ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับความถี่ลักษณะ (characteristic frequency  $F_c$  in MHz) และความต้านทานดิน  $\rho$  จากผลการศึกษาในดินที่มีความต้านทานดินต่ำ ความยาวลักษณะจะมีค่าสั้น และจะเพิ่มขึ้นตามความ



ด้านทานดินดังสมการที่ (3.4) อย่างไรก็ตามการกำหนดความถี่ลักษณะที่สอดคล้องกับรูปคลื่นกระแสมัลส์จะทำได้ยาก

$$l_c = 0.6(\rho / F_c)^{0.43} \quad (3.4)$$

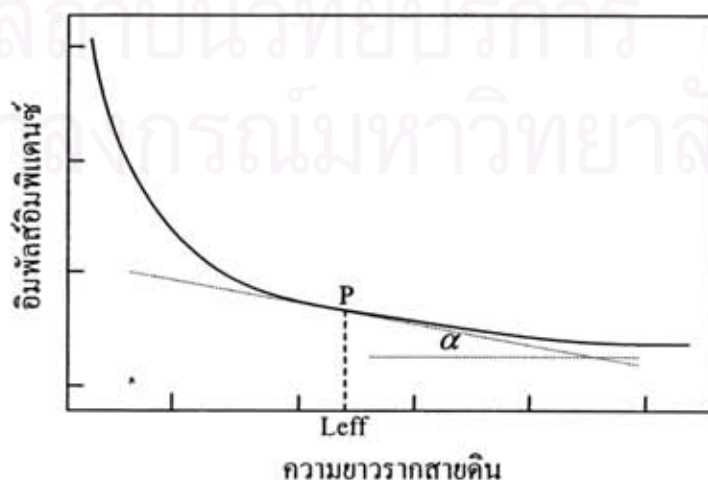
Gupta และ Thapar [33] ได้ทำการศึกษาความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอน โดยพบว่าจากความยาวของรากสายดินทั้งหมดนั้น จะมีความยาวบางส่วนนับจากจุดปล่อยกระแสที่สามารถกำหนดค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของระบบรากสายดินได้อย่างมีประสิทธิภาพและเรียกความยาวนี้ว่าความยาวประสิทธิผล ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (3.5)

$$l_c = A(\rho \tau)^{0.5} \quad (3.5)$$

เมื่อ  $\rho$  เป็นความต้านทานดิน  $\tau$  เป็นเวลาหน้าคลื่น และสัมประสิทธิ์  $A$  มีค่า 1.4 สำหรับรากสายดินแนวนอนที่ปล่อยกระแสตรงปลายตัวนำและมีค่า 1.55 สำหรับรากสายดินแนวนอนที่ปล่อยกระแสตรงกึ่งกลางตัวนำ และมีค่า 1.85 สำหรับรากสายดิน 4 แฉกที่ปล่อยกระแสตรงจุดกึ่งกลางที่เชื่อมตัวนำเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ Gupta และ Thapar ได้เสนอเงื่อนไขความยาวประสิทธิผลว่าจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราส่วน  $R.T/L_s$  มีค่าเท่ากับ 0.57 โดย  $R$  คือความต้านทานดินของกระแสดำ  $T$  คือเวลาหน้าคลื่น ( $\mu s$ ) และ  $L_s$  เป็นความเหนี่ยวนำทั้งหมดของรากสายดิน อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ดังกล่าวไม่ได้คำนึงถึงผลของรูปคลื่นกระแสมัลส์

He [34] ได้เสนอแบบจำลองความยาวประสิทธิผลที่คิดผลการแตกตัวของดิน โดยความยาวประสิทธิผลจะคำนวณได้จากค่าอนุพันธ์ระหว่างอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินเทียบกับความยาวที่มีค่าไม่เกิน tangent ของมุม  $\alpha$  ดังสมการที่ (3.6) และรูปที่ 3.5 โดยมุม  $\alpha$  ที่เลือกคือ  $5^\circ$

$$-\frac{dZ_l}{dl} \leq \tan \alpha \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.5 ค่าอนุพันธ์ระหว่างอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินเทียบกับความยาว

นอกจากนี้ He ได้เสนอการคำนวณหาค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนกรณีที่ถูกปล่อยกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ปลายของรากสายดินดังสมการที่ (3.7) ซึ่งวิเคราะห์มาจากการทำ curve fitting ของข้อมูลที่ได้จากการจำลองด้วยทฤษฎีสายส่ง

$$l_e = \frac{6.528(\rho T)^{0.379}}{I_M^{0.097}} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $\rho$  คือความต้านทานดิน

$T$  คือเวลาหน้าคลื่นของกระแสไฟฟ้า

$I_M$  คือขนาดกระแสไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามการจำลองพฤติกรรมรากสายดินของ He ด้วยแบบจำลองทฤษฎีสายส่งบนค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาวได้แก่ตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และความนำ ที่มีค่าคงที่ตลอดความยาวไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง ทำให้ผลจากการจำลองยังไม่ถูกต้อง และสมการ (3.7) ที่สร้างมาจากข้อมูลดังกล่าวจึงมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่

Liu และ Theethayi [35] ได้เสนอแนะเงื่อนไขของความยาวประสิทธิผล  $l_e$  คือความยาวรากสายดินที่มีค่าความแตกต่างระหว่างค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์สูงสุดของรากสายดินความยาว  $l_e$  กับความยาว  $l_e + 1$  ต้องมีค่าไม่เกิน 0.001  $\Omega$  ดังสมการที่ (3.8)

$$Z_{max}(l_e) - Z_{max}(l_e + 1) < 0.001 \quad (3.8)$$

สำหรับการคำนวณหาค่าความยาวประสิทธิผลด้วยสมการที่กล่าวไป พบว่ายังมีข้อจำกัดอยู่ โดยสมการที่ (3.4) และ (3.5) ได้ถูกพิสูจน์ใน [33] แล้วว่ามีความผิดพลาด ส่วนเงื่อนไขตามสมการที่ (3.6) การกำหนดค่ามุม  $\alpha$  ที่  $5^\circ$  และสมการที่ (3.8) การเลือกค่าความแตกต่างของค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์สูงสุด ไม่เกิน 0.001  $\Omega$  ยังไม่มีข้อมูลสนับสนุนที่เพียงพอ

ในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอแนวคิดจุดคุ้มค่า (optimum point) ทางคณิตศาสตร์คือวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวต่ำสุด (minimize per unit length impedance method) สำหรับคำนวณหาค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินทั้งแนวดิ่งและรากสายดินแนวนอนภายใต้เงื่อนไขของแรงดันที่มีค่าไม่เกินค่าแรงดันวิกฤตจนทำให้ดินเกิดการแตกตัว ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. หาความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของรากสายดิน ( $Z$ ) กับความยาวของรากสายดิน ( $L$ ) ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ power function

$$Z = aL^b + c \quad (3.9)$$

เมื่อ  $a$ ,  $b$  และ  $c$  หาได้จากการทำ curve fitting

2. หาค่าอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยโดยการหาร function  $Z$  ในสมการที่ (3.9) ด้วย  $L$  ดังสมการที่ (3.10)

$$\frac{Z}{L} = \frac{aL^b + c}{L} = aL^{b-1} + cL^{-1} \quad (3.10)$$

3. หาค่าอนุพันธ์  $Z/L$  แล้วกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อหาค่าความยาวตรงจุดต่ำสุดดังสมการที่ (3.11)

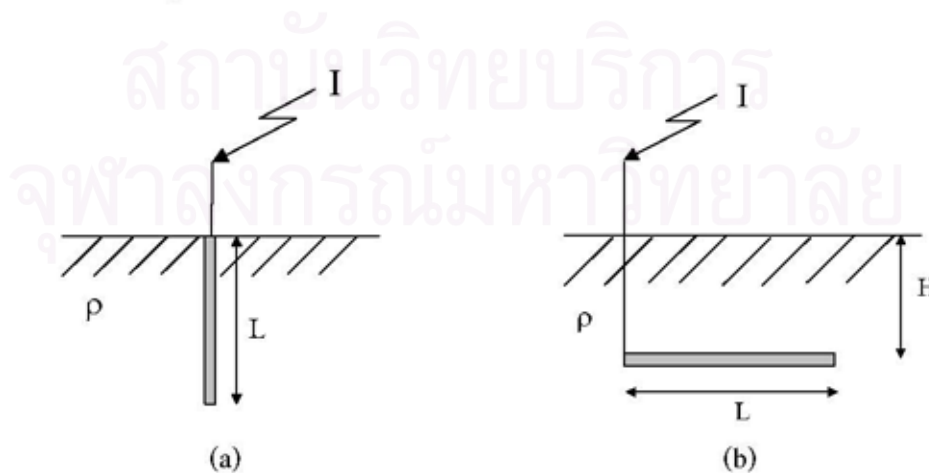
$$\frac{d(Z/L)}{dL} = 0 \quad (3.11)$$

แก้สมการหาค่าความยาวประสิทธิผล  $l_e$  ดังสมการที่ (3.12)

$$l_e = \left| \frac{c}{a(b-1)} \right|^{1/b} \quad (3.12)$$

ข้อมูลที่ใช้ในการหาค่า  $a$ ,  $b$  และ  $c$  จะได้จากการจำลองพฤติกรรมรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยทฤษฎีสายส่ง ซึ่งการกระจายกระแสอิมพัลส์และแรงดันอิมพัลส์บนรากสายดินจะหาได้จากการแก้สมการ Telegrapher ของแบบจำลองรากสายดินดังรูปที่ 3.6 ด้วยเทคนิค finite - difference time - domain (FDTD) [36-37] ซึ่งเป็นการใช้ค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาวของตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุ และความนำ ที่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งทำให้มีความถูกต้องมากกว่าทฤษฎีสายส่งปกติ เมื่อได้ค่าแรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อยกระแส ก็จะหาค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินจากอัตราส่วนค่ายอดแรงดันต่อค่ายอดกระแสตามสมการที่ (3.13)

$$Z = \frac{V_{peak}}{I_{peak}} \quad (3.13)$$



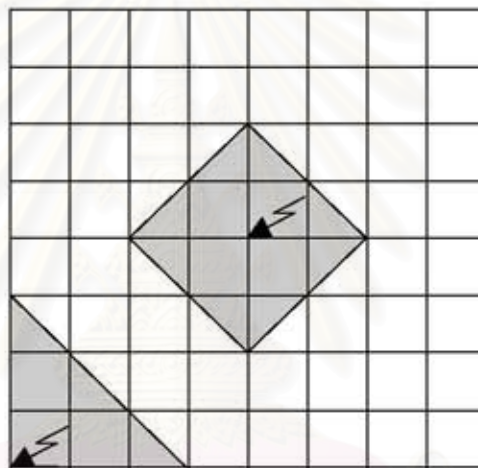
รูปที่ 3.6 การจำลองหาค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน (a) แนวตั้ง (b) แนวนอน



หลังจากได้ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินที่เกิดขึ้นตรงจุดปล่อยกระแส ก็จะนำค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์มาทำ curve fitting กับความยาวรากสายดินด้วย power function ตามสมการที่ (3.9) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์  $a$ ,  $b$  และ  $c$

### 3.3 ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด

การศึกษาขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด ได้เริ่มต้นขึ้นหลังจากการศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของกราวด์กริดภายใต้กระแสอิมพัลส์ โดย Gupta และ Thapar [38] เสนอว่าพื้นที่ประสิทธิผลของกราวด์กริดขนาดใหญ่ที่มีจำนวน sub-grid จำกัดจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเมื่อจุดปล่อยกระแสอยู่กึ่งกลางของกราวด์กริด และมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมเมื่อจุดปล่อยกระแสอยู่ที่มุมของกราวด์กริดดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 พื้นที่ประสิทธิผลของกราวด์กริดตามแนวคิดของ Gupta และ Thapar

ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดจะคำนวณจากรัสมิเทียบเท่า ( $r_e$ ) ของวงกลมที่มีพื้นที่เท่ากับพื้นที่ประสิทธิผลดังสมการที่ (3.14)

$$r_e = K(\rho T)^{0.5} \quad (3.14)$$

เมื่อ

$K = 1.45 - (0.05 \times S)$  สำหรับกราวด์กริดที่มีจุดปล่อยกระแสตรงกึ่งกลาง

$= 0.6 - (0.025 \times S)$  สำหรับกราวด์กริดที่มีจุดปล่อยกระแสตรงมุม

$S$  คือขนาดของ sub-grid

$\rho$  คือความต้านทานดิน

$T$  คือเวลาหน่วงคลื่นของกระแสอิมพัลส์

พื้นที่ประสิทธิผลของกราวด์กริดจะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วน  $R.T/L_s$  มีค่าเท่ากับ 0.65 เมื่อ  $R$  คือความต้านทานดินของกระแสความถี่ต่ำ  $T$  คือเวลาหน้าคลื่นกระแส ( $\mu s$ ) และ  $L_s$  เป็นความเหนี่ยวนำทั้งหมดของรากสายดิน

หลังจากนั้น Gupta และ Thapar [38] ได้นำเสนอความหมายใหม่สำหรับพื้นที่ประสิทธิผลของกราวด์กริดว่าเป็นพื้นที่ต่ำสุด ซึ่งการเพิ่มพื้นที่ดังกล่าวจะทำให้ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าลดลงต่ำกว่า 3% ของค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์สูงสุด โดยค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ ( $Z$ ) จะคำนวณจากผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อิมพัลส์ (impulse coefficient,  $A$ ) กับค่าความต้านทานความถี่กำลังของรากสายดิน ( $R$ ) ดังสมการที่ (3.15)

$$Z = A \times R \quad (3.15)$$

เมื่อ

$$A = e^{0.333.(r/r_c)^{23}} \quad (3.16)$$

การวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าวยังไม่ถูกต้องเนื่องจากความต้านทานความถี่กำลังจะเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่กราวด์กริดแม้ว่าพื้นที่ดังกล่าวจะมีค่ามากกว่าพื้นที่ประสิทธิผล นอกจากนี้การนำมาประยุกต์ใช้กับกราวด์กริดขนาดใหญ่ จะทำให้การคำนวณใช้เวลานานเพราะต้องคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์สูงสุดก่อน

Greev และ Heimbach [39] ได้ศึกษาถึงปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทรานเซียนต์ของกราวด์กริด จากผลการจำลองด้วยทฤษฎีสนามแม่เหล็กพบว่าขนาดกราวด์กริดมีอิทธิพลกับค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ โดยเฉพาะในช่วงความถี่ต่ำ แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นขนาดกราวด์กริดจะมีผลน้อยลงเพราะค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของกราวด์กริดได้รับอิทธิพลจากความถี่มากกว่าขนาดของกราวด์กริดทำให้เกิดเป็นขนาดประสิทธิผลโดย Greev และ Heimbach ได้ให้ความหมายของขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดว่าเป็นพื้นที่สูงสุด เมื่อเพิ่มพื้นที่ขึ้นแล้วค่ายอดแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสจะยังคงที่ จากนั้นยาดังกล่าวเป็นการบอกถึงเงื่อนไขการคำนวณหาค่าสุดท้ายของค่ายอดแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสซึ่งในทางปฏิบัติจะทำได้ยาก

Gao และ He [23] ได้ใช้แบบจำลองสายส่งในการศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทรานเซียนต์ของกราวด์กริด จากผลการจำลองพบว่ากราวด์กริดจะมีขนาดประสิทธิผลภายใต้กระแสอิมพัลส์ ซึ่ง Gao และ He ยังได้ให้ความหมายของขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดว่าเป็นพื้นที่ที่ขนาดกราวด์กริดมีผลน้อยมากต่อค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ตรงจุดปล่อยกระแส

Yaqing Liu และ Nelson Theethayi [35] ได้นำเสนอนิยามพื้นที่ประสิทธิผลของกราวด์กริดที่มีขนาด  $N \times N$  จะเกิดขึ้นเมื่อการลดลงของค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์สูงสุดตรงจุดปล่อยกระแส

เปรียบเทียบระหว่างพื้นที่กราวด์กริดขนาด  $(N + 1) \times (N + 1)$  กับพื้นที่กราวด์กริดขนาด  $N \times N$  ต้องมีค่าไม่เกิน 1% ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้บอกถึงที่มาของเงื่อนไขข้างต้น

Silverio [40] ได้แนะนำว่าการเพิ่มพื้นที่ของกราวด์กริดให้มาก เพื่อลดค่าของอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ตรงจุดปล่อยกระแสจะไม่มีประสิทธิภาพเมื่อกระแสอิมพีแดนซ์นั้นเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (fast transient) ในกรณีนี้จึงควรเน้นการปรับปรุงความสามารถในการกระจายกระแสอิมพีแดนซ์ในพื้นที่จำกัดหรือพื้นที่ประสิทธิผลของกราวด์กริด ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อการลดลงของค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ รวมทั้งควรเน้นตำแหน่งของจุดปล่อยกระแสให้สอดคล้องกับพื้นที่ประสิทธิผลด้วย อย่างไรก็ตาม Silverio ไม่ได้กล่าวถึงการคำนวณหาค่าพื้นที่ประสิทธิผลของกราวด์กริด

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะประยุกต์วิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวต่ำสุด (minimize per unit length impedance method) มาใช้กับกราวด์กริดภายใต้เงื่อนไขที่แรงดันไม่สูงจนทำให้เกิดการแตกตัวของดิน โดยจะคำนวณหาขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดจตุรัสด้วยหลักการอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยพื้นที่ต่ำสุด เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับขนาดกราวด์กริดมีลักษณะคล้ายกับกรณีของรากสายคินดังแสดงในรูปที่ 2.13 ดังนั้นจึงนำความสัมพันธ์ดังกล่าวจากสมการที่ (3.9) มาคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ต่อพื้นที่โดยการหารด้วย  $L^2$  ดังสมการที่ (3.17)

$$\frac{Z}{L^2} = \frac{aL^b + c}{L^2} = aL^{b-2} + cL^{-2} \quad (3.17)$$

หาค่าอนุพันธ์  $Z/L^2$  แล้วกำหนดให้มีค่าเท่ากับศูนย์เพื่อหาขนาดความยาวด้านของกราวด์กริดตรงจุดต่ำสุด

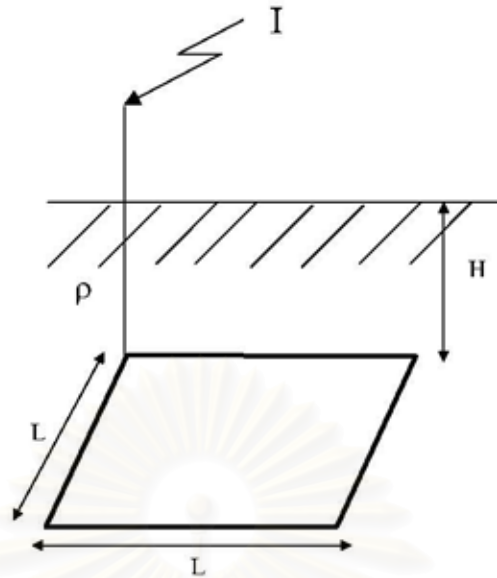
$$\frac{d(Z/L^2)}{dL} = 0 \quad (3.18)$$

แก้สมการเพื่อหาค่าขนาดประสิทธิผล  $L_e \times L_e$  ของกราวด์กริดดังสมการที่ (3.19)

$$L_e = \left| \frac{2c}{a(b-2)} \right|^{1/b} \quad (3.19)$$

ทำนองเดียวกับการหาค่าความยาวประสิทธิผลข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วยค่าสัมประสิทธิ์  $a$ ,  $b$  และ  $c$  ที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมของกราวด์กริดภายใต้กระแสอิมพีแดนซ์ฟ้าผ่าด้วยทฤษฎีสายส่งปรับปรุง ซึ่งการกระจายกระแสอิมพีแดนซ์และแรงดันอิมพีแดนซ์บนตัวนำของกราวด์กริดจะหาได้จากการแก้สมการ Telegrapher ของแบบจำลองกราวด์กริดดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยใช้เทคนิค finite - difference time - domain (FDTD)





รูปที่ 3.8 การจำลองหาขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด

ค่าอิมพีแดนซ์ตรงจุดปล่อยกระแสจะคำนวณจากอัตราส่วนค่ายอดแรงดันอิมพีแดนซ์ต่อค่ายอดกระแสอิมพีแดนซ์  $Z = V_{peak} / I_{peak}$  หลังจากนั้นทำ curve fitting ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์กับความยาวด้านของกราวด์กริดด้วย power function ดังสมการที่ (3.9) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์  $a$ ,  $b$  และ  $c$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### แบบจำลองพฤติกรรมของระบบรากสายดิน

ในการศึกษาความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน จำเป็นต้องมีการคำนวณค่าแรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อยกระแสด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้มีความเข้าใจถึงพื้นฐานของแต่ละทฤษฎีและจะได้ใช้เป็นแนวทางในการเลือกทฤษฎีที่จะนำมาใช้สร้างแบบจำลองพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน ในส่วนนี้จะได้นำเสนอรายละเอียดของทฤษฎีที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ ทฤษฎีสายส่ง ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า ทฤษฎี Hybrid ทฤษฎีวงจร และทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วย

#### 4.1 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีสายส่ง (transmission line approach)

การทดลองและการวิเคราะห์พฤติกรรมทรานเซียนต์ที่มีกระแสอิมพัลส์ไหลผ่านด้วยทฤษฎีสายส่งมีขึ้นครั้งแรกในปี 1934 โดย Bewley [41-43] ได้นำเสนอสมการอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำแนวนอน เมื่อป้อนแหล่งจ่ายเป็น unit step voltage ดังสมการที่ (4.1) โดยสมมติฐานคือสายตัวนำเป็นสายส่งยาวที่มีความสูญเสีย (long lossy transmission line) และมีพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาวคงที่

$$Z_c(t) = \frac{1}{Gl_c \left\{ 1 - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8e^{-\delta}}{(2k-1)^2 \cdot 2\pi^2} \left[ \cos \omega_k t + \left( \frac{G}{4\omega_k C} - \frac{\omega_k C}{G} \right) \sin \omega_k t \right] \right\}} \quad (4.1 \text{ a})$$

$$\omega_k = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{(2k-1) \cdot 2\pi^2}{LCl_c^2} - \frac{G^2}{C^2}} \quad (4.1 \text{ b})$$

$$\delta = \frac{G}{2C} \quad (4.1 \text{ c})$$

ในสมการ (4.1) ค่า  $l_c$  คือความยาวรากสายดิน  $G$  คือค่าความนำ  $L$  คือค่าความเหนี่ยวนำ และ  $C$  คือค่าเก็บประจุของสายตัวนำ สมการ (4.1) แสดงว่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำมีผลกระทบจากค่าอิมพีแดนซ์เริ่มต้น ( $\sqrt{L/C}$ ) และผลจากความต้านทานรั่วคอนแทก ( $\frac{1}{Gl_c}$ ) และเวลาของการส่งผ่านผลทั้งสองจะขึ้นอยู่กับความต้านทานดิน และแรงดันเลิฟ ผลสรุปทั้งหมดได้ถูกรวบรวมไว้ในหนังสือ "Travelling wave in transmission systems" [43] ในปี 1943 Bellaschi [44] ได้

วิเคราะห์ผลตอบสนองแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสของแท่งรากสายดินที่มีต่อรูปร่างกระแสได้แก่ กระแสรูปคลื่น unit step, กระแสรูปคลื่น double exponential และ กระแสรูปคลื่น sinusoidal สมการแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสของรูปคลื่นกระแสดังกล่าวแสดงดังสมการที่ (4.2 a) - (4.2 c)

1. สมการแรงดันสำหรับกระแสรูปคลื่น unit step

$$e(t) = \frac{1}{G_t} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} t} \right] \quad (4.2 a)$$

2. สมการแรงดันสำหรับกระแสรูปคลื่น double exponential

$$e(t) = I_0 \left[ \frac{\sqrt{\frac{L_t \alpha}{G_t}} e^{-\alpha t}}{\tan(\sqrt{G_t L_t} \alpha)} - \frac{\sqrt{\frac{L_t \beta}{G_t}} e^{-\beta t}}{\tan(\sqrt{G_t L_t} \beta)} + \frac{\alpha - \beta}{G_t L_t} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n^2 \pi^2 e^{-\frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} t}}{\left( \alpha - \frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} \right) \left( \beta - \frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} \right)} \right] \quad (4.2 b)$$

3. สมการแรงดันสำหรับกระแสรูปคลื่น sinusoidal

$$e(t) = \frac{A}{G_t} - A \sqrt{\frac{L_t \beta}{G_t}} \times \frac{\cos \left[ Bt + 0.783 - \tan^{-1} \left( \frac{\sin \sqrt{2G_t L_t B}}{\sinh \sqrt{2G_t L_t B}} \right) \right]}{\frac{\sqrt{\sinh^2 \sqrt{2G_t L_t B} + \sin^2 \sqrt{2G_t L_t B}}}{\cosh \sqrt{2G_t L_t B} + \cos \sqrt{2G_t L_t B}}} - \frac{2AG_t B^2 L_t^2}{\pi^4} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\frac{n^2 \pi^2}{G_t L_t} t}}{n^4 + \frac{B^2 G_t L_t^2}{\pi^4}} \quad (4.2 c)$$

โดยกำหนดให้  $L_t$  คือความเหนี่ยวนำทั้งหมดหน่วยเป็น Henry,  $G_t$  คือความนำดินทั้งหมดหน่วยเป็น mhos,  $I_0$  คือค่ายอดกระแส ส่วน  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $A$  และ  $B$  คือค่าคงที่ที่สอดคล้องกับรูปคลื่นกระแส นอกจากนี้ใน [44] ได้มีการกล่าวถึงวงจรสมมูลที่มีการกระจายของความต้านทานและความเหนี่ยวนำอย่างเหมาะสมเพื่อคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของรากสายดิน และเมื่อเปรียบเทียบกับสมการ (4.1) พบว่า Bellachi ได้ผลของตัวเก็บประจุไว้

หลังจากนั้น Sunde ได้มีการนำเสนอการศึกษาผลตอบสนองของระบบรากสายดินทั้งความถี่ไฟฟ้ากระแสตรงและความถี่สูง โดยใช้การแก้สมการ Maxwell แบบสมบูรณ นอกเหนือยังเสนอการคำนวณความต้านทานไฟฟ้ากระแสตรงของโครงสร้างรากสายดินแบบต่างๆ [12] และเสนอทฤษฎีที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของรากสายดินเนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำที่ความถี่สูง โดย



ใช้ทฤษฎีสายส่งอธิบายพฤติกรรมรากสายดินแนวนอนที่ฝังอยู่ในดินภายใต้กระแสไฟฟ้าด้วยสมการ Telegrapher

$$\frac{dI(x, j\omega)}{dx} = -YV(x, j\omega) \quad (4.3 \text{ a})$$

$$\frac{dV(x, j\omega)}{dx} = -ZI(x, j\omega) \quad (4.3 \text{ b})$$

ในสมการที่ (4.3) ตัวแปร  $Z$  คือค่าอิมพีแดนซ์ตามยาวต่อหน่วยความยาวของตัวนำ และ  $Y$  คือแอดมิตแดนซ์ตามขวางต่อหน่วยความยาวของตัวนำที่มีค่าดังสมการ

$$Y(\Gamma) = \left[ Y_l^{-1} + \frac{1}{\pi(\sigma_{soil} + i\omega\epsilon_{soil})} \log\left(\frac{1.12}{\Gamma a}\right) \right]^{-1} \quad (4.3 \text{ c})$$

$$Z(\Gamma) = Z_s + \frac{i\omega\mu_0}{2\pi} \log \frac{1.85}{a(\gamma^2 + \Gamma^2)^{1/2}} \quad (4.3 \text{ d})$$

เมื่อ

$$\gamma^2 = i\omega\mu_0(\sigma_{soil} + i\omega\epsilon_{soil}) \quad (4.3 \text{ e})$$

และ  $Z_s$  คืออิมพีแดนซ์ภายในต่อหน่วยความยาว และ  $Y_l$  คือแอดมิตแดนซ์ภายในต่อหน่วยความยาว ซึ่ง  $Y_l$  จะมีค่าเป็นศูนย์เมื่อสายตัวนำสัมผัสกับดินอย่างสมบูรณ์  $a$  คือรัศมีของตัวนำรากสายดินและ  $\Gamma$  คือค่าคงที่การแพร่กระจาย ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (4.3 f)

$$\Gamma = [Z(\Gamma).Y(\Gamma)]^{1/2} \quad (4.3 \text{ f})$$

การนำทฤษฎีสายส่งมาอธิบายพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน เริ่มต้นเมื่อ Verma [45] Mazzetti [46] และ Velazquez [47] ใช้แนวคิดทฤษฎีสายส่งมาอธิบายพฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดินแนวนอนด้วยสมการ Telegrapher

$$\frac{\partial V}{\partial x} + L \frac{\partial I}{\partial t} + r_c I = 0 \quad (4.4 \text{ a})$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} + C \frac{\partial V}{\partial t} + GV = 0 \quad (4.4 \text{ b})$$

คำตอบของสมการหาได้จากกรการกระจายของแรงดันและกระแสบนตัวนำในโดเมน  $s$  ก่อนแล้วจึงแปลงกลับมาเป็นโดเมนเวลาโดยอินเวอร์สลาปลาซ ต่อมา Lorentzou [48] ได้ใช้สมการ Telegrapher ที่ (4.4) เพื่อหาการกระจายของกระแสและแรงดันโดยตรงในโดเมนเวลา โดยการคำนวณทั้งสองแบบนี้จะมีลักษณะที่ร่วมกันคือใช้ค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยความยาว

การใช้แบบจำลองสายส่งเพื่อศึกษาพฤติกรรมระบบรบกวนสายดินพบว่ามีความยืดหยุ่นในการคำนวณเนื่องจากสามารถคำนวณได้ทั้ง โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่ นอกจากนี้ยังคิดผลของการคาบเกี่ยวที่เกิดขึ้นระหว่างส่วนต่างๆของตัวนำ สามารถทำนายเวลาการแพร่กระจายคลื่นบนตัวนำ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับระบบรบกวนสายดินขนาดใหญ่ และแบบจำลองสายส่งยังมีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่าแบบจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้ความถูกต้องที่ยอมรับได้

#### 4.2 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีสานแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic approach)

การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีสานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นวิธีที่ใช้วิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบรบกวนสายดินที่แม่นยำที่สุด เพราะเป็นการแก้สมการ Maxwell ที่สมบูรณ์บนสมมติฐานที่น้อยที่สุด การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีนี้มีการนำเสนอครั้งแรกใน [49] โดยอาศัยหลักการของทฤษฎีสายอากาศ [50] คำตอบที่ได้อยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งการวิเคราะห์จะอาศัยการแปลงแบบฟูเรียร์หรือการแปลงแบบลาปลาซ การแก้สมการ Maxwell มีได้ 2 วิธีคือ Method of Moment (MoM) กับ Finite Element Method (FEM)

แบบจำลองพฤติกรรมของระบบรบกวนสายดินแบบ MoM ถูกนำเสนอโดย Greev [27,51-53] คำตอบของสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะอยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งคำนวณจากการแปลงแบบฟูเรียร์หรือการแปลงแบบลาปลาซกับตัวกลางที่มีสมบัติเชิงเส้น โดยในแบบจำลองใช้ทฤษฎี thin wire เพื่อนำมาใช้ประมาณการกระจายกระแสและประจุที่เกิดขึ้นบนระบบรบกวนสายดิน พร้อมกับใช้เงื่อนไขขอบเขต (boundary condition) ตรงพื้นผิวของตัวนำ การศึกษาจะพิจารณาจากรบกวนสายดินอย่างง่ายที่วางตัวในแนวแกน x ด้วยการคำนวณแบบ Method of Moment (MoM) ที่แบ่งรบกวนสายดินเป็นท่อนยาว  $l$  แล้วอธิบายส่วนประกอบกระแส  $I(x')$  และประจุ  $q(x')$  ที่ผิวท่อนตัวนำโดยใช้ศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก (magnetic vector potential,  $A_x(x)$ ) และศักย์สเกลาร์สนามไฟฟ้า (electric scalar potential,  $\phi(x)$ ) การพิจารณาสมการ Maxwell ทำได้ 2 รูปแบบคือรูปดิฟเฟอเรนเชียลหรือรูปอินทิเกรท

1) สมการ Maxwell ในรูปดิฟเฟอเรนเชียล [27]

$$E(x) = -\frac{\partial}{\partial x} \phi(x) - j\omega A_x(x) \quad (4.5 a)$$

$$\text{เมื่อ } \phi(x) = \int_l G_\phi(x, x') q(x') dx' \quad (4.5 b)$$

$$A_x(x) = \int_l G_{xx}^A(x, x') I(x') dx' \quad (4.5 c)$$

$$q = -\frac{l}{j\omega} \frac{dI}{dx'} \quad (4.5 d)$$

โดย  $G_\phi$  เป็นฟังก์ชัน Green ของศักย์สเกลาร์และ  $G_{xx}^A$  เป็นส่วนประกอบของฟังก์ชัน Green ของศักย์เวกเตอร์แม่เหล็ก

$$G_\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left( G_{11} + \frac{k_1^2 - k_0^2}{k_1^2 + k_0^2} G_{12} + k_1^2 V'_{11} \right) \quad (4.5 e)$$

$$G_{xx}^A = \frac{\mu_0}{4\pi} (G_{11} + W_{11}) \quad (4.5 f)$$

$$G_{11} = \exp(-jk_1 r_1) / r_1, \quad G_{112} = \exp(-jk_1 r_1) / r_1 \quad (4.5 g)$$

เมื่อ

$r_1$  คือระยะจากแหล่งกำเนิดจุดที่อยู่บนท่อนตัวนำมายังจุดที่อยู่บนตัวนำ

$r_2$  คือระยะจากแหล่งกำเนิดจุดอิมเมจตรงผิวดำนำที่อยู่เหนือดินมายังจุดที่อยู่บนตัวนำ

เทอม  $W_{11}$  และ  $V'_{11}$  ในสมการที่ (4.5 f) และ (4.5 g) ได้จากสมการอินทิเกรต Sommerfeld [54]

ใช้เทคนิค Method of Moment [41] สร้างเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ปกติ (generalized impedance) จากสนามไฟฟ้าใน (4.5 a) ได้ดังสมการ

$$Z_{mn} = -E_m \cdot I_n / I_n \quad (4.6 a)$$

โดย m และ n แทนลำดับของท่อนตัวนำและ  $E_m$  เป็นสนามไฟฟ้าสัมผัสที่จุดกึ่งกลางของผิวดำนำ จากนั้นคำนวณเมตริกซ์การกระจายกระแสที่เกิดขึ้นบนตัวนำซึ่งเป็นคำตอบของสมการเมตริกซ์ (4.6 b)

$$[Z][I] = [Z_s I_s] \quad (4.6 b)$$

เมื่อ

$[Z]$  เป็นเมตริกซ์อิมพีแดนซ์ปกติ

$[Z_s I_s]$  เป็นเมตริกซ์กระตุ้น

$I_s$  คือกระแสที่ปล่อยลงรากสายดิน

$Z_s$  คืออิมพีแดนซ์คาบเกี่ยวระหว่างท่อนที่ปล่อยกระแสไปยังท่อนอื่น

ถ้ารู้การกระจายกระแสก็จะสามารถคำนวณค่าศักย์สเกลาร์ที่จุดปล่อยกระแส  $V_s$  และค่าอิมพีแดนซ์ที่เทียบกับดินตรงจุดปล่อยกระแสดังสมการ

$$Z_g = \frac{V_s}{I_s} = \frac{1}{I_s} [I][Z_s] = [Z]^{-1} \cdot [Z'] [Z_s] \quad (4.6 c)$$



2) สมการ Maxwell ในรูปอินทิกราลดังสมการที่ (4.7)

$$E^s = \frac{1}{4\pi \cdot j\omega\epsilon} (\nabla\nabla - \gamma^2) \int_1 t' J_1(r') G_n(r, r') dl \quad (4.7 a)$$

$$G_n(r, r') = G_i(r, r') + G_l(r, r') + G_s(r, r') \quad (4.7 b)$$

เมื่อ  $E^s$  คือสนามไฟฟ้าที่กระจายตามผิวทั้งหมด  $t' J_1(r')$  คือกระแสที่ไหลในตัวนำ  $\epsilon = \epsilon + \frac{\sigma}{j\omega}$  เป็นค่า permittivityเชิงซ้อน  $\sigma$  เป็นความนำ  $\epsilon$  เป็นค่า permittivity  $\mu$  เป็นค่า permeability  $G_n(r, r')$  คือฟังก์ชัน Green ที่สมบูรณ์  $G_i(r, r')$  และ  $G_l(r, r')$  คือฟังก์ชัน Green dyadic สำหรับสนามไฟฟ้าที่รัศมี  $r$  เนื่องจากอิลิเมนต์กระแสกับอิมเมจ [55] และ  $G_s(r, r')$  คือเทอมแก้ไข (ตรงรอยต่อตัวกลางอากาศกับดิน) ซึ่งจำเป็นในการหาค่าตอบของสนามไฟฟ้า

เงื่อนไขขอบเขตคือสนามไฟฟ้าตามยาวทั้งหมด (longitudinal electric field) ตรงพื้นผิวดำนำที่สอดคล้องกับสมการเมื่อ  $E_l$  เป็นสนามไฟฟ้าตกกระทบ  $Z_s$  คือค่าอิมพีแดนซ์ภายในอนุกรมต่อหน่วยความยาวของตัวนำที่เกิดผลของ skin effect ตามความสัมพันธ์ (4.8)

$$t \cdot (E^i + E^s) = I Z_s \cdot \Delta l \quad (4.8)$$

สมการพีชคณิต (4.8) เรียกว่า Method of Moment (MoM) ซึ่งจริงๆคือการแปลงจากรูปอินทิกราลเป็นพีชคณิตเชิงเส้น สำหรับแบบจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆที่ถูกพัฒนาและนำมาใช้ได้แก่ Nekhoul [56-57] เริ่มจากสมการพลังงานสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก ในรูป partial differentiation ของสมการ Maxwell โดยใช้ vector potential ( $\vec{A}$ ) และ scalar potential ( $V$ ) ในโดเมน  $s$  และ พิจารณา volume ของระบบ ด้วย Finite Element Method (FEM) ภายได้สมมติฐานพลังงานในระบบต่ำสุด ได้ฟังก์ชันสุดท้ายดังสมการ (4.9 a) และ (4.9 b) สำหรับสนามในดินและ (4.9 c) สำหรับสนามในอากาศ ซึ่งเกี่ยวข้องกับฟังก์ชัน weighting ได้แก่  $\vec{W}$  สำหรับ vector potential และ  $w$  สำหรับ scalar potential

$$\int_{\Omega} \left( \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{W}) (\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \vec{W}) (\nabla \cdot \vec{A}) + (\sigma_{soil} + j\omega\epsilon_{soil}) (j\omega \vec{W} \cdot \vec{A} + \vec{W} \cdot \nabla V) \right) d\Omega = 0 \quad (4.9 a)$$

$$\int_{\Omega} (\sigma_{soil} + j\omega\epsilon_{soil}) \nabla \omega \cdot (j\omega \vec{A} + \nabla V) d\Omega = 0 \quad (4.9 b)$$

$$\int_{\Omega} \left( \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{W}) (\nabla \times \vec{A}) + \frac{1}{\mu_0} (\nabla \vec{W}) (\nabla \cdot \vec{A}) \right) d\Omega = 0 \quad (4.9 c)$$

เพื่อให้สามารถคำนวณเชิงเลขคณิต สมการ (4.9) จะถูกแปลงเป็นสมการเชิงเส้น โดยแบ่งระบบทั้งหมดเป็นส่วนเล็กๆ  $N$  อิลิเมนต์ เวลาที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลองนี้จะขึ้นอยู่กับการแปลงเงื่อนไขขอบเขตของตัวกลางอากาศและดินจากแบบเปิดให้เป็นแบบปิด ด้วย Spatial transformation [58-59] เพื่อลดขนาดของปัญหา

ข้อดีของแบบจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่คำนวณด้วย FEM คือมีความยืดหยุ่นในการคำนวณ โดยสามารถแบ่งส่วนของโดเมนปัญหา (ตามโครงสร้างการจัดวางหรือตัวกลาง) ทำให้สามารถนำมาใช้กับรากสายดินที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ อย่างไรก็ตามวิธีนี้จะมีความยากต่อการทำความเข้าใจมากกว่าวิธี MoM เพราะต้องมีการแปลงสมการ Maxwell ก่อนการแก้สมการหาคำตอบ

#### 4.3 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี hybrid (hybrid approach)

สำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินด้วยทฤษฎี hybrid ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Dwaitlabi ในปี 1988 [60-61] จากนั้นก็มีการปรับปรุงโดย Andolfato [62] ในปี 2000 คำว่า Hybrid คือแบบจำลองเกิดจากการรวมกันของแบบจำลองสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าและวงจรไฟฟ้า วิธีการ Hybrid มีขั้นตอนดังนี้

1. แบ่งระบบรากสายดินทั้งหมดเป็น  $n$  อิลิเมนต์เล็กๆ สนามไฟฟ้าแต่ละอิลิเมนต์จะหาได้จากสมการ Maxwell

$$E = -\text{grad}V - j\omega\vec{A} \quad (4.10)$$

โดย  $\vec{A}$  vector potential และ  $V$  scalar potential เมื่อมองเป็นแต่ละอิลิเมนต์  $k$  จากสมการ (4.10) สามารถเขียนใหม่เป็นสมการ (4.11)

$$Z_{sk}I_k + \sum_{i=1}^n (V_{ave_k} - V_{ave_i}) + j\omega \sum_{i=1}^n \int_{l_k} \vec{A}_{ik} dl = 0 \quad (4.11)$$

เมื่อ  $Z_{sk}$  คือ อิมพีแดนซ์ภายในของตัวนำ  $k$  ที่รวมผล skin effect ส่วน  $V_{ave_k}$  และ  $V_{ave_i}$  คือศักย์ไฟฟ้าบนอิลิเมนต์  $k$  และอิลิเมนต์  $i$  โดย Andolfato ได้ให้เหตุผลว่า  $V_{ik} = V_{ave_k} - V_{ave_i}$  เพราะผลจากการคาบเกี่ยวของตัวเก็บประจุและ  $j\omega \int_{l_k} \vec{A}_{ik} dl$  เป็นผลจากการคาบเกี่ยวของตัวเหนี่ยวนำ ดังนั้นสามารถเขียนสมการ (4.11) ได้ใหม่เป็น (4.12)

$$Z_{sk}I_k + \sum_{i=1}^n (C-G)_{ik} I_{ik} + j\omega \sum_{i=1}^n L_{ik} I_i = 0 \quad (4.12)$$

สมการ (4.12) อยู่ในรูปสมการวงจร อย่างไรก็ตามส่วนประกอบการคาบเกี่ยวตัวนำและตัวเก็บประจุตามสมการที่ (4.12) จะคำนวณได้จากทฤษฎีสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าดังสมการ (4.13)

$$j\omega L_{ik} = \frac{j\omega}{I_i} \int_{I_k} \vec{A}_{ik} dl \quad (4.13 \text{ a})$$

$$(C-G)_{ik} = \frac{V_{ik}}{I_{\perp ik}} = \frac{1}{4\pi\sigma_{soil}} \int_{I_i} \frac{e^{-\gamma r}}{r} dl + \zeta \frac{1}{4\pi\sigma_{soil}} \int_{I_i} \frac{e^{-\gamma r'}}{r'} dl \quad (4.13 \text{ b})$$

เมื่อ  $\vec{A}_{ik}$  คือ vector potential บนอิลิเมนต์  $k$  เนื่องจากกระแสอิลิเมนต์  $i$  ส่วน  $I_k$  และ  $I'_k$  คือความยาวอิลิเมนต์  $k$  และ ความยาวอิลิเมนต์  $k'$ ,  $I_i$  คือกระแสไหลตามอิลิเมนต์,  $I_{\perp ik}$  คือการกระจายของกระแสจากอิลิเมนต์  $i$  ไป  $k$  ผ่านดิน,  $r$  และ  $r'$  คือระยะจากแหล่งจ่ายกระแสและอิมเมจของแหล่งจ่ายไปยังจุดที่ต้องการคำนวณสนาม  $\sigma = \sigma_{soil} + j\omega\epsilon_{soil}$  เป็นความนำเชิงซ้อนของดิน,  $\gamma = \sqrt{i\omega\mu_0(\sigma_{soil} + i\omega\epsilon_{soil})}$  คือค่าคงที่การแพร่กระจายและ  $\zeta$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของความนำและความจุ

ข้อดีของการวิเคราะห์แบบ hybrid คือจะรวมอิทธิพลของความถี่ที่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ภายในรากสายดิน ซึ่งช่วยให้ผลที่ได้ถูกต้องมากขึ้นกว่าการใช้ทฤษฎีวงจรเพียงอย่างเดียว โดยเฉพาะกับแหล่งจ่ายความถี่สูง

#### 4.4 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีวงจร (circuit approach)

ทฤษฎีวงจรสำหรับวิเคราะห์พฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดย Meliopoulos et.al. ในปี 1983 [63] โดยใช้พารามิเตอร์ของแต่ละอิลิเมนต์ที่อิสระจากความถี่ได้แก่ค่าความเหนี่ยวนำ ( $\Delta L$ ) ค่าเก็บประจุ ( $\Delta C$ ) ความนำ ( $\Delta G$ ) และความต้านทานภายในท่อนตัวนำ ( $\Delta r_c$ ) วงจรสมมูลในรูปของสายส่งแบบไม่มีความสูญเสีย (lossless transmission line) ที่มีความนำแทนกระแสรั่วออกจากตัวนำแสดงดังรูปที่ 4.1 (a) ซึ่งแปลงได้เป็นวงจรใหม่ดังรูปที่ 4.1 (b)

ค่าแรงดัน โนดหาได้จากการสร้างสมการ โนดของวงจรสมมูลที่แทนระบบรากสายดินทั้งหมด ด้วยกฎของ Kirchoff ดังสมการที่ (4.14)

$$[Y][V(t)] = [I_s(t)] + [b(t - \Delta t, \dots)] \quad (4.14)$$

เมื่อ

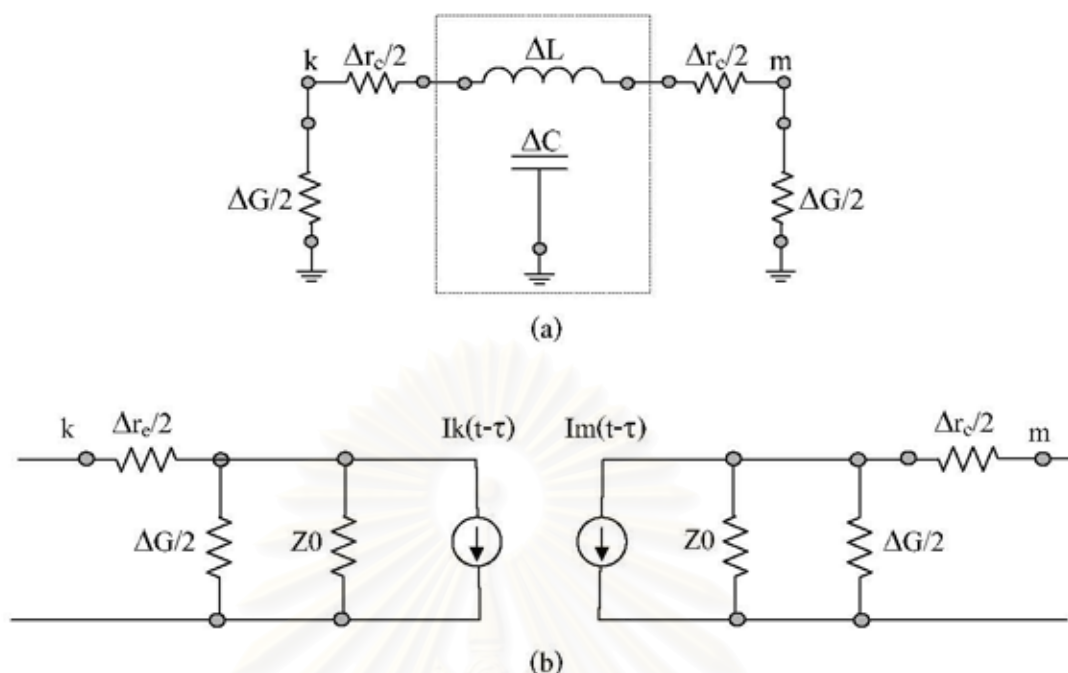
$[Y]$  เป็นเมตริกซ์แอดมิตแตนซ์ของ โนดของวงจรสมมูล

$[V(t)]$  เป็นเวกเตอร์แรงดันของ โนดที่เวลา  $t$

$[I_s(t)]$  เป็นแหล่งจ่ายกระแสภายนอกที่ป้อนให้กับ โนด

$[b(t - \Delta t, \dots)]$  เป็นเวกเตอร์กระแสเดิมที่ป้อนให้กับ โนด





รูปที่ 4.1 (a) และ (b) วงจรสมมูลตามทฤษฎีวงจรของ Meliopoulos et.al

หลังจากนั้น Thapar และ Gupta [64] ได้นำทฤษฎีวงจรมาพัฒนาเป็นแบบจำลองกราวด์กริดภายใต้กระแสฟ้าผ่า พร้อมทั้งตรวจสอบกับการทดสอบจริง โดยใช้วิธีพารามิเตอร์สมมูลเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ของรากสายดิน แต่ในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดคือ

1. การสมมติให้การกระจายกระแสในกราวด์กริดมีค่าแตกต่างกัน
2. สนใจเฉพาะกราวด์กริดแบบจัตุรัส (square ground grids)
3. ความต้านทานรากสายดินคิดจากการสมมติเป็นแผ่นกลมและขนาดประสิทธิผลคิดจากหลักการสมมูลพลังงาน
4. ไม่คิดผลการกระจายกระแสของรากสายดินแห่งแนวโค้งที่ฝังดิน

M. Ramamoorthy [65] เสนอการปรับปรุงการคำนวณพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณเพื่อให้แบบจำลองวงจรสามารถอธิบายพฤติกรรมทรานเซียนต์ของกราวด์กริดซึ่งมีความยาวแต่ละท่อน  $l$  รัศมี  $a$  ฝังที่ความลึก  $d$  ดังนี้

1. ความต้านทานของรากสายดิน คือความต้านทานดินที่เกิดจากทุกส่วนของระบบรากสายดิน
2. ความนำรั่ว (leakage conductance) ที่กระจายบนรากสายดินสามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (4.15 a)

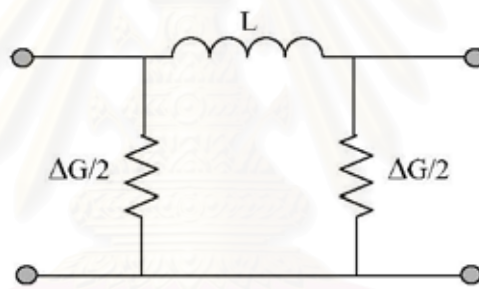
$$G = \frac{\pi l}{\rho} \left( \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right)^{-1} \text{ mho} \quad (4.15 \text{ a})$$

3. ความเหนี่ยวนำตัวเอง ( $L$ ) ของท่อนตัวนำในกราวด์กริดจะคำนวณได้ตามสมการที่ (4.15 b)

$$L = 0.002l \left( \ln \left( \frac{2l}{a} \right) - 1 \right) \quad \mu\text{H} \quad (4.15 \text{ b})$$

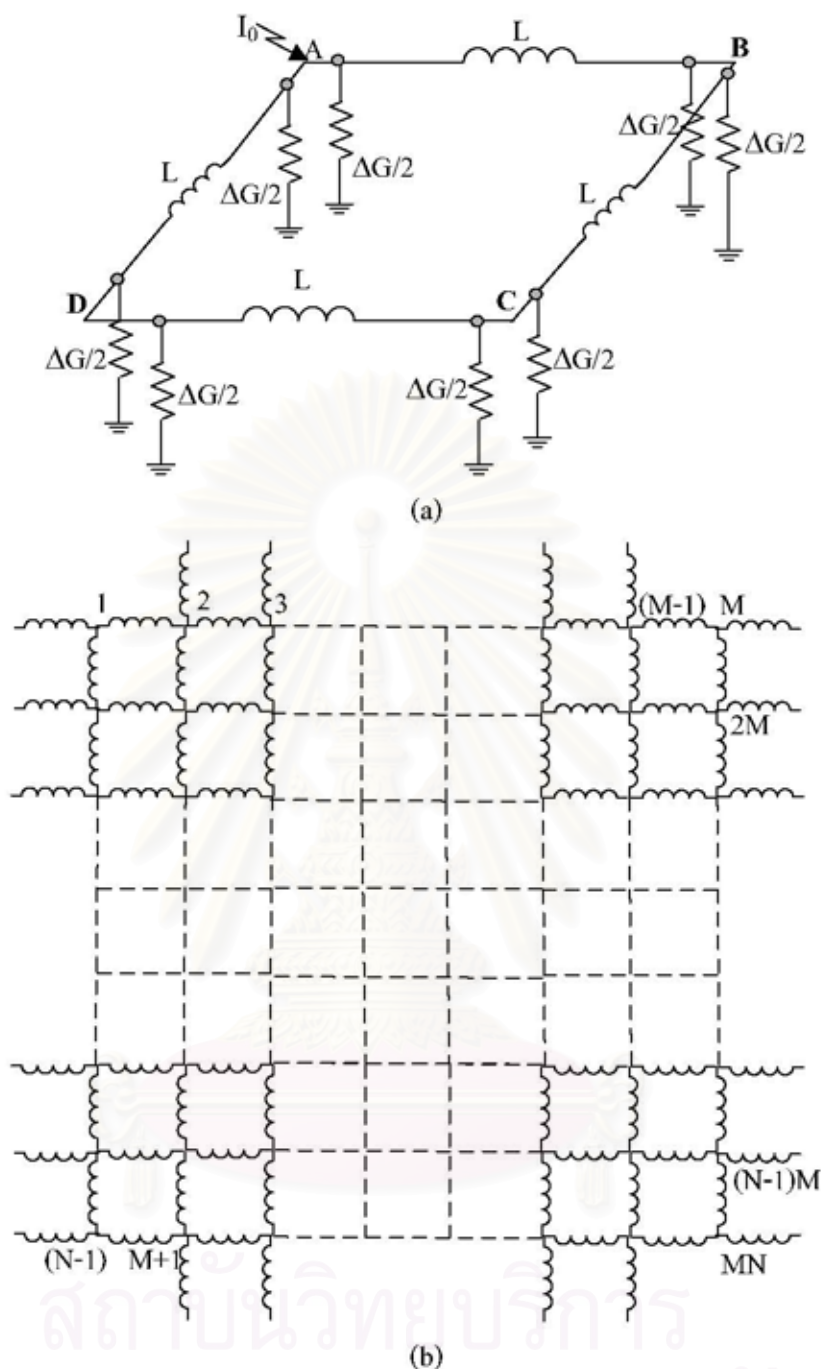
4. คิดผลของค่าตัวเก็บประจุของรากสายดิน

การเรียงตัวของระบบรากสายดินจะแทนด้วย การกระจายความต้านทานหรือความนำต่อหน่วยความยาว การกระจายตัวเก็บประจุต่อหน่วยความยาวและการกระจายความเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาว โดยถือว่าค่าตัวเก็บประจุของรากสายดินจากการต่อขนานกันของรากสายดินมีค่าน้อยมาก ค่าพารามิเตอร์โดยประมาณของตัวเก็บประจุมีค่า  $10^9$  F/m, ค่า  $\epsilon$  ของโลกมีค่าประมาณ 9, ความต้านทานดิน 3000  $\Omega\cdot\text{m}$  จะได้  $RC = 0.01\text{-}0.1 \mu\text{s}$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าเวลาน้ำคลื่นของกระแสฟ้าผ่า เพราะฉะนั้นจึงสามารถสร้างแบบจำลองแต่ละอิลิเมนต์ด้วย  $L$  และ  $G$  เป็นลักษณะของวงจร  $\pi$  ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แบบจำลองอิลิเมนต์ของทฤษฎีวงจร

แบบจำลองนี้จะมองกราวด์กริดเทียบเท่ากับแผ่นวงกลม (circular plate) ซึ่งทำให้การคำนวณง่ายกว่าแบบกระจายพารามิเตอร์ การวิเคราะห์ห้วงจรสมมูลของกราวด์กริดแบบจัดรัสแสดงดังรูปที่ 4.3 (a) และการคำนวณกราวด์กริด  $N$  แถว  $M$  คอลัมน์ ซึ่งมีจำนวน โหนดทั้งหมดในกราวด์กริดเท่ากับ  $N \times M$  แสดงดังรูปที่ 4.3 (b) การวิเคราะห์พฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินแห่งแนวตั้งที่ฝังอยู่รอบๆกราวด์กริดจะทำโดยใช้ทฤษฎีวงจรสร้างสมการโหนด มี  $[I]$  เป็น force function  $[L]^{-1}$  เป็น bus admittance matrix และ  $[G]$  เป็น conductance matrix ดังสมการที่ (4.16 a) และ (4.16 b)



รูปที่ 4.3 (a) วงจรสมมูลกราวด์กริดแบบจัตุรัส (b) กราวด์กริด  $N$  แถว  $M$  คอลัมน์

$$\frac{1}{s}[L]^{-1}[V] + [G][V] = [I] \quad (4.16 \text{ a})$$

$$[L]^{-1}[V] + [G]\frac{d}{dt}[V] = \frac{d}{dt}[I] \quad (4.16 \text{ b})$$

จัดรูปใหม่ได้ดังสมการที่ (4.16 c) ซึ่งสามารถแก้สมการได้โดยวิธี Runge-Kutta แต่ก็มีข้อควรระวังในการเลือกค่า timestep ถ้าเลือกค่าที่ไม่เหมาะสมแล้วจะหาคำตอบไม่ได้



$$\frac{d}{dt}[V] = [G]^{-1} \left\{ \frac{d}{dt}[I] - [L]^{-1}[V] \right\} \quad (4.16 c)$$

วิธีนี้มีประโยชน์คือ สามารถใช้กับกราวด์กริดขนาดต่างๆได้ สามารถคำนวณแรงดันได้ทุกโหนด สามารถป้อนกระแสตรงโนดไหนก็ได้เพราะอยู่ในรูปของเมตริกซ์กระแส  $[I]$  แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถทำนายเวลาล่าช้า (delay time) ของเสิร์จ

#### 4.5 การวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีสายส่งปรับปรุง (Improved transmission line approach)

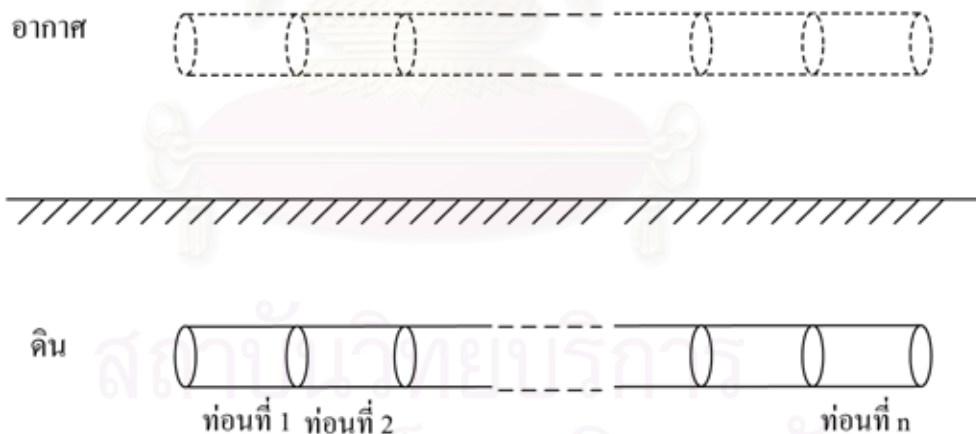
การศึกษาผลตอบสนองของระบบรากสายดินที่มีต่อกระแสฟ้าผ่า ด้วยทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นยังมีข้อจำกัด โดยแบบจำลองระบบรากสายดินด้วยทฤษฎีสนามไฟฟ้าที่อาศัยการแก้สมการแมกซ์เวลล์ในโดเมนความถี่ แม้ว่าจะมีสมมติฐานน้อยแต่แบบจำลองก็ยังมีข้อซับซ้อนสูงและใช้เวลาคำนวณนาน ส่วนแบบจำลองระบบรากสายดินด้วยทฤษฎีวงจรไฟฟ้า แม้ว่าจะมีการคำนวณในโดเมนเวลาและคิดผลการคาบเกี่ยวร่วมระหว่างอุปกรณ์รากสายดิน แต่ยังมีข้อเสียคือไม่สามารถทำนายเวลาล่าช้าของเสิร์จ ส่วนการจำลองด้วยทฤษฎีสายส่งจะไม่มีข้อจำกัดเพราะคำนวณได้ทั้งโดเมนเวลาหรือโดเมนความถี่ สามารถคำนวณโดยรวมผลของความคาบเกี่ยวร่วมระหว่างส่วนต่างๆของรากสายดินและสามารถทำนายเวลาล่าช้าของเสิร์จ

เนื่องจากทฤษฎีสายส่งมีข้อดีอยู่หลายประการ ทำให้มีการใช้ทฤษฎีสายส่งอย่างแพร่หลายและเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงมีการพัฒนาและแก้ไขข้อจำกัดต่างๆ จนถึงปัจจุบัน โดยเรียกชื่อใหม่ว่าทฤษฎีสายส่งปรับปรุง (improved transmission line) ซึ่งมีลำดับการพัฒนาดังนี้

ในงานวิจัย [66] และ [67] มีการนำทฤษฎีสายส่งมาใช้โดยการแบ่งเป็นอิลิเมนต์คั่นสั้นๆ เพื่อจะสร้างเป็นเมตริกซ์ความต้านทานแล้วใช้ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าหาค่าตอบ ส่วนงานวิจัย [68-71] ได้ใช้แนวคิดสายส่งแบบสม่ำเสมอ (uniform transmission line) ภายใต้งานวิจัยที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ต่อหน่วยคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง สำหรับ [68] จะใช้สมการ Sunde สำหรับค่านำรากสายดินเดี่ยวความยาวอนันต์ที่คิดค่าต่อหน่วยของอิมพีแดนซ์แนวอนและแอดมิตแตนซ์แนววางที่ขึ้นกับความถี่ โดยจะเปลี่ยนรัศมีค่านำจาก  $a$  เป็น  $\sqrt{2ad}$  อย่างไรก็ตามหลักการดังกล่าวยังไม่มีการสรุปที่แน่ชัดเพราะค่าที่ได้จากการจำลองและค่าจริงจากการทดลองยังแตกต่างกันอยู่ 13 - 40%

ในงานวิจัย [69] ได้ใช้พารามิเตอร์ต่อหน่วยที่คำนวณโดยสมการ Sunde บนค่านำยาว  $l_c$  มาวิเคราะห์พฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดินที่ความยาวค่าต่างๆในโดเมนเวลาเสมือนว่าค่าต่อหน่วยอิสระจากความยาวของค่านำ แต่จากผลการศึกษา [72] พบว่าการทำนายแรงดันที่จุดปล่อยกระแสของค่านำความยาวจำกัดยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ และในทางตรงข้ามเมื่อมีการปล่อยกระแสฟ้าผ่าลงบนค่านำความยาวอนันต์กลับพบว่าไม่มีโครงสร้างสนามเกิดขึ้นซึ่งความจริงแล้วควรมีสนาม quasi TEM ดังนั้นค่าต่อหน่วยของความเหนี่ยวนำ ( $l$ ) ตัวเก็บประจุ ( $c$ ) และความนำ ( $g$ ) จึงควรคิดรวมผลของความยาวค่านำด้วย

จากข้อสรุปข้างต้นนักวิจัยบางคนเริ่มคิดค่า  $l$ ,  $c$  และ  $g$  ของตัวนำความยาวจำกัดรวมทั้งหมดก่อน โดยใช้สมการ Sunde แล้วค่อยกระจายค่าดังกล่าวไปตลอดความยาวตัวนำ เพื่อให้เป็นค่าต่อหน่วยก่อนนำมาใช้แก้สมการ Telegrapher อย่างไรก็ตามวิธีนี้ไม่สามารถใช้ทำนายความยาวประสิทธิผลของตัวนำ ซึ่งนิยามเป็นความยาวของตัวนำคิดจากจุดปล่อยกระแส ที่แรงดันทรานเซียนต์อิสระจากความยาว ทำนองเดียวกับนิยามของพื้นที่ประสิทธิผลของกราวด์กริด ดังนั้นใน [37] Theethayi ได้นำเสนอการคำนวณค่าต่อหน่วยที่แก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว โดยเริ่มจากการแบ่งรากสายดินเดี่ยวฝังในดิน half space homogeneous ที่มีความต้านทาน  $\rho_{soil}$  ออกเป็นอิลิเมนต์พร้อมกับคิดผลของอิมเมจดังรูปที่ 4.4 การคำนวณค่าต่อหน่วยความยาว  $l$ ,  $c$  และ  $g$  ของแต่ละท่อนตัวนำจะเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการแก้สมการ Telegrapher โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์พฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินจะได้อธิบายในส่วนถัดไปหลังจากการคำนวณค่าต่อหน่วยความยาว ในระหว่างการแก้สมการ Telegrapher ด้วยเทคนิค FDTD จะกำหนด  $dx$  ให้มีค่าเท่ากับความยาวของตัวนำแต่ละท่อน  $l_{seg}$  ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าคงที่ตลอดช่วงเวลาของการจำลอง  $dt$  เงื่อนไขในการเลือกค่าดังกล่าวจะกำหนดจากค่า  $dx/dt$  ต้องมีค่ามากกว่าความเร็วการแพร่กระจายของคลื่นในดิน  $v_{air}/\epsilon_r$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญที่จะทำให้การจำลองมีคำตอบที่ถูกต้องและมีเสถียรภาพ เมื่อ  $v_{air}$  เป็นความเร็วแสงในอากาศ และ  $\epsilon_r$  เป็นค่าความซาบซึมได้ของสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ของดิน



รูปที่ 4.4 รากสายดินเดี่ยวฝังในดิน half space homogeneous

ค่าความต้านทานต่อหน่วย ( $r_e$ ) ความยาวของตัวนำแต่ละท่อนสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.17)

$$r_e = \frac{\rho_e}{2\pi \cdot a^2} \quad (4.17)$$

เมื่อ

a รัศมีค่านำ

$\rho_c$  ความต้านทานค่านำ

เมตริกซ์อิลิเมนต์ของความต้านทานสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4.18)

$$R_{ji} = \frac{v_{ji}}{I_i} = \frac{\rho_{soil}}{4\pi l_j} \iint_{l_j, l_i} \frac{1}{r'_{ji}} dl dl + k_{sigma} \cdot \frac{\rho_{soil}}{4\pi l_j} \iint_{l_j, l_i} \frac{1}{r'_{ji}} dl dl \quad (4.18 a)$$

$$k_{sigma} = \frac{\sigma_{soil} - \sigma_{air}}{\sigma_{soil} + \sigma_{air}} \quad (4.18 b)$$

เมตริกซ์อิลิเมนต์ของซัสเซปแตนส์คำนวณได้ดังสมการที่ (4.19)

$$P_{ji} = \frac{v_{ji}}{q_i} = \frac{1}{4\pi\epsilon_{soil} l_j} \iint_{l_j, l_i} \frac{1}{r'_{ji}} dl dl + k_{epsilon} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_{soil} l_j} \iint_{l_j, l_i} \frac{1}{r'_{ji}} dl dl \quad (4.19 a)$$

$$k_{epsilon} = \frac{\epsilon_{soil} - \epsilon_{air}}{\epsilon_{soil} + \epsilon_{air}} \quad (4.19 b)$$

เมตริกซ์อิลิเมนต์ของอินดักแตนส์คำนวณได้ดังสมการที่ (4.20)

$$L_{ii} = \frac{v_{ii}}{i_i} = \frac{\mu_0}{4\pi l_i} \iint_{l_i, l_i} \frac{1}{r'_{ii}} dl dl \quad (4.20 a)$$

$$L_{ji} = \frac{v_{ji}}{i_i} = \frac{\mu_0}{4\pi l_j} \iint_{l_j, l_i} \frac{1}{r'_{ji}} d\vec{l} \cdot d\vec{l} \quad (4.20 b)$$

นำค่าพารามิเตอร์ของแต่ละอิลิเมนต์มาสร้างเป็นเมตริกซ์

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

การวิเคราะห์พฤติกรรมของรากสายดินภายใต้กระแสฟ้าผ่า ด้วยสมการ Telegrapher ค่าคาบเกี่ยวร่วมทั้งหมดระหว่างส่วนต่างๆของรากสายดิน จะอยู่ในรูปค่าต่อหน่วยความยาวของความเหนี่ยวนำ ( $l$ ) ค่าตัวเก็บประจุ ( $c$ ) และความนำ ( $g$ ) ที่มีค่าขึ้นอยู่กับตำแหน่งและเวลา (space time dependent)

ค่ากระแสและแรงดันที่เกิดขึ้นบนรากสายดินจากแหล่งกำเนิดแรงดัน  $V_F(z, t)$  และแหล่งกำเนิดกระแส  $I_F(z, t)$  จะหาได้จากคำตอบของสมการ (4.22)



$$\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} + l \frac{\partial I(z,t)}{\partial t} + rI(z,t) = V_F(z,t) \quad (4.22 \text{ a})$$

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} + c \frac{\partial V(z,t)}{\partial t} + gV(z,t) = I_F(z,t) \quad (4.22 \text{ b})$$

การแก้สมการ Telegrapher อย่างรวดเร็วและมีระดับความถูกต้องที่ยอมรับได้จะใช้เทคนิค finite-difference time-domain (FDTD) [36] แปลงสมการกระแสและแรงดันให้อยู่ในรูป discrete โดยการแบ่งเป็นอิลิเมนต์จำนวน NDZ แต่ละอิลิเมนต์จะมีความยาว  $\Delta z$  จะได้จำนวนโนดแรงดัน NDZ+1 และจำนวนโนดกระแส NDZ โดยโนดกระแสและโนดแรงดันที่ติดกันจะห่างกันอยู่  $\Delta z / 2$  และในทำนองเดียวกันก็แบ่งเวลาออกเป็นช่วงเวลา  $\Delta t$  ในทางเวลาโนดแรงดันและโนดกระแสจะห่างกัน  $\Delta t / 2$  ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (a) การประมาณสมการดิฟเฟอเรนเชียลที่ (4.22) ด้วยหลักการ central difference จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันในแต่ละอิลิเมนต์ดังสมการที่ (4.23 a) และ (4.23 b) เมื่อ subscript  $n$  แทนเวลา และ  $k$  แทนตำแหน่ง โดยการคำนวณแรงดันและกระแสบนรากสายดินจะทำไปพร้อมกันดังรูปที่ 4.5 (b)

$$\frac{V_{k+1}^{n+1} - V_k^{n+1}}{\Delta z} + l \frac{I_k^{n+3/2} - I_k^{n+1/2}}{\Delta t} + r \frac{I_k^{n+3/2} + I_k^{n+1/2}}{2} = \frac{V_{Fk}^{n+3/2} - V_{Fk}^{n+1/2}}{2} \quad (4.23 \text{ a})$$

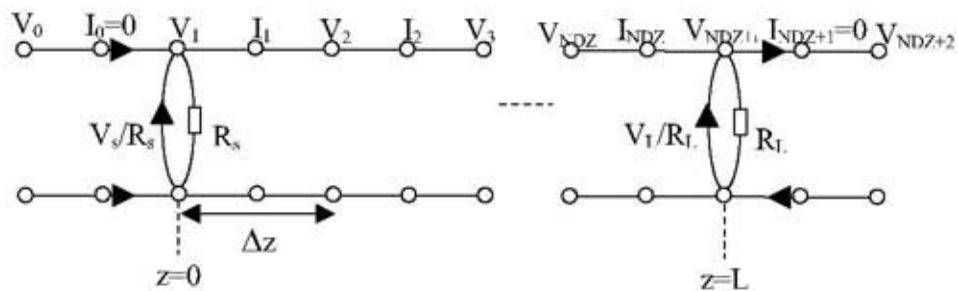
$$\frac{I_k^{n+1/2} - I_{k-1}^{n+1/2}}{\Delta z} + c \frac{V_k^{n+1} - V_k^n}{\Delta t} + g \frac{V_k^{n+1} + V_k^n}{2} = \frac{I_{Fk}^{n+1} - I_{Fk}^n}{2} \quad (4.23 \text{ b})$$

จัดรูปสมการที่ (4.23) ใหม่ในรูป recursion ได้เป็นสมการที่ (4.24)

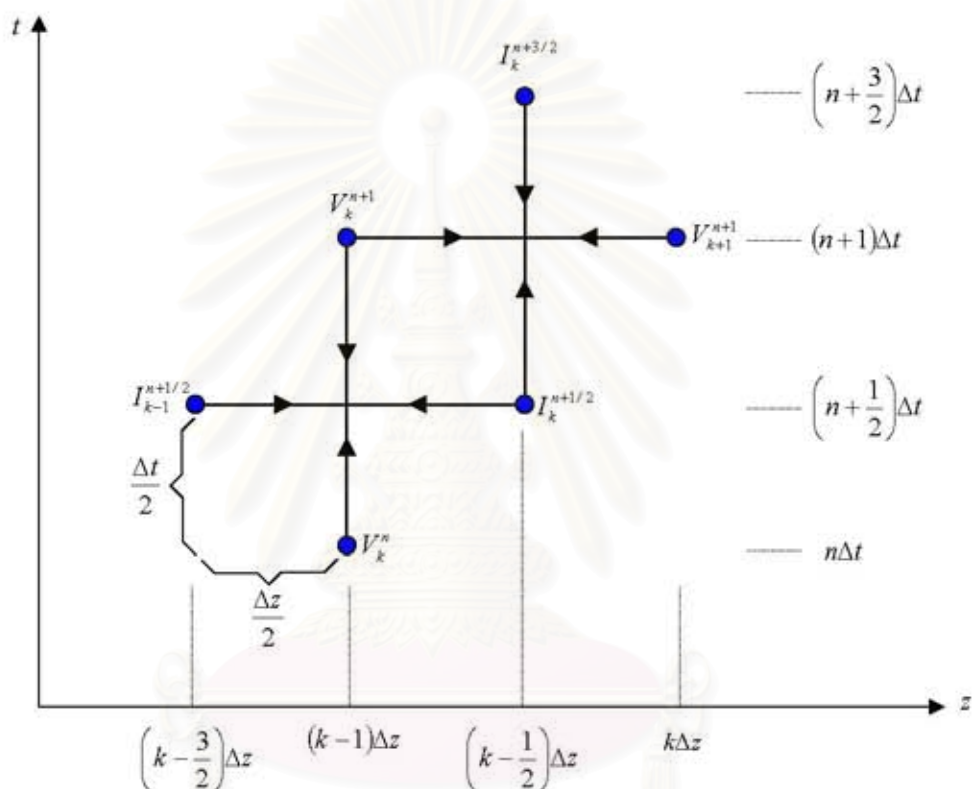
$$\left( l \frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{r}{2} \Delta z \right) I_k^{n+3/2} = \left( l \frac{\Delta z}{\Delta t} - \frac{r}{2} \Delta z \right) I_k^{n+1/2} - (V_{k+1}^{n+1} - V_k^{n+1}) + \frac{\Delta z}{2} (V_{Fk}^{n+3/2} + V_{Fk}^{n+1/2}) \quad (4.24 \text{ a})$$

$$\left( c \frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{g}{2} \Delta z \right) V_k^{n+1} = \left( c \frac{\Delta z}{\Delta t} - \frac{g}{2} \Delta z \right) V_k^n - (I_k^{n+1/2} - I_{k-1}^{n+1/2}) + \frac{\Delta z}{2} (I_{Fk}^{n+1} + I_{Fk}^n) \quad (4.24 \text{ b})$$

จากสมการที่ (4.24 a) เมื่อพิจารณาเงื่อนไขเฉพาะของ โนด จะได้สมการแรงดันของ โนด แหล่งจ่าย ( $k=1$ ) ดังสมการที่ (4.25 a) สมการแรงดันของ โนดสุดท้ายที่มีโหนดต่ออยู่ ( $k=NDZ+1$ ) ดังสมการที่ (4.25 b) และสมการแรงดันของ โนดที่เหลือ ( $k=2, 3, \dots, NDZ$ ) ดังสมการที่ (4.25 c)



(a)



(b)

รูปที่ 4.5 (a) แบบจำลองสายดินในรูป discrete

(b) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในแต่ละอิลิเมนต์

$$V_1^{n+1} = \left( R_s \cdot \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{1}{2} \right)^{-1} \times \left[ \left( R_s \cdot \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta z}{\Delta t} - \frac{1}{2} \right) V_1^n - R_s \cdot I_1^{n+1/2} + \frac{(V_z^{n+1} + V_z^n)}{2} \right] \quad (4.25 \text{ a})$$

$$V_{NDZ+1}^{n+1} = \left( R_L \cdot \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{1}{2} \right)^{-1} \times \left[ \left( R_L \cdot \frac{c}{2} \cdot \frac{\Delta z}{\Delta t} - \frac{1}{2} \right) V_{NDZ}^n + R_L \cdot I_{NDZ}^{n+1/2} + \frac{(V_L^{n+1} + V_L^n)}{2} \right] \quad (4.25 \text{ b})$$

$$V_k^{n+1} = V_k^n - \frac{\Delta t}{\Delta z} c^{-1} (I_k^{n+1/2} - I_{k-1}^{n+1/2}) \quad (4.25 \text{ c})$$

และกระแสสำหรับโนดใดๆ ( $k=1, 2, 3, \dots, \text{NDZ}$ ) ดังสมการที่ (4.25 d)

$$I_k^{n+3/2} = I_k^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{\Delta z} I^{-1} \cdot (V_{k+1}^{n+1} - V_{k+1}^n) \quad (4.25 d)$$

การคำนวณค่าต่อหน่วย  $l$ ,  $c$  และ  $g$  ด้วยสมการ Sunde [14] สำหรับตัวนำยาว  $l_c$  รัศมี  $a$  ฝังลึก  $d$  ในดินที่มีพารามิเตอร์  $\rho_{soil}$ ,  $\epsilon_{soil}$ ,  $\sigma_{soil}$  ตามสมการที่ (4.26) นั้นยังไม่ถูกต้องเพราะความสัมพัทธ์ดังกล่าวใช้ได้กับตัวกลางเนื้อเดียว (homogeneous medium) แต่ความจริงรากสายดินจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนตรงรอยต่อตัวกลางที่เป็นดินกับตัวกลางอากาศ

$$g = \frac{\pi}{\rho_{soil} \left[ \ln \frac{2}{\sqrt{2ad}} - 1 \right]} \quad (4.26 a)$$

$$c = \frac{\pi \epsilon_{soil}}{\ln \frac{2}{\sqrt{2ad}} - 1} \quad (4.26 b)$$

$$l = \frac{\mu_0}{\pi} \left( \ln \frac{2}{\sqrt{2ad}} - 1 \right) \quad (4.26 c)$$

การคำนวณค่าต่อหน่วยควรเป็นตัวกลางแบบ half-space ระหว่างอากาศกับดิน [35] ดังสมการที่ (4.27)

$$g = \frac{2\pi}{\rho_{soil} \left[ \left( \ln \frac{2l_c}{a} - 1 \right) + \frac{\sigma_{soil} - \sigma_{air}}{\sigma_{soil} + \sigma_{air}} \cdot \left( \ln \frac{2l_c}{2d} - 1 \right) \right]} \quad (4.27 a)$$

$$c = \frac{2\pi \epsilon_{soil}}{\left( \ln \frac{2l_c}{a} - 1 \right) + \frac{\epsilon_{soil} - \epsilon_{air}}{\epsilon_{soil} + \epsilon_{air}} \cdot \left( \ln \frac{2l_c}{2d} - 1 \right)} \quad (4.27 b)$$

$$l = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \ln \frac{2l_c}{a} - 1 \right] \quad (4.27 c)$$

อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง จึงทำให้ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ การปรับปรุงจะใช้การคำนวณค่าต่อหน่วยด้วยหลักการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจากเมตริกซ์  $[L]$ ,  $[P]$  และ  $[R]$  ดังสมการที่ (4.28) สำหรับความนำ สมการที่ (4.29) สำหรับตัวเก็บประจุและสมการที่ (4.30) สำหรับค่าความเหนี่ยวนำ



$$g = \frac{1}{\left( \sum_{i=1}^n r_i \right)} \quad (4.28 \text{ a})$$

$$r_i = [R_{i1} \ R_{i2} \ \dots \ R_{in}] \cdot [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \quad (4.28 \text{ b})$$

$$c = \frac{1}{\left( \sum_{i=1}^n p_i \right)} \quad (4.29 \text{ a})$$

$$p_i = [P_{i1} \ P_{i2} \ \dots \ P_{in}] \cdot [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \quad (4.29 \text{ b})$$

$$l = \frac{\left( \sum_{i=1}^n l_i \right)}{n} \quad (4.30 \text{ a})$$

$$l_i = [L_{i1} \ L_{i2} \ \dots \ L_{in}] \cdot [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \quad (4.30 \text{ b})$$

เมื่อได้ค่าต่อหน่วยที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางและเวลา ก็จะนำมาใช้คำนวณหาค่าแรงดันและกระแสตามยาว (longitudinal current) เฉลี่ยที่เกิดขึ้นบนแต่ละอิลิเมนต์ตามสมการที่ (4.31)

$$V_{\_ave}(i) = 0.5 \cdot (V(i) + V(i+1)) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.31 \text{ a})$$

$$I_{\_long}(i) = g(i) V_{\_ave}(i) \quad (4.31 \text{ b})$$

ตารางที่ 4.1 สรุปรายละเอียด ข้อดี และข้อเสียของการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมา ซึ่งพบว่าการใช้ทฤษฎีสายส่งปรับปรุง (improved transmission line) มาสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมระบบรากสายดินภายใต้กระแสสลับพัลส์ไฟฟ้า จะทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากต้องการทรัพยากรบนเครื่องคอมพิวเตอร์และเวลาประมวลผลที่ไม่สูงมากภายใต้ความถูกต้องที่ยอมรับได้ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะนำทฤษฎีดังกล่าวมาศึกษาเปรียบเทียบกับทฤษฎีสายส่งเพื่อดูความเหมาะสมของทั้งสองทฤษฎีกับหัวข้อที่ต้องการศึกษาได้แก่ การศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินและการคำนวณความยาวประสิทธิผลของรากสายดินภายใต้รูปคลื่นกระแสสลับพัลส์ไฟฟ้า

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบการวิเคราะห์พฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดินด้วยทฤษฎีต่างๆ [72]

ทฤษฎี	รายละเอียดของทฤษฎี						
	การประยุกต์ใช้งาน	สมการทางคณิตศาสตร์	การทำความเข้าใจ	ขั้นตอนการแก้ปัญหา	ความต้องการทรัพยากรของคอมพิวเตอร์เพื่อการประมวลผล	เวลาในการประมวลผล	ความถูกต้อง
1. ทฤษฎีสายส่ง	รากสายดินเดี่ยวและกราวด์กริด	ง่ายที่สุด	ง่ายที่สุด	ง่ายที่สุด, สามารถทำนายเวลาการเคลื่อนที่ของคลื่น	คอมพิวเตอร์ปกติ	ใช้เวลาน้อยสุด	ยอมรับได้
2. ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า	รากสายดินเดี่ยวและกราวด์กริด	ยาก	ยาก	ยาก, สามารถทำนายเวลาการเคลื่อนที่ของคลื่น	คอมพิวเตอร์พิเศษที่มีทรัพยากรมาก	ใช้เวลานานมาก	มากที่สุด
3. ทฤษฎี Hybrid	รากสายดินเดี่ยวและกราวด์กริด	ยาก	ปานกลาง	ปานกลาง, ความสามารถในการทำนายเวลาการเคลื่อนที่ของคลื่นยังไม่ชัดเจน	คอมพิวเตอร์ปกติ	ใช้เวลานาน	ยอมรับได้
4. ทฤษฎีวงจร	กราวด์กริด	ง่าย	ง่าย	ง่าย, ไม่สามารถทำนายเวลาการเคลื่อนที่ของคลื่น	คอมพิวเตอร์ปกติ	ใช้เวลาปกติ	ยอมรับได้
5. ทฤษฎีสายส่งปรับปรุง	รากสายดินเดี่ยวและกราวด์กริด	ง่าย	ง่าย	ง่าย, สามารถทำนายเวลาการเคลื่อนที่ของคลื่น	คอมพิวเตอร์ปกติ	ใช้เวลาน้อย	มาก

## บทที่ 5

### การตรวจสอบแบบจำลอง

การศึกษาพฤติกรรมของรากสายดินด้วยแบบจำลองที่สร้างขึ้น จำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการตรวจสอบแบบจำลอง ได้แก่ ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง โดยจะศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิง การตรวจสอบแบบจำลองด้วยผลการทดลองจากงานวิจัยอื่นและการตรวจสอบแบบจำลองด้วยผลการทดลองย่อส่วน (scaling experiment) ที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

#### 5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยทฤษฎีต่างๆ เพื่อนำมาใช้ทำนายพฤติกรรมของระบบรากสายดินภายใต้กระแสฟ้าผ่าได้มีการนำเสนอในหลายงานวิจัย โดยแบบจำลองที่ใช้จะครอบคลุมถึงตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อพฤติกรรมของรากสายดิน ทำให้แบบจำลองสามารถทำนายพฤติกรรมของรากสายดินได้ใกล้เคียง มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ก็มีส่วนของการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดิน ดังนั้นจะทำการศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองจากงานวิจัยต่างๆเพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาแบบจำลอง

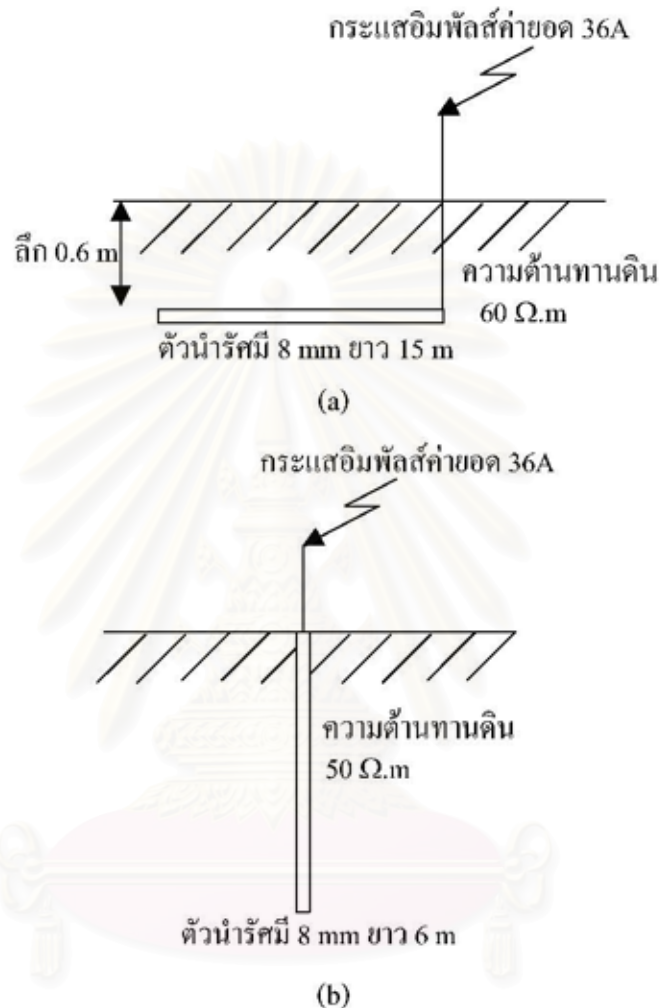
##### 5.1.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของการจำลองพฤติกรรมรากสายดินเดี่ยว

Grcev [52] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของรากสายดินแนวนอนและรากสายดินตั้งแนวตั้งในการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของรากสายดินแนวนอนจะเลือกใช้ตัวนำทองแดงที่มีค่าความต้านทาน  $1.72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$  ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm ยาว 15 m ฝังที่ระดับความลึก 0.6 m ในดินที่มีความต้านทานดิน 60  $\Omega \cdot m$  ค่าความซาบซึมได้ของสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์  $\epsilon_r = 15$  และค่าความซาบซึมได้ของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์  $\mu_r = 1$  ปล่อยกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 0.8/12.5  $\mu s$  ที่ค่ายอดกระแส 36 A ที่ปลายข้างหนึ่งของตัวนำดังรูปที่ 5.1 (a)

สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของรากสายดินตั้งแนวตั้งจะใช้ตัวนำทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm ยาว 6 m ฝังในดินที่มีความต้านทานดิน 50  $\Omega \cdot m$  ค่าความซาบซึมได้ของสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์  $\epsilon_r = 15$  และค่าความซาบซึมได้ของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์  $\mu_r = 1$  ปล่อยกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 0.8/12.5  $\mu s$  ที่ค่ายอดกระแส 36 A ตรงปลายตัวนำดังรูปที่ 5.1 (b)



จากผลการทดลองเมื่อนำค่าแรงดันที่เกิดขึ้นบนตัวนำเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วย ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าค่ายอดแรงดันจากการจำลองมากกว่าการทดลองอยู่ 7 - 8 % โดย Greev ให้เหตุผลว่าค่าแรงดันของการทดลองที่อ่าน ได้จากระบบวัดถูกลดทอนไปในตัวแบ่งแรงดัน (voltage divider)



รูปที่ 5.1 การจำลองพฤติกรรมรอกสายดินเดี่ยวของ Greev

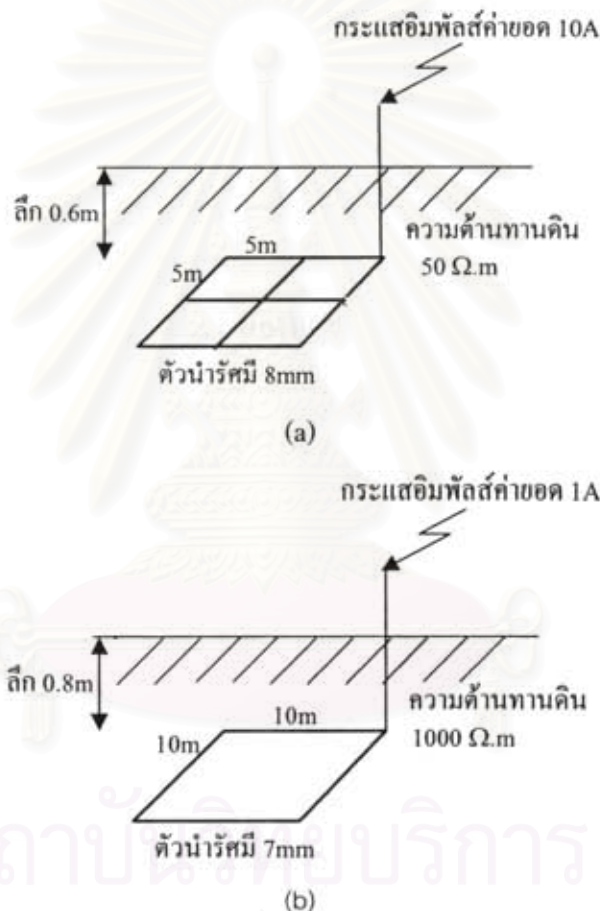
(a) รอกสายดินแนวนอน (b) รอกสายดินแท่งแนวตั้ง

### 5.1.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของการจำลองพฤติกรรมกรวดกริด

Otero [73] ได้ทำการทดลองกับกรวดกริดลักษณะ  $2 \times 2$  โดยใช้ตัวนำทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm ติดตั้งในดินที่มีค่าความต้านทานดิน 50  $\Omega \cdot m$  มีค่าความซาบซึมได้ของสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์  $\epsilon_r = 15$  และค่าความซาบซึมได้ของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์  $\mu_r = 1$  โดยฝังที่ระดับความลึก 0.6 m ปล่อยกระแสิมพัลส์รูปคลื่น 10/750  $\mu s$  ด้วยค่ายอดกระแส 10 A ที่มุมข้างหนึ่งของกรวดกริดดังแสดงในรูปที่ 5.2 (a) เมื่อนำค่าแรงดันที่เกิดขึ้นบนตัวนำจากการทดลอง

เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากแบบจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าค่ายอดแรงดันมีความแตกต่างกันอยู่ 10 %

Yaqing และ Nelson [72] ใช้แบบจำลองสายส่งปรับปรุงศึกษาพฤติกรรมของกราวด์กริด ที่ได้จากงานวิจัยของ Greev [53] โดยจะเป็นกราวด์กริดที่ใช้ตัวนำทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14 mm ฝังในดินที่มีความต้านทานดิน 1000  $\Omega$ .m ค่าความซาบซึมได้ของสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์  $\epsilon_r = 9$  และค่าความซาบซึมได้ของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์  $\mu_r = 1$  ที่ระดับความลึก 0.8 m ปล่อยกระแส อิมพัลส์รูปคลื่น 0.36/26.8  $\mu$ s ที่มีค่ายอดกระแส 1 A ตรงมุมของกราวด์กริดดังรูปที่ 5.2 (b) ได้ ความแตกต่างของค่ายอดแรงดันของแบบจำลองอยู่ที่ 5 - 9 %



รูปที่ 5.2 การจำลองพฤติกรรมกราวด์กริดของ  
(a) Otero (b) Yaqing และ Nelson

จากงานวิจัยที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบ รากสายดิน พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของแรงดันจากแบบจำลองอยู่ในระดับที่ยอมรับได้คือไม่เกิน 8% สำหรับการจำลองพฤติกรรมของรากสายดินเดี่ยวและไม่เกิน 10% สำหรับการจำลองพฤติกรรมของกราวด์กริด ซึ่งจะได้นำค่าดังกล่าวมาใช้เป็นค่าอ้างอิงเพื่อตรวจสอบแบบจำลองพฤติกรรม ทรานเซียนต์ของรากสายดินที่พัฒนาขึ้น

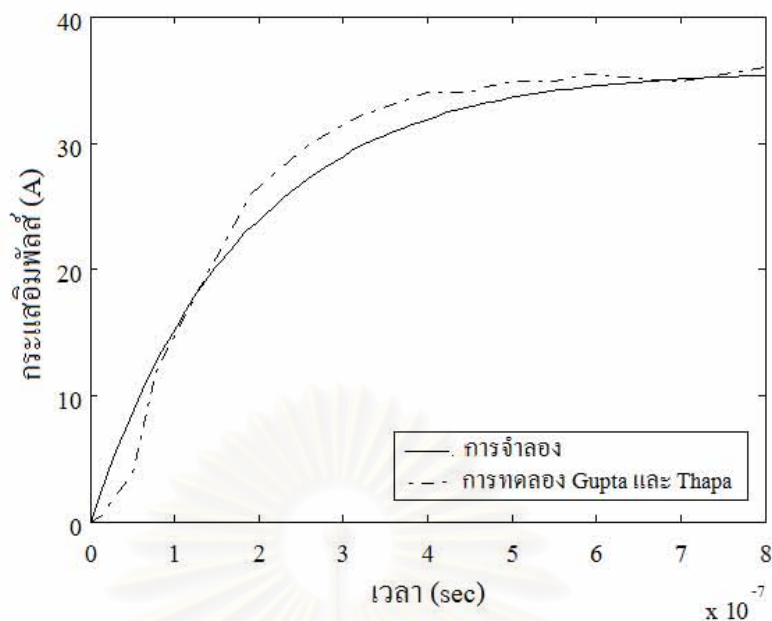
## 5.2 การตรวจสอบแบบจำลองด้วยผลการทดลองจากงานวิจัยอื่น

ในวิทยานิพนธ์นี้จะพัฒนาแบบจำลองด้วยทฤษฎีสายส่งที่ใช้ค่าต่อหน่วยแบบ half-space และทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วยสำหรับศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้แบบจำลองที่เหมาะสมและถูกต้องมากที่สุด จึงต้องทำการตรวจสอบผลของแบบจำลองดังกล่าวด้วยผลการทดลองจากงานวิจัยต่างๆที่น่าเชื่อถือ โดยการทดลองที่ใช้เปรียบเทียบได้แก่การทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์รากสายดินเดี่ยวของ Gupta และ Thapa [64] ที่ใช้ตัวนำทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm ฝังในดินที่มีความต้านทาน  $70 \Omega \cdot \text{m}$  ค่าความซบซึมได้ของสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์  $\epsilon_r = 15$  และค่าความซบซึมได้ของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์  $\mu_r = 1$  ฝังที่ระดับความลึก 0.6 m ปล่อยกระแสเข้าที่ปลายของรากสายดิน การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับการทดลองของ Gupta และ Thapa แสดงดังรูปที่ 5.3 (a) รูปคลื่นกระแสและ (b) รูปคลื่นแรงดันตรงจุดปล่อยกระแส ค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่สร้างขึ้นแสดงดังตารางที่ 5.1

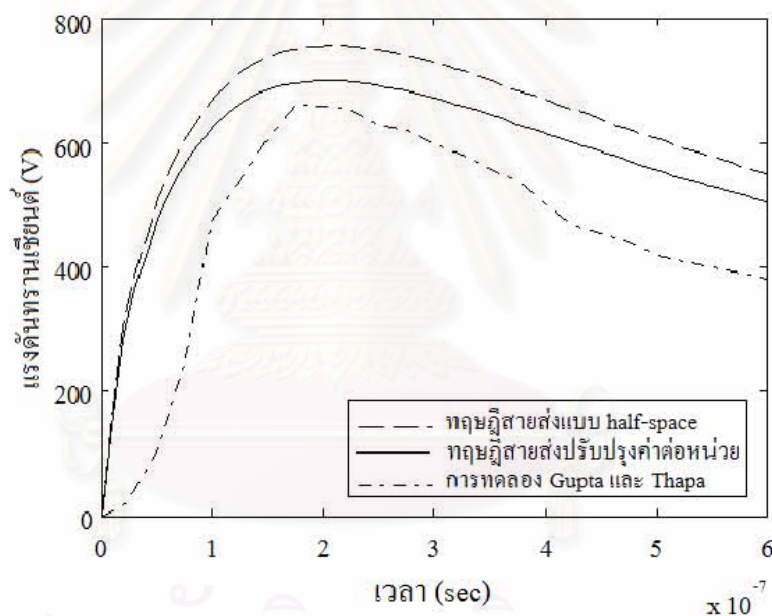
ตารางที่ 5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนของการจำลองพฤติกรรมรากสายดินเดี่ยวเปรียบเทียบกับ การทดลองของ Gupta และ Thapar

ผลการทดลองโดย Gupta และ Thapar (V)	ผลจากแบบจำลอง			
	ทฤษฎีสายส่งที่ใช้ค่าต่อหน่วย แบบ half-space		ทฤษฎีสายส่งแบบปรับปรุง ค่าต่อหน่วย	
	ค่ายอดแรงดัน (V)	% ค่าความ คลาดเคลื่อน	ค่ายอดแรงดัน (V)	% ค่าความ คลาดเคลื่อน
660	757	15	704	7

การจำลองด้วยทฤษฎีสายส่งที่ใช้ค่าต่อหน่วยแบบ half-space จะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วย เนื่องจากการประมาณค่าต่อหน่วยแบบ half-space จะกำหนดให้ค่าต่อหน่วยของทุกอิลิเมนต์มีค่าเท่ากัน ไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง ทำให้ผลของความคาบเกี่ยว (mutual coupling) ถูกคำนวณไว้มากเกินไปในทุกอิลิเมนต์ของรากสายดิน สำหรับความคลาดเคลื่อนของทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วย สาเหตุหนึ่งมาจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์เวลาหากลื่น  $\alpha$  ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์  $I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$  ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์เวลาหากลื่น  $\alpha$  จะมีผลต่อแรงดันน้อยเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์เวลาหากลื่น  $\beta$



(a)



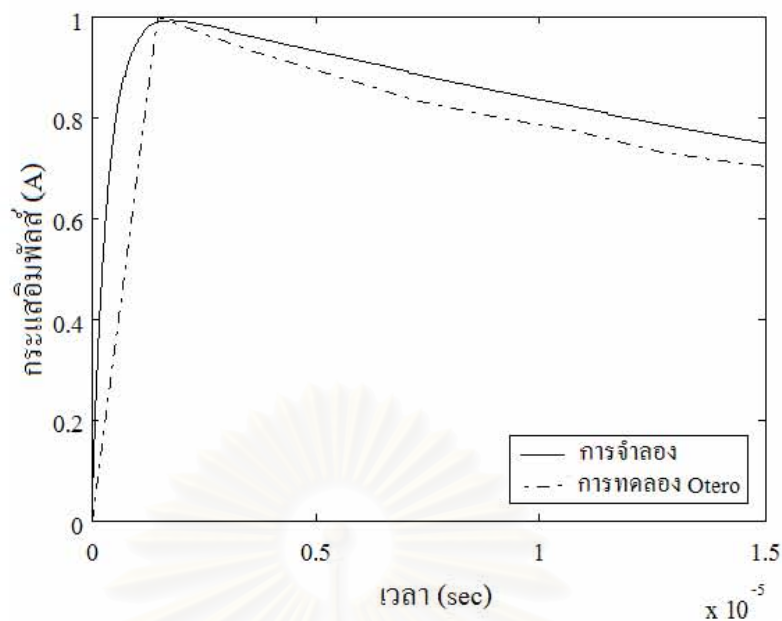
(b)

รูปที่ 5.3 เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองของ Gupta และ Thapar

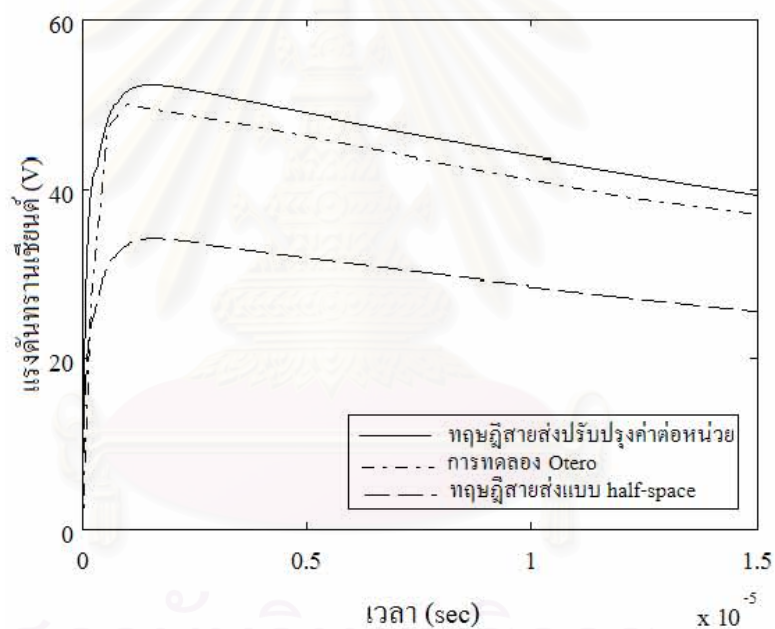
(a) รูปคลื่นกระแส (b) รูปคลื่นแรงดัน

การตรวจสอบแบบจำลองกราวด์กริดจะทำได้โดยเปรียบเทียบผลของทฤษฎีสายส่งที่ใช้ค่าต่อหน่วยแบบ half-space และทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วยกับผลการทดสอบของ Otero [73] ดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 5.1 ได้ผลการเปรียบเทียบรูปคลื่นกระแสแสดงดังรูปที่ 5.4 (a) และรูปคลื่นแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสแสดงดังรูปที่ 5.4 (b) ค่าความคลาดเคลื่อนจากการจำลองแสดงดังตารางที่ 5.2





(a)



(b)

รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดสอบของ Otero (a) รูปคลื่นกระแส (b) รูปคลื่นแรงดัน

ตารางที่ 5.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของผลการจำลองกราวด์กริดกับผลการทดสอบของ Otero [73]

ผลการทดสอบ โดย Otero	ผลจากแบบจำลอง			
	ทฤษฎีสายส่งที่ใช้ค่าต่อหน่วยแบบ half-space		ทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วย	
	ค่ายอดแรงดัน (V)	% ค่าความ คลาดเคลื่อน	ค่ายอดแรงดัน (V)	% ค่าความ คลาดเคลื่อน
51	34	33	54	7

การจำลองพฤติกรรมทรานเซียนต์ของกราวด์กริดด้วยทฤษฎีสายส่งที่ใช้ค่าต่อหน่วยแบบ half-space จะมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่าทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วย เนื่องจากการประมาณค่าต่อหน่วยแบบ half-space ที่ทุกอิมิตเมนต์มีค่าต่อหน่วยคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามตำแหน่ง และการเรียงตัวของตัวนำบนกราวด์กริดซึ่งการประมาณดังกล่าวนี้จะยังไม่ถูกต้อง สำหรับความคลาดเคลื่อนที่มีอยู่ของทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วย สาเหตุหนึ่งมาจากการประมาณค่าสัมประสิทธิ์เวลาหาค่า  $\alpha$  ของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์

ดังนั้นจากการตรวจสอบเปรียบเทียบเบื้องต้นระหว่างทฤษฎีสายส่งที่ใช้ค่าต่อหน่วยแบบ half-space กับทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วย พบว่าทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วยมีความเหมาะสมในการนำมาใช้จำลองพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดิน โดยเฉพาะรากสายดินที่มีความซับซ้อนขึ้นเช่นกราวด์กริด เพราะว่าทฤษฎีดังกล่าวให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ อย่างไรก็ตามจะได้มีการตรวจสอบเพิ่มเติมกับผลการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ

### 5.3 การตรวจสอบแบบจำลองด้วยการทดลองย่อส่วน (scaling experiment)

การจำลองพฤติกรรมรากสายดินด้วยทฤษฎีสายส่งปรับปรุงค่าต่อหน่วยจะถูกตรวจสอบอีกครั้งกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่เนื่องจากการทดลองด้วยขนาดที่เท่ากับของจริงยังมีข้อจำกัด ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ทฤษฎีการทดลองย่อส่วน (scaling experiment) [74] ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการทดลองภาคสนามกับผลที่ได้จากการทดลองย่อส่วน [17, 75] ยืนยันว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน หลังจากนั้นการทดลองย่อส่วนก็ถูกนำมาใช้ในอีกหลายงานวิจัย [76-78] ได้แก่ การศึกษาพฤติกรรมของกราวด์กริด การศึกษาผลตอบสนองของอุปกรณ์รากสายดิน (grounding device) และการศึกษาคูสมบัติของระบบรากสายดินที่คลุมด้วยวัสดุความต้านทานต่ำ (low resistivity materials)

#### 5.3.1 หลักการทำกรทดลองย่อส่วน

การทดลองย่อส่วนมีเงื่อนไข 2 ประการคือปัจจัยทางกายภาพที่ใช้ในการทดลองภายในห้องปฏิบัติการ (แทนด้วย 2) จะต้องเหมือนกับสภาพจริง (แทนด้วย 1) ได้แก่ ค่าความต้านทานดิน ( $\rho$ ) ความเข้มสนามไฟฟ้า ( $E_0$ ) และ ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ( $v$ ) ดังสมการ (5.1) – (5.3)

$$\rho_1 = \rho_2 \quad (5.1)$$

$$E_{01} = E_{02} \quad (5.2)$$

$$v_1 = v_2 \quad (5.3)$$

และปัจจัยทางกายภาพที่ใช้ในการทดลองมีค่าอยู่ในรูปอัตราส่วน  $n$  เท่าของค่าในสภาพจริง ได้แก่ ความยาวรากสายดิน แรงดันอิมพัลส์ กระแสอิมพัลส์ และอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (5.4) - (5.7)

$$l_1 = nl_2 \quad (5.4)$$

$$u_1 = nu_2 \quad (5.5)$$

$$i_1 = n^2 i_2 \quad (5.6)$$

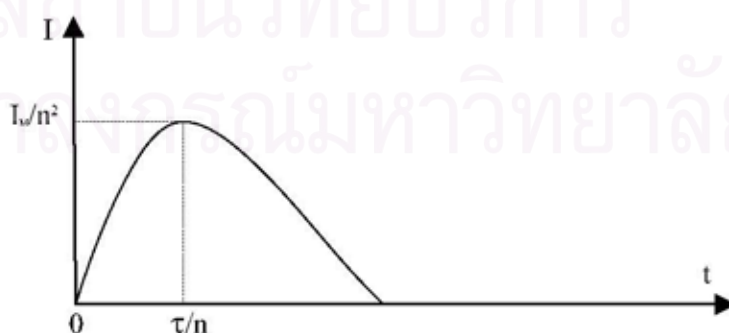
$$Z_{n1} = \frac{1}{n} Z_{n2} \quad (5.7)$$

ในการทดลองย่อส่วน เวลาค้นคืนจริงของกระแสอิมพัลส์จะถูกทำอัตราส่วน  $n$  เท่าดังสมการที่ (5.8) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จริงและรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จำลองที่ใช้ในการทดลองย่อส่วนแสดงดังรูปที่ 5.5

$$\tau_1 = n\tau_2 \quad (5.8)$$



(a)

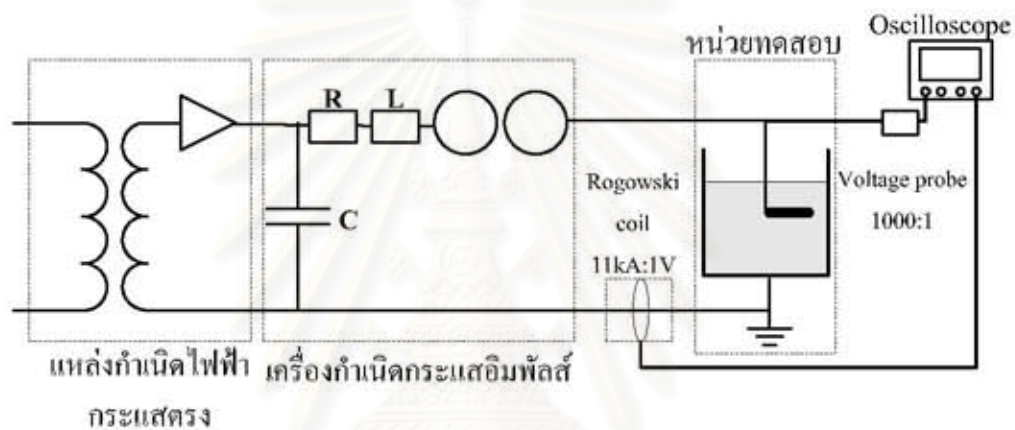


(b)

รูปที่ 5.5 (a) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จริง (b) รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จำลอง

### 5.3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองย่อยส่วนเพื่อตรวจสอบแบบจำลองจะใช้เครื่องกำเนิดกระแสพัลส์ที่มีวงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.6 และชุดทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.7 สร้างกระแสพัลส์ป้อนให้กับรากสายดินทดสอบที่ติดตั้งอยู่ในถังอลูมิเนียมทรงกระบอก (test unit) เส้นผ่าศูนย์กลาง 70 cm สูง 80 cm ภายในบรรจุสารละลายน้ำเกลือที่ใช้แทนดิน โดยปรับค่าความต้านทานสารละลายเพื่อให้ได้รูปคลื่นกระแสพัลส์ที่ต้องการ การวัดกระแสพัลส์จะใช้ Rogowski coil ที่มีอัตราส่วน 11 KA : 1 V และค่าความคลาดเคลื่อนของการวัด  $\pm 2\%$  ส่วนการวัดแรงดันพัลส์ที่เกิดขึ้นตรงจุดปล่อยกระแสจะใช้หัววัด attenuator probe อัตราส่วน 1 KV : 1V แบนด์วิดท์ 500MHz ค่าที่วัดได้ทั้งหมดจะถูกบันทึกด้วยออสซิลโลสโคป Tektronix TDS 3034B



รูปที่ 5.6 วงจรทดสอบ

ความหมายในวงจร

C = ตัวเก็บประจุอิมพัลส์ขนาด 24  $\mu\text{F}$  เป็นตัวเก็บพลังงาน

R = ความต้านทานปรับรูปคลื่นกระแสพัลส์

L = ความเหนี่ยวนำปรับรูปคลื่นกระแสพัลส์



รูปที่ 5.7 ชุดทดสอบในห้องปฏิบัติการ



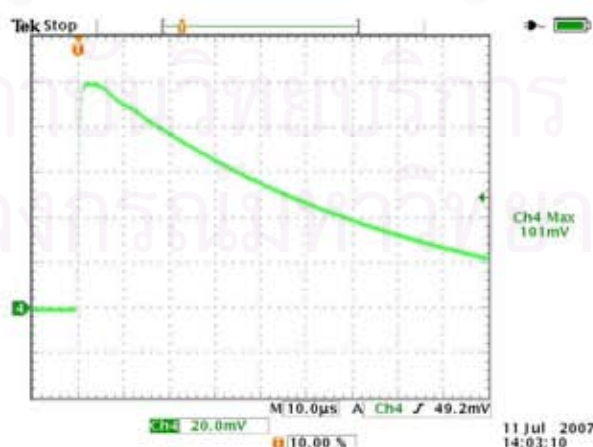
เพื่อความถูกต้องในการปรับค่ากระแสที่ได้จากการทดลองย่อส่วนไปเป็นกระแสไฟฟ้าค่าตามทีระบุไว้ในมาตรฐาน กระแสอิมพัลส์ทดสอบควรมีเวลาน้ำคลื่นสั้น ในการทำวิจัยนี้จะเลือกที่  $1 \mu\text{s}$  ซึ่งจะได้อัตราส่วน  $n = 10$  สำหรับกระแสไฟฟ้าค่าแรก  $10 \mu\text{s}$  และ  $n = 0.25$  สำหรับกระแสไฟฟ้าค่าตาม  $0.25 \mu\text{s}$  ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ของการจำลองกับการทดลองย่อส่วนแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของการจำลองกับการทดลองย่อส่วน

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้ในการทดลองย่อส่วน	ค่าจำลองที่กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น $10 \mu\text{s}$	ค่าจำลองที่กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น $0.25 \mu\text{s}$
อัตราส่วน $n$	-	10	0.25
เวลาน้ำคลื่น	$1 \mu\text{s}$	$10 \mu\text{s}$	$0.25 \mu\text{s}$
เส้นผ่าศูนย์กลางรากสายดิน	1.5 mm	15 mm	0.375 mm
ความลึกรากสายดิน	8 cm	80 cm	2 cm
ความยาวรากสายดินแนวนอน	10,20,30 cm	100,200,300 cm	2.5,5,7.5 cm
ความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้ง	30,40 cm	300,400 cm	7.5,10 cm
ขนาดกราวด์กริด	10cm x 10cm, 20cm x 20cm	100cm x 100cm, 200cm x 200cm	2.5cm x 2.5cm, 5cm x 5cm

### 5.3.3 ผลการทดลอง

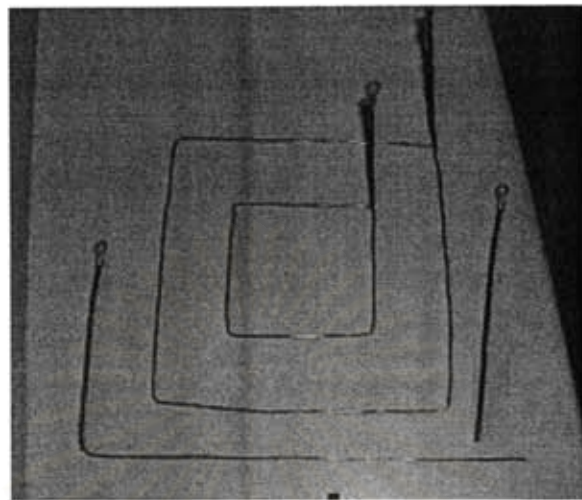
รูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่สร้างได้จากห้องปฏิบัติการมีเวลาน้ำคลื่น  $1 \mu\text{s}$  และเวลาหลังคลื่น  $45 \mu\text{s}$  ดังแสดงในรูปที่ 5.8 โดยใช้สารละลายน้ำเกลือที่มีค่าความต้านทาน  $190 \Omega \cdot \text{cm}$



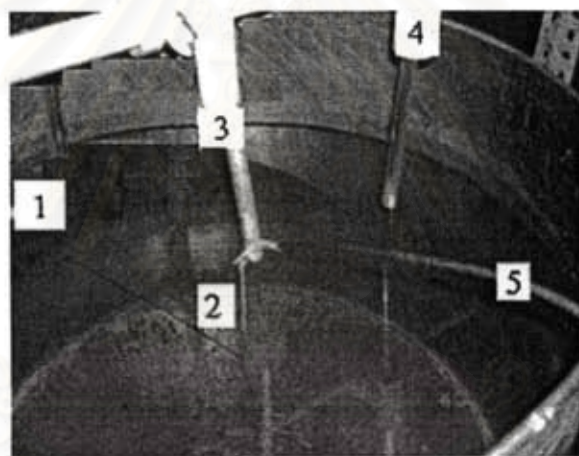
รูปที่ 5.8 กระแสอิมพัลส์  $1/45 \mu\text{s}$

การทดลองหาค่าแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสเพื่อตรวจสอบกับผลการจำลองจะทำโดยใช้รากสายดินทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ รากสายดินแท่งแนวตั้ง รากสายดินแนวนอนและกราวด์กริด ซึ่งทำ

จากตัวนำทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 mm ที่ปลายตัวนำทองแดงเชื่อมติดกับหัวต่อเพื่อใช้ยึดกับอิเล็กโทรดจ่ายกระแสของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ดังรูปที่ 5.9



(a)

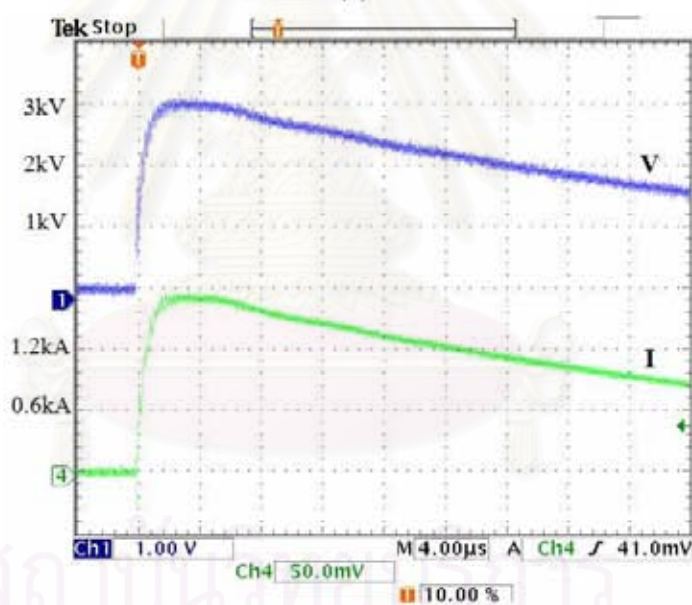
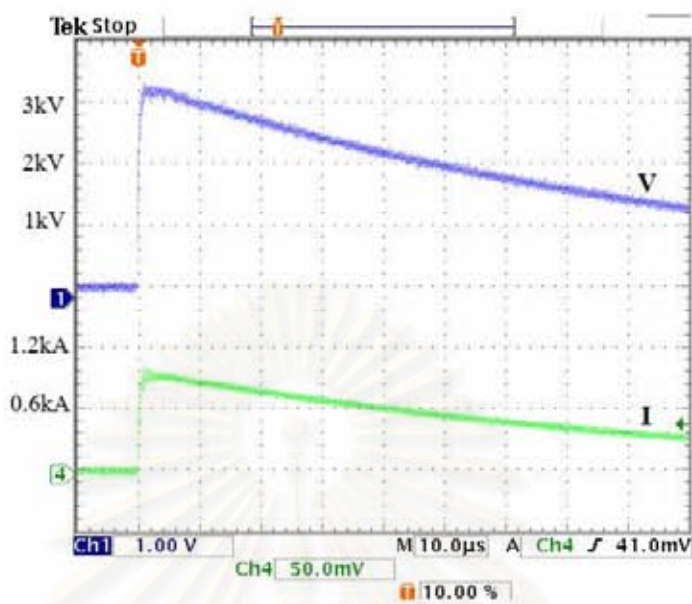


(b)

รูปที่ 5.9 (a) ตัวอย่างรากสายดินทดสอบในการทดลองข้อส่วน

(b) การทดลองข้อส่วนของรากสายดินทดสอบ 1= สารละลายน้ำเกลือ, 2=รากสายดินทดสอบ, 3=อิเล็กโทรดปล่อยกระแส, 4=หัววัดแรงดันตามผิว, 5=เกเบิลวัดแรงดันตรงจุดปล่อยกระแส

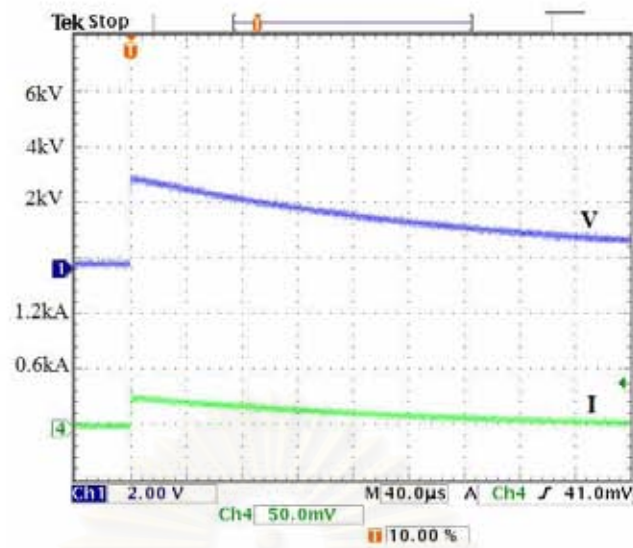
รูปที่ 5.10 แสดงผลการทดลองหาค่าแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสของกราวด์กริด (a) ขนาด 10cm x 10cm และ (b) ขนาด 20cm x 20cm จากผลการทดลองแม้ว่าแรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์มีค่าคงที่ แต่เมื่อเปลี่ยนขนาดกราวด์กริดให้ใหญ่ขึ้นพบว่าค่ายอดกระแสเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวนำของกราวด์กริดกับสารละลายน้ำเกลือมีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้ความต้านทานต่ำลง ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของกราวด์กริดลดลง การกระจายกระแสออกจากกราวด์กริดเพิ่มขึ้นและแรงดันทรานเซียนต์ตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าลดลง นอกจากนี้รูปคลื่นของ



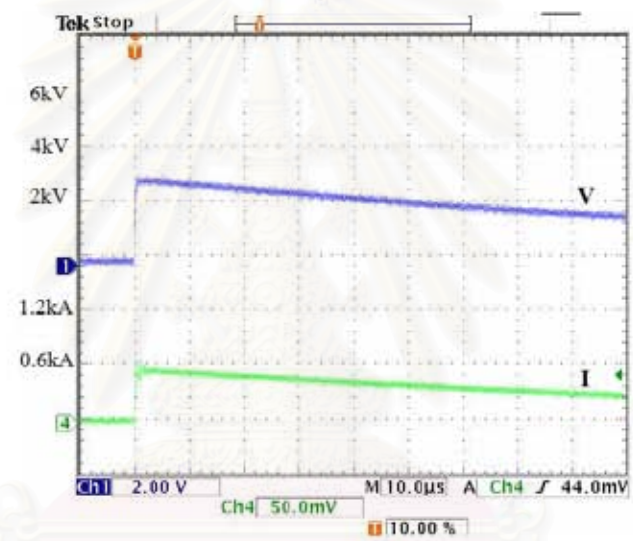
รูปที่ 5.10 ผลการทดลองกราวด์กริด (a) ขนาด 10 cm x 10 cm และ (b) ขนาด 20 cm x 20 cm

การทดลองหาค่าแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสของรอกสายดินเดี่ยวที่ติดตั้งในสารละลายน้ำเกลือความต้านทาน  $190 \Omega \cdot \text{cm}$  ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.11 สำหรับรอกสายดินแนวนอน และรูปที่ 5.12 สำหรับรอกสายดินแท่งแนวตั้ง เมื่อความยาวรอกสายดินเดี่ยวเพิ่มขึ้น พื้นผิวสัมผัสระหว่างตัวนำของรอกสายดินกับสารละลายน้ำเกลือมีมากขึ้น ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรอกสายดินลดลง ทำให้กระแสไหลออกจากรอกสายดินได้มากขึ้น และแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสก็จะมีค่าต่ำลง

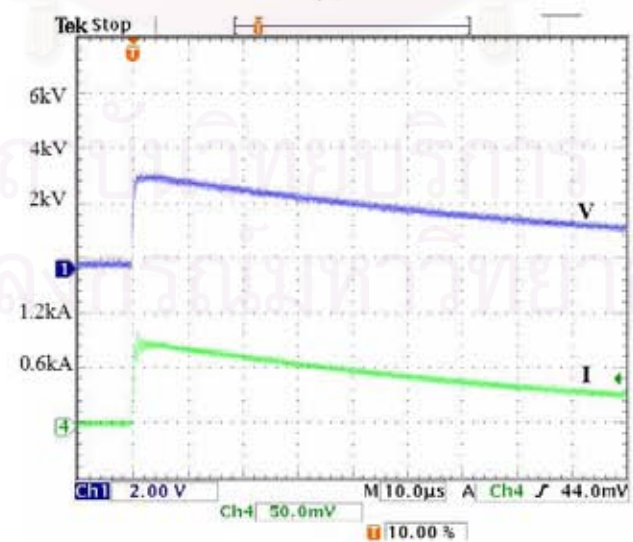




(a)



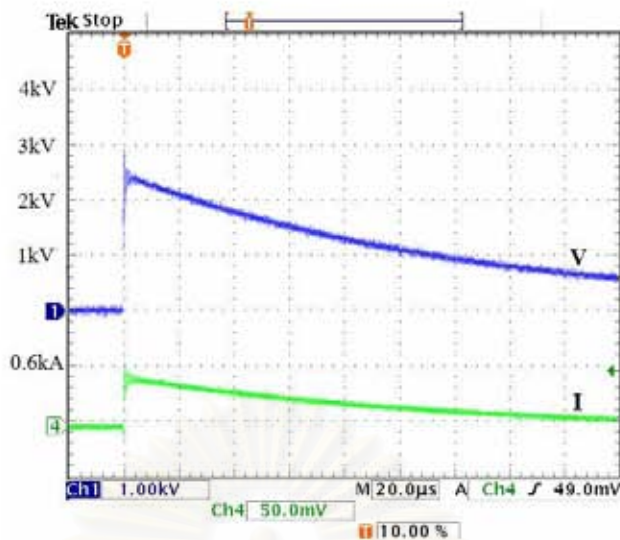
(b)



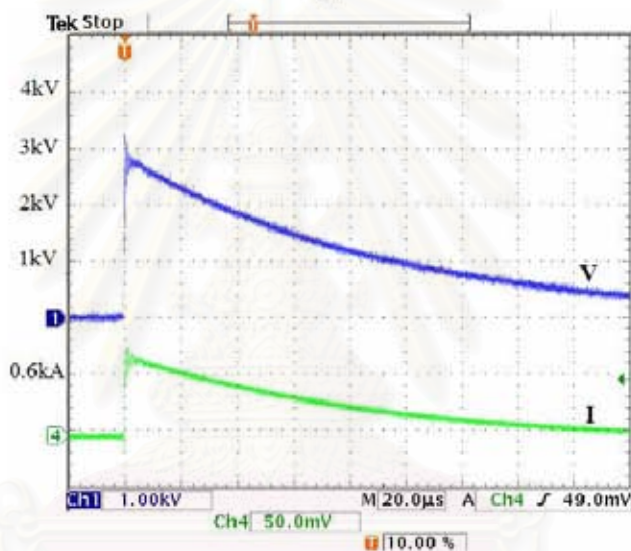
(c)

รูปที่ 5.11 ผลการทดลองกราฟสายดินแนวนอนความยาว (a) 10 cm (b) 20 cm (c) 30 cm

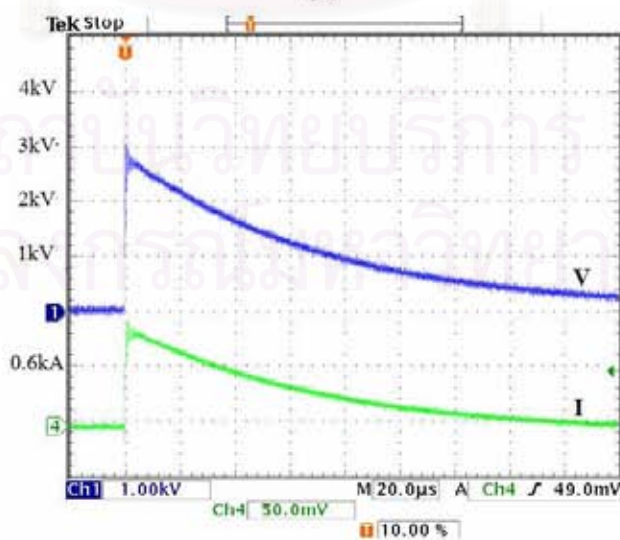




(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.12 ผลการทดลองรากสายดินแท่งแนวตั้งความยาว (a) 30 cm (b) 40 cm (c) 50 cm

การตรวจสอบผลการจำลองกับผลการทดลองจะใช้พารามิเตอร์ต่างๆจากการทดลอง  
 ย่อส่วนไปปรับเป็นค่าจริงที่สอดคล้องกับเวลาหน้าคลื่นของรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าที่ต้องการศึกษา  
 ได้แก่ อัตราส่วน  $n = 10$  สำหรับกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  ดังตารางที่ 5.4 และ  $n = 0.25$   
 สำหรับกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.4 พารามิเตอร์ในการจำลองรากสายดินด้วยกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$

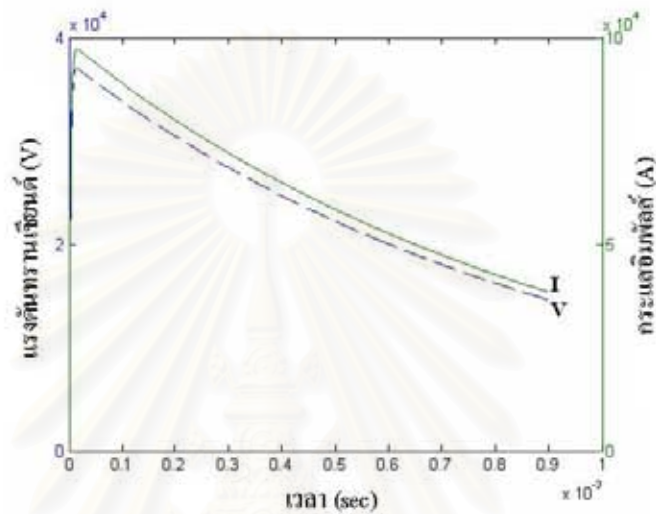
พารามิเตอร์ในการทดลอง					พารามิเตอร์ในการจำลองด้วย $n = 10$				
รากสายดิน, L	Tf ( $\mu\text{s}$ )	Tt ( $\mu\text{s}$ )	Ip (kA)	Vp (kV)	รากสายดิน, n.L	n.Tf ( $\mu\text{s}$ )	n.Tt ( $\mu\text{s}$ )	$n^2 \cdot Ip$ (kA)	n.Vp (kV)
กริด 10cm x 10cm	1	60	0.99	3.52	กริด 100cm x 100cm	10	600	99	35.2
กริด 20cm x 20cm	1	45	1.65	3.38	กริด 200cm x 200cm	10	450	165	33.8
แนวนอน 10cm	1	75	0.48	3.36	แนวนอน 100cm	10	750	48	33.6
แนวนอน 20cm	1	65	0.67	3.32	แนวนอน 200cm	10	650	67	33.2
แนวนอน 30cm	1	50	0.96	3.52	แนวนอน 300cm	10	500	96	35.2
แท่งแนวตั้ง 30cm	1	60	0.66	2.86	แท่งแนวตั้ง 300cm	10	600	66	28.6
แท่งแนวตั้ง 40cm	1	50	0.86	3.22	แท่งแนวตั้ง 400cm	10	500	86	32.2
แท่งแนวตั้ง 50cm	1	40	1.05	3.04	แท่งแนวตั้ง 500cm	10	400	105	30.4

ตารางที่ 5.5 พารามิเตอร์ในการจำลองรากสายดินด้วยกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$

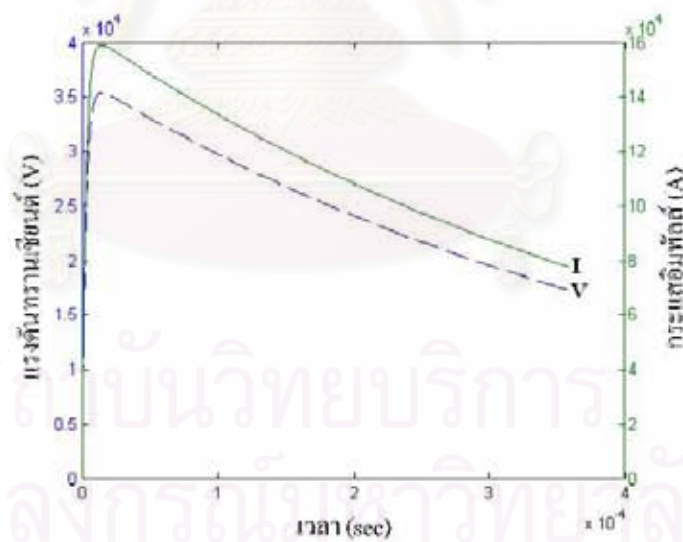
พารามิเตอร์ในการทดลอง					พารามิเตอร์ในการจำลองด้วย $n = 0.25$				
รากสายดิน, L	Tf ( $\mu\text{s}$ )	Tt ( $\mu\text{s}$ )	Ip (kA)	Vp (kV)	รากสายดิน, n.L	n.Tf ( $\mu\text{s}$ )	n.Tt ( $\mu\text{s}$ )	$n^2 \cdot Ip$ (A)	n.Vp (V)
กริด 10cm x 10cm	1	60	0.99	3.52	กริด 2.5cm x 2.5cm	0.25	15.0	62	880
กริด 20cm x 20cm	1	45	1.65	3.38	กริด 5cm x 5cm	0.25	11.2	104	845
แนวนอน 10cm	1	75	0.48	3.36	แนวนอน 2.5cm	0.25	18.7	30	840
แนวนอน 20cm	1	65	0.67	3.32	แนวนอน 5cm	0.25	16.2	42	830
แนวนอน 30cm	1	50	0.96	3.52	แนวนอน 7.5cm	0.25	12.5	60	880
แท่งแนวตั้ง 30cm	1	60	0.66	2.86	แท่งแนวตั้ง 7.5cm	0.25	15.0	41	715
แท่งแนวตั้ง 40cm	1	50	0.86	3.22	แท่งแนวตั้ง 10cm	0.25	12.5	54	805
แท่งแนวตั้ง 50cm	1	40	1.05	3.04	แท่งแนวตั้ง 12.5cm	0.25	10.0	65	760

### 5.3.4 การตรวจสอบผลการจำลองกับผลการทดลอง

การจำลองพฤติกรรมรากลากสายดินภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก  $10/350 \mu\text{s}$  ด้วยทฤษฎีสายส่ง ปรับปรุงค่าค่อหน่วย จะใช้พารามิเตอร์ที่ปรับด้วยด้วยอัตราส่วน  $n = 10$  ตามตารางที่ 5.4 ผลการจำลองพฤติกรรมของกราวด์กริดแสดงดังรูปที่ 5.13 (a) ขนาด  $100\text{cm} \times 100\text{cm}$  และ (b) ขนาด  $200\text{cm} \times 200\text{cm}$  จากการจำลองพบว่าได้ผลสอดคล้องกับการทดลองย่อส่วนคือเมื่อกราวด์กริดมีขนาดใหญ่ขึ้นจะได้แรงดันตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าลดลง



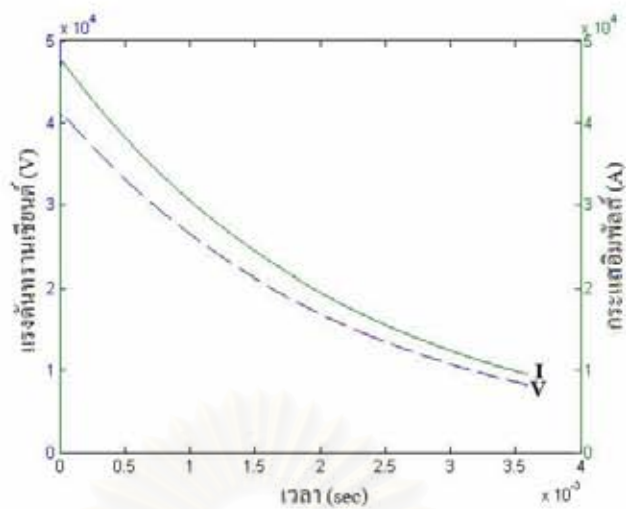
(a)



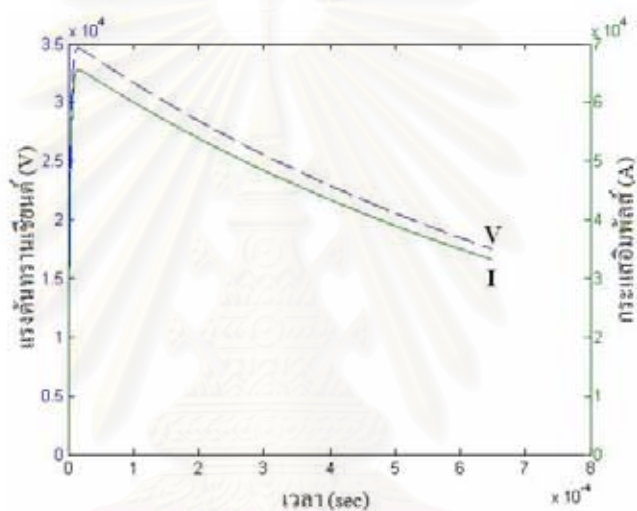
(b)

รูปที่ 5.13 ผลการจำลองภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก  $10/350 \mu\text{s}$   
ของกราวด์กริดขนาด (a)  $100\text{cm} \times 100\text{cm}$  และ (b)  $200\text{cm} \times 200\text{cm}$

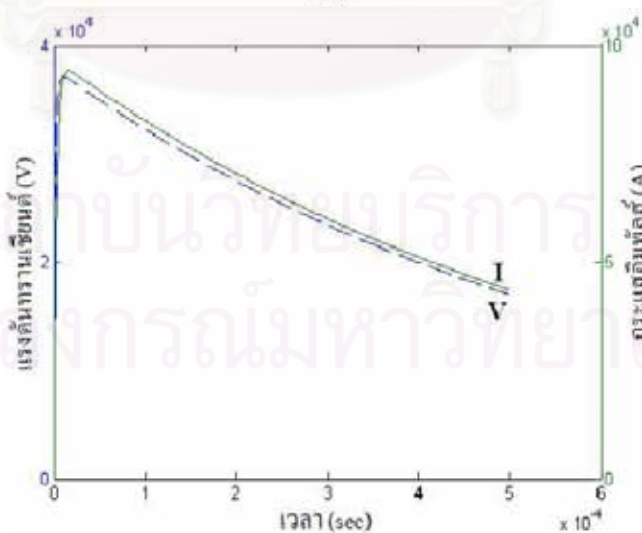
ส่วนผลการจำลองพฤติกรรมรากลากสายดินแนวนอนดังรูปที่ 5.14 และผลการจำลองพฤติกรรมรากลากสายดินแท่งแนวตั้งดังรูปที่ 5.15 มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองย่อส่วน โดยแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าลดลงตามความยาวรากลากสายดินที่เพิ่มขึ้น



(a)



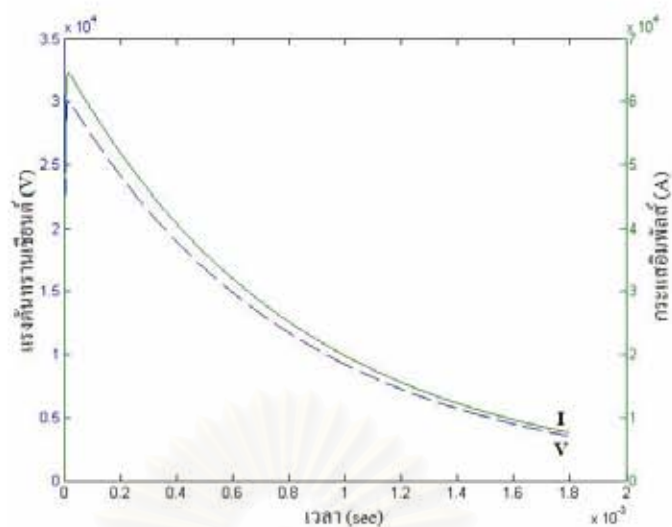
(b)



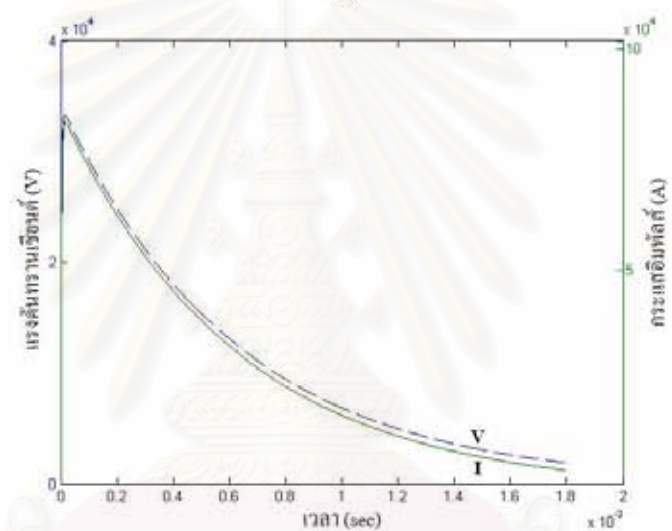
(c)

รูปที่ 5.14 ผลการจำลองภายใต้กระแสไฟฟ้าผ่านแรก  $10/350 \mu\text{s}$   
ของรากสายดินแนวนอนความยาว (a) 100 cm (b) 200 cm (3) 300 cm

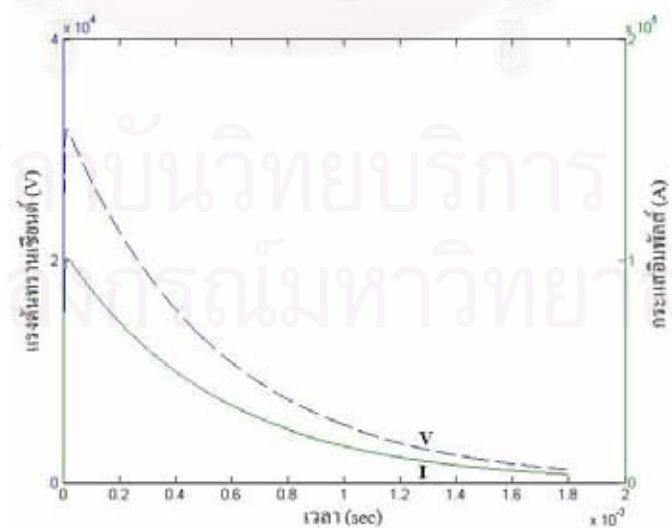




(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.15 ผลการจำลองภายใต้กระแสที่ผ่านแรก  $10/350 \mu\text{s}$   
ของรากสายดินแห่งแนวตั้งความยาว (a) 300cm (b) 400cm (3) 500cm

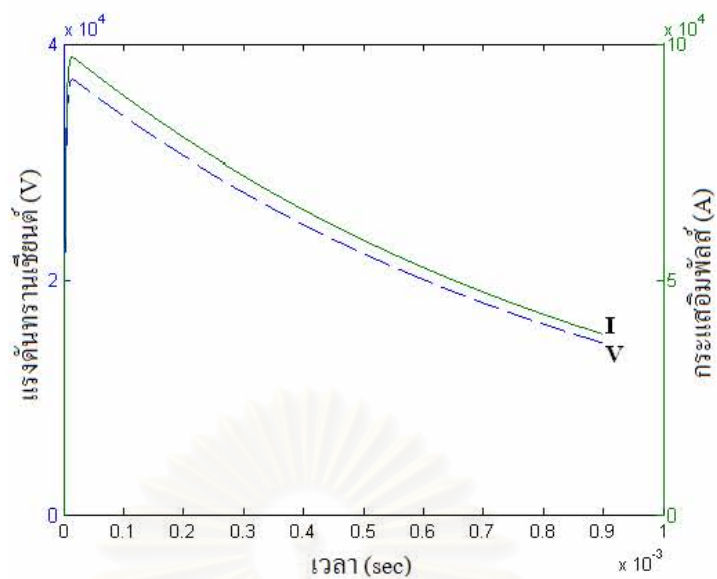
ตารางที่ 5.6 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu$ s ระหว่างผลการจำลองกับผลการทดลองที่ปรับด้วยอัตราส่วน  $n = 10$  ของรากสายดิน ทดสอบทั้ง 3 ชนิด

ตารางที่ 5.6 เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองของรากสายดินที่กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu$ s

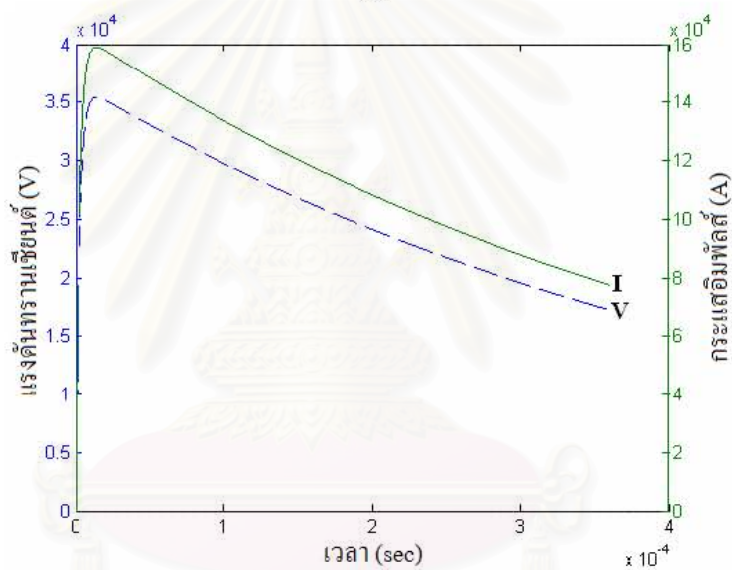
รากสายดิน	ผลการทดลองแรงดัน ตรงจุดปล่อยกระแส ปรับด้วย $n = 10$ (kV)	ผลการจำลองแรงดัน ตรงจุดปล่อยกระแส (kV)	%ความแตกต่าง ของค่ายอดแรงดัน
กราวด์กริด 100cmx100cm	35.2	36.7	4.3
กราวด์กริด 200cmx200cm	33.8	35.4	4.7
แนวนอน 100cm	33.6	35.4	5.4
แนวนอน 200cm	33.2	34.6	4.3
แนวนอน 300cm	35.2	37.0	5.2
แท่งแนวตั้ง 300cm	28.6	30.0	5.0
แท่งแนวตั้ง 400cm	32.2	33.3	3.5
แท่งแนวตั้ง 500cm	30.4	31.8	4.8

แรงดันตรงจุดปล่อยกระแสที่ได้จากการจำลองจะมีค่าสูงกว่าแรงดันที่ได้จากการทดลอง ย่อส่วน โดยกราวด์กริดจะมีความแตกต่างของค่าแรงดันเฉลี่ย 4.5 % รากสายดินแนวนอนมีความแตกต่างของค่าแรงดันเฉลี่ย 4.9 % และรากสายดินแท่งแนวตั้งมีความแตกต่างของค่าแรงดันเฉลี่ย 4.4 %

สำหรับการจำลองพฤติกรรมรากสายดินภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu$ s ในดินที่มีความต้านทานดิน 190  $\Omega$ .cm โดยใช้พารามิเตอร์ที่ปรับด้วยอัตราส่วน  $n = 0.25$  ตามตารางที่ 5.3 ได้ผลการจำลองพฤติกรรมของกราวด์กริดแสดงดังรูปที่ 5.16 (a) กราวด์กริดขนาด 2.5cm x 2.5cm และ (b) กราวด์กริดขนาด 5cm x 5cm ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองย่อส่วน โดยค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของกราวด์กริดมีค่าลดลงเมื่อขนาดกราวด์กริดใหญ่ขึ้นเนื่องจากการกระจายกระแสมีมากขึ้น ทำให้กระแสไหลผ่านกราวด์กริดเพิ่มขึ้นและแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าลดลง



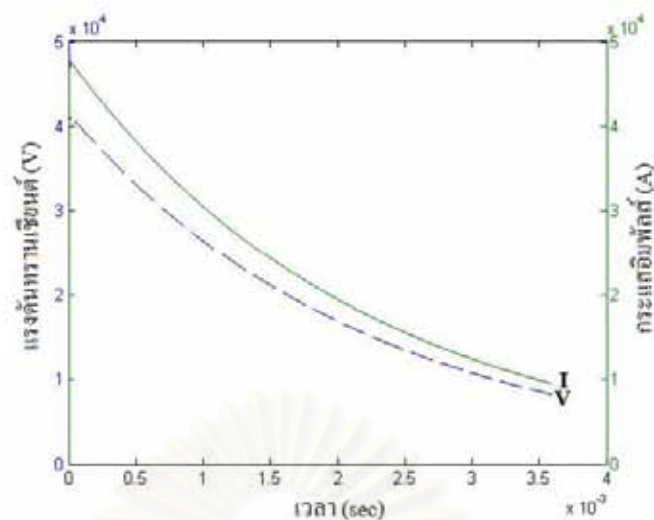
(a)



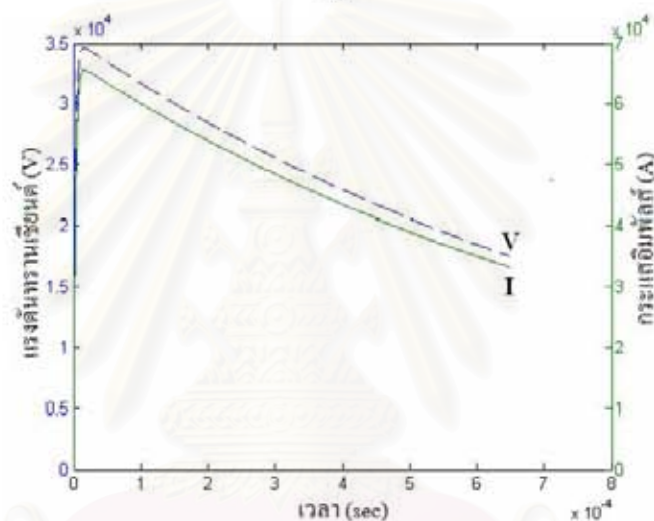
(b)

รูปที่ 5.16 ผลการจำลองภายใต้กระแสไฟฟ้าค่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  ของกรวดคาร์บอนขนาด (a) 2.5cm x 2.5cm และ (b) 5cm x 5cm

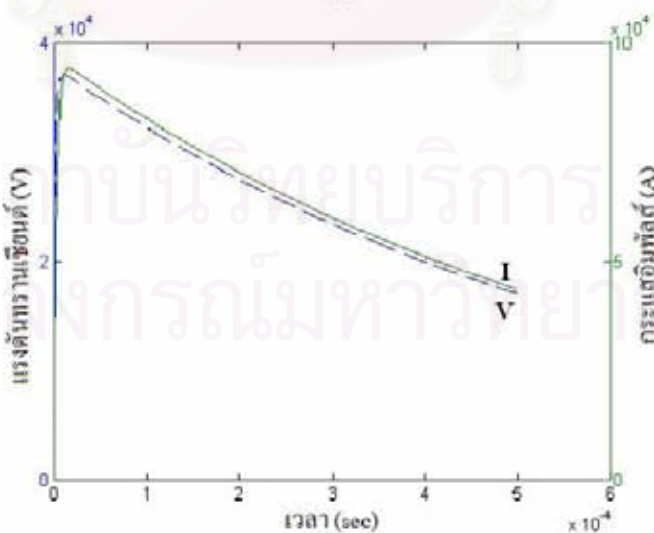
ผลการจำลองพฤติกรรมรากสายดินแนวนอนแสดงดังรูปที่ 5.17 และรากสายดินแบ่งแนวตั้งแสดงดังรูปที่ 5.18 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองย่อส่วน โดยแรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าลดลงตามความยาวตัวนำของรากสายดินที่เพิ่มขึ้น



(a)



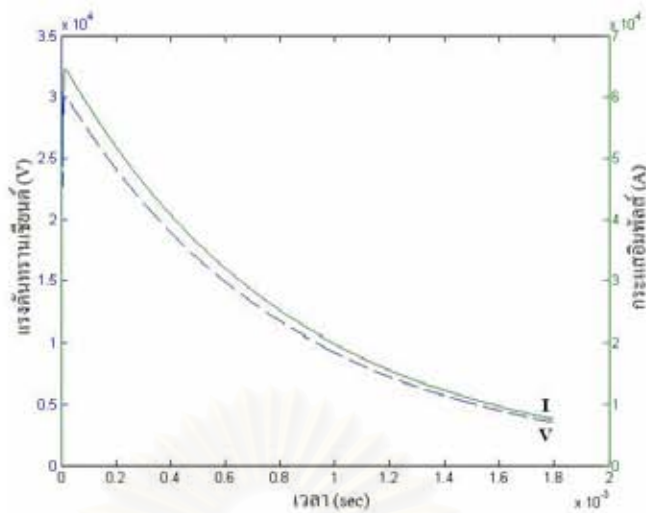
(b)



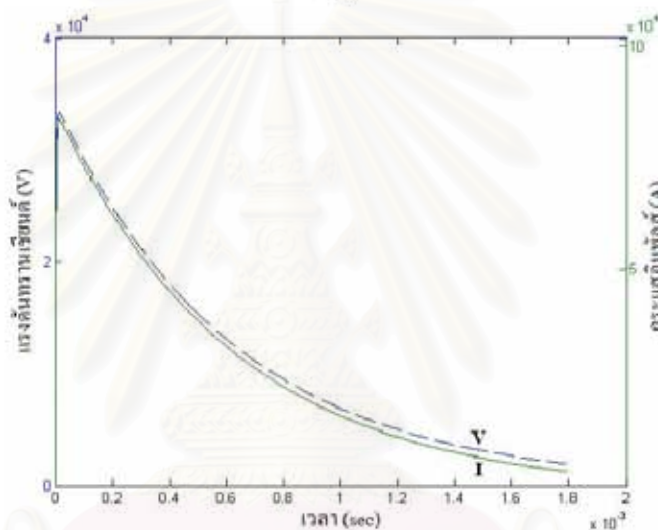
(c)

รูปที่ 5.17 ผลการจำลองภายใต้กระแสไฟฟ้าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$   
ของรากสายดินแนวนอนความยาว (a) 2.5 cm (b) 5 cm (c) 7.5 cm

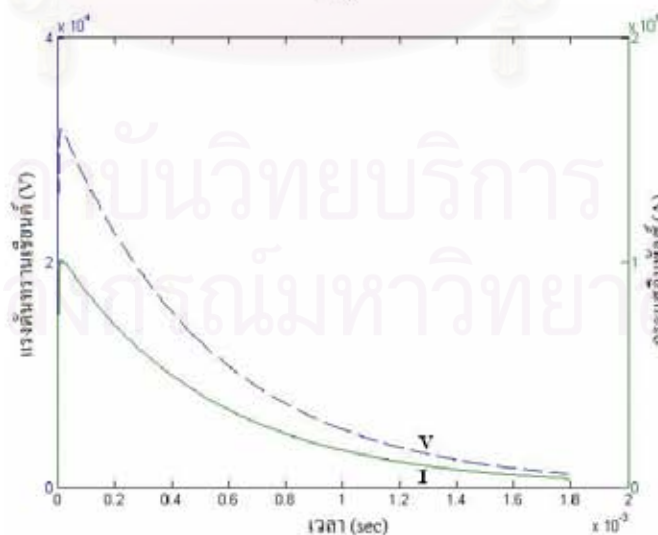




(a)



(b)



(c)

รูปที่ 5.18 ผลการจำลองภายใต้กระแสไฟฟ้าค่าตาม 0.25/100  $\mu$ s ของรากสายดินแท่งแนวตั้งความยาว (a) 7.5 cm (b) 10 cm (c) 12.5 cm

ตารางที่ 5.7 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  ระหว่างผลการทดลองย่อยส่วนที่ปรับด้วยอัตราส่วน  $n = 0.25$  กับผลการจำลองของ รากสายดินทดสอบทั้ง 3 ชนิด

ค่าแรงดันที่ได้จากการจำลองมีค่าสูงกว่าค่าแรงดันที่ได้จากการทดลองย่อยส่วนเช่นเดียวกับการจำลองภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  โดยกราวด์กริดมีความแตกต่างของค่าแรงดันเฉลี่ย 9 % รากสายดินแนวนอนมีความแตกต่างของค่าแรงดันเฉลี่ย 5.6 % และรากสายดินแท่งแนวตั้งมีความแตกต่างของค่าแรงดันเฉลี่ย 4.9 %

ตารางที่ 5.7 เปรียบเทียบผลการจำลองกับการทดลองรากสายดินที่กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$

รากสายดิน	ผลการทดลองแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสปรับด้วย $n = 0.25$ (V)	ผลการจำลองแรงดันตรงจุดปล่อยกระแส (V)	%ความแตกต่างของค่ายอดแรงดัน
กราวด์กริด 2.5cmx2.5cm	880	962	9.3
กราวด์กริด 5cmx5cm	845	916	8.4
แนวนอน 2.5cm	840	888	5.7
แนวนอน 5cm	830	889	7.1
แนวนอน 7.5cm	880	915	4.0
แท่งแนวตั้ง 7.5cm	715	754	5.5
แท่งแนวตั้ง 10cm	805	838	4.1
แท่งแนวตั้ง 12.5cm	760	800	5.3

จากผลการจำลองพฤติกรรมรากสายดินด้วยทฤษฎีสายส่งปรับปรุงภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  พบว่าค่า % ความแตกต่างของค่ายอดแรงดันระหว่างการจำลองกับการทดลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ สาเหตุของค่าความแตกต่างอาจจะมาจากการประมาณสัมประสิทธิ์เวลาหลังคลื่น  $\alpha$  ของกระแสอิมพัลส์  $I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$  อย่างไรก็ตามค่าสัมประสิทธิ์เวลาหลังคลื่น  $\alpha$  จะมีผลต่อค่ายอดแรงดันอิมพัลส์น้อยมากเมื่อเทียบกับสัมประสิทธิ์เวลาน้ำคลื่น  $\beta$

### 5.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความยาวของรากสายดิน

ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้วิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวเพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของรากสายดิน ซึ่งต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความยาวของรากสายดิน ดังนั้นจะได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยการทดลองย่อยส่วน โดยใช้เครื่องกำเนิดกระแส

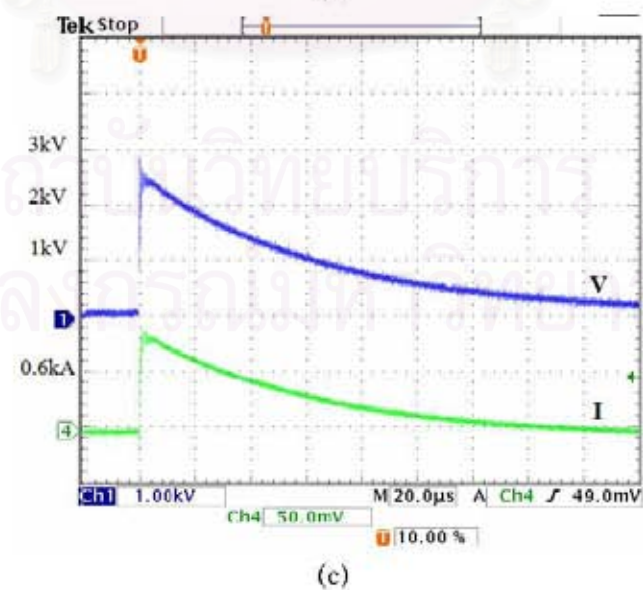
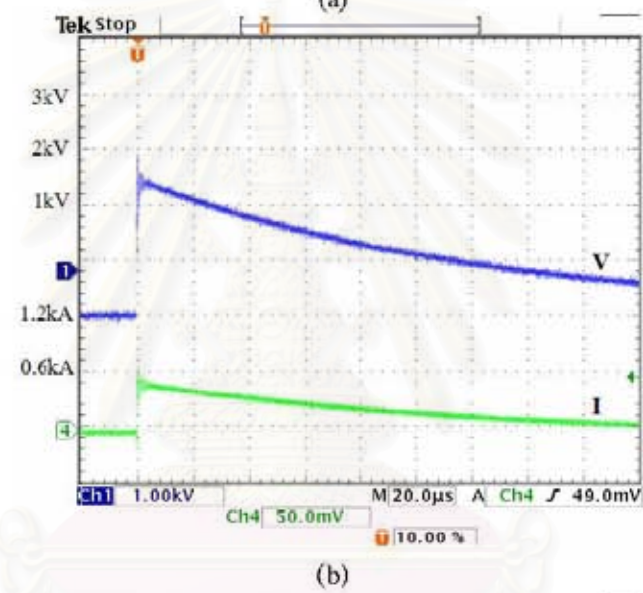
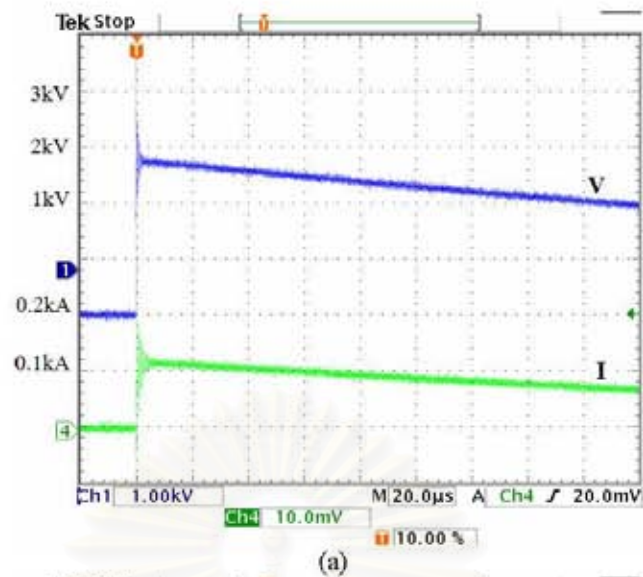
อิมพัลส์สร้างกระแส  $1/45 \mu\text{s}$  ป้อนให้กับรากสายดินแท่งแนวตั้งทดสอบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $1.5 \text{ mm}$  ที่ติดตั้งในสารละลายน้ำเกลือความต้านทาน  $190 \Omega\cdot\text{cm}$  ในการทดลองจะป้อนแรงดันอัดประจุที่มีค่าคงที่ โดยจะเปลี่ยนแปลงเฉพาะความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้งเริ่มต้นจากความยาว  $10 \text{ cm}$  ถึง  $55 \text{ cm}$  ทำการบันทึกรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์และแรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อยกระแสที่ความยาวต่างๆเพื่อนำมาคำนวณหาค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์จากอัตราส่วนค่ายอดแรงดันอิมพัลส์ต่อค่ายอดกระแสอิมพัลส์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองที่ถูกปรับเป็นค่าจริงด้วยอัตราส่วน  $n = 10$  สำหรับกระแสไฟฟ้าผ่านแรกแสดงดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองอิทธิพลของความยาวรากสายดินต่ออิมพัลส์อิมพีแดนซ์

พารามิเตอร์	ค่าในการทดลองย่อย	ค่าจริง
เวลาหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์	$1 \mu\text{s}$	$10 \mu\text{s}$
เวลาหลังคลื่นกระแสอิมพัลส์	$45 \mu\text{s}$	$450 \mu\text{s}$
ขนาดกระแส	$1 \text{ kA}$	$100 \text{ kA}$
เส้นผ่าศูนย์กลางรากสายดิน	$1.5 \text{ mm}$	$1.5 \text{ cm}$
ความยาวรากสายดิน	$10 \text{ cm} - 55 \text{ cm}$	$100 \text{ cm} - 550 \text{ m}$

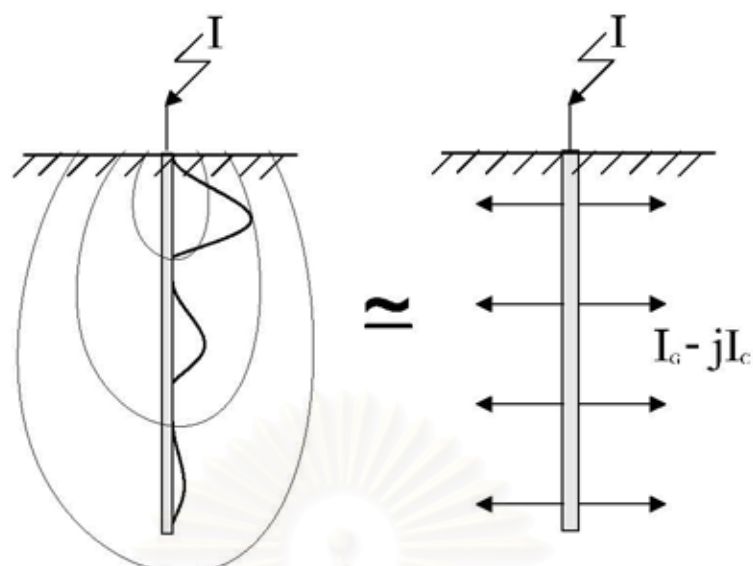
ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสและแรงดันของรากสายดินทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.19 (a) ความยาว  $10 \text{ cm}$  (b) ความยาว  $30 \text{ cm}$  (c) ความยาว  $55 \text{ cm}$  ลักษณะของรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์และแรงดันอิมพัลส์จะใกล้เคียงกัน เนื่องจากภายใต้กระแสอิมพัลส์  $1/45 \mu\text{s}$  ความเหนี่ยวนำของรากสายดินแท่งแนวตั้งที่ฝังในสารละลายน้ำเกลือความต้านทานต่ำจะมีผลต่ออิมพัลส์อิมพีแดนซ์น้อยเมื่อเทียบกับผลของความนำที่เกิดขึ้นระหว่างผิวสัมผัสของรากสายดินแท่งแนวตั้งกับสารละลายน้ำเกลือ เมื่อความยาวรากสายดินเพิ่มขึ้นจะทำให้มีพื้นที่สัมผัสเพิ่มขึ้น ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ลดลง การระบายกระแสตามขวาง ( $I_c - jI_c$ ) ของรากสายดินก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5.20 ส่งผลให้ค่าแรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าลดลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.19 ผลการทดลองรากสายดินแ่งแนวดิ่งความยาว (a) 10 cm (b) 30 cm (c) 55 cm



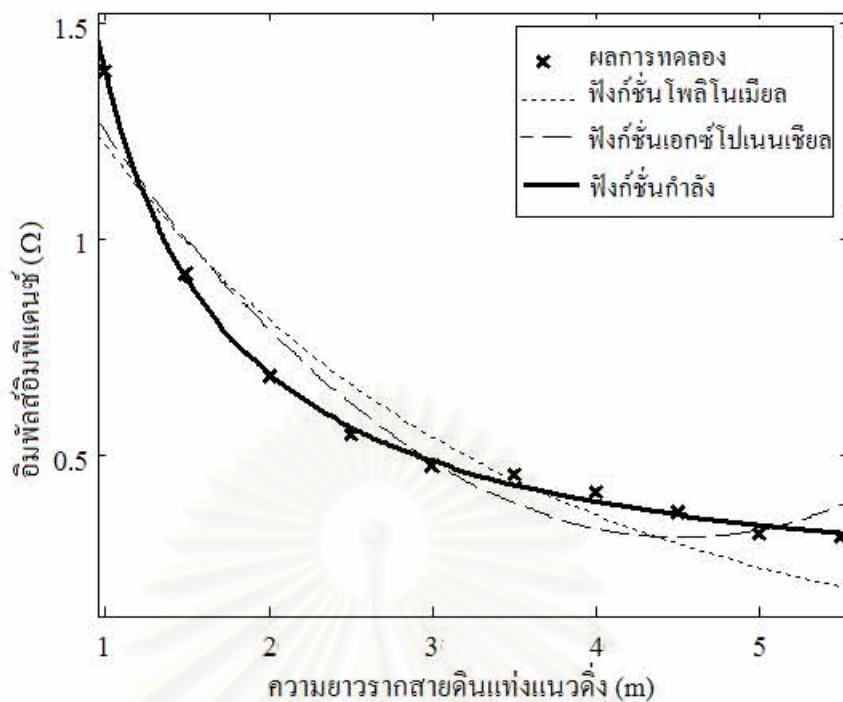


รูปที่ 5.20 การระบายกระแสของรากสายดินแท่งแนวดิ่ง

นำผลการทดลองทั้งหมดรวมทั้งค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์มาปรับเป็นค่าจริงตามหลักการทดลองย่อส่วนแสดงดังตารางที่ 5.9 และนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์กับความยาวที่ปรับเป็นค่าจริงแล้วดังแสดงในรูปที่ 5.21 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์นี้ทำโดยใช้ curve fitting ด้วยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้แก่ ฟังก์ชันโพลิโนเมียล ฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลและฟังก์ชันกำลัง ซึ่งพบว่าฟังก์ชันกำลังมีความเหมาะสมที่สุดด้วยค่า R-square ที่ดีกว่า 0.99 ดังนั้นการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับความยาวของรากสายดินจึงใช้ฟังก์ชันกำลังดังแสดงในสมการที่ (3.9)

ตารางที่ 5.9 ผลการทดลองอิทธิพลของความยาวรากสายดินต่ออิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์

ค่าจากการทดลอง				ค่าที่ปรับเป็นค่าจริง	
ความยาวรากสายดิน, L (cm)	แรงดันอิมพีลส์ (kV)	กระแสอิมพีลส์ (kA)	อิมพีลส์อิมพีแดนซ์ ( $\Omega$ )	ความยาว $n*L$ (m)	อิมพีลส์อิมพีแดนซ์ ( $\Omega$ )
10	4.58	0.33	13.88	0.7	1.388
15	3.60	0.39	9.18	1.2	0.918
20	3.24	0.48	6.81	1.7	0.681
25	3.46	0.63	5.49	2.2	0.549
30	2.86	0.60	4.77	2.7	0.477
35	3.10	0.68	4.56	3.2	0.456
40	3.22	0.78	4.13	3.7	0.413
45	3.08	0.84	3.67	4.2	0.367
50	3.04	0.95	3.20	4.7	0.320
55	2.84	0.91	3.12	5.2	0.312



รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์และความยาวของรากสายดิน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### ผลการจำลองพฤติกรรมรากลายดิน

ในบทนี้จะทำการศึกษาพฤติกรรมของรากลายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยจะกล่าวถึงวิธีและเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลอง ผลการจำลองพฤติกรรมรากลายดินแนวนอน ผลการจำลองพฤติกรรมรากลายดินแท่งแนวตั้ง และผลการจำลองพฤติกรรมราวต์กริด รวมทั้งการวิเคราะห์การนำรากลายดินมาใช้งานซึ่งจะพิจารณาจากความสามารถในการกระจายกระแสของรากลายดิน และอิทธิพลของความต้านทานดินและเวลาหน้าคลื่นของกระแสอิมพัลส์ที่มีต่อพฤติกรรมของรากลายดิน

#### 6.1 วิธีและเงื่อนไขที่ใช้ในการจำลอง

มาตรฐาน IEC [7] ได้แบ่งรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าออกเป็นกระแสฟ้าผ่าแรกรูปคลื่น 10/350  $\mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตามรูปคลื่น 0.25/100  $\mu\text{s}$  เพื่อให้ครอบคลุมรูปคลื่นที่กำหนดไว้ตามมาตรฐาน ในการจำลองจะป้อนกระแสฟ้าผ่าดังกล่าวให้กับรากลายดิน ส่วนความต้านทานดินที่ศึกษาจะพิจารณาจากความถูกต้องของแบบจำลอง ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวของดิน (soil ionization) จากงานวิจัย [79] และ [80] ได้อธิบายถึงรัศมีของบริเวณที่เกิดการแตกตัวของดิน ( $r_i$ ) สัมพันธ์กับความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤต ( $E_c$ ) ดังสมการที่ (6.1)

$$r_i = \sqrt{\frac{\rho_{soil} \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot E_c}} \quad (6.1)$$

จากรัศมีการแตกตัวสามารถประมาณค่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤต ( $V_c$ ) ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของดิน ได้ดังสมการที่ (6.2)

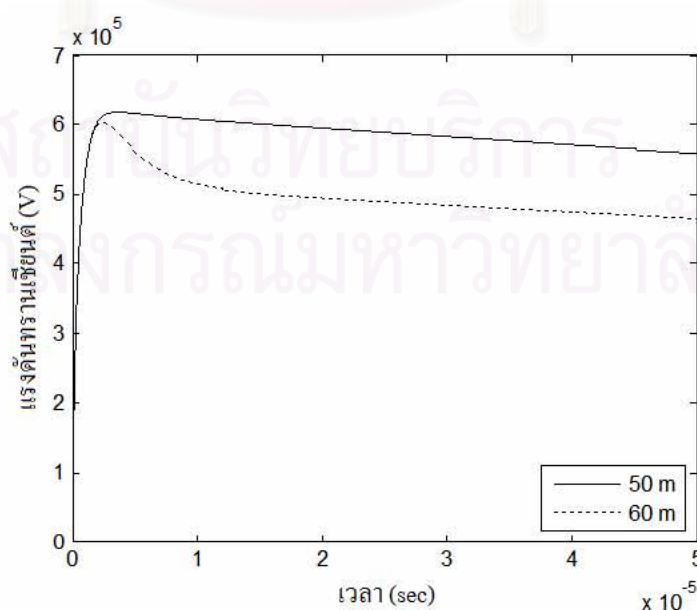
$$V_c = E_c \cdot r_i \quad (6.2)$$

เงื่อนไขในการจำลองพฤติกรรมรากลายดินคือแรงดันไฟฟ้าตรงจุดปล่อยกระแสต้องมีค่าไม่เกินแรงดันไฟฟ้าวิกฤต ( $V_c$ ) ในงานวิจัย [81] พบว่าความเข้มสนามไฟฟ้าวิกฤตที่ทำให้เกิดการแตกตัวของดินมีค่า 300 kV/m และจาก [6] ขนาดกระแสฟ้าผ่าแรกมีค่า 100 kA ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤตสำหรับความต้านทานดินค่าต่างๆ ได้ดังตารางที่ 6.1

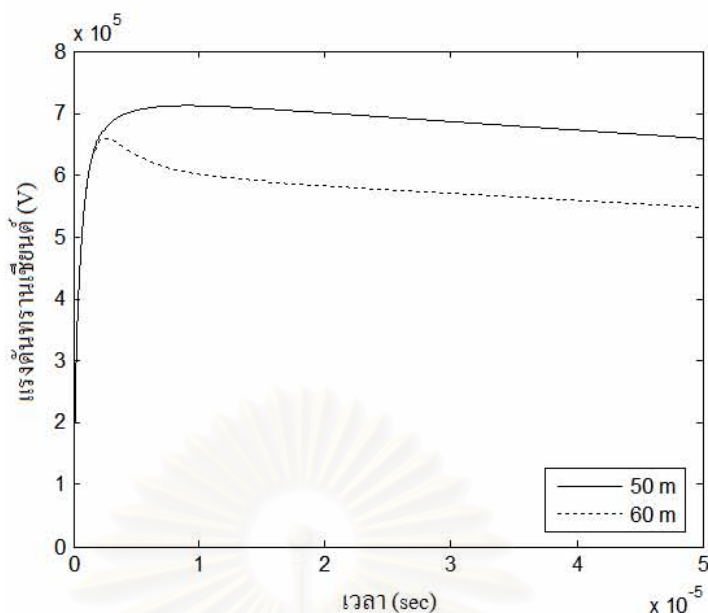
ตารางที่ 6.1 แรงดันไฟฟ้าวิกฤต

ความต้านทานดิน ( $\Omega.m$ )	ขนาดกระแส (kA)	รัศมีการแตกตัว (m)	แรงดันไฟฟ้าวิกฤต (kV)
50	100	1.60	193
60	100	1.76	177
70	100	1.90	163
80	100	2.03	153
90	100	2.15	144
100	100	2.27	137
200	100	3.21	97
300	100	3.93	79
400	100	4.53	68
500	100	5.07	61
600	100	5.55	56

การตรวจสอบเงื่อนไขของความต้านทานจะทำโดยการจำลองพฤติกรรมรากสายดินภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรกที่ความต้านทานดินค่าต่างๆ เพื่อหาค่าแรงดันทรานเซียนต์ตรงจุดปล่อยกระแสเปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤต พบว่าจากผลการจำลองที่ความต้านทานดิน 500  $\Omega.m$  จะได้ค่าแรงดันที่จุดปล่อยกระแส 60 kV ดังรูปที่ 6.1 ซึ่งยังมีค่าไม่เกินค่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤต ในขณะที่ความต้านทานดิน 600  $\Omega.m$  จะให้ค่าแรงดัน 65 kV ดังรูปที่ 6.2 ซึ่งมียุคมากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าวิกฤต ดังนั้นการจำลองพฤติกรรมรากสายดินเพื่อหาค่าความยาวประสิทธิภาพผลจะคำนวณที่ค่าความต้านทานดินไม่เกิน 500  $\Omega.m$

รูปที่ 6.1 ผลการจำลองรากสายดินแนวนอนที่ความต้านทานดิน 500  $\Omega.m$





รูปที่ 6.2 ผลการจำลองรอกสายดินแนวนอนที่ความต้านทานดิน 600  $\Omega$ .m

สำหรับค่าตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณได้แก่

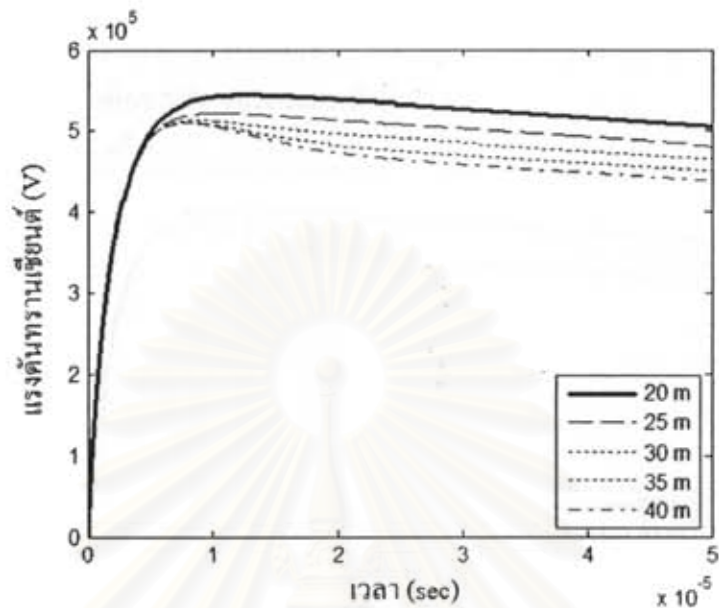
- ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตัวนำของรอกสายดิน: 16 mm
- ความลึกของรอกสายดินแนวนอนและกราวด์กริด: 0.8 m
- รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า,  $I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ : 10/350  $\mu$ s ( $\alpha=2100$ ,  $\beta=370000$ ) และ 0.25/100  $\mu$ s ( $\alpha=7000$ ,  $\beta=13500000$ )
- ขนาดกระแสฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC: 100 kA สำหรับกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu$ s และ 25 kA สำหรับกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu$ s
- ค่าความซบซิมได้ของสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์ของดิน  $\epsilon_r = 4$
- ค่าความซบซิมได้ของสนามแม่เหล็กสัมพัทธ์ของดิน  $\mu_r = 1$

โดยค่าความซบซิมได้ของสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  จะมีผลต่อค่าเก็บประจุคาบเกี่ยวระหว่างตัวนำของระบบรอกสายดินที่มีดินเป็นตัวกลาง ไดอิเล็กทริก ค่าเก็บประจุคาบเกี่ยวจะเป็นตัวกำหนดการกระจายกระแสคาปาซิทีฟของรอกสายดิน ดังนั้นค่าเก็บประจุหรือค่าความซบซิมได้ของสนามไฟฟ้าสัมพัทธ์  $\epsilon_r$  จะมีผลมากในดินที่มีความต้านทานดินสูงมากและจะมีผลน้อยกับดินที่มีความต้านทานดินปกติ

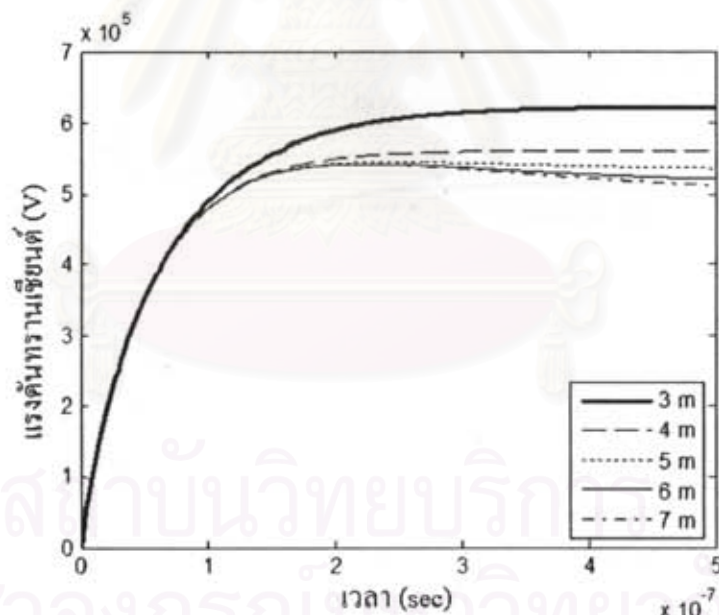
## 6.2 ผลการจำลองพฤติกรรมรอกสายดินแท่งแนวดิ่ง

การจำลองพฤติกรรมรอกสายดินแท่งแนวดิ่งเพื่อศึกษาอิทธิพลของความยาวรอกสายดินแท่งแนวดิ่งที่มีต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu$ s และกระแสฟ้าผ่า

ตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  ได้ผลการจำลองดังตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันในรูปที่ 6.3 สำหรับค่าความต้านทานดิน 50  $\Omega\cdot\text{m}$  และรูปที่ 6.4 สำหรับค่าความต้านทานดิน 100  $\Omega\cdot\text{m}$



(a)

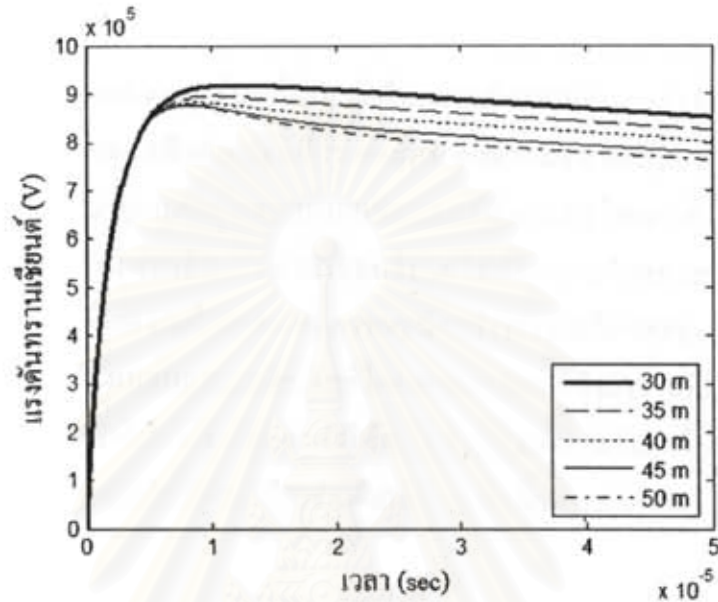


(b)

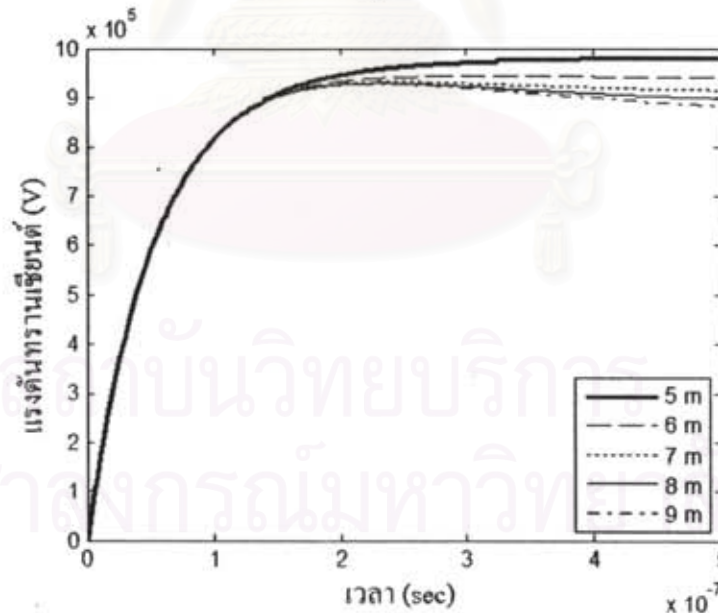
รูปที่ 6.3 อิทธิพลของความยาวรากสายดินแท่งแนวดิ่งต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสสำหรับ ความต้านทานดิน 50  $\Omega\cdot\text{m}$  ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) 10/350  $\mu\text{s}$  และ (b) 0.25/100  $\mu\text{s}$

ค่ายอดแรงดันจะลดลงเมื่อความยาวรากสายดินแท่งแนวดิ่งมีค่ามากขึ้น แต่การลดลงของค่า ยอดแรงดันจะน้อยลงและมีแนวโน้มอ้อมตัวเมื่อความยาวถึงค่าๆหนึ่งเนื่องจากรากสายดินมีความยาว ประสิทธิภาพ จากรูปที่ 6.3 (a) ภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  ขนาด 100 kA ความยาว

ประสิทธิผลจะมีค่าอยู่ในช่วง 30 - 40 m ที่ค่าขอดแรงดันประมาณ 500 kV และจากรูปที่ 6.3 (b) ความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu$ s ขนาด 25 kA จะมีค่าอยู่ในช่วง 5 - 7 m ด้วยค่าขอดแรงดันประมาณ 520 kV เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองด้วยกระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นต่างกัน พบว่าค่าขอดแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่าค่าขอดของกระแสฟ้าผ่าตามมีค่าเพียง 25% ของกระแสฟ้าผ่าแรก



(a)

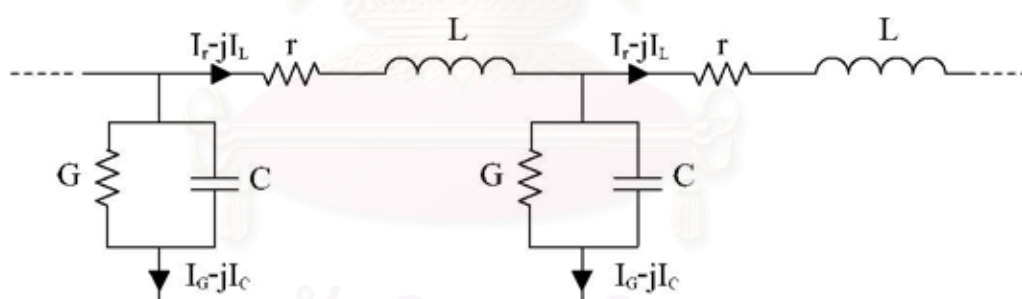


(b)

รูปที่ 6.4 อิทธิพลของความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้งต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสสำหรับความต้านทานดิน 100  $\Omega$ .m ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) 10/350  $\mu$ s และ (b) 0.25/100  $\mu$ s

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าขดแรงดันและความยาวรากสายดินสำหรับความต้านทานดิน  $100 \Omega.m$  มีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของความต้านทานดิน  $50 \Omega.m$  เนื่องจากรากสายดินมีความยาวประสิทธิผล จากรูปที่ 6.4 (a) ความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก  $10/350 \mu s$  จะมีค่าอยู่ในช่วง  $40 - 50 m$  ที่ค่าขดแรงดันประมาณ  $850 kV$  และจากรูปที่ 6.4 (b) ความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม  $0.25/100 \mu s$  จะมีค่าอยู่ในช่วง  $7 - 9 m$  ด้วยค่าขดแรงดันประมาณ  $900 kV$  ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าขดแรงดันจากกระแสฟ้าผ่าแรก

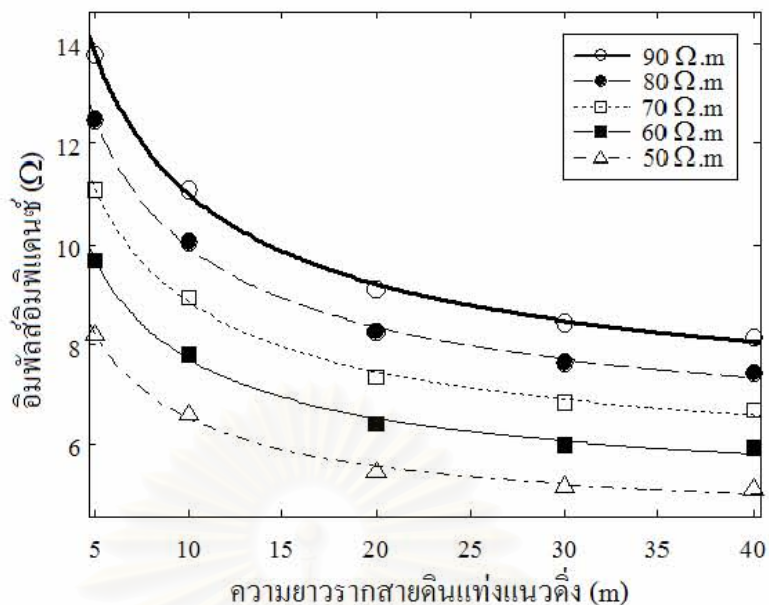
จากผลการจำลองรากสายดินแท่งแนวตั้งในความต้านทานดิน  $50 \Omega.m$  และ  $100 \Omega.m$  ด้วยกระแสฟ้าผ่าแรกและกระแสฟ้าผ่าตาม แม้ว่ากระแสฟ้าผ่าตามมีขนาดกระแสสั้นกว่า แต่กระแสฟ้าผ่าตามก็ให้แรงดันตรงจุดปล่อยกระแสมากกว่ากระแสฟ้าผ่าแรก โดยผลต่างแรงดันดังกล่าวจะมากขึ้นตามค่าความต้านทานดิน ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองสายส่งแบบกระจายพารามิเตอร์ที่ประกอบด้วยความต้านทาน ( $r$ ) ความเหนี่ยวนำ ( $L$ ) ตัวเก็บประจุ ( $C$ ) และความนำ ( $G$ ) ดังแสดงในรูปที่ 6.5 เมื่อป้อนกระแสอิมพัลส์โดยเฉพาะกระแสฟ้าผ่าตามที่มีส่วนประกอบของความถี่สูง ความเหนี่ยวนำในรากสายดินจะทำให้ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์มากขึ้น และแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าสูงขึ้นอย่างไรก็ตามค่าแรงดันดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานดินเนื่องจากค่ากระแสตามขวาง ( $I_G - jI_C$ ) ที่ไหลออกจากรากสายดินผ่านทางความนำ  $G$  มีค่าลดลงในขณะที่กระแสตามยาว ( $I_r - jI_L$ ) ที่ไหลผ่านความต้านทาน  $r$  มีค่าเพิ่มขึ้น



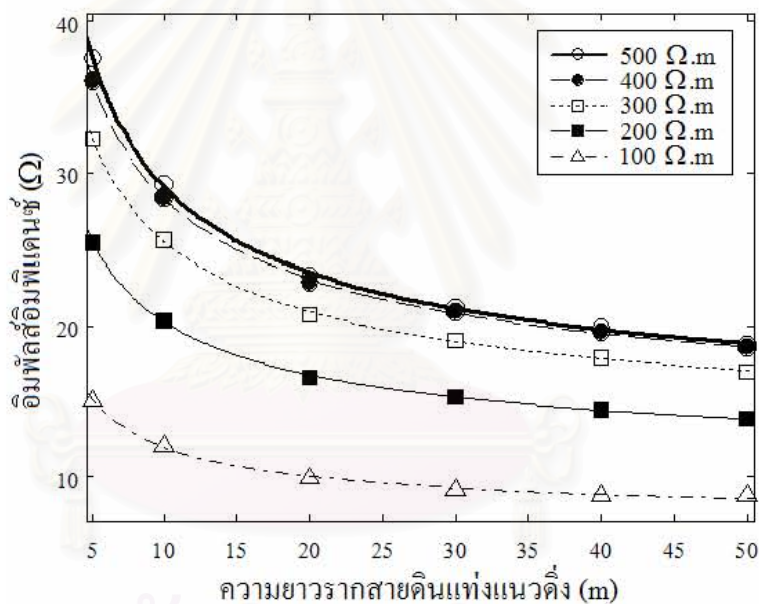
รูปที่ 6.5 แบบจำลองสายส่งแบบกระจายพารามิเตอร์

นำค่ากระแสและแรงดันที่ได้จากผลการจำลองพฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดินโดยการเปลี่ยนแปลงความยาวรากสายดินที่ความต้านทานดินค่าต่างๆ มาหาค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์จากอัตราส่วนค่าขดแรงดันต่อค่าขดกระแส จากนั้นนำค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ที่ได้มาพล็อตกราฟกับความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้งแล้วทำ fit curve ด้วย power function เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์  $a$ ,  $b$  และ  $c$  ดังแสดงในรูปที่ 6.6 สำหรับกระแสฟ้าผ่าแรก  $10/350 \mu s$  และรูปที่ 6.7 สำหรับกระแสฟ้าผ่าตาม  $0.25/100 \mu s$





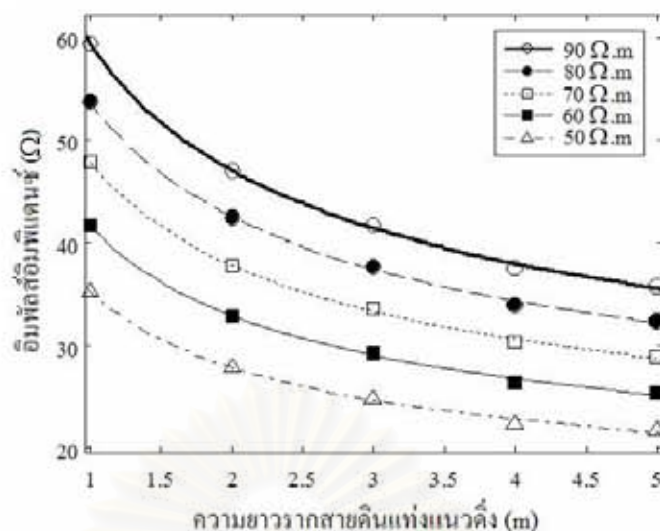
(a)



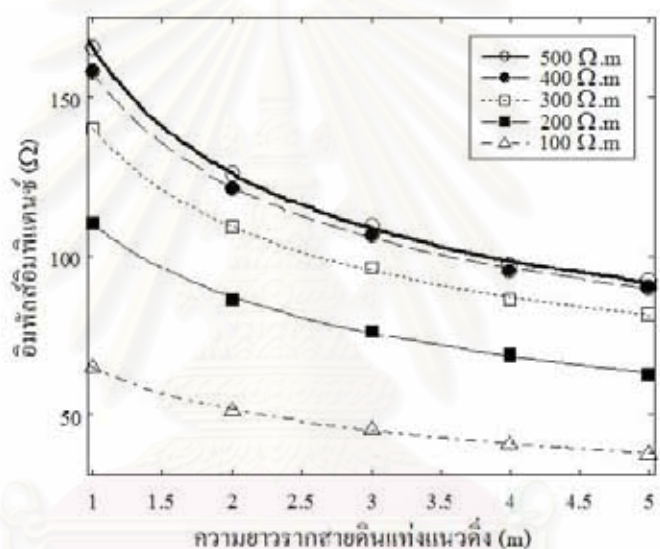
(b)

รูปที่ 6.6 อิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับความยาวรอกสายดินแบ่งแหวดิ่ง ภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu$ s สำหรับความต้านทานดิน (a) 50 - 90  $\Omega$ .m (b) 100 - 500  $\Omega$ .m

ความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับความยาวรอกสายดิน จะมีแนวโน้มเข้าใกล้กันเมื่อความต้านทานดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสอิมพีแดนซ์ที่ไหลผ่านรอกสายดินส่วนใหญ่จะเป็นกระแสตามยาว ( $I_{-j}I_L$ ) ที่ไหลอยู่ภายในตัวนำของรอกสายดิน ซึ่งการไหลของกระแสจะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำ



(a)



(b)

รูปที่ 6.7 อิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้ง ภายใต้  
กระแสไฟฟ้าตาม 0.25/100  $\mu$ s สำหรับความต้านทานดิน (a) 50 - 90  $\Omega$ .m (b) 100 - 500  $\Omega$ .m

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับความยาวรากสายดินภายใต้กระแส  
ไฟฟ้าตาม 0.25/100  $\mu$ s ในรูปที่ 6.7 มีลักษณะคล้ายกับกราฟความสัมพันธ์ภายใต้กระแสไฟฟ้าแรก  
ในรูปที่ 6.6 โดยกราฟที่ได้มีแนวโน้มเข้าใกล้กันเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b$  และ  $c$  ที่ได้จากการทำ fit curve และค่าความยาว  
ประสิทธิผลของรากสายดินแท่งแนวตั้งภายใต้กระแสไฟฟ้าแรก 10/350  $\mu$ s ที่คำนวณด้วยวิธี  
อิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวดังสมการที่ (3.12) เปรียบเทียบกับวิธีของ Gupta ดังสมการที่ (3.5) ที่  
นำมาใช้กับรากสายดินแท่งแนวตั้ง และค่า % ความคลาดเคลื่อนของวิธี Gupta เปรียบเทียบกับ  
วิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว สำหรับความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสไฟฟ้าตาม 0.25/100  $\mu$ s  
จะแสดงอยู่ในตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.2 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแท่งแนวดิ่งภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu$ s

ความต้านทานดิน	สัมประสิทธิ์ power function				ความยาวประสิทธิผล (m)		% ความ
	a	b	c	R-square	วิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว	วิธี Gupta	
50	9.19	-0.42	3.11	0.97	29.4	40.1	37
60	10.98	-0.42	3.59	0.97	31.7	44.5	39
70	12.71	-0.42	4.05	0.97	34.0	48.2	40
80	14.37	-0.42	4.48	0.97	36.2	51.0	41
90	16.02	-0.42	4.88	0.97	38.5	54.1	40
100	17.58	-0.41	5.25	0.97	41.1	57.8	39
200	30.39	-0.40	8.09	0.99	63.0	80.7	176
300	40.29	-0.41	9.51	0.99	78.2	99.1	211
400	46.59	-0.41	10.02	0.99	94.4	114.0	232
500	50.35	-0.42	9.81	0.99	109.1	127.3	240

ตารางที่ 6.3 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแท่งแนวดิ่งภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu$ s

ความต้านทานดิน	สัมประสิทธิ์ power function				ความยาวประสิทธิผล (m)		% ความ
	a	b	c	R-square	วิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว	วิธี Gupta	
50	23.41	-0.54	11.93	0.99	5.3	6.4	20
60	27.92	-0.54	13.78	0.99	5.7	7.8	22
70	32.40	-0.53	15.44	0.99	6.2	8.0	21
80	36.84	-0.53	16.94	0.99	6.7	8.1	19
90	41.17	-0.52	18.33	0.99	7.3	9.1	17
100	45.35	-0.52	19.68	0.99	7.7	9.8	16
200	79.93	-0.51	30.33	0.99	10.4	80.4	270
300	103.10	-0.52	37.08	1.00	11.2	99.5	313
400	118.20	-0.53	39.65	1.00	12.3	114.1	333
500	126.20	-0.54	39.40	1.00	13.2	127.2	334

เปรียบเทียบค่าความยาวประสิทธิผลที่คำนวณได้ตามนิยามของ Gupta กับวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาวพบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความยาวประสิทธิผลสำหรับกระแสฟ้าผ่าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานดิน

ค่าความยาวประสิทธิผลที่คำนวณด้วยหลักการต่อหน่วยความยาว พบว่ามีความใกล้เคียงกับนิยามพื้นฐานคือเป็นความยาวที่มีผลน้อยมากต่อการลดลงของค่ายอดแรงดัน ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานดิน เพราะว่าการไหลของกระแสตามขวาง (transverse current) ที่ไหลในแนวรัศมีออกจากรากสายดินมีค่าน้อยลง แต่การไหลของกระแสตามยาว (longitudinal current) จะมีค่ามากขึ้น ซึ่งการไหลของกระแสตามยาวจะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำของรากสายดิน ทำให้ค่าความยาวประสิทธิผลมีค่าสั้นลงตามเวลาหน้าคลื่นของกระแสอิมพัลส์

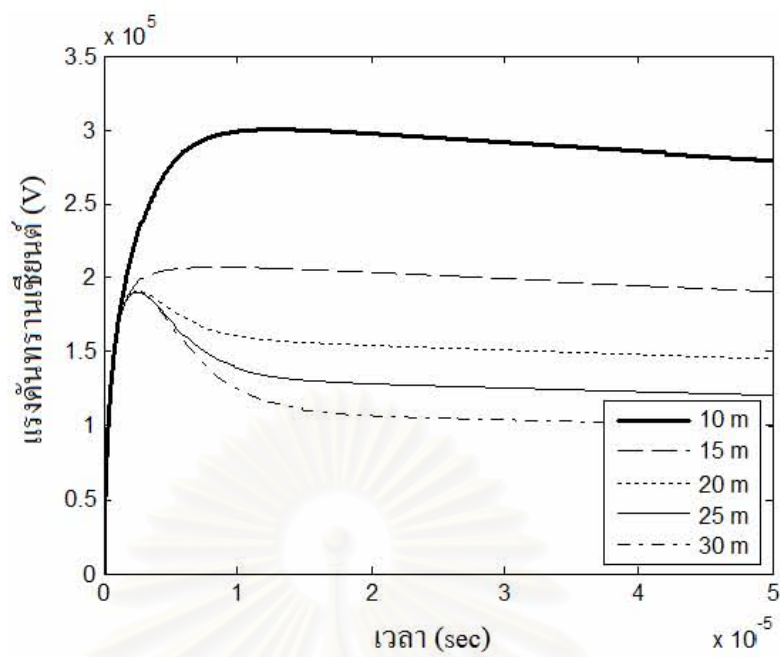
### 6.3 ผลการจำลองพฤติกรรมรากสายดินแนวนอน

การจำลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของความยาวรากสายดินแนวนอนที่มีต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสภายใต้กระแสฟ้าผ่าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  ได้ผลของการจำลองรูปคลื่นแรงดันดังตัวอย่างในรูปที่ 6.8 สำหรับความต้านทานดิน 50  $\Omega\cdot\text{m}$  และรูปที่ 6.9 สำหรับความต้านทานดิน 100  $\Omega\cdot\text{m}$

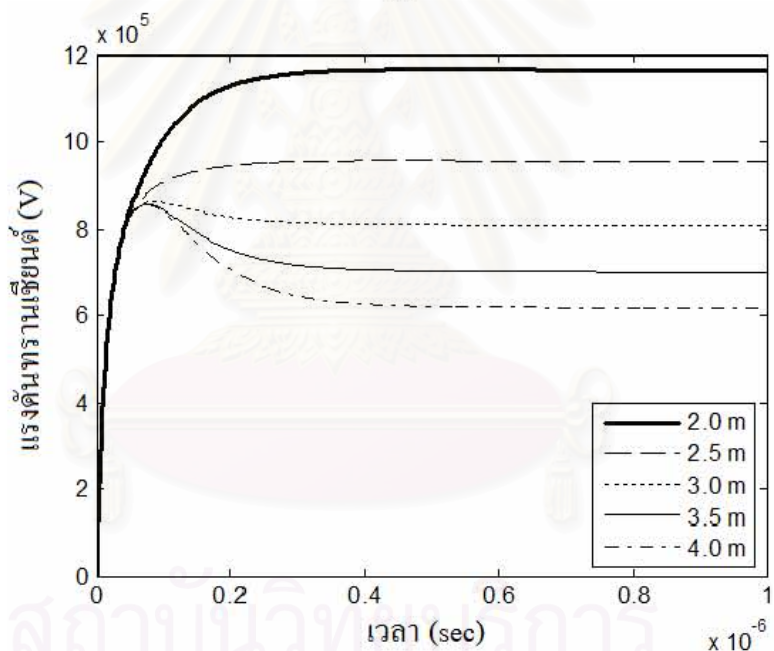
ค่ายอดแรงดันจะลดลงตามความยาวของรากสายดินแนวนอนที่เพิ่มขึ้น แต่การลดลงของค่ายอดแรงดันจะมีแนวโน้มอ้อมตัวเมื่อความยาวถึงค่าๆหนึ่ง เพราะรากสายดินมีความยาวประสิทธิผลในรูปที่ 6.8 (a) ภายใต้กระแสฟ้าผ่าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  ขนาด 100 kA ความยาวประสิทธิผลจะมีค่าอยู่ในช่วง 20 - 30 m ที่ค่ายอดแรงดันประมาณ 180 kV และจากรูปที่ 6.8 (b) ความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  ขนาด 25 kA จะมีค่าอยู่ในช่วง 3 - 4 m ด้วยค่ายอดแรงดันประมาณ 820 kV ซึ่งมีค่ามากกว่าค่ายอดแรงดันของกระแสฟ้าผ่าผ่าแรก

สำหรับความต้านทานดิน 100  $\Omega\cdot\text{m}$  ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดแรงดันกับความยาวของรากสายดินมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของความต้านทานดิน 50  $\Omega\cdot\text{m}$  การลดลงของค่ายอดแรงดันมีแนวโน้มอ้อมตัวเนื่องจากความยาวประสิทธิผล จากรูปที่ 6.9 (a) ความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสฟ้าผ่าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  ขนาด 100 kA จะมีค่าอยู่ในช่วง 30 - 35 m ที่ค่ายอดแรงดันประมาณ 280 kV และจากรูปที่ 6.9 (b) ความยาวประสิทธิผลภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  ขนาด 25 kA จะมีค่าอยู่ในช่วง 4 - 5 m ด้วยค่ายอดแรงดันประมาณ 1200 kV



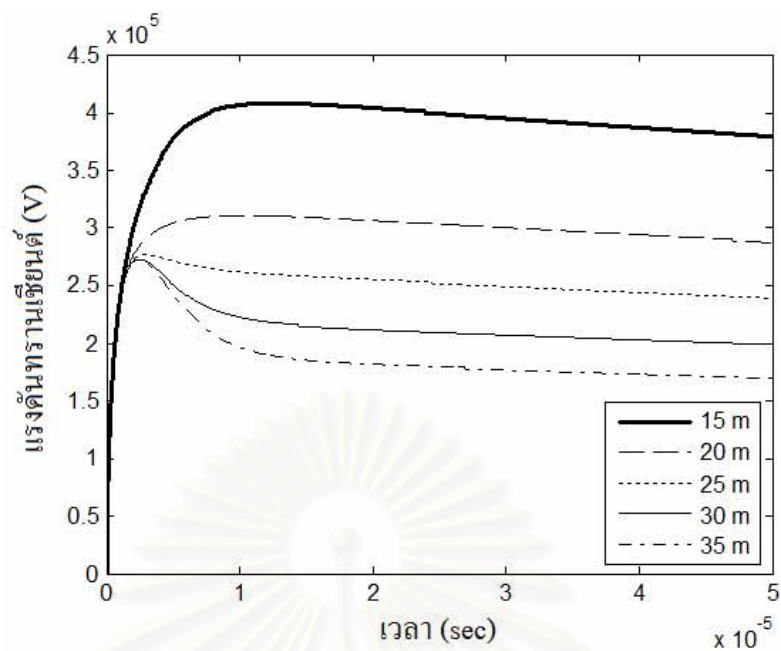


(a)

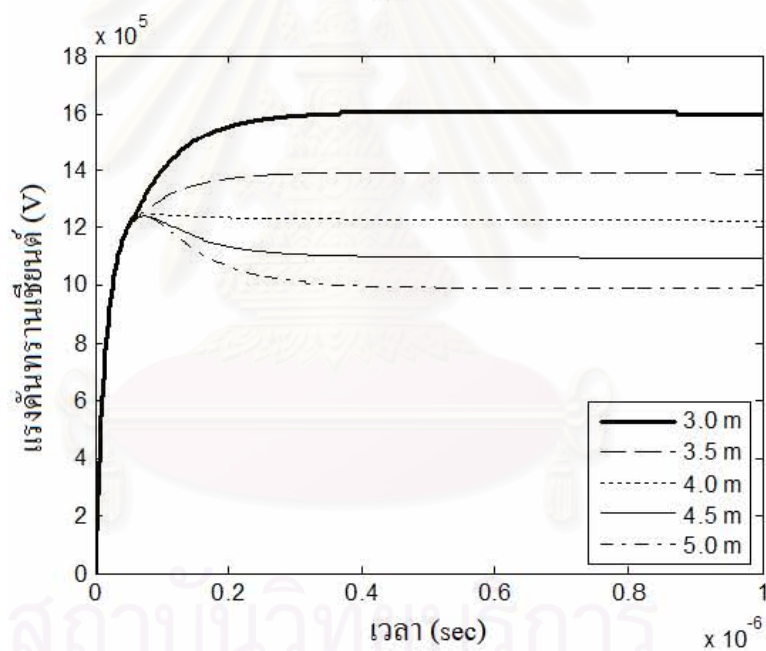


(b)

รูปที่ 6.8 อิทธิพลของความยาวรากสายดินแนวนอนต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแส สำหรับความต้านทานดิน 50 Ω.m ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) รูปคลื่น 10/350 μs และ (b) รูปคลื่น 0.25/100 μs



(a)

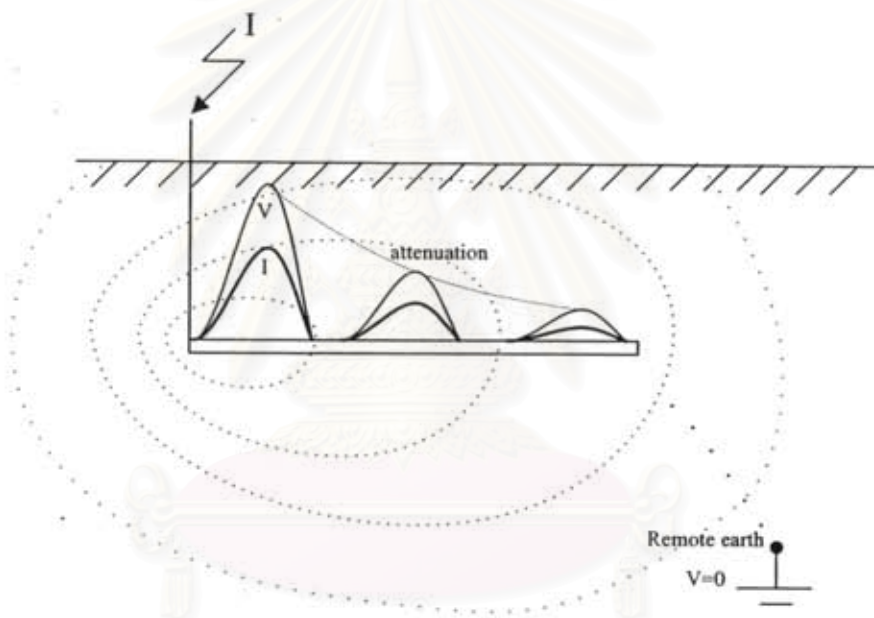


(b)

รูปที่ 6.9 อิทธิพลของความยาวรากสายดินแนวนอนต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแส สำหรับ ความต้านทานดิน  $100 \Omega.m$  ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a)  $10/350 \mu s$  และ (b)  $0.25/100 \mu s$

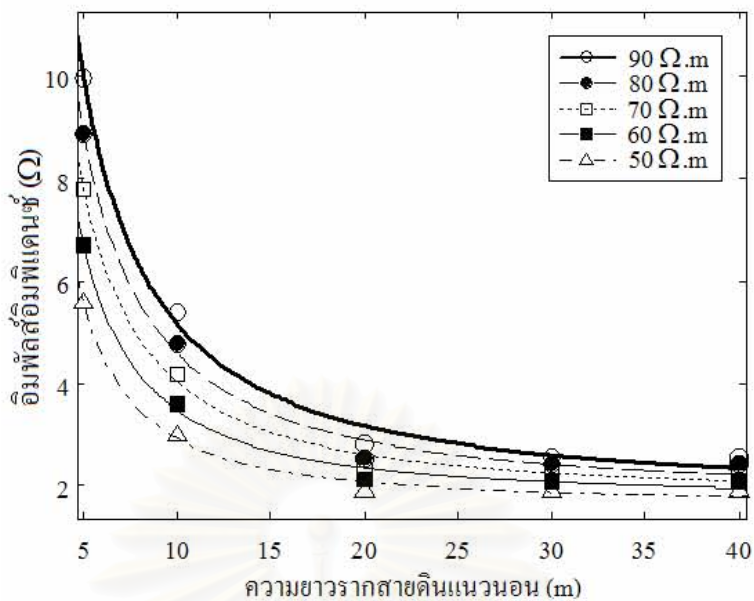
จากผลการจำลองรากสายดินแนวนอนในดินที่มีความต้านทานดิน  $50 \Omega.m$  และ  $100 \Omega.m$  พบว่าพฤติกรรมของรากสายดินภายใต้กระแสฟ้าผ่าตามจะมีค่าแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสมากกว่าแรงดันของกระแสฟ้าผ่าแรกแม้ว่าขนาดของกระแสฟ้าผ่าตามจะมีค่าน้อยกว่า ส่วนผลต่างของแรงดันจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความต้านทานดิน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการเคลื่อนที่ของคลื่นกระแส

หรือแรงดันบนรากสายดินด้วยแบบจำลองสายส่งบนสื่อกลางแบบมีความสูญเสีย (lossy medium) จากรูปที่ 6.10 ระหว่างที่คลื่นกระแสและแรงดันเคลื่อนที่ออกจากจุดปล่อยกระแสพลังงานของคลื่น จะถูกลดทอนทำให้ค่ายอดของคลื่นลดลง การลดทอนภายในรากสายดินจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความถี่ ในขณะที่เดียวกันการเคลื่อนที่ของคลื่นออกจากรากสายดินไปยัง remote earth จะเกิดขึ้นโดยรอบตลอดความยาวของรากสายดินตามค่าความนำของดิน ดังนั้นการเคลื่อนที่ของคลื่นทั้งที่เคลื่อนไปบนรากสายดินและที่เคลื่อนออกจากรากสายดินจึงถูกจำกัดจากส่วนประกอบทางความถี่ของกระแสอิมพัลส์และความนำของดิน กระแสอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นสั้นเช่นกระแสฟ้าผ่าตาม ซึ่งมีส่วนประกอบของความถี่สูงจะทำให้อิมพีแดนซ์ของรากสายดินเพิ่มขึ้น แรงดันไฟฟ้าตรงจุดปล่อยกระแสสูงขึ้น โดยเฉพาะเมื่อรากสายดินดังกล่าวถูกฝังในดินที่มีความต้านทานดินสูง แรงดันไฟฟ้าตรงจุดปล่อยกระแสก็จะมีค่าสูงขึ้น

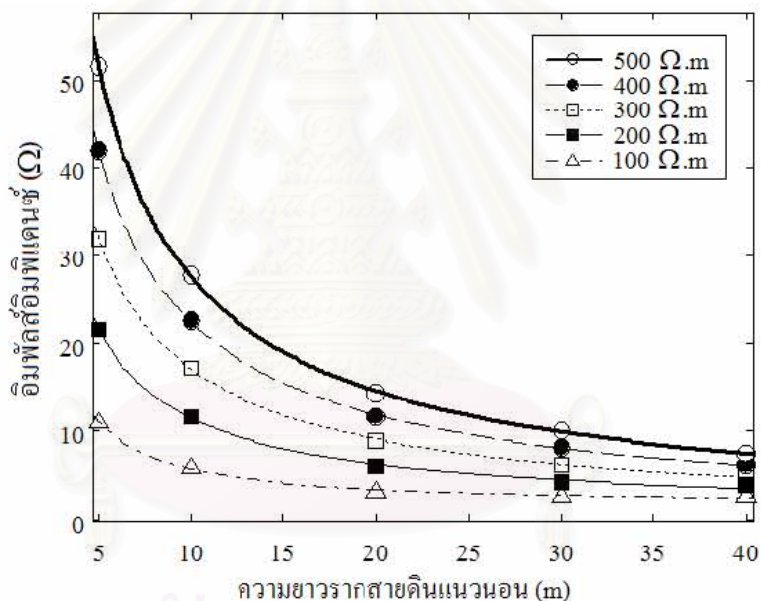


รูปที่ 6.10 การเคลื่อนที่ของคลื่นที่ออกจากรากสายดิน ไปยัง remote earth

ค่ากระแสและแรงดัน ที่ได้จากการจำลองเปลี่ยนความยาวของรากสายดินแนวนอน ในความต้านทานดินค่าต่างๆ จะถูกนำมาคำนวณหาค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์จากอัตราส่วนค่ายอดแรงดันต่อค่ายอดกระแส จากนั้นนำค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ที่ได้มาพล็อตกราฟกับความยาวรากสายดินแนวนอนแล้วทำ fit curve ด้วย power function เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์  $a$ ,  $b$  และ  $c$  ดังแสดงในรูปที่ 6.11 สำหรับกระแสฟ้าผ่าแรก  $10/350 \mu\text{s}$  และ รูปที่ 6.12 สำหรับกระแสฟ้าผ่าตาม  $0.25/100 \mu\text{s}$



(a)

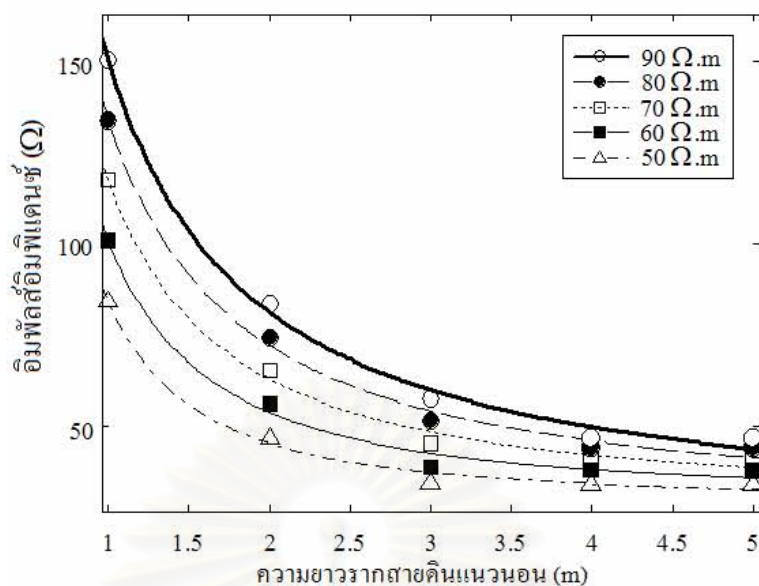


(b)

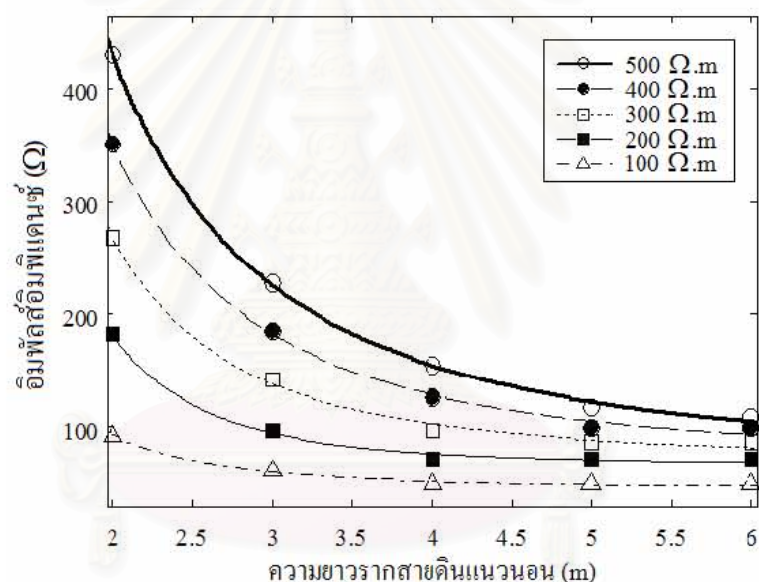
รูปที่ 6.11 อิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับความยาวรากสายดินแนวนอน ภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu$ s สำหรับความต้านทานดิน (a) 50 - 90  $\Omega$ .m (b) 100 - 500  $\Omega$ .m

ค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์จะลดลงตามความยาวรากสายดิน และกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จะมีแนวโน้มเข้าใกล้กันเมื่อความต้านทานดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากการไหลของกระแสตามขวางออกรากรากสายดินมีค่าน้อย ทำให้กระแสอิมพีแดนซ์ส่วนใหญ่จะไหลอยู่ภายในรากสายดินซึ่งได้รับอิทธิพลจากค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำ ที่มีค่าขึ้นกับส่วนประกอบทางความถี่ของกระแสอิมพีแดนซ์มากกว่าความยาวของรากสายดิน





(a)



(b)

รูปที่ 6.12 อิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับความยาวรากสายดินแนวนอน ภายใต้  
กระแสไฟฟ้าตาม 0.25/100  $\mu$ s สำหรับความต้านทานดิน (a) 50 - 90  $\Omega$ .m (b) 100 - 500  $\Omega$ .m

ภายใต้กระแสไฟฟ้าตาม 0.25/100  $\mu$ s กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับ  
ความยาวรากสายดินจะมีลักษณะคล้ายกับกราฟความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าแรก 10/350  $\mu$ s

ค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b$  และ  $c$  ที่ได้จากการทำ fit curve ค่าความยาวประสิทธิผลของ  
รากสายดินแนวนอนที่คำนวณด้วยหลักการค่อหน่วยความยาวกับวิธีของ Gupta รวมทั้งค่า %  
ความคลาดเคลื่อนระหว่างวิธี Gupta เปรียบเทียบกับวิธีอิมพีแดนซ์ค่อหน่วยความยาวแสดงดัง

ตารางที่ 6.4 สำหรับกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  และตารางที่ 6.5 สำหรับกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$

ตารางที่ 6.4 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$

ความต้านทานดิน ( $\Omega\cdot\text{m}$ )	สัมประสิทธิ์ของ power function				ความยาวประสิทธิผล (m)		%ความ คลาดเคลื่อน
	a	b	c	R- square	วิธีอิมพีแดนซ์ต่อ หน่วยความยาว	วิธี Gupta	
50	55.34	-1.65	1.68	0.99	15.0	40.5	33
60	61.12	-1.57	1.81	0.98	17.2	44.4	37
70	67.77	-1.52	1.92	0.98	19.2	48.1	41
80	71.69	-1.45	1.99	0.98	21.9	51.5	46
90	78.86	-1.43	2.12	0.98	23.3	54.2	49
100	84.35	-1.40	2.22	0.98	25.2	57.1	53
200	241.3	-1.42	2.56	1.00	46.1	80.1	79
300	338.1	-1.38	3.29	1.00	53.2	99.3	97
400	395.4	-1.32	3.80	1.00	63.1	114.0	114
500	438.7	-1.27	4.17	1.00	75.4	127.4	132

ตารางที่ 6.5 ความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$

ความต้านทานดิน ( $\Omega\cdot\text{m}$ )	สัมประสิทธิ์ของ power function				ความยาวประสิทธิผล (m)		%ความ คลาดเคลื่อน
	a	b	c	R- square	วิธีอิมพีแดนซ์ต่อ หน่วยความยาว	วิธี Gupta	
50	58.53	-1.53	25.72	0.99	3.1	6.4	38
60	72.81	-1.49	28.19	0.99	3.5	7.0	44
70	85.73	-1.49	31.97	0.99	3.6	7.5	47
80	100.1	-1.45	34.22	0.99	3.9	8.0	52
90	113.9	-1.45	37.09	0.99	4.0	8.5	56
100	128.6	-1.45	39.01	0.99	4.2	9.0	58
200	404.7	-1.67	54.51	1.00	6.0	12.7	68
300	601.8	-1.60	69.13	0.99	7.1	15.6	87
400	787.1	-1.54	80.70	0.99	8.0	18.0	106
500	943.2	-1.47	90.17	0.99	9.2	20.1	128

ผลการเปรียบเทียบความยาวประสิทธิผลตามนิยามของ Gupta กับวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วย ความยาวพบว่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของความยาวประสิทธิผลสำหรับกระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามค่าความต้านทานดินเช่นเดียวกับ รากสายดินแห่งแฉวง

ค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแนวนอนที่คำนวณด้วยวิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วย ความยาวมีความสอดคล้องกับความหมายของความยาวประสิทธิผลคือเป็นความยาวที่มีผลน้อยมาก ต่อการลดลงของค่ายอดแรงดัน โดยความยาวประสิทธิผลจะมีค่าน้อยสำหรับกระแสอิมพัลส์ที่มี เวลาหน้าคลื่นสั้น เพราะอิทธิพลของส่วนประกอบความถี่สูงในกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นสั้น ทำให้ ค่าอิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำในรากสายดินมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งจะจำกัดการไหลของกระแสอิมพัลส์ ที่ไปยังปลายอีกข้างหนึ่งของรากสายดิน

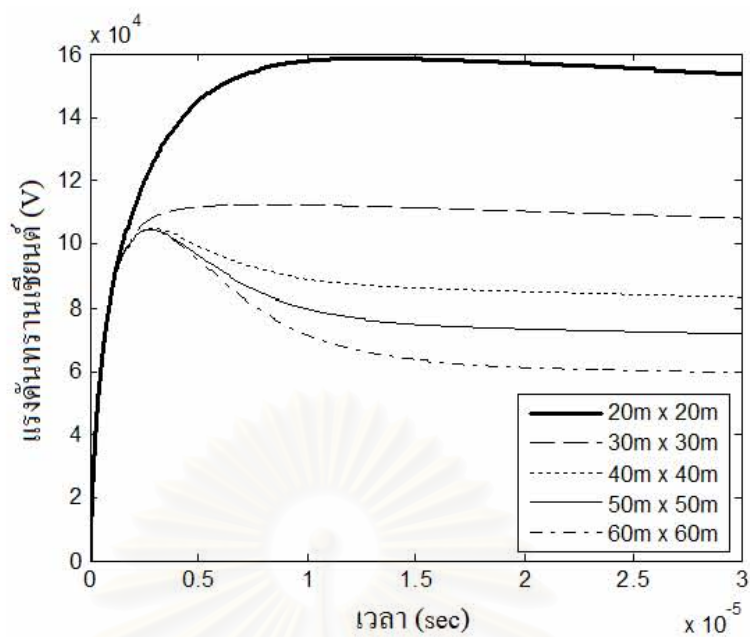
#### 6.4 ผลการจำลองพฤติกรรมกราวด์กริด

การจำลองพฤติกรรมกราวด์กริดเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของขนาดกราวด์กริดที่มีต่อแรงดัน ตรงจุดปล่อยกระแส พบว่าค่ายอดแรงดันจะลดลงเมื่อขนาดกราวด์กริดมีค่ามากขึ้น แต่การลดลง ของค่ายอดแรงดันจะน้อยลงเมื่อขนาดกราวด์กริดใหญ่จนถึงค่าๆหนึ่ง เพราะว่ากราวด์กริดจะมี ขนาดประสิทธิผลภายใต้กระแสอิมพัลส์ ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันของกราวด์กริดแสดงดังรูปที่ 6.13 สำหรับกราวด์กริดที่ติดตั้งในดินที่มีความต้านทานดิน 50  $\Omega\cdot\text{m}$  และรูปที่ 6.14 สำหรับกราวด์กริดที่ ติดตั้งในความต้านทานดิน 100  $\Omega\cdot\text{m}$

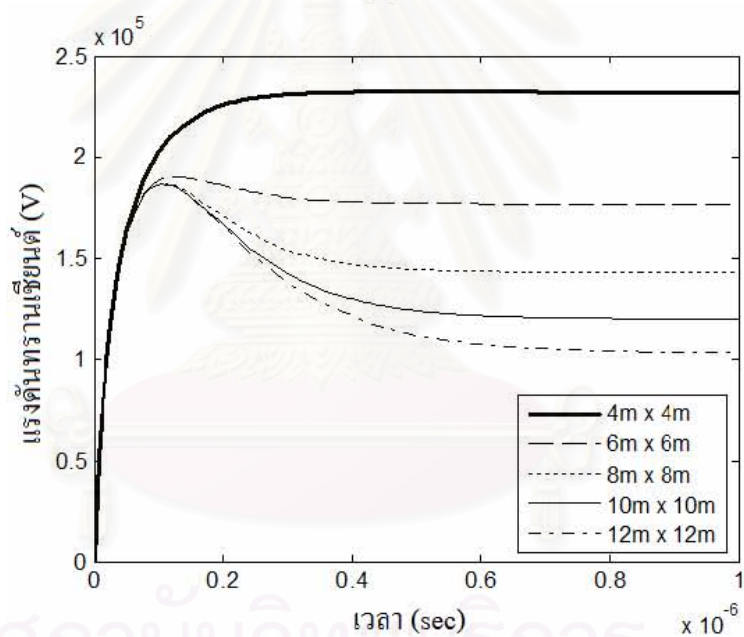
ภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  ขนาด 100 kA ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดจะมีค่า อยู่ในช่วง 40m x 40m - 60m x 60m ที่ค่ายอดแรงดันประมาณ 100 kV และจากรูปที่ 6.13 (b) ขนาด ประสิทธิผลของกราวด์กริดภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  ขนาด 25 kA จะมีค่าอยู่ในช่วง 8m x 8m - 12m x 12m ด้วยค่ายอดแรงดันประมาณ 185 kV เมื่อเปรียบเทียบผลการจำลองด้วย กระแสฟ้าผ่าที่มีเวลาหน้าคลื่นต่างกัน พบว่าค่ายอดแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสภายใต้กระแสฟ้าผ่า ตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  มีค่ามากกว่าค่ายอดแรงดันของกระแสฟ้าผ่าแรกเกือบสองเท่า แม้ว่าขนาดของ กระแสฟ้าผ่าตามมีค่าเพียงหนึ่งในสี่ของกระแสฟ้าผ่าแรก

ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu\text{s}$  ขนาด 100 kA ดัง รูปที่ 6.14 (a) จะมีค่าอยู่ในช่วง 60m x 60m - 70m x 70m ที่ค่ายอดแรงดันประมาณ 150 kV และ จากรูปที่ 6.14 (b) ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu\text{s}$  ขนาด 25 kA จะมีค่าอยู่ในช่วง 10m x 10m - 14m x 14m ด้วยค่ายอดแรงดันประมาณ 280 kV ซึ่งมีค่ามากกว่า ค่ายอดแรงดันจากกระแสฟ้าผ่าแรก





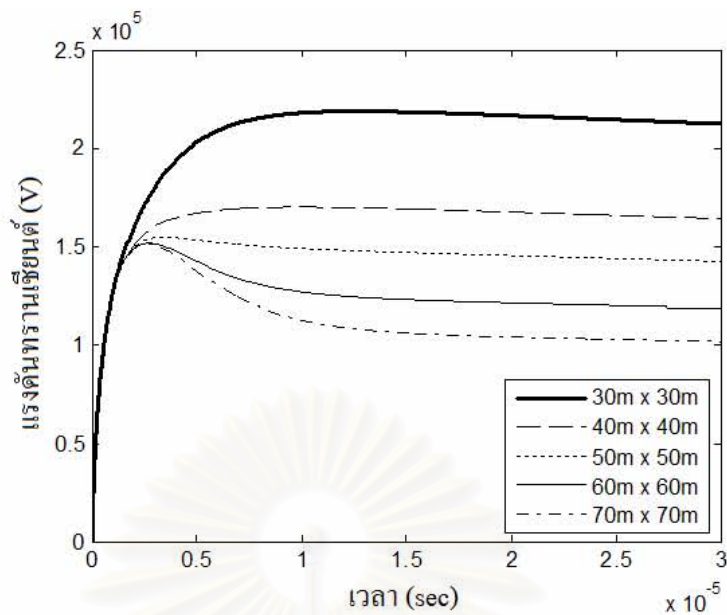
(a)



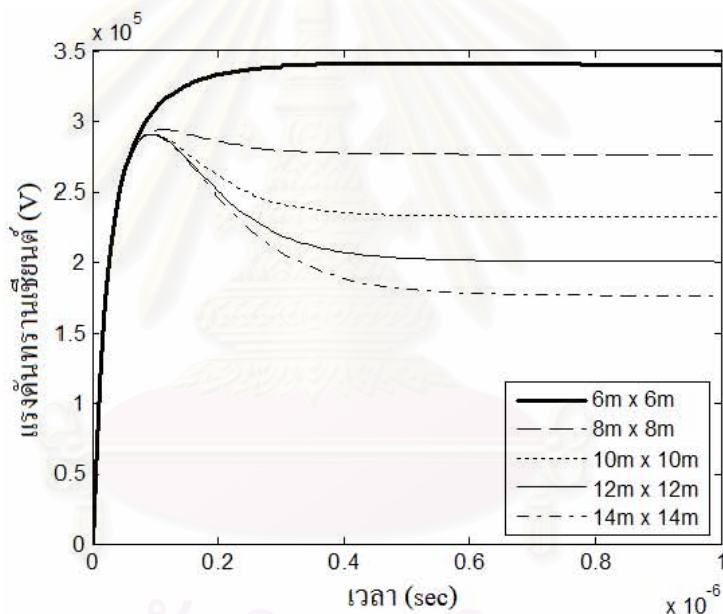
(b)

รูปที่ 6.13 อิทธิพลของขนาดกรวดคาร์บอนต่อแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสสำหรับความต้านทานดิน  $50 \Omega.m$  ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a)  $10/350 \mu s$  และ (b)  $0.25/100 \mu s$





(a)



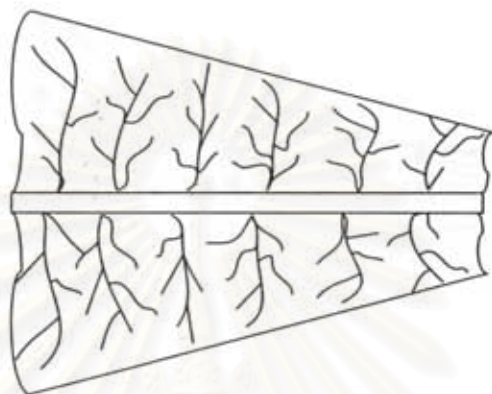
(b)

รูปที่ 6.14 อิทธิพลของขนาดกรวดคาร์บอนต่อแรงตรงจุดปล่อยกระแสสำหรับ ความต้านทานดิน 100 Ω.m ภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) 10/350 μs และ (b) 0.25/100 μs

พฤติกรรมของกรวดคาร์บอนที่ค่าความต้านทานดิน 50 Ω.m และ 100 Ω.m จะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดแรงดันและขนาดกรวดคาร์บอนที่คล้ายกันคือ ค่ายอดแรงดันมีแนวโน้มมีค่าเมื่อขนาดกรวดคาร์บอนใหญ่ขึ้นถึงระดับหนึ่ง ซึ่งสามารถอธิบายได้จากการกระจายกระแสบนตัวนำที่ประกอบขึ้นเป็นกรวดคาร์บอน

ในขณะที่มีกระแสอิมพัลส์ไหลผ่านกรวดคาร์บอน การกระจายกระแสบนตัวนำจะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ (nonuniform) ดังแสดงในรูปที่ 6.15 เนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำทำให้ค่าอิมพัลส์

อิมพีแดนซ์ของตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้นตามความยาว ตัวนำที่อยู่ใกล้จุดปล่อยกระแสจึงมีการกระจายกระแสออกไปยังดินมากกว่าตัวนำที่อยู่ด้านปลาย และเมื่อความยาวของตัวนำเพิ่มขึ้นถึงค่าๆหนึ่ง ค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์จะมีค่าสูงมากจนกระทั่งกระแสอิมพีแดนซ์ไม่สามารถไหลไปถึงปลายตัวนำ ส่งผลให้การกระจายกระแสบนตัวนำมีค่าเท่าเดิม และแรงดันที่จุดปล่อยกระแสก็จะไม่ลดลงตามความยาวของตัวนำที่เพิ่มขึ้น

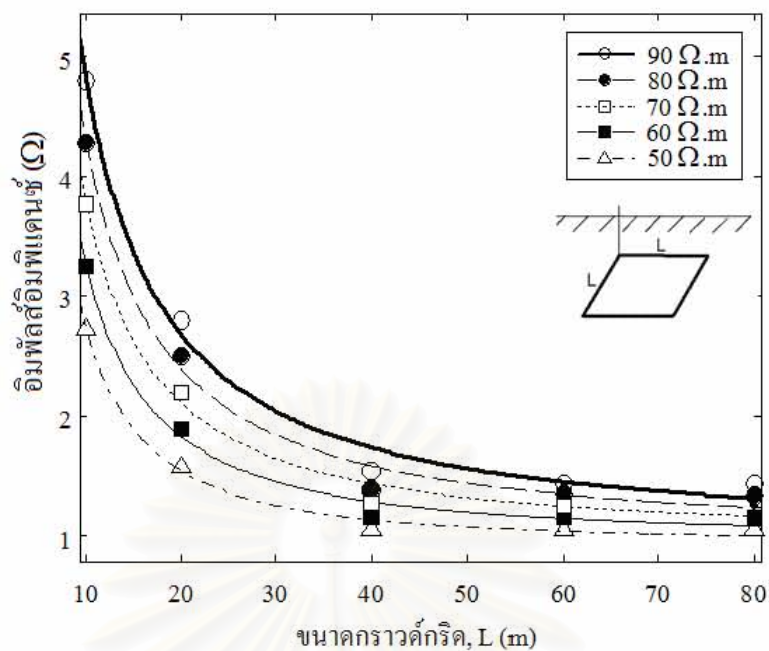


รูปที่ 6.15 การกระจายกระแสบนท่อนำของกราวด์กริด

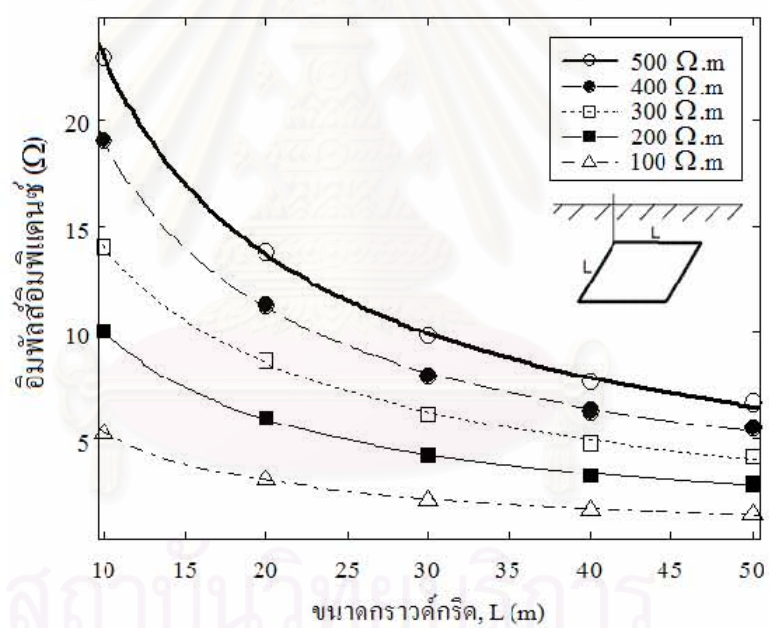
นำผลการจำลองที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงขนาดกราวด์กริดที่ความต้านทานดินค่าต่างๆ มาหาค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์แล้วพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์กับขนาดด้านของกราวด์กริด จากนั้นทำ fit curve ด้วย power function เพื่อหาค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b$  และ  $c$  ดังแสดงในรูปที่ 6.16 สำหรับกระแสฟ้าผ่าแรก  $10/350 \mu\text{s}$  และรูปที่ 6.17 สำหรับกระแสฟ้าผ่าตาม  $0.25/100 \mu\text{s}$

ภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก  $10/350 \mu\text{s}$  กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับขนาดกราวด์กริดจะมีแนวโน้มเข้าใกล้กันเมื่อความต้านทานดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสอิมพีแดนซ์ส่วนใหญ่ไหลอยู่ภายในตัวนำซึ่งจะถูกจำกัดการไหลโดยค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกระจายกระแสบนตัวนำของกราวด์กริดมีค่าลดลง

สำหรับกระแสฟ้าผ่าตาม  $0.25/100 \mu\text{s}$  กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับขนาดกราวด์กริดจะมีลักษณะคล้ายกับของกระแสฟ้าผ่าแรก  $10/350 \mu\text{s}$  คือที่ค่าความต้านทานดินสูงกราฟความสัมพันธ์มีแนวโน้มเข้าหากัน แต่กรณีกระแสฟ้าผ่าตามจะมีค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์สูงกว่าเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำในตัวนำของกราวด์กริดมีค่าเพิ่มขึ้นตามการลดลงของเวลาหน้าคลื่นหรือการเพิ่มขึ้นของค่า  $dI/dt$

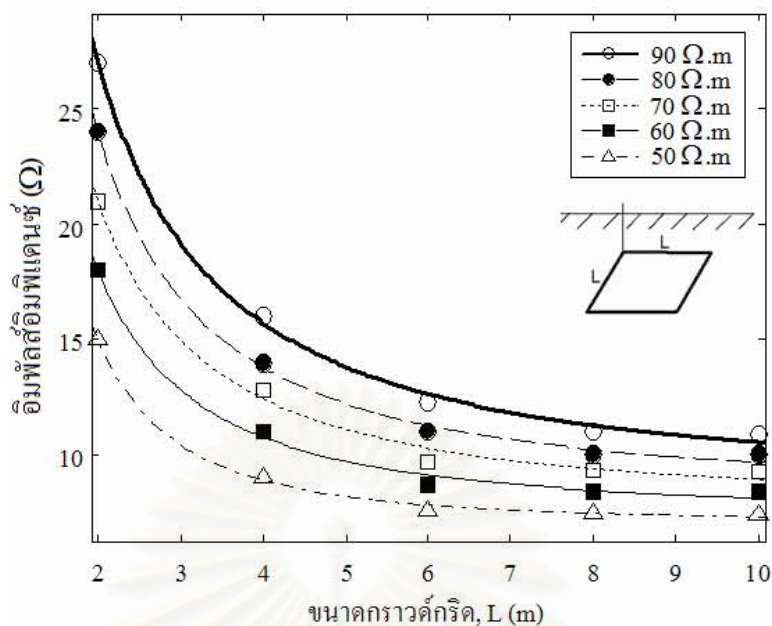


(a)

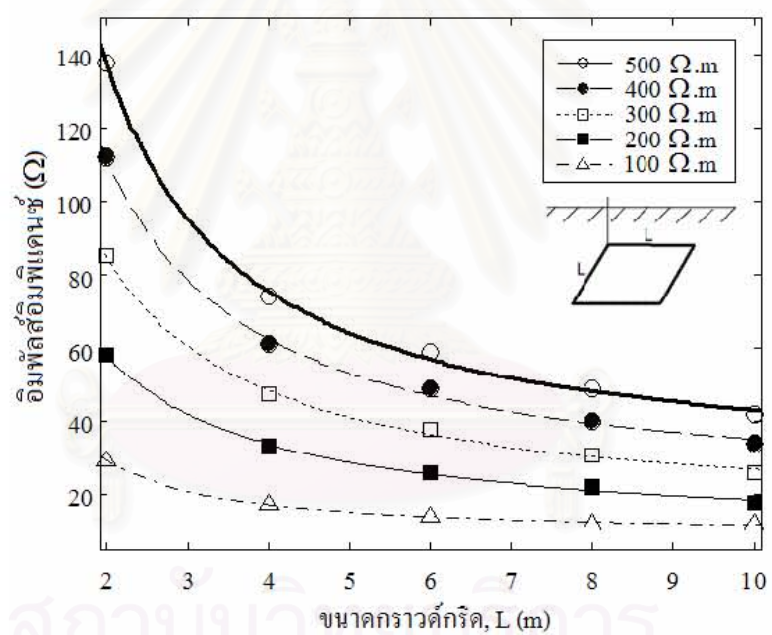


(b)

รูปที่ 6.16 อิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับขนาดกรวดกริดภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก  $10/350 \mu s$   
 สำหรับความต้านทานดิน (a)  $50 - 90 \Omega.m$  (b)  $100 - 500 \Omega.m$



(a)



(b)

รูปที่ 6.17 อิมพีแดนซ์สัมผัสกับขนาดกราวด์กริดภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม  $0.25/100 \mu s$  สำหรับความต้านทานดิน (a)  $50 - 90 \Omega.m$  (b)  $100 - 500 \Omega.m$

ค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b$  และ  $c$  ที่ได้จากการทำ fit curve และขนาดประสิทธิภาพของกราวด์กริดด้วยหลักการอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยพื้นที่แสดงดังตารางที่ 6.6 สำหรับกระแสฟ้าผ่าแรก  $10/350 \mu s$  และตารางที่ 6.7 สำหรับกระแสฟ้าผ่าตาม  $0.25/100 \mu s$



ตารางที่ 6.6 ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu$ s

ความต้านทานดิน	สัมประสิทธิ์ของ power function				ขนาดประสิทธิผล (m <sup>2</sup> )
	a	b	c	R-square	
50	31.46	-1.17	0.59	1.00	44 x 44
60	36.75	-1.15	0.67	1.00	47 x 47
70	42.30	-1.14	0.74	0.99	51 x 51
80	47.20	-1.13	0.81	0.97	54 x 54
90	51.96	-1.12	0.87	0.99	57 x 57
100	55.94	-1.11	0.92	0.97	61 x 61
200	177.20	-1.21	1.23	1.00	91 x 91
300	280.90	-1.23	1.57	1.00	102 x 102
400	314.60	-1.17	1.92	1.00	116 x 116
500	365.30	-1.15	2.12	1.00	132 x 132

ตารางที่ 6.7 ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu$ s

ความต้านทานดิน	สัมประสิทธิ์ของ power function				ขนาดประสิทธิผล (m <sup>2</sup> )
	a	b	c	R-square	
50	22.48	-1.06	4.16	1.00	7.3 x 7.3
60	27.49	-1.06	4.72	1.00	7.8 x 7.8
70	32.71	-1.06	5.17	1.00	8.4 x 8.4
80	37.78	-1.06	5.66	0.99	8.9 x 8.9
90	42.67	-1.06	6.20	1.00	9.1 x 9.1
100	48.00	-1.06	6.62	1.00	9.6 x 9.6
200	98.87	-1.06	10.51	1.00	12.5 x 12.5
300	149.40	-1.06	13.98	0.99	13.9 x 13.9
400	199.20	-1.06	16.43	0.99	15.8 x 15.8
500	244.60	-1.04	18.79	1.00	17.6 x 17.6

ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดที่คำนวณด้วยหลักการต่อหน่วยความยาวมีความใกล้เคียงกับนิยามพื้นฐานคือเป็นขนาดกราวด์กริด ที่เมื่อเพิ่มขึ้นแล้วจะมีผลน้อยมากต่อการลดลงของค่าขดแรงดัน ขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดจะมีค่าน้อยสำหรับกระแสอิมพัลส์ที่มีเวลาหน้าคลื่นสั้น เนื่องจากอิทธิพลของความเหนี่ยวนำ

## 6.5 การวิเคราะห์การนำรอกสายดินมาใช้งาน

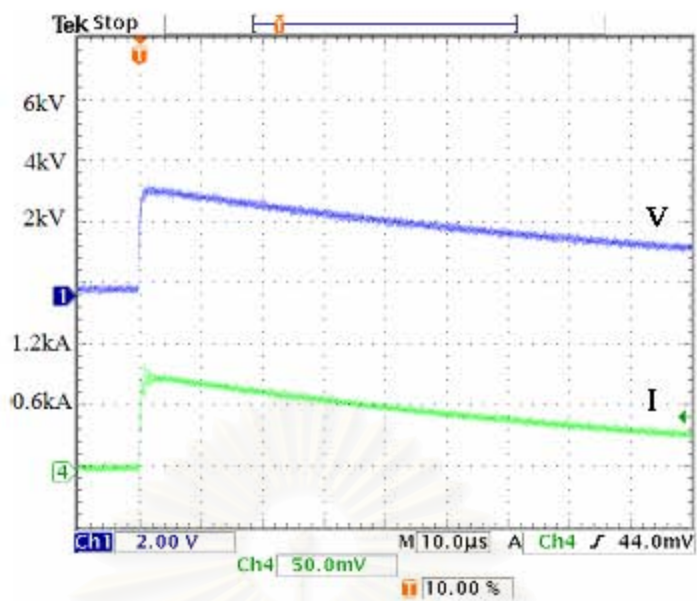
การนำรอกสายดินแบบต่างๆมาใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพในการป้องกันผลกระทบจากฟ้าผ่า นอกจากความยาวประสิทธิผลที่กล่าวไปแล้ว ยังมีหัวข้อที่ควรพิจารณาเพิ่มเติมได้แก่ ความสามารถในการกระจายกระแสของรอกสายดินพื้นฐาน อิทธิพลของความต้านทานดิน และอิทธิพลของเวลาหน้าคลื่น

### 6.5.1 การกระจายกระแสของรอกสายดิน

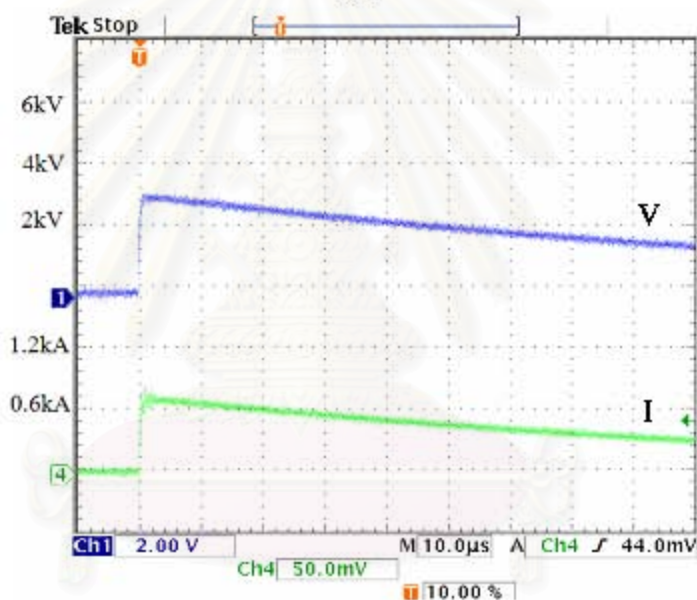
ภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า รอกสายดินจะมีการกระจายกระแสที่ต่างกันขึ้นอยู่กับการวางตัวของรอกสายดิน แม้ว่าตัวนำที่ใช้จะยาวเท่ากัน เพื่อให้การออกแบบระบบรอกสายดินมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ากับการลงทุน ในส่วนนี้จะได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบความสามารถในการกระจายกระแสของรอกสายดินแนวนอนกับรอกสายดินแท่งแนวดิ่ง โดยอาศัยการทดลองและการจำลอง

การทดลองเพื่อศึกษาความสามารถกระจายกระแสของรอกสายดินจะทำโดยการติดตั้งรอกสายดินทดสอบได้แก่รอกสายดินแนวนอนและรอกสายดินแนวดิ่งที่มีความยาวตัวนำเท่ากัน ในชุดการทดลองย่อยส่วน โดยใช้สารละลายน้ำเกลือจำลองแทนดินที่มีค่าความต้านทาน  $190 \Omega \cdot \text{cm}$  แล้วทำการปรับเปลี่ยนความยาวของรอกสายดินทดสอบทั้งสองชนิดพร้อมทั้งบันทึกค่าแรงดันที่เกิดขึ้นตรงจุดปล่อยกระแสและค่าความยาวของตัวนำ ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรอกสายดินจะคำนวณจากอัตราส่วนค่าขดแรงดันต่อค่าขดกระแส

ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ได้จากการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.18 สำหรับรอกสายดินแนวนอนความยาว (a) 30 cm (b) 25 cm และรูปที่ 6.19 สำหรับรอกสายดินแท่งแนวดิ่งความยาว (a) 10 cm (b) 15 cm



(a)

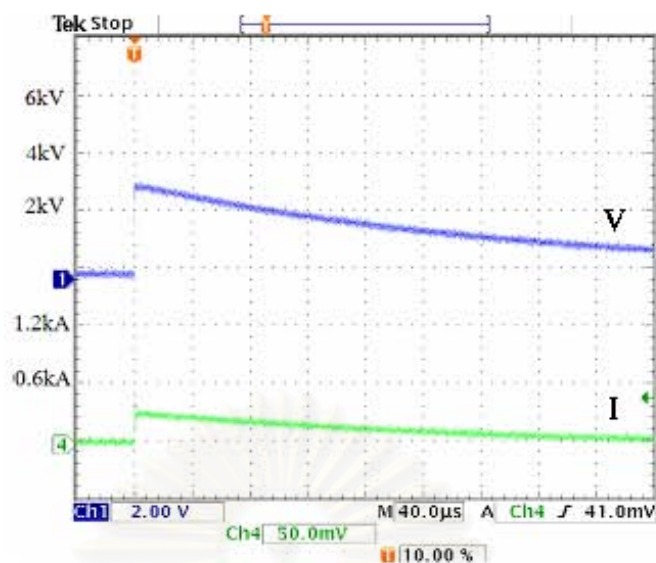


(b)

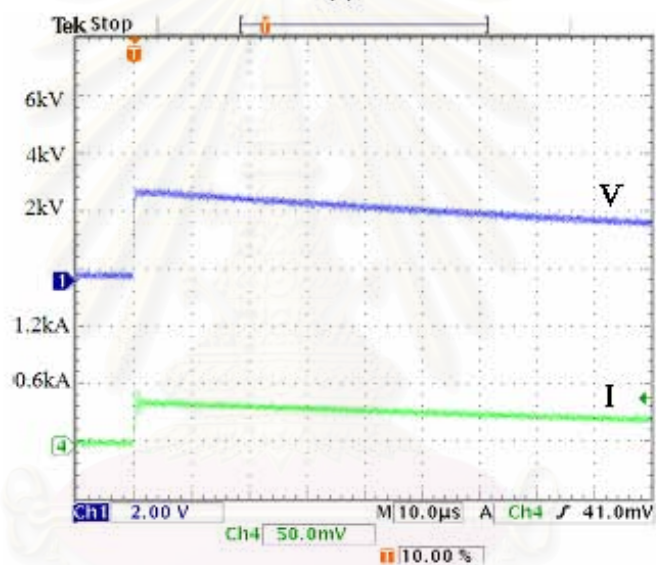
รูปที่ 6.18 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของวาทสายดิน

แนวนอนความยาว (a) 30 cm (b) 25 cm

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(a)



(b)

รูปที่ 6.19 รูปคลื่นกระแสและแรงดันของรากสายดินแท่งแนวตั้ง

ความยาว (a) 10 cm (b) 15 cm

เมื่อความยาวตัวนำทองแดงเพิ่มขึ้น พื้นที่การกระจายกระแสออกจากตัวนำของรากสายดินแนวนอนและรากสายดินแนวตั้งก็จะเพิ่มขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินจะมีค่าลดลง ทำให้กระแสไหลได้มากขึ้น ข้อมูลที่ได้จากการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.8 สำหรับรากสายดินแนวนอน และตารางที่ 6.9 สำหรับรากสายดินแท่งแนวตั้ง

จากข้อมูลในตารางที่ 6.8 และ 6.9 พบว่ารากสายดินแท่งแนวตั้งมีค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ต่ำกว่ารากสายดินแนวนอน ภายใต้ความยาวของตัวนำทองแดงที่เท่ากัน โดยแนวโน้มความแตกต่างของค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์จะน้อยลงเมื่อความยาวรากสายดินมากขึ้น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวตัวนำกับอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินทั้งสองแสดงดังรูปที่ 6.20

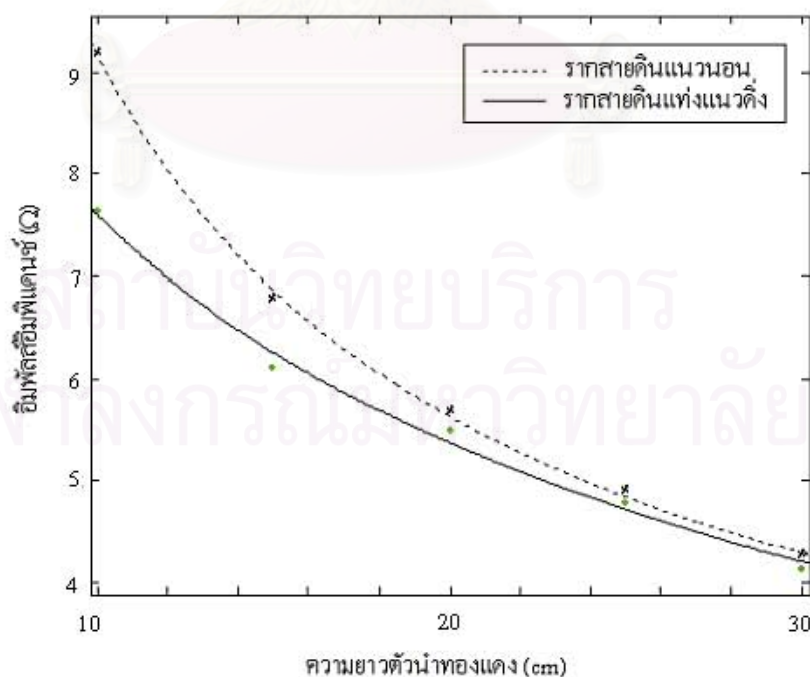


ตารางที่ 6.8 ผลการทดลองการกระจายกระแสของรากสายดินแนวนอน

ความยาวตัวนำ ทองแดง (cm)	ค่ายอดแรงดันที่จุด ปล่อยกระแส (kV)	ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ (kA)	อิมพัลส์อิมพีแดนซ์ ( $\Omega$ )
30	3.68	0.87	4.23
25	3.48	0.71	4.90
20	3.28	0.58	5.66
15	3.24	0.48	6.81
10	3.60	0.39	9.18

ตารางที่ 6.9 ผลการทดลองการกระจายกระแสของรากสายดินแท่งแนวตั้ง

ความยาวตัวนำ ทองแดง (cm)	ค่ายอดแรงดันที่จุด ปล่อยกระแส (kV)	ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ (kA)	อิมพัลส์อิมพีแดนซ์ ( $\Omega$ )
30	3.02	0.73	4.13
25	2.86	0.60	4.77
20	3.46	0.63	5.49
15	3.24	0.53	6.11
10	3.36	0.44	7.64



รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวตัวนำกับค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์  
ของรากสายดินแนวนอนและรากสายดินแท่งแนวตั้งภายใต้ค่าความต้านทาน 190  $\Omega$ .cm

จากผลการทดลองสามารถประมาณสมการความสัมพันธ์ระหว่างความยาวตัวนำกับค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ภายใต้ค่าความต้านทาน 190  $\Omega$ .cm สำหรับรากสายดินแนวนอนดังสมการที่ (6.3) และรากสายดินแท่งแนวตั้งดังสมการที่ (6.4)

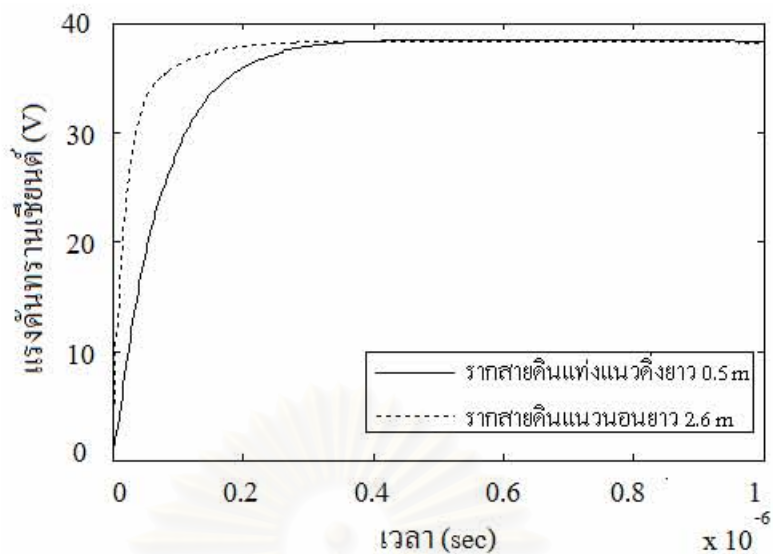
$$Z_{hor} = 50.76L^{-0.7755} + 0.6529, \text{ R-square: } 0.9984 \quad (6.3)$$

$$Z_{ver} = 25.63L^{-0.5689} + 0.7077, \text{ R-square: } 0.9962 \quad (6.4)$$

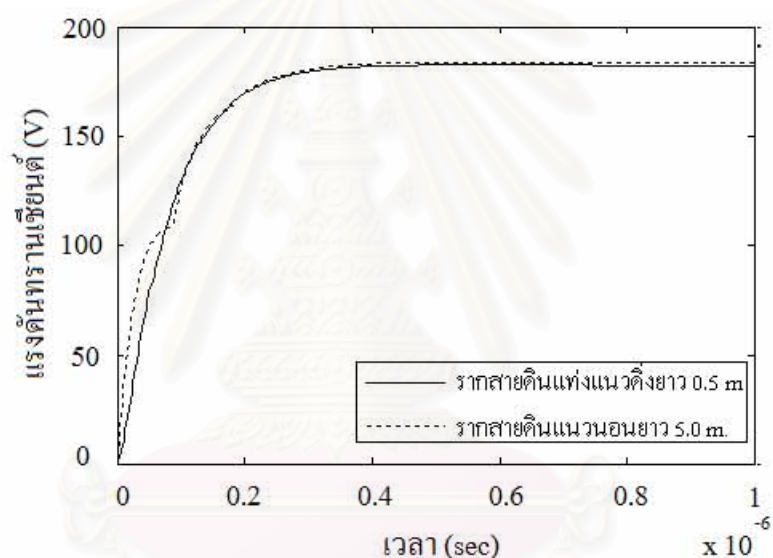
อย่างไรก็ตามการทดลองข้างต้นใช้สารละลายน้ำเกลือที่มีค่าความต้านทานต่ำ ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ดังกล่าวในความต้านทานดินที่สูงขึ้น จะทำโดยการจำลองพฤติกรรมรากสายดินภายใต้กระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu$ s ซึ่งมีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์มากกว่ากระแสฟ้าผ่าแรก 10/350  $\mu$ s

เงื่อนไขการพิจารณาเปรียบเทียบความสามารถในการกระจายกระแสของรากสายดินคือการกำหนดค่ายอดกระแสฟ้าผ่าที่ป้อน และค่ายอดแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสให้มีค่าเท่ากัน แล้ววิเคราะห์ว่ารากสายดินแบบใดที่ใช้ความยาวตัวนำทองแดงต่ำสุด ผลการจำลองเปรียบเทียบความยาวตัวนำทองแดงระหว่างรากสายดินแนวนอนกับรากสายดินแท่งแนวตั้งแสดงดังรูปที่ 6.21 (a) สำหรับค่าความต้านทานดิน 50  $\Omega$ .m และ (b) สำหรับความต้านทานดิน 500  $\Omega$ .m

จากผลการเปรียบเทียบภายใต้ค่ายอดแรงดันทรานเซียนต์ที่เท่ากัน ความยาวรากสายดินแนวนอนจะมีค่าประมาณ 5 เท่าของความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้งที่ความต้านทานดิน 50  $\Omega$ .m และความยาวรากสายดินแนวนอนจะมีค่าเป็น 10 เท่าของความยาวรากสายดินแท่งแนวตั้งเมื่อความต้านทานดินมีค่า 500  $\Omega$ .m ดังนั้นรากสายดินแท่งแนวตั้งจะใช้เวลาของตัวนำที่สั้นกว่ารากสายดินแนวนอนภายใต้การกระจายกระแสและค่ายอดแรงดันที่เท่ากัน โดยเฉพาะที่ความต้านทานดินสูง



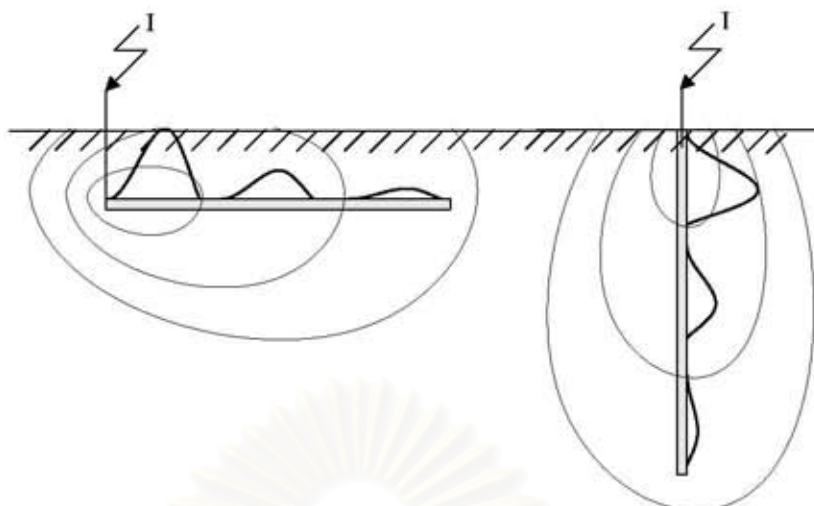
(a)



(b)

รูปที่ 6.21 ผลการจำลองเปรียบเทียบการกระจายกระแสระหว่างรากสายดินแนวนอนกับรากสายดินแท่งแนวตั้งที่ฝังในดิน (a) ความต้านทานดิน  $50 \Omega \cdot m$  (b) ความต้านทานดิน  $500 \Omega \cdot m$

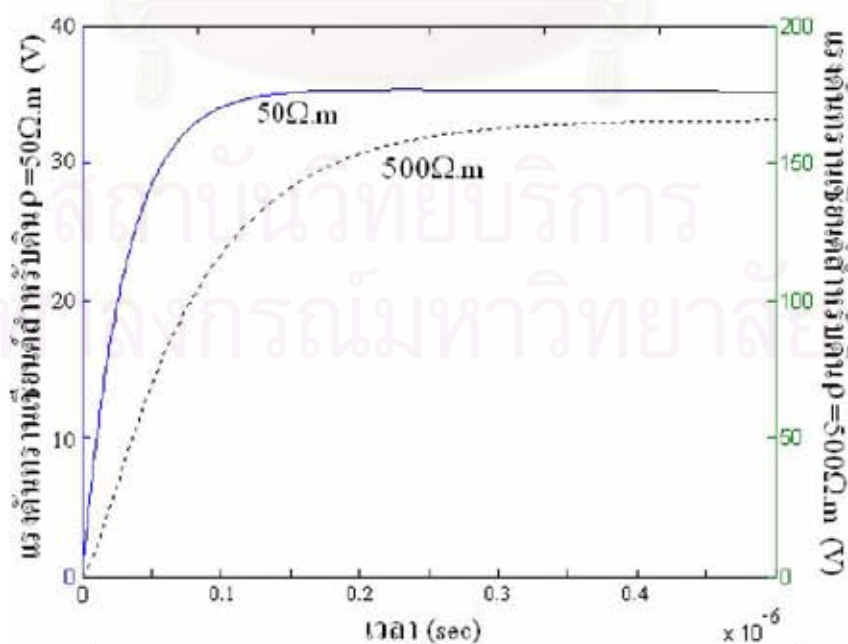
สาเหตุที่รากสายดินแท่งแนวตั้งสามารถกระจายกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่ารากสายดินแนวนอนสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 6.22 กระแสไฟฟ้าที่กระจายออกจากตัวนำไปยังดินในทิศทางเข้าหารอยต่อของดินกับอากาศจะถูกจำกัด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรากสายดินแนวนอนกับรากสายดินแท่งแนวตั้ง พบว่ารากสายดินแนวนอนจะมีกระแสส่วนนี้มากกว่ารากสายดินแท่งแนวตั้ง จึงทำให้ความสามารถในการกระจายกระแสโดยรวมของรากสายดินแนวนอนแย่กว่าความสามารถกระจายกระแสของรากสายดินแท่งแนวตั้ง



รูปที่ 6.22 การกระจายกระแสของรากสายดินแนวนอนกับรากสายดินแท่งแนวตั้ง

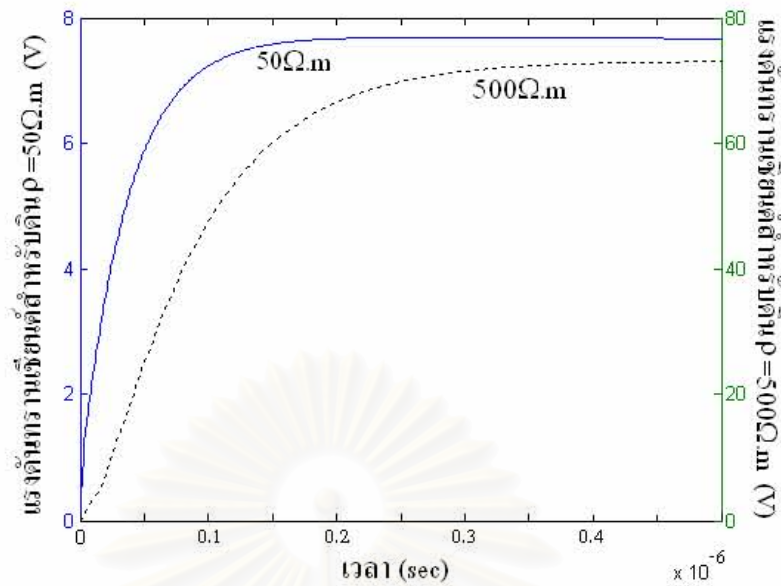
### 6.5.2 อิทธิพลของความต้านทานดิน

จากผลการจำลองในหัวข้อ 6.2 - 6.4 จะสังเกตว่าความต้านทานดินมีอิทธิพลต่อทั้งค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินและขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของความต้านทานดินที่มีต่อพฤติกรรมรากสายดิน จะทำการจำลองด้วยเงื่อนไขของระบบรากสายดินแบบเดียวกัน โดยใช้รากสายดินแท่งแนวตั้งที่มีความยาวตัวนำ 1 m ป้อนกระแสไฟฟ้าค่าตาม 0.25/100  $\mu$ s ขนาด 1 A แต่จะเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าความต้านทานดินเพื่อเปรียบเทียบแรงดันที่เกิดขึ้น การจำลองจะใช้ความต้านทานดินต่ำที่ 50  $\Omega$ .m และความต้านทานดินสูง 500  $\Omega$ .m ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 6.23 สำหรับรากสายดินแท่งแนวตั้งและรูปที่ 6.24 สำหรับรากสายดินแนวนอน



รูปที่ 6.23 อิทธิพลของค่าความต้านทานดินต่อรากสายดินแท่งแนวตั้ง





รูปที่ 6.24 อิทธิพลของค่าความต้านทานดินต่อรากสายดินแวนอน

จากผลการจำลองระบบรากสายดินที่ติดตั้งในดินที่มีความต้านทานดินสูงจะให้ค่าแรงดันไฟฟ้าตรงจุดปล่อยกระแสสูงกว่ารากสายดินที่ติดตั้งในความต้านทานดินต่ำ เพราะความต้านทานดินสูงจะมีความนำของดินน้อย กระแสตามขวางที่ไหลออกจากรากสายดินมีค่าต่ำทำให้แรงดันไฟฟ้าตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าสูง

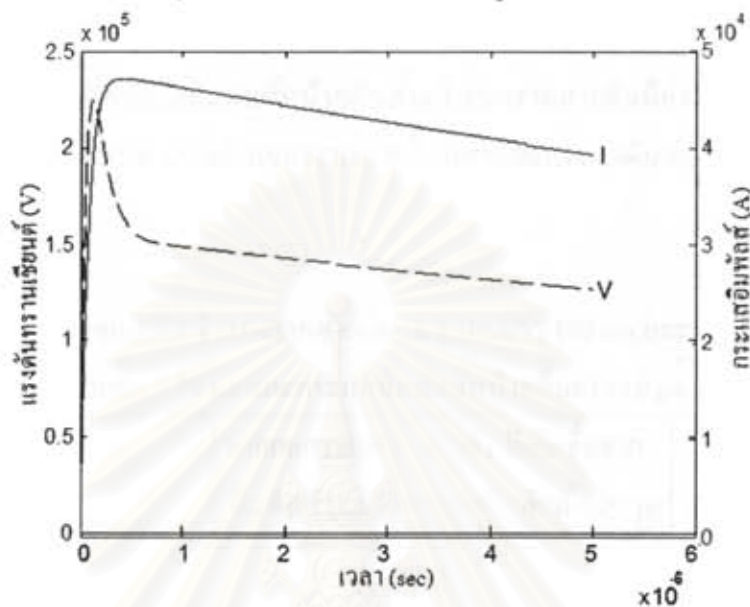
เมื่อพิจารณาถึงเวลาหน่วงคลื่นของแรงดันที่เกิดขึ้น พบว่าเวลาหน่วงคลื่นจะมากขึ้น ในกรณีของความต้านทานดินสูง เนื่องจากการไหลของกระแสตามยาวในรากสายดินเพิ่มขึ้น โดยการไหลของกระแสตามยาวจะได้รับอิทธิพลจากค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของความเหนี่ยวนำภายในตัวนำของรากสายดิน

ข้อสังเกตที่พบจากการศึกษาถึงอิทธิพลของความต้านทานดิน ถ้าวางรากสายดินฝังในดินที่มีความต้านทานดินสูงและค่าความเหนี่ยวนำของรากสายดินก็มีค่าสูงจนทำให้กระแสไม่สามารถไหลไปถึงปลายตัวนำ ทำให้การกระจายของแรงดันบนตัวนำไม่สม่ำเสมอ และอาจมีศักย์ไฟฟ้าเป็นศูนย์เกิดขึ้นที่ปลายตัวนำ เกิดเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดที่อยู่บนตัวนำเดียวกัน ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเป็นปัญหาที่สำคัญมากกับระบบรากสายดินที่มีจุดต่อลงดินหลายจุด เพราะเมื่อแต่ละจุดมีศักย์ไฟฟ้าต่างกันย่อมจะทำให้เกิดการไหลของกระแสภายในระบบรากสายดิน ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ที่ต่ออยู่กับระบบรากสายดินได้

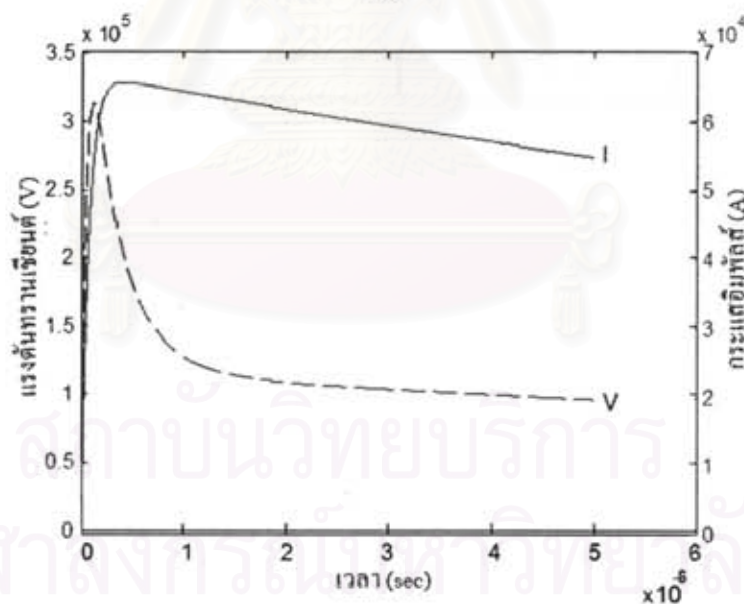
### 6.5.3 อิทธิพลของเวลาหน่วงคลื่นกระแสอิมพัลส์

จากการจำลองพฤติกรรมรากสายดินภายใต้กระแสฟ้าผ่าแรก  $10/350 \mu\text{s}$  และกระแสฟ้าผ่าตาม  $0.25/100 \mu\text{s}$  ในหัวข้อที่ 6.2 - 6.4 พบว่ารูปคลื่นกระแสอิมพัลส์จะมีผลต่อแรงดันอิมพัลส์ตรง

จุดปล่อยกระแส คังนั้นเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลดังกล่าวจะใช้ผลการจำลองรากสายดินแนวนอนด้วย กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $10 \mu\text{s}$  จากรูปที่ 5.14 เปรียบเทียบกับผลการจำลองใหม่บนเงื่อนไขของ รากสายดินเดียวกันคือความยาว 100 cm และ 200 cm ที่ความต้านทานดิน  $190 \Omega\cdot\text{cm}$  แต่จะป้อน ด้วยกระแสฟ้าผ่าตาม  $0.25/100 \mu\text{s}$  ได้ผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 6.25



(a)



(b)

รูปที่ 6.25 ผลการจำลองภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $0.25 \mu\text{s}$  ของรากสายดินแนวนอนยาว (a) 100 cm (b) 200 cm

จากผลการจำลองทั้งในรูปที่ 6.25 (a) และ (b) พบว่ารูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตรงจุดปล่อย กระแสจะมีความแตกต่างจากรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ เนื่องจากค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นจาก

ความเหนียวนำบนรากสายดินของกระแสพัลส์หน้าคลื่นสั้นจะมีผลต่อพฤติกรรมทรานเซียนต์ของรากสายดินมากกว่ากระแสพัลส์หน้าคลื่นยาว

ตารางที่ 6.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นจากกระแสพัลส์หน้าคลื่นสั้น  $0.25 \mu\text{s}$  และกระแสพัลส์หน้าคลื่นยาว  $10 \mu\text{s}$  ซึ่งกระแสพัลส์หน้าคลื่นสั้นจะให้แรงดันทรานเซียนต์ที่มากกว่าโดยเฉพาะในรากสายดินที่ยาว เนื่องจากผลของความเหนียวนำทำให้ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ที่กระแสพัลส์หน้าคลื่นสั้นเห็นบนรากสายดินมีค่าสูงกว่า ทำให้การไหลของกระแสพัลส์ไปยังปลายอีกด้านของรากสายดินมีค่าน้อยลง แรงดันตรงจุดปล่อยกระแสจึงมีค่าสูงขึ้น

ตารางที่ 6.10 เปรียบเทียบผลการจำลองรากสายดินแนวนอนยาว 100 cm และ 200 cm ภายใต้อิมพัลส์หน้าคลื่นสั้น  $0.25 \mu\text{s}$  และกระแสพัลส์หน้าคลื่นยาว  $10 \mu\text{s}$

รากสายดิน	ค่ายอดกระแสอิมพัลส์ (kA)	แรงดันที่เกิดขึ้นจากกระแสพัลส์ $0.25 \mu\text{s}$ (kV)	แรงดันที่เกิดขึ้นจากกระแสพัลส์ $10 \mu\text{s}$ (kV)
แนวนอน 10cm ปรับเป็น 100cm	48	224	35.4
แนวนอน 20cm ปรับเป็น 200cm	67	314	34.6

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 7

### อิทธิพลของรากสายดินต่อแรงดันช่วงก้าว

ความสามารถในการป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่าของระบบรากสายดิน นอกจากการลดค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้นบนรากสายดิน (ground potential rise, GPR) แล้ว ระบบรากสายดินยังต้องสามารถช่วยลดค่าแรงดันช่วงก้าวที่เกิดขึ้นด้วย มาตรฐาน IEEE Std.80-1998 ได้ให้ความหมายของแรงดันช่วงก้าวว่าเป็นความต่างศักย์บริเวณผิวดินที่ส่งผลต่อคนซึ่งไม่ได้สัมผัสกับวัตถุที่ต่อลงดิน โดยมีระยะก้าว 1 m

งานวิจัยที่ศึกษาถึงแรงดันช่วงก้าวยังมีไม่มากเมื่อเทียบกับการศึกษาแรงดันที่เพิ่มขึ้นบนรากสายดิน งานวิจัยแรงดันช่วงก้าว [82] ได้ทำการศึกษาและพัฒนาสมการที่ใช้ประมาณค่าแรงดันช่วงก้าว ส่วนงานวิจัย [83-84] จะเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของรากสายดินแท่งแนวดิ่งที่ติดตั้งเพิ่มเติมในระบบรากสายดินด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในวิทยานิพนธ์นี้จะศึกษาถึงอิทธิพลของรากสายดินที่มีต่อแรงดันช่วงก้าว ได้แก่ ความยาวรากสายดินแท่งแนวดิ่ง รูปร่างรากสายดิน และรากสายดินเสริม โดยใช้ชุดการทดลองย่อยส่วนที่ประกอบสร้างขึ้นเพราะสามารถควบคุมตัวแปรต่างๆ ได้อย่างอิสระและสามารถทำการทดลองได้ภายในห้องปฏิบัติการ

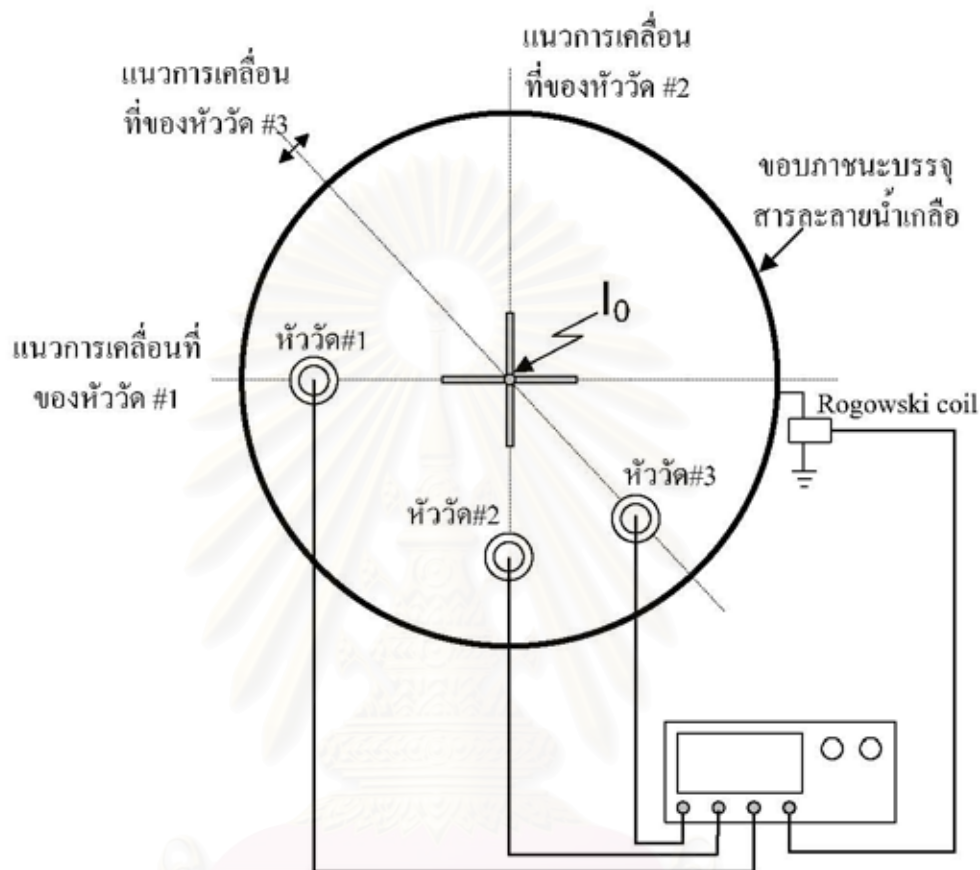
#### 7.1 วิธีการทดลองแรงดันช่วงก้าว

การทดลองแรงดันช่วงก้าวด้วยชุดการทดลองย่อยส่วนจะทำโดยใช้เครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์สร้างกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu\text{s}$  ป้อนให้กับรากสายดินทดสอบที่ติดตั้งอยู่ในสารละลายน้ำเกลือซึ่งจำลองแทนดิน ข้อดีของการใช้สารละลายน้ำเกลือคือมีความสะดวกทั้งในการปรับเปลี่ยนค่าความต้านทานเพื่อให้ได้รูปคลื่นกระแสที่ต้องการและการวัดแรงดันที่ผิวในขณะที่เกิดการถ่ายเทของกระแสอิมพัลส์ออกจากตัวนำ ในการศึกษาอิทธิพลของเวลาหน้าคลื่นที่มีต่อแรงดันช่วงก้าวจะทำโดยการป้อนกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 1  $\mu\text{s}$  ให้กับรากสายดินทดสอบ

แผนภาพการทดลองแรงดันช่วงก้าวแสดงดังรูปที่ 7.1 รากสายดินทดสอบจะถูกติดตั้งตรงกึ่งกลางของถังกลึงไป 8 cm ในสารละลายน้ำเกลือ ในส่วนของระบบวัดจะประกอบด้วยหัววัดแรงดันอิมพัลส์จำนวน 3 หัวเพื่อใช้วัดแรงดันตรงผิวของสารละลายน้ำเกลือ หัววัดจะติดตั้งอยู่บนแกนที่ช่วยให้สามารถเลื่อนได้ตามแนวรัศมีของถัง ตำแหน่งของหัววัดที่ 1 และ 2 จะยึดติดไว้ที่แนว  $0^\circ$  และ  $90^\circ$  ส่วนแกนของหัววัดที่ 3 สามารถเลื่อนปรับองศาได้ตามความเหมาะสม



การวัดแรงดันช่วงก๊าวจะเริ่มวัดจากรากสายดินออกไปจนถึงถึงอลูมิเนียมตามแนวรัศมี โดยระยะทางการวัดแต่ละครั้งห่างกัน 5 cm การวัดกระแสอิมพัลส์จะใช้ Rogowski coil ผลการวัดจะบันทึกด้วยออสซิลโลสโคป Tektronix TDS 3034B ที่มีช่องวัดสัญญาณขาเข้าได้ 4 ช่อง



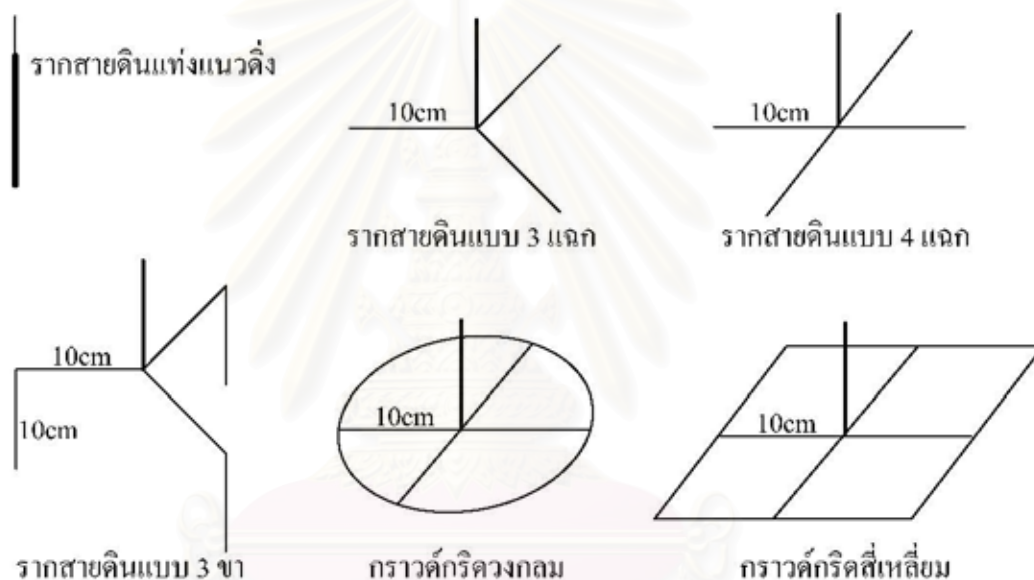
รูปที่ 7.1 แผนภาพการทดลองแรงดันช่วงก๊าว

การศึกษานิทธิพลของลักษณะรากสายดินที่มีต่อค่าแรงดันช่วงก๊าว จะแบ่งการศึกษาของรากสายดินออกเป็น 4 กลุ่ม

1. รากสายดินแท่งแนวตั้ง
2. รากสายดินแบบแฉกได้แก่ รากสายดินแบบ 3 แฉก รากสายดินแบบ 4 แฉก และ รากสายดินแบบ 3 ขา (คือรากสายดินแบบ 3 แฉกที่ติดตั้งรากสายดินแท่งแนวตั้งเพิ่มเติม)
3. กราวด์กริดวงกลม และกราวด์กริดสี่เหลี่ยม
4. รากสายดินเสริม

ลักษณะของรากสายดินประเภทที่ 1 - 3 แสดงดังรูปที่ 7.2 ส่วนรากสายดินเสริมแสดงดังรูปที่ 7.3 ซึ่งประกอบด้วยรากสายดินหลักอยู่ตรงกลางมีรากสายดินเสริมอยู่ด้านข้าง การทดสอบอิทธิพลของรากสายดินเสริมที่มีต่อแรงดันช่วงก้ำวจะทำโดยการเปลี่ยนแปลงค่าความยาวของรากสายดินเสริมเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของแรงดันช่วงก้ำว ผลการศึกษาที่ได้จะสามารถนำมาเป็นข้อมูลในการเลือกรากสายดินเสริมเพื่อช่วยให้ได้ค่าแรงดันช่วงก้ำวที่ดีขึ้น

การทดลองของรากสายดินทดสอบแต่ละประเภท ที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกันย่อมทำให้ได้ค่ายอดกระแสต่างกัน แม้ว่าจะใช้แรงดันอัดประจุของเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ที่เท่ากัน ดังนั้นการเปรียบเทียบความสามารถในการลดค่าแรงดันช่วงก้ำวของรากสายดินแต่ละประเภทจะใช้เป็นค่าแรงดันนอัมัลไลซ์กระแส (V/I)



รูปที่ 7.2 รากสายดินทดสอบสำหรับการศึกษาแรงดันช่วงก้ำว

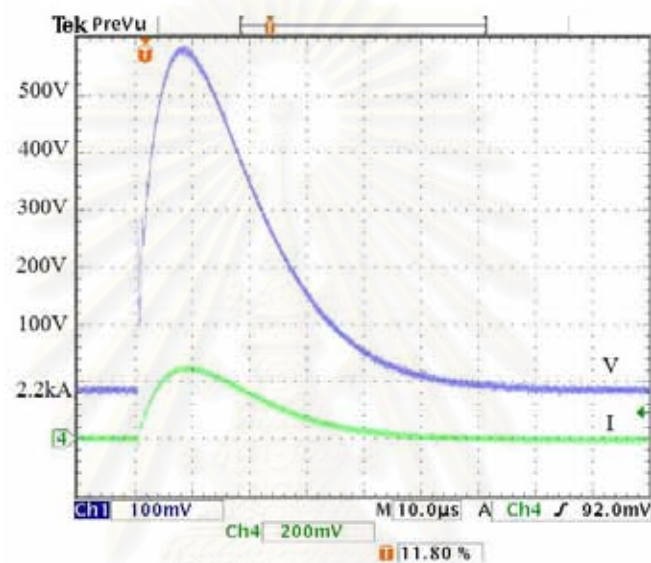


รูปที่ 7.3 รากสายดินทดสอบสำหรับการศึกษาอิทธิพลของรากสายดินเสริม

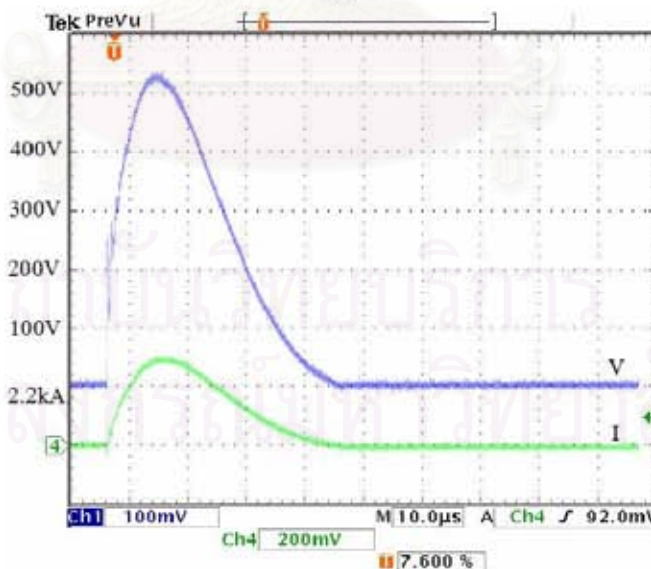
## 7.2 อิทธิพลของความยาวรากสายดินแท่งแนวดิ่งต่อแรงดันช่วงก้าว

การทดลองเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของความยาวรากสายดินแท่งแนวดิ่ง จะทำโดยการติดตั้งรากสายดินแท่งแนวดิ่งทดสอบที่มีความยาวต่างๆกันแล้วทำการวัดแรงดันอิมพัลส์ตรงมิวสาร์ละลาย ที่ระยะห่างจากรากสายดินจนถึงขอบถังช่วงละ 5 cm

ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสอิมพัลส์ที่ผ่านรากสายดินและรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์ตรงมิวสาร์ละลายที่ระยะห่างจากรากสายดิน 5 cm แสดงดังรูปที่ 7.4 (a) สำหรับรากสายดินแท่งแนวดิ่งความยาว 25 cm และ (b) สำหรับรากสายดินแท่งแนวดิ่งยาว 35 cm



(a)



(b)

รูปที่ 7.4 รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ระยะห่าง 5 cm ของรากสายดินแท่งแนวดิ่ง

ความยาว (a) 25cm (b) 35cm

จากผลการทดลองในรูปที่ 7.4 พบว่าค่าแรงดันนอมัลไลซ์ของรากสายดินแท่งแนวตั้งจะลดลงเมื่อความยาวรากสายดินเพิ่มขึ้น โดยแรงดันนอมัลไลซ์ที่ความยาว 25 cm ระยะห่าง 5 cm มีค่า 0.2377 และเมื่อความยาวรากสายดินเพิ่มขึ้นเป็น 35 cm ระยะห่างเท่าเดิมที่ 5 cm ค่าแรงดันลดลงเหลือ 0.1789 รายละเอียดผลการทดลองแรงดันนอมัลไลซ์ที่ระยะต่างๆของรากสายดินแท่งแนวตั้งความยาว 25, 35, 45 และ 50 cm แสดงดังตารางที่ 7.1

ตารางที่ 7.1 แรงดันช่วงก้าวสำหรับรากสายดินแท่งแนวตั้งที่ความยาว 25, 35, 45 และ 50 cm

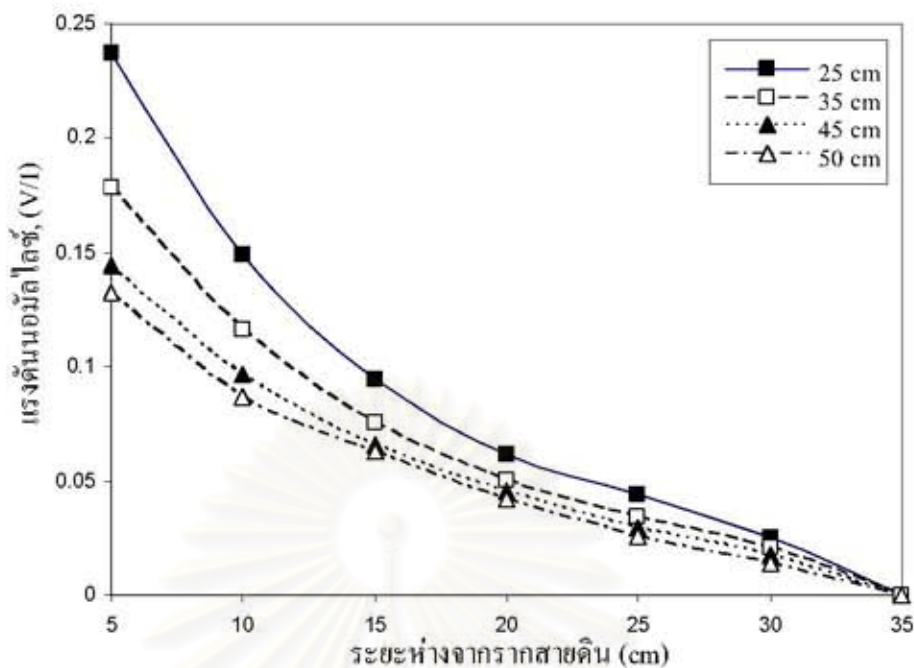
ระยะห่างจาก รากสายดิน (cm)	แรงดันนอมัลไลซ์, V/I			
	25 cm	35 cm	45 cm	50 cm
5	0.2377	0.1789	0.1442	0.1324
10	0.1492	0.1162	0.0965	0.0869
15	0.0946	0.0753	0.0655	0.0629
20	0.0615	0.0501	0.0456	0.0421
25	0.0441	0.0341	0.0292	0.0256
30	0.0254	0.0211	0.0176	0.014
35 (ขอบถัง)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ค่าแรงดันนอมัลไลซ์จะลดลงตามความยาวรากสายดินและระยะห่างจากรากสายดินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันดังกล่าวสามารถอธิบายด้วยการกระจายกระแสของรากสายดิน รากสายดินยาวจะมีพื้นที่สัมผัสกับสารละลายมาก ความสามารถในการกระจายกระแสจึงดีกว่ารากสายดินสั้น ถ้าความยาวนั้นยังไม่เกินค่าความยาวประสิทธิภาพ

จากผลการทดลองจะนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของระยะห่างจากจุดปล่อยกระแสกับแรงดันตรงจุดนั้นได้กราฟดังรูปที่ 7.5 ความชันของกราฟการกระจายแรงดันที่ได้จะบอกถึงค่าของแรงดันช่วงก้าว ซึ่งพบว่าความชันของกราฟหรือแรงดันช่วงก้าวของรากสายดินแท่งแนวตั้งยาว 25 cm จะมีค่าสูงสุดและจะลดลงตามความยาวของรากสายดินที่เพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความยาวรากสายดินขึ้น พบว่ากราฟการกระจายแรงดันจะเข้าใกล้กันหรือกล่าวได้ว่าการลดลงของแรงดันช่วงก้าวจะมีแนวโน้มอ้อมตัวเนื่องจากความยาวประสิทธิภาพของรากสายดินแท่งแนวตั้งที่ส่งผลให้การกระจายกระแสนบนรากสายดินถูกจำกัดแม้ว่าความยาวจะเพิ่มขึ้น

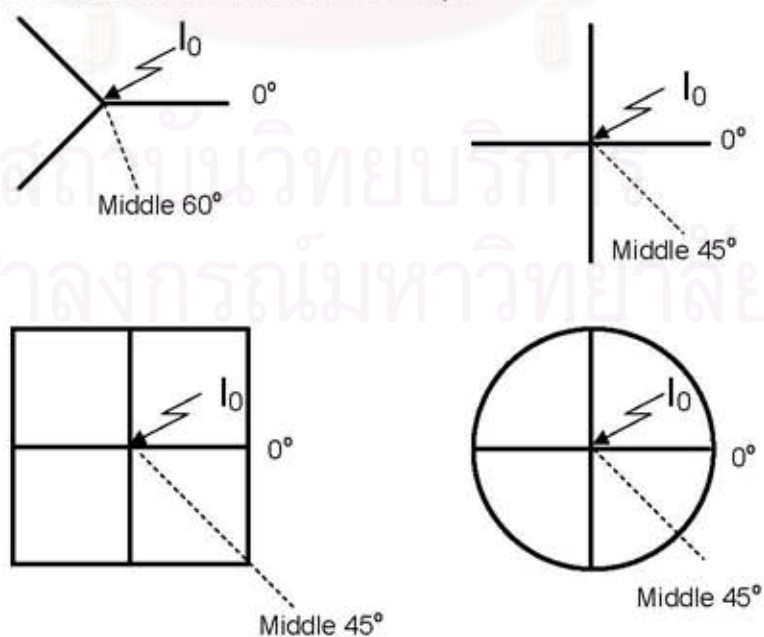




รูปที่ 7.5 ผลการทดลองการกระจายแรงดันของรากสายดินแท่งแนวตั้ง

### 7.3 อิทธิพลของรูปร่างรากสายดินต่อแรงดันช่วงก้ำว

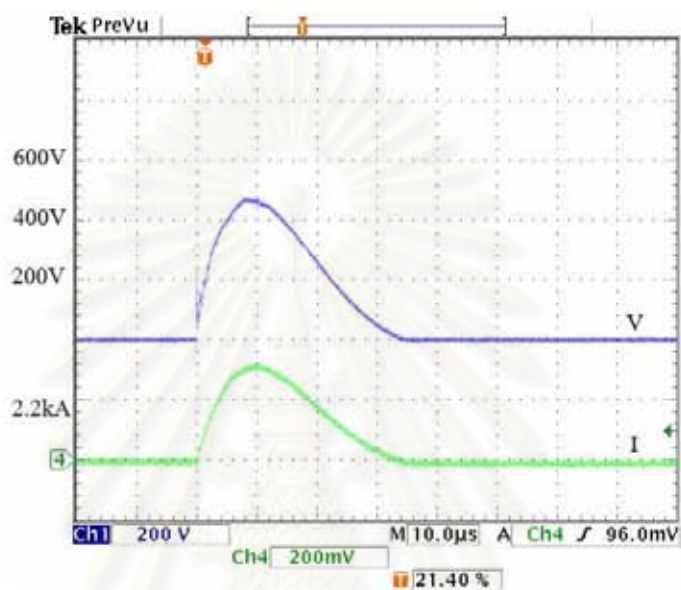
การศึกษาอิทธิพลของรูปร่างรากสายดินที่มีต่อแรงดันช่วงก้ำว จะทำการทดลองโดยป้อนกระแสอิมพัลส์ ( $I_0$ ) ให้กับรากสายดินทดสอบประเภทต่างๆ แล้วทำการวัดแรงดันที่กระจายอยู่ตรงผิวของสารละลายที่ระยะห่างต่างๆกันตามแนวที่กำหนดดังรูปที่ 7.6 และกรณี que ศึกษาอิทธิพลของเวลาหน้าคลื่นก็จะทำโดยการป้อนกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นสั้น  $1 \mu s$  ให้กับรากสายดินทดสอบเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นยาว  $8 \mu s$



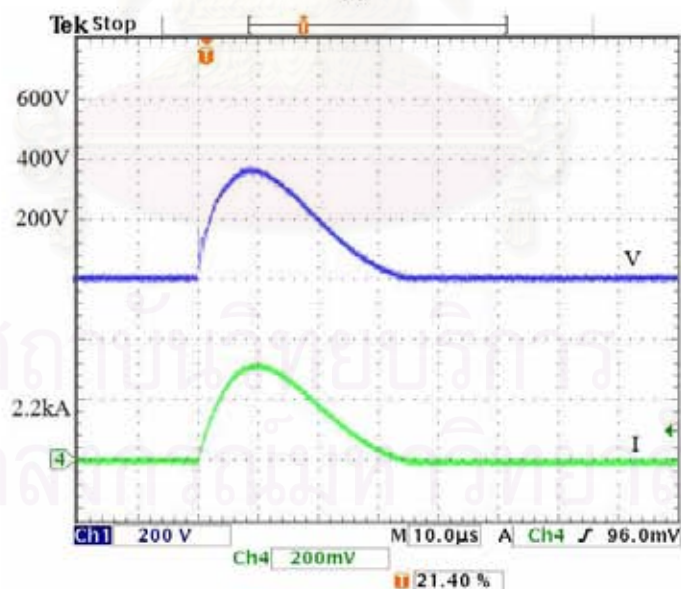
รูปที่ 7.6 แนวหัววัดแรงดันของรากสายดินทดสอบ

### 7.3.1 อิทธิพลของรากสายดินแท่งแนวตั้ง

การศึกษาอิทธิพลของรากสายดินแท่งแนวตั้งต่อแรงดันช่วงก้าวจะทำโดยการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างรากสายดินแบบ 3 แฉกและรากสายดินแบบ 3 ขา ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันที่ผิวสารละลายและรูปคลื่นกระแสภายใต้กระแสสลับพัลส์หน้าคลื่น  $8 \mu\text{s}$  แสดงดังรูปที่ 7.7 สำหรับรากสายดินแบบ 3 ขา และรูปที่ 7.8 สำหรับรากสายดินแบบ 3 แฉก

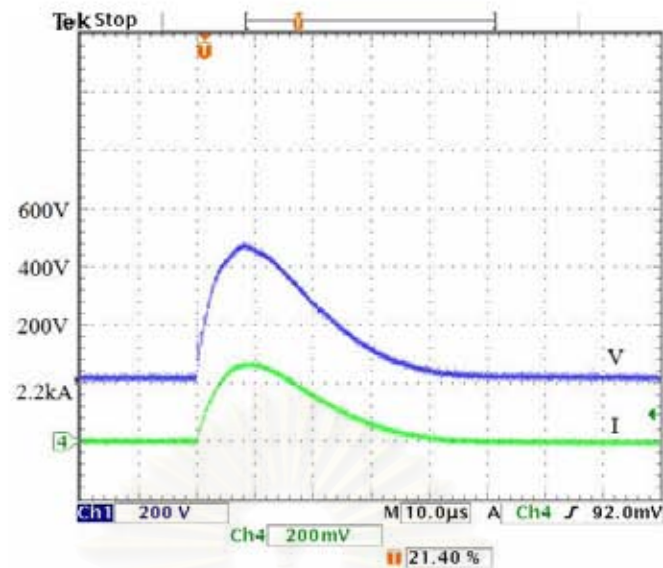


(a)

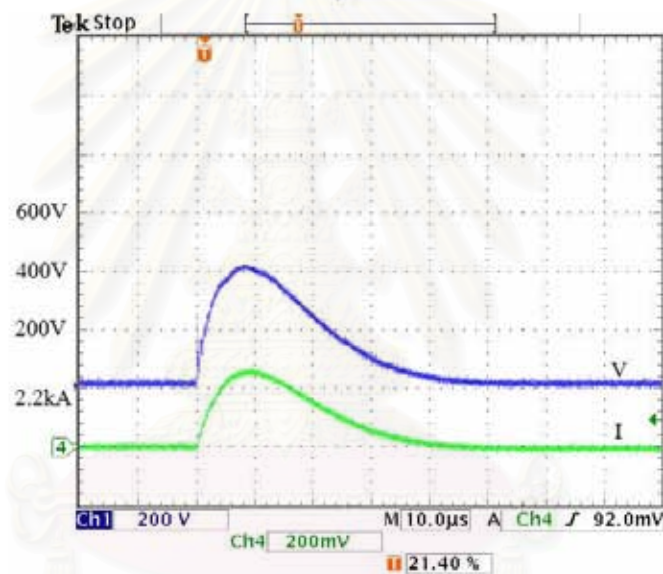


(b)

รูปที่ 7.7 ผลการทดลองรากสายดินแบบ 3 ขาภายใต้กระแสสลับพัลส์หน้าคลื่น  $8 \mu\text{s}$  ที่ระยะห่าง 10 cm (a) แนว  $0^\circ$  (b) แนว  $60^\circ$



(a)



(b)

รูปที่ 7.8 ผลการทดลองรอกสายดินแบบ 3 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s ที่ระยะห่าง 15 cm (a) แนว  $0^\circ$  (b) แนว  $60^\circ$

จากผลการทดลองในรูปที่ 7.7 และ 7.8 พบว่ารอกสายดินแบบ 3 ขาและรอกสายดินแบบ 3 แฉกมีแรงคั้นนมัลไลซ์ในแนว  $0^\circ$  มากกว่าในแนว  $60^\circ$  เนื่องจากการไหลของกระแสตามยาวและกระแสตามขวางมีอิทธิพลต่อแรงคั้นในแนว  $0^\circ$  มากกว่าในแนว  $60^\circ$  และที่ระยะห่าง 15 cm เท่ากัน ในแนว  $0^\circ$  รอกสายดินแบบ 3 ขาจะให้ค่าแรงคั้นนมัลไลซ์ 0.151 ซึ่งต่ำกว่าแรงคั้นนมัลไลซ์ของรอกสายดินแบบ 3 แฉกที่มีค่า 0.170 รายละเอียดผลการทดลองแรงคั้นนมัลไลซ์กระแสที่ระยะห่างต่างๆ ภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s ของรอกสายดินทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 7.2

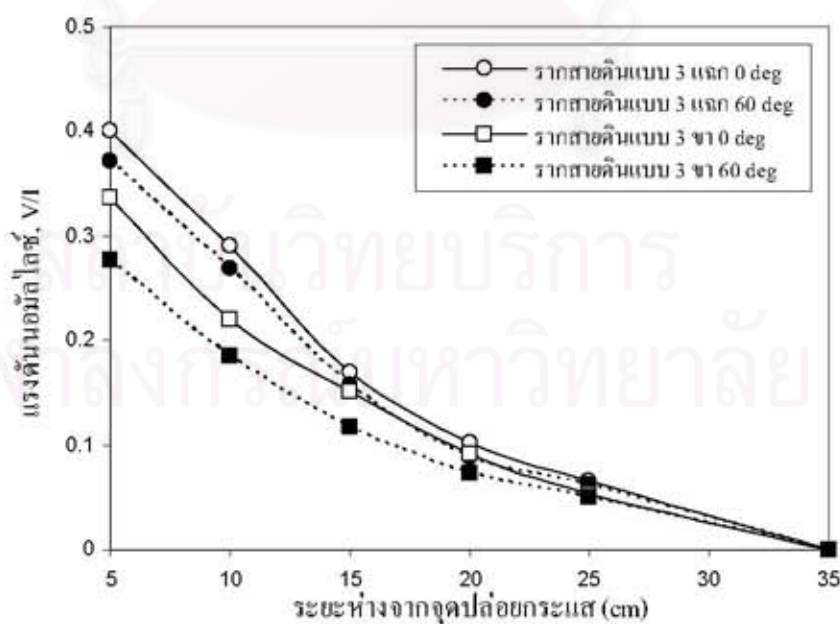


ตารางที่ 7.2 แรงดันที่ผิวสารละลายของรากสายดินแบบ 3 แฉกและแบบ 3 ขาภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s

ระยะห่าง (cm)	รากสายดินแบบ 3 ขา		รากสายดินแบบ 3 แฉก	
	0°	60°	0°	60°
5	0.336	0.277	0.401	0.371
10	0.220	0.185	0.290	0.269
15	0.151	0.118	0.170	0.158
20	0.091	0.074	0.103	0.089
25	0.053	0.050	0.066	0.062
35	0.000	0.000	0.000	0.000

นอกจากรากสายดินทั้งสองชนิดจะมีค่าแรงดันอิมพัลส์ในแนว 0° มากกว่าในแนว 60° แล้ว เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ระยะห่างจากรากสายดินเท่าๆกัน พบว่ารากสายดินแบบ 3 ขาจะให้แรงดันอิมพัลส์ที่ผิวสารละลายต่ำกว่ารากสายดินแบบ 3 แฉกทั้งในแนว 0° และแนว 60° เนื่องจากรากสายดินแท่งแนวตั้งที่ติดตั้งเพิ่มเติมเข้าไปกับรากสายดินแบบ 3 ขาช่วยให้ค่าอิมพีแดนซ์ของรากสายดินต่ำลง การกระจายกระแสของรากสายดินดีขึ้น แรงดันที่ผิวสารละลายจึงมีค่าลดลง

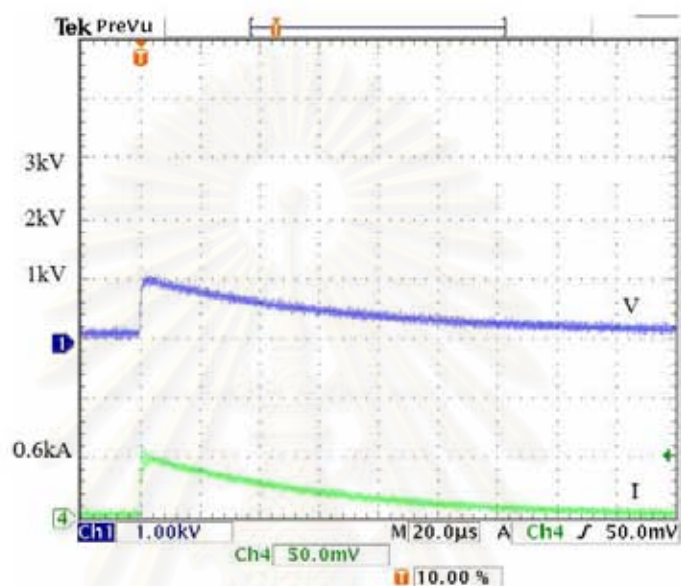
จากผลการทดลองจะนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของระยะห่างจากจุดปล่อยกระแสกับแรงดันอิมพัลส์ตรงจุดนั้นแสดงดังรูปที่ 7.9 ความชันของกราฟจะแทนค่าของแรงดันช่วงก้าว ซึ่งพบว่าแรงดันช่วงก้าวของรากสายดินแบบ 3 แฉกมีค่ามากกว่ารากสายดินแบบ 3 ขา



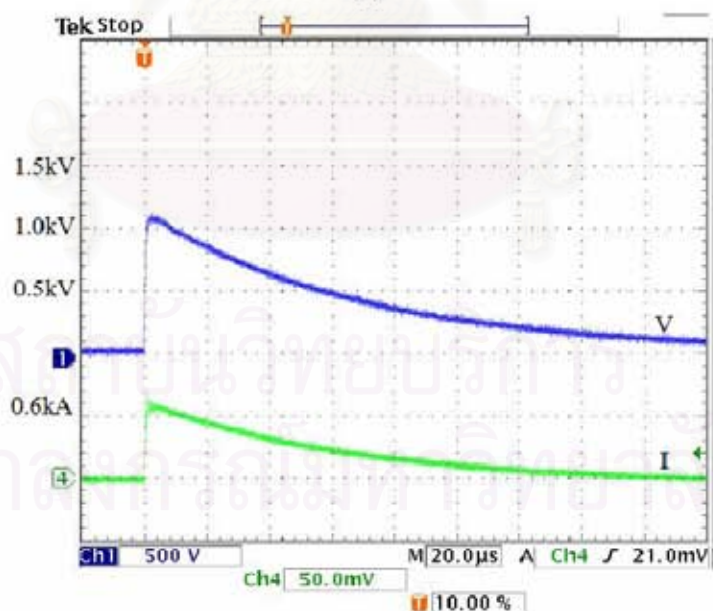
รูปที่ 7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายแรงดันบนผิวสารละลายกับระยะห่างของรากสายดินแบบ 3 แฉกและแบบ 3 ขาภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s



การศึกษาอิทธิพลของเวลาหน่วงกระแสสลับต่อแรงดันช่วงก้าวของรากสายดินทั้งสองชนิด จะทำโดยป้อนกระแสสลับพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$  ให้กับรากสายดินทดสอบ นำแรงดันที่วัดได้มาทำอิมัลชันกระแส แล้วพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับกรณีป้อนด้วยกระแสสลับพัลส์หน้าคลื่น  $8 \mu\text{s}$  ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันที่ผิวสารละลายและรูปคลื่นกระแสสำหรับรากสายดินแบบ 3 ขา แสดงดังรูปที่ 7.10 และรากสายดินแบบ 3 แฉกแสดงดังรูปที่ 7.11

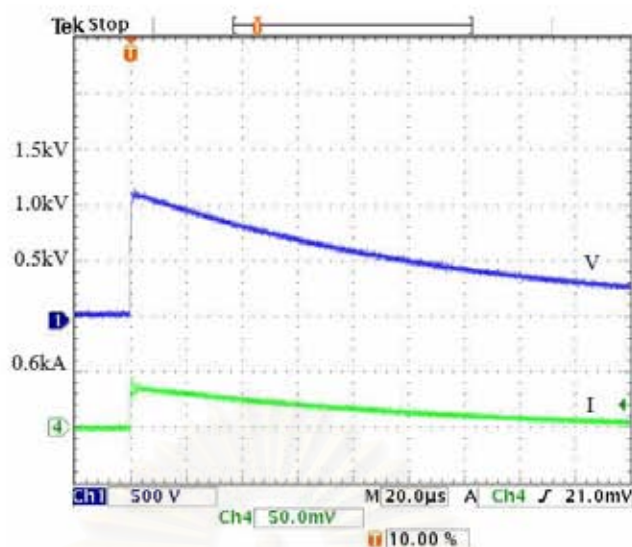


(a)

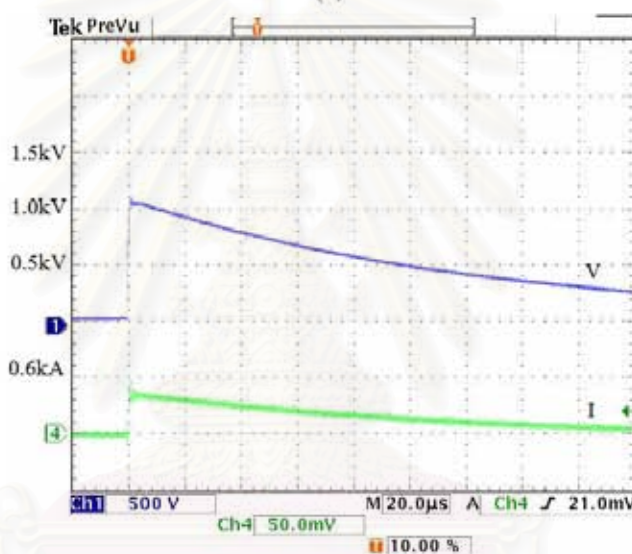


(b)

รูปที่ 7.10 ผลการทดลองรากสายดินแบบ 3 ขาภายใต้กระแสสลับพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$  ที่ระยะห่าง  $5 \text{ cm}$  (a) แนว  $0^\circ$  (b) แนว  $60^\circ$



(a)



(b)

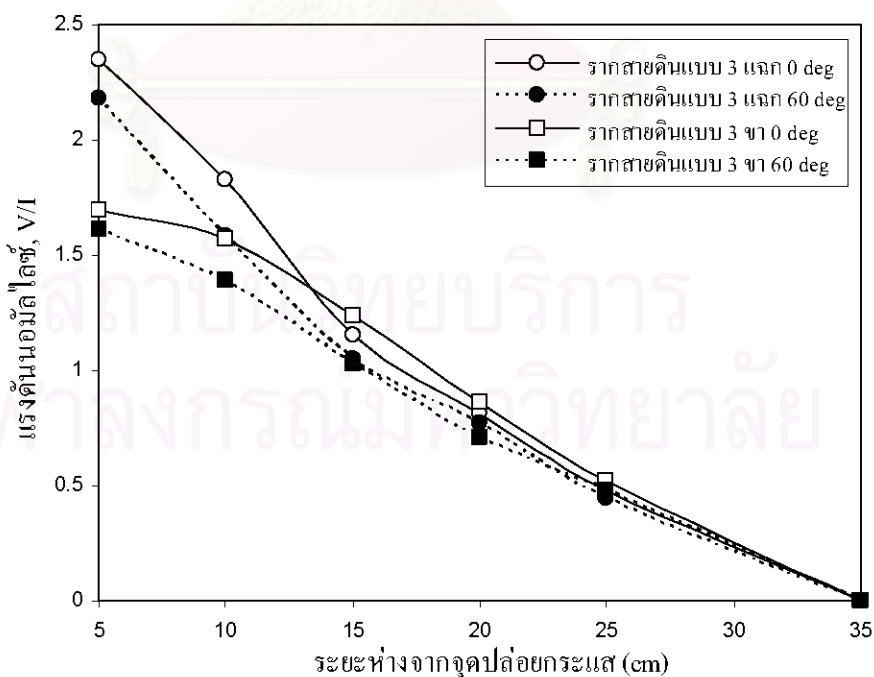
รูปที่ 7.11 ผลการทดลองรอกสายดินแบบ 3 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 1  $\mu$ s ที่ระยะห่าง 5 cm (a) แนว  $0^\circ$  (b) แนว  $60^\circ$

จากผลการทดลองภายใต้กระแสอิมพัลส์ที่มีหน้าคลื่น 1  $\mu$ s รอกสายดินแบบ 3 แฉกและ รอกสายดินแบบ 3 ขาจะมีค่าแรงดันในแนว  $0^\circ$  มากกว่าค่าแรงดันในแนว  $60^\circ$  เช่นเดียวกับการทดลองด้วยกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s แต่เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในแนว  $0^\circ$  ที่ระยะห่าง 15 cm เท่ากันซึ่งจะเลยจากแนวตัวนำของรอกสายดินที่ยาวเพียง 10 cm จะพบว่ารอกสายดินแบบ 3 ขาให้ค่าแรงดันอิมพัลส์ 1.2340 สูงกว่าแรงดันอิมพัลส์ของรอกสายดินแบบ 3 แฉกที่มีค่า 1.1563 รายละเอียดผลการทดลองแรงดันอิมพัลส์กระแสที่ระยะห่างต่างๆ ภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 1  $\mu$ s ของรอกสายดินทั้งสองชนิดแสดงดังตารางที่ 7.3

ตารางที่ 7.3 แรงดันที่ผิวสารละลายของรากสายดินแบบ 3 แฉกและแบบ 3 ขาภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$

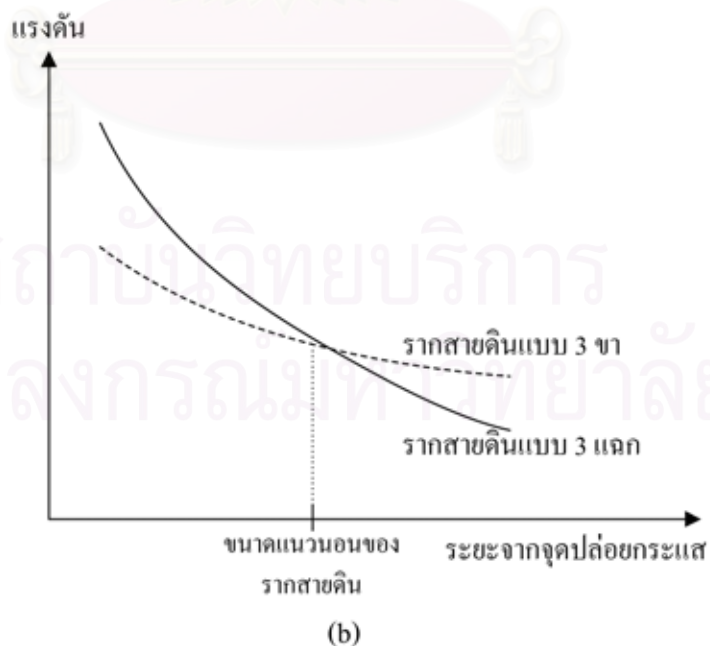
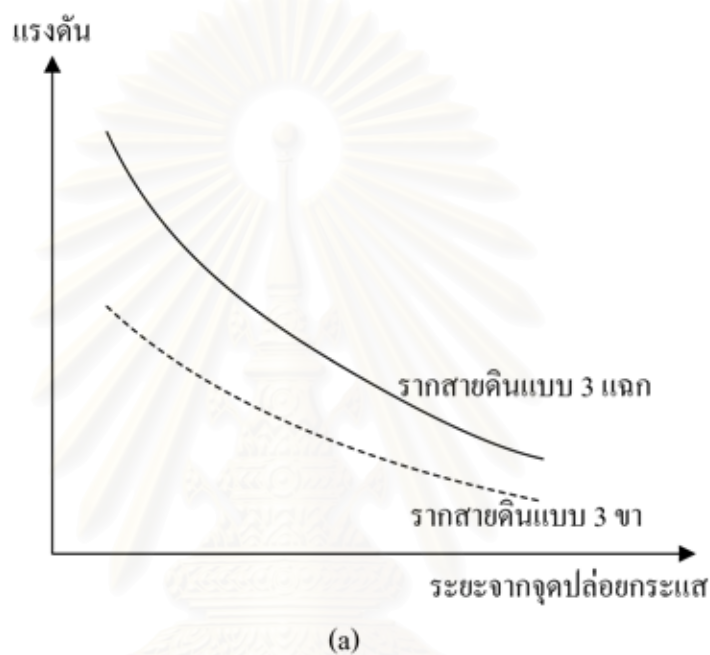
ระยะห่าง (cm)	รากสายดินแบบ 3 ขา		รากสายดินแบบ 3 แฉก	
	$0^\circ$	$60^\circ$	$0^\circ$	$60^\circ$
5	1.694	1.608	2.346	2.180
10	1.572	1.390	1.829	1.584
15	1.234	1.029	1.156	1.050
20	0.862	0.706	0.812	0.773
25	0.520	0.480	0.477	0.444
35	0.000	0.000	0.000	0.000

รากสายดินทั้งสองชนิดจะมีค่าแรงดันอิมพัลส์ในแนว  $0^\circ$  มากกว่าในแนว  $60^\circ$  และในแนว  $0^\circ$  จะมีพฤติกรรมกระจายกระแสที่แตกต่างกัน 2 ช่วงคือช่วงระยะห่างจากรากสายดินอยู่ในแนวตัวนำของรากสายดินที่ไม่เกิน 10 cm ค่าแรงดันอิมพัลส์ที่ผิวสารละลายของรากสายดินแบบ 3 ขาจะต่ำกว่ารากสายดินแบบ 3 แฉก กับช่วงที่ระยะห่างจากรากสายดินมีค่ามากกว่า 10 cm ค่าแรงดันอิมพัลส์ที่เกิดขึ้นตรงผิวสารละลายของรากสายดินแบบ 3 ขาจะมีค่าสูงกว่ารากสายดินแบบ 3 แฉก จากผลการทดลองสามารถนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของระยะห่างจากจุดปล่อยกระแสกับแรงดัน ได้ดังรูปที่ 7.12



รูปที่ 7.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายแรงดันบนผิวสารละลายกับระยะห่างสำหรับรากสายดินแบบ 3 แฉกและรากสายดินแบบ 3 ขาภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$

เมื่อพิจารณาความชันของกราฟซึ่งแทนแรงดันช่วงก้าว พบว่าภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$  รากสายดินแบบ 3 ขาจะมีค่าแรงดันช่วงก้าวน้อยกว่ารากสายดินแบบ 3 แฉกและเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $8 \mu\text{s}$  ดังรูปที่ 7.13 (a) กับผลการทดลองภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$  ดังรูปที่ 7.13 (b) พบว่าค่าความชันกราฟหรือแรงดันช่วงก้าวของรากสายดินแบบ 3 ขาภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$  จะมีค่าต่ำกว่าโดยเฉพาะบริเวณที่เลขออกไปจากแนวตัวนำของรากสายดิน



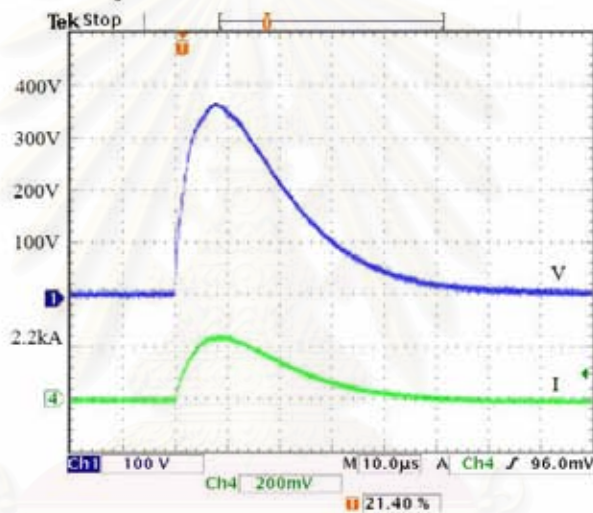
รูปที่ 7.13 เปรียบเทียบลักษณะแรงดันช่วงก้าวระหว่างรากสายดินแบบ 3 ขาและรากสายดินแบบ 3 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์ (a) หน้าคลื่น  $8 \mu\text{s}$  และ (b) หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$



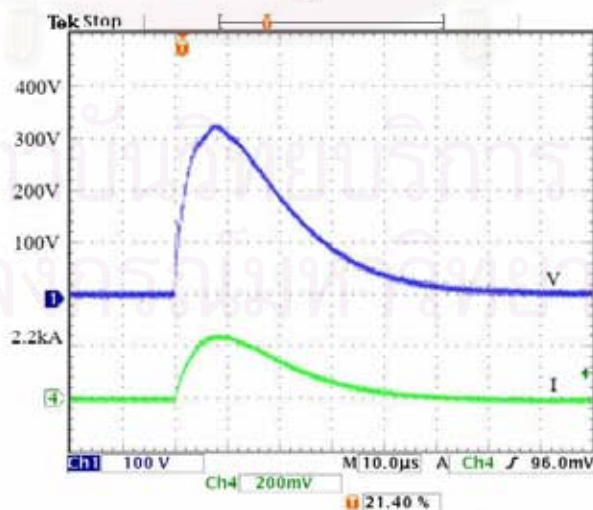
รากสายดินแ่งแนวตั้งซึ่งติดตั้งเพิ่มเติมกับรากสายดินแบบ 3 จะช่วยลดค่าแรงดันช่วงก้ำวทำให้รากสายดินแบบ 3 ขามีค่าแรงดันช่วงก้ำวต่ำกว่ารากสายดินแบบ 3 แฉก โดยเฉพาะภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นสั้นที่รากสายดินแ่งแนวตั้งจะช่วยลดค่าแรงดันช่วงก้ำวให้กับทั้งบริเวณภายในและภายนอกแนวรากสายดินได้ดีกว่า ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบรากสายดินในการป้องกันอันตรายจากแรงดันช่วงก้ำว

### 7.3.2 อิทธิพลของจำนวนกิ่งรากสายดิน

การศึกษาอิทธิพลของจำนวนกิ่งรากสายดินที่มีต่อแรงดันช่วงก้ำวจะทำโดยการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างรากสายดินแบบ 3 แฉกและรากสายดินแบบ 4 แฉก ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันที่ผิวสารละลายและรูปคลื่นกระแสของรากสายดินแบบ 4 แฉกที่ระยะห่าง 15 cm ภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu\text{s}$  แสดงดังรูปที่ 7.14 และภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 1  $\mu\text{s}$  ดังรูปที่ 7.15

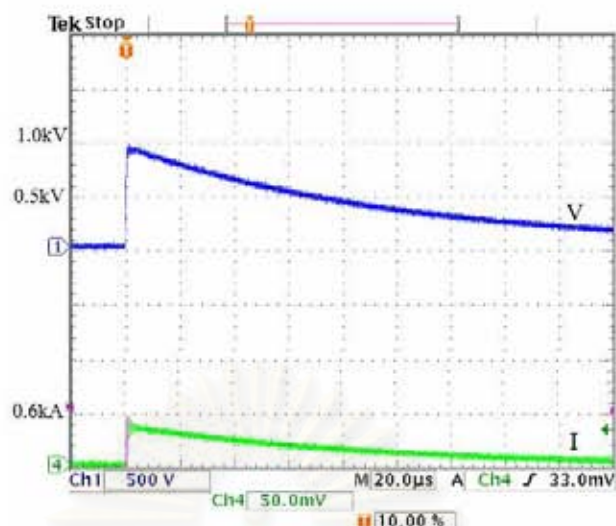


(a)

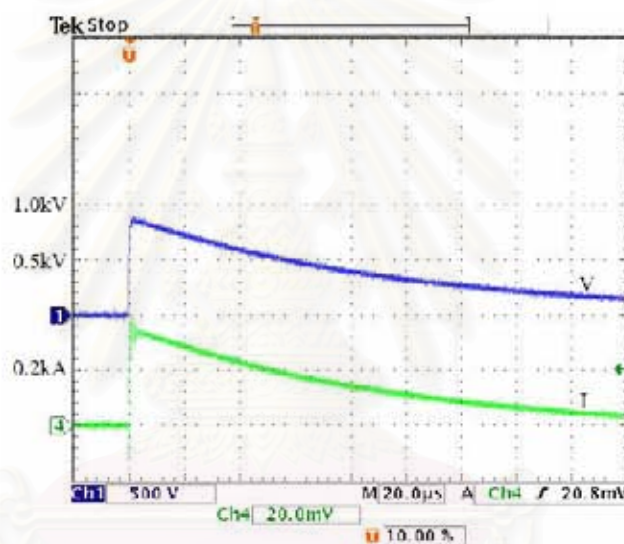


(b)

รูปที่ 7.14 ผลการทดลองรากสายดินแบบ 4 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu\text{s}$  ที่ระยะห่าง 10 cm (a) แนว  $0^\circ$  (b) แนว  $45^\circ$



(a)



(b)

รูปที่ 7.15 ผลการทดลองรอกสายดินแบบ 4 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$  ที่ระยะห่าง 10 cm (a) แนว  $0^\circ$  (b) แนว  $45^\circ$

เปรียบเทียบผลการทดลองในรูปที่ 7.14 และ 7.15 พบว่ารอกสายดินแบบ 4 แฉกมีค่าแรงดันนอมัลไลซ์ในแนว  $0^\circ$  มากกว่าในแนว  $45^\circ$  เนื่องจากในแนว  $0^\circ$  ซึ่งเป็นแนวของตัวนำรอกสายดิน ทำให้การกระจายกระแสบนรอกสายดินและที่ไหลออกจากรอกสายดินส่งผลต่อแรงดันตรงผิวซึ่งอยู่เหนือขึ้นไปจากรอกสายดินมากกว่าในแนว  $45^\circ$  และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของรอกสายดินแบบ 3 แฉกกับรอกสายดินแบบ 4 แฉกที่ระยะห่าง 10 cm เท่ากัน ในแนว  $0^\circ$  รอกสายดินแบบ 4 แฉกจะมีค่าแรงดันนอมัลไลซ์ 0.2702 ต่ำกว่าแรงดันนอมัลไลซ์ของรอกสายดินแบบ 3 แฉกที่มีค่า 0.170 รายละเอียดผลการทดลองแรงดันนอมัลไลซ์กระแสที่ระยะห่างต่างๆ ภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $8 \mu\text{s}$  แสดงดังตารางที่ 7.4 และภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$  แสดงดังตารางที่ 7.5

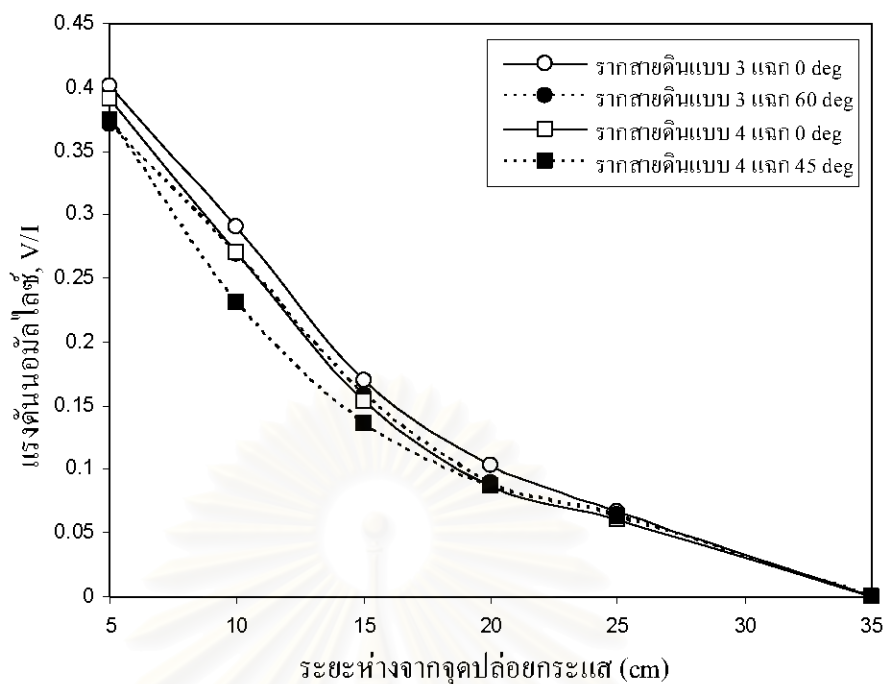
ตารางที่ 7.4 แรงดันที่ผิวสารละลายของรากสายดิน 3 แฉกและ 4 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์ 8  $\mu\text{s}$ 

ระยะห่าง (cm)	รากสายดินแบบ 3 แฉก		รากสายดินแบบ 4 แฉก	
	0°	60°	0°	45°
5	0.401	0.371	0.391	0.375
10	0.290	0.269	0.270	0.231
15	0.170	0.158	0.153	0.136
20	0.103	0.089	0.087	0.087
25	0.066	0.064	0.060	0.063
35	0.000	0.000	0.000	0.000

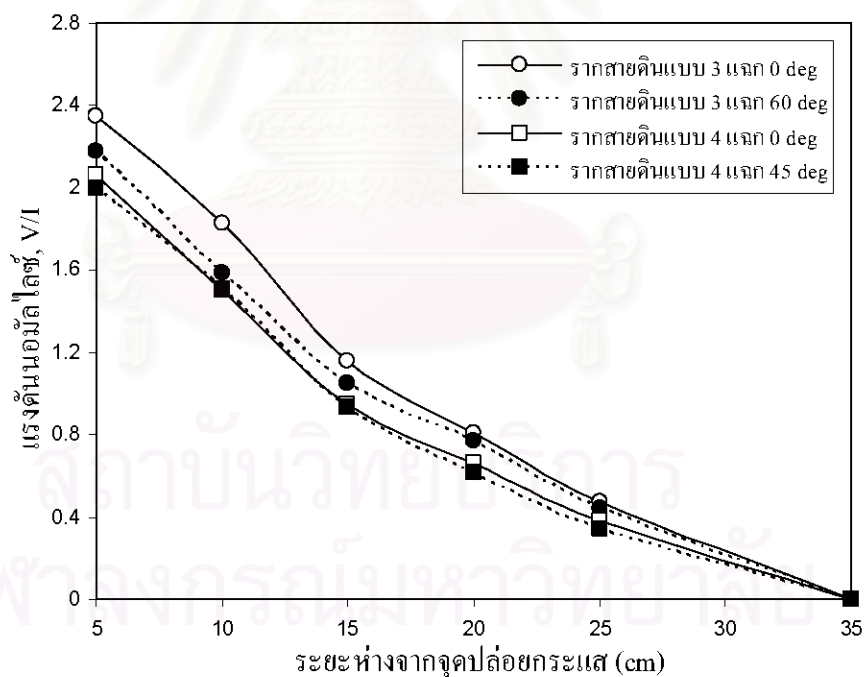
ตารางที่ 7.5 แรงดันที่ผิวสารละลายของรากสายดิน 3 แฉกและ 4 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์ 1  $\mu\text{s}$ 

ระยะห่าง (cm)	รากสายดินแบบ 3 แฉก		รากสายดินแบบ 4 แฉก	
	0°	60°	0°	45°
5	2.346	2.180	2.065	2.001
10	1.829	1.584	1.500	1.511
15	1.156	1.050	0.950	0.937
20	0.812	0.773	0.663	0.613
25	0.477	0.444	0.378	0.346
35	0.000	0.000	0.000	0.000

รากสายดินแบบ 4 แฉกมีค่าแรงดันนอมัลไลซ์ในแนว 0° มากกว่าในแนว 45° เช่นเดียวกับรากสายดินแบบ 3 แฉกเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ระยะห่างเท่าๆกัน รากสายดินแบบ 4 แฉกจะให้แรงดันนอมัลไลซ์ที่ผิวสารละลายต่ำกว่ารากสายดินแบบ 3 แฉกทั้งในแนว 0° และในแนว 60° เพราะว่ารากสายดินแบบ 4 แฉกมีความยาวตัวนำมากกว่ารากสายดินแบบ 3 แฉก ทำให้พื้นที่ระบายกระแสเพิ่มขึ้น อิมพีแดนซ์ของรากสายดินต่ำลง แรงดันไฟฟ้าที่ผิวสารละลายจึงมีค่าลดลงต่ำกว่ารากสายดินแบบ 3 แฉก จากข้อมูลดังกล่าวสามารถนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าบนผิวสารละลายกับระยะห่างจากรากสายดินได้ดังรูปที่ 7.16 สำหรับกระแสอิมพัลส์ 8  $\mu\text{s}$  และรูปที่ 7.17 สำหรับกระแสอิมพัลส์ 1  $\mu\text{s}$



รูปที่ 7.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันบนฟิวसरละลายกับระยะห่างของ รากสายดินแบบ 3 แฉก และรากสายดินแบบ 4 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์ 8  $\mu$ s



รูปที่ 7.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันบนฟิวसरละลายกับระยะห่างของ รากสายดินแบบ 3 แฉกและรากสายดินแบบ 4 แฉกภายใต้กระแสอิมพัลส์ 1  $\mu$ s

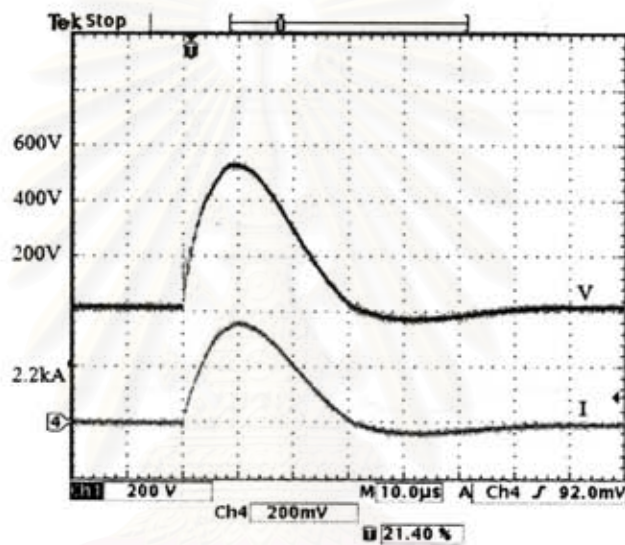
จากกราฟในรูปที่ 7.16 และ 7.17 รากสายดินแบบ 4 แฉกจะมีความชันของกราฟซึ่งแทน แรงดันช่วงก้ำวที่ต่ำกว่ารากสายดินแบบ 3 แฉก ทั้งภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นยาว 8  $\mu$ s และ



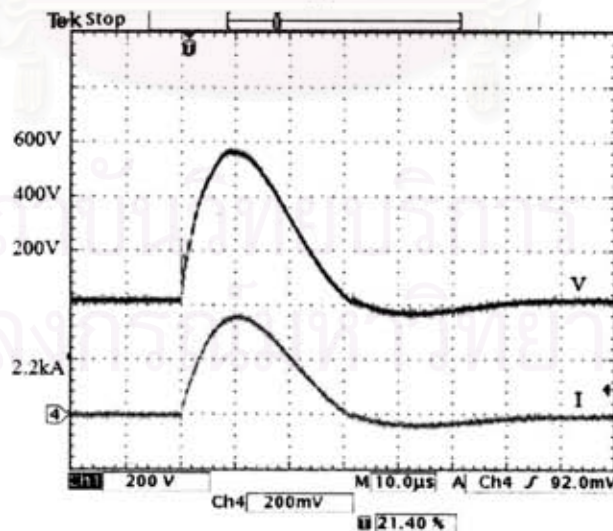
กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นสั้น  $1 \mu\text{s}$  โดยแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่นสั้นจะมีค่าสูงกว่าเพราะค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์จากความเหนี่ยวนำและจะเพิ่มขึ้นตามเวลาหน้าคลื่นที่สั้นลง

### 7.3.3 อิทธิพลของกราวด์กริด

การศึกษาอิทธิพลของกราวด์กริดที่มีต่อแรงดันช่วงก้าวจะทำโดยเปรียบเทียบผลการกระจายกระแสและแรงดันของกราวด์กริดวงกลมเปรียบเทียบกับกราวด์กริดสี่เหลี่ยม ได้ผลการทดลองรูปคลื่นแรงดันที่ผิวสารละลายและรูปคลื่นกระแสภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $8 \mu\text{s}$  ที่ระยะห่าง  $15 \text{ cm}$  แสดงดังรูปที่ 7.18 สำหรับกราวด์กริดวงกลม และรูปที่ 7.19 สำหรับกราวด์กริดสี่เหลี่ยม

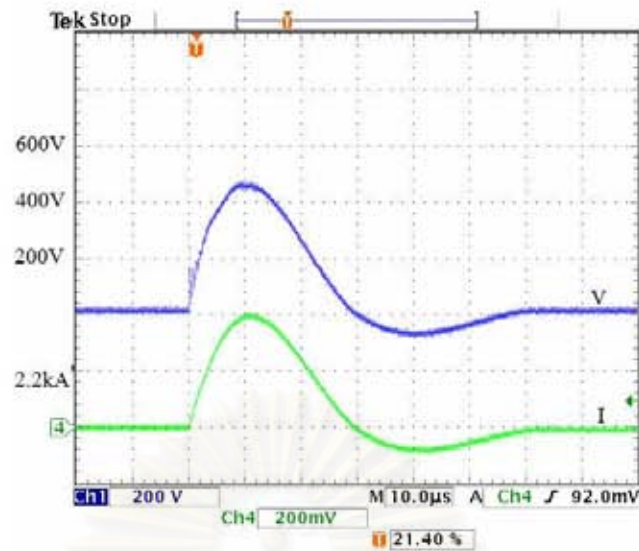


(a)

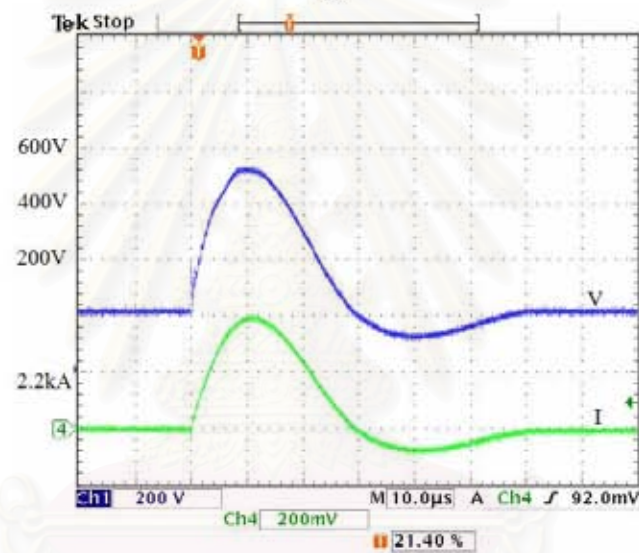


(b)

รูปที่ 7.18 ผลการทดลองกราวด์กริดวงกลมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $8 \mu\text{s}$  ที่ระยะห่าง  $15 \text{ cm}$  (a) แนว  $0^\circ$  (b) แนว  $45^\circ$



(a)



(b)

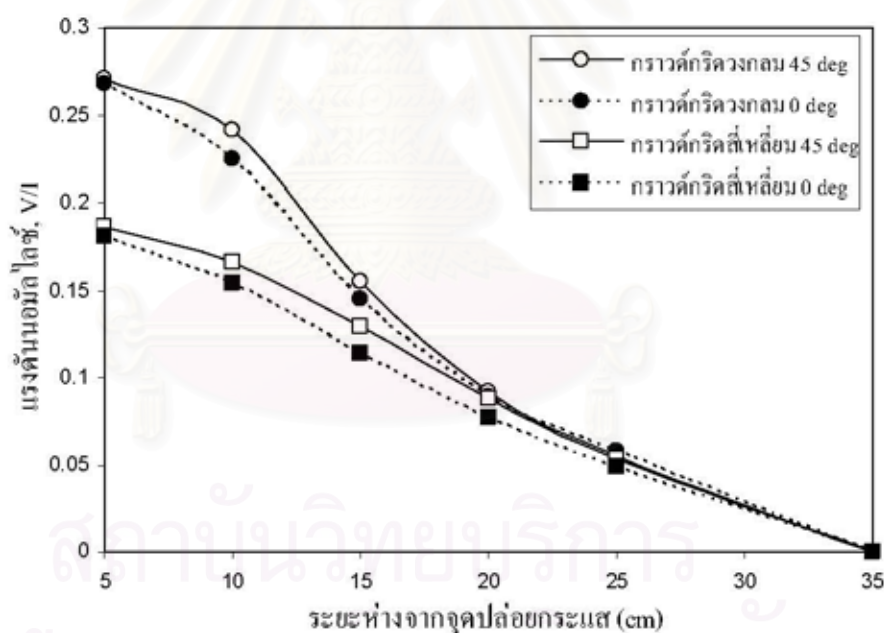
รูปที่ 7.19 ผลการทดลองกราวด์กริดสี่เหลี่ยมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s ที่ระยะห่าง 15 cm (a) แนว  $0^\circ$  (b) แนว  $45^\circ$

จากผลการทดลองในรูปที่ 7.18 และ 7.19 พบว่ากราวด์กริดวงกลมและกราวด์กริดสี่เหลี่ยมมีแรงดันนอัมัลไลซ์ในแนว  $0^\circ$  น้อยกว่าในแนว  $45^\circ$  เนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้นในแนว  $45^\circ$  จะได้รับอิทธิพลจากการไหลของกระแสตามยาวและกระแสตามขวางของตัวนำที่อยู่รอบกราวด์กริดมากกว่าในแนว  $0^\circ$  และที่ระยะห่าง 15 cm เท่ากัน ในแนว  $45^\circ$  กราวด์กริดสี่เหลี่ยมจะให้ค่าแรงดันนอัมัลไลซ์ 0.1297 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแรงดันนอัมัลไลซ์ของกราวด์กริดวงกลมที่มีค่า 0.1554 ผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลอง [84] ที่ใช้โปรแกรม CDEGS จำลองพฤติกรรมระบบรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า โดยค่าแรงดันช่วงก้าวจะลดลงตามความยาวตัวนำของกราวด์กริดที่เพิ่มขึ้น ผลการทดลองแรงดันนอัมัลไลซ์กระแสที่ระยะห่างจากจุดปล่อยกระแสค่าต่างๆ ภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s แสดงดังตารางที่ 7.6

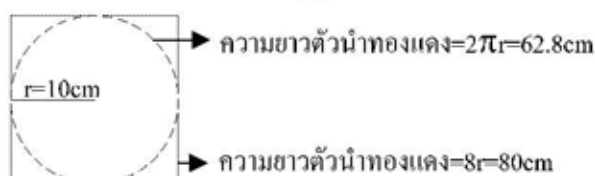
ตารางที่ 7.6 แรงดันที่ผิวสารละลายของกราวด์กริดวงกลมและกราวด์กริดสี่เหลี่ยมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu\text{s}$

ระยะห่าง (cm)	กราวด์กริดวงกลม		กราวด์กริดสี่เหลี่ยม	
	0°	45°	0°	45°
5	0.268	0.271	0.181	0.186
10	0.225	0.241	0.154	0.166
15	0.145	0.155	0.114	0.129
20	0.089	0.092	0.077	0.088
25	0.058	0.055	0.049	0.053
35	0.000	0.000	0.000	0.000

จากผลการทดลองจะนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ของระยะห่างจากจุดปล่อยกระแสกับแรงดันตรงจุดนั้นได้กราฟดังรูปที่ 7.20 (a) ซึ่งแรงดันช่วงก้ำวภายในพื้นที่กราวด์กริดมีค่าน้อยกว่าพื้นที่ภายนอกกราวด์กริด โดยกราวด์กริดวงกลมจะมีค่าแรงดันช่วงก้ำวมากกว่ากราวด์กริดสี่เหลี่ยม



(a)



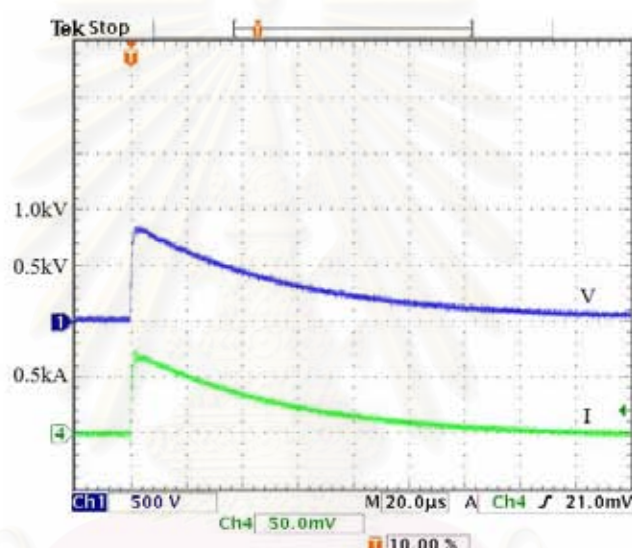
(b)

รูปที่ 7.20 (a) การกระจายแรงดันที่ผิวสารละลายกับระยะห่างของกราวด์กริดภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu\text{s}$  (b) เปรียบเทียบความยาวตัวนำรอบกราวด์กริดวงกลมและกราวด์กริดสี่เหลี่ยม

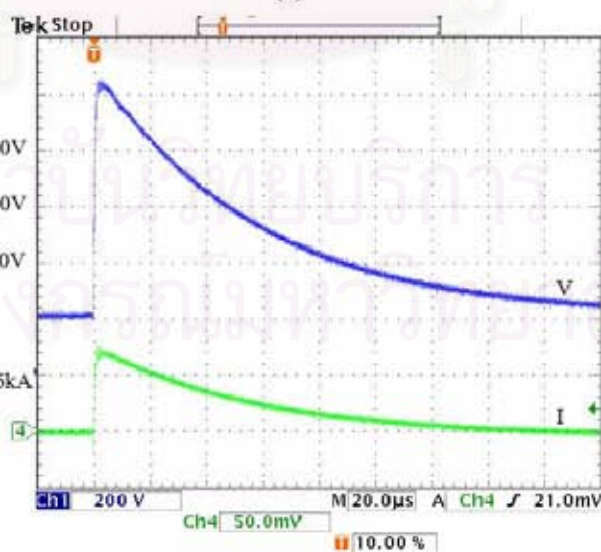


นอกจากกราวด์กริดทั้งสองชนิดจะมีค่าแรงดันนอมัลไลซ์ในแนว  $45^\circ$  มากกว่าในแนว  $0^\circ$  แล้ว เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ระยะห่างจากรากสายดินเท่าๆกัน พบว่ากราวด์กริดสี่เหลี่ยมจะให้แรงดันนอมัลไลซ์ที่ผิวสารละลายมีค่าต่ำกว่ากราวด์กริดวงกลมทั้งในแนว  $0^\circ$  และ  $45^\circ$  เนื่องจากกราวด์กริดสี่เหลี่ยม ใช้ตัวนำรอบนอกมากกว่ากราวด์กริดวงกลมดังรูปที่ 7.20 (b) ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินต่ำลง แรงดันที่ผิวสารละลายจึงมีค่าลดลง

การศึกษาอิทธิพลของเวลาหน้าคลื่นกระแสอิมพัลส์จะทำ โดยการป้อนกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$  ให้กับกราวด์กริดทดสอบ นำแรงดันที่วัดได้มาพล็อตกราฟเปรียบเทียบกับกรณีป้อนด้วยกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $8 \mu\text{s}$  ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันที่ผิวสารละลายและรูปคลื่นกระแสแสดงดังรูปที่ 7.21 สำหรับกราวด์กริดวงกลมและรูปที่ 7.22 สำหรับกราวด์กริดสี่เหลี่ยม



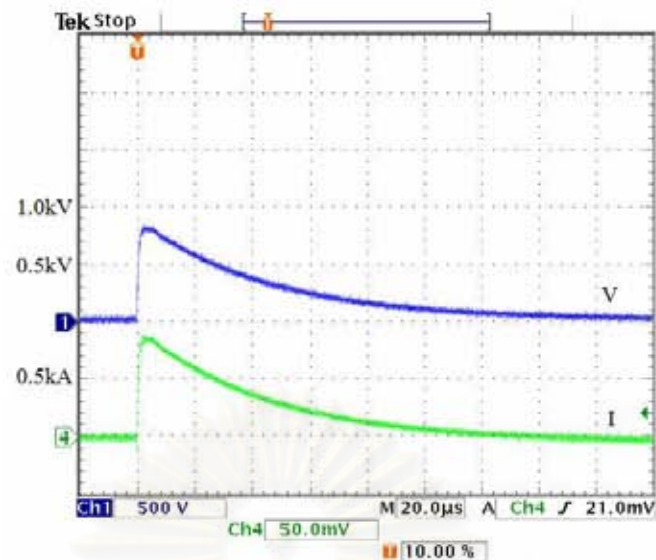
(a)



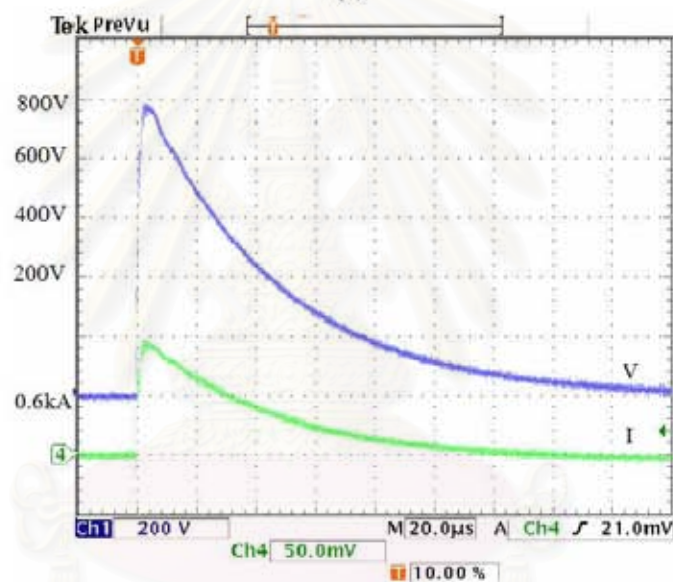
(b)

รูปที่ 7.21 ผลการทดลองกราวด์กริดวงกลมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$  ที่ระยะห่าง 15 cm (a) แนว  $0^\circ$  (b) แนว  $45^\circ$





(a)



(b)

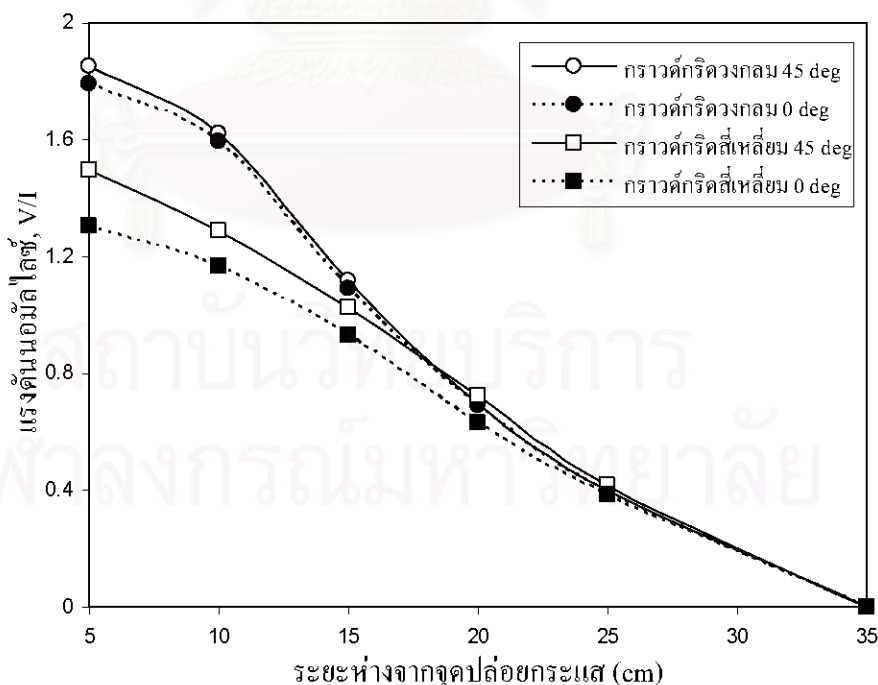
รูปที่ 7.22 ผลการทดลองกราวด์กริดสี่เหลี่ยมภายใต้กระแสพัลส์หน้าคลื่น 1  $\mu$ s ที่ระยะห่าง 15 cm (a) แนว  $0^\circ$  (b) แนว  $45^\circ$

จากผลการทดลองภายใต้กระแสพัลส์หน้าคลื่น 1  $\mu$ s กราวด์กริดวงกลมและกราวด์กริดสี่เหลี่ยมมีค่าแรงดันในแนว  $0^\circ$  น้อยกว่าค่าแรงดันในแนว  $45^\circ$  เช่นเดียวกับการทดลองด้วยกระแสพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s และที่ระยะห่าง 15 cm เท่ากันในแนว  $45^\circ$  กราวด์กริดสี่เหลี่ยมจะให้ค่าแรงดันนอมัลไลซ์ 1.023 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแรงดันนอมัลไลซ์ของกราวด์กริดวงกลมที่มีค่า 1.1184 ตารางที่ 7.7 แสดงผลการทดลองแรงดันนอมัลไลซ์กระแสของกราวด์กริดทั้งสองชนิดที่ระยะห่างต่างๆ ภายใต้กระแสพัลส์หน้าคลื่น 1  $\mu$ s

ตารางที่ 7.7 แรงดันที่ผิวสารละลายของกราวด์กริดวงกลมและกราวด์กริดสี่เหลี่ยมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$

ระยะห่าง (cm)	กราวด์กริดวงกลม		กราวด์กริดสี่เหลี่ยม	
	$0^\circ$	$45^\circ$	$0^\circ$	$45^\circ$
5	1.794	1.851	1.302	1.494
10	1.594	1.623	1.168	1.287
15	1.092	1.118	0.932	1.023
20	0.688	0.694	0.632	0.722
25	0.394	0.401	0.382	0.417
35	0.000	0.000	0.000	0.000

การทดลองกราวด์กริดวงกลมและกราวด์กริดสี่เหลี่ยมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$  ให้ผลเช่นเดียวกับกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $8 \mu\text{s}$  โดยกราวด์กริดวงกลมจะมีค่าแรงดันนอัมัลไลซ์ที่ผิวสารละลายสูงกว่ากราวด์กริดสี่เหลี่ยมทั้งในแนว  $0^\circ$  และในแนว  $45^\circ$  เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของกราวด์กริดสี่เหลี่ยมต่ำกว่า ส่งผลให้แรงดันที่ผิวสารละลายมีค่าน้อยกว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายแรงดันบนผิวสารละลายกับระยะห่างจากจุดปล่อยกระแสแสดงดังรูปที่ 7.23 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกราฟการกระจายแรงดันภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $8 \mu\text{s}$

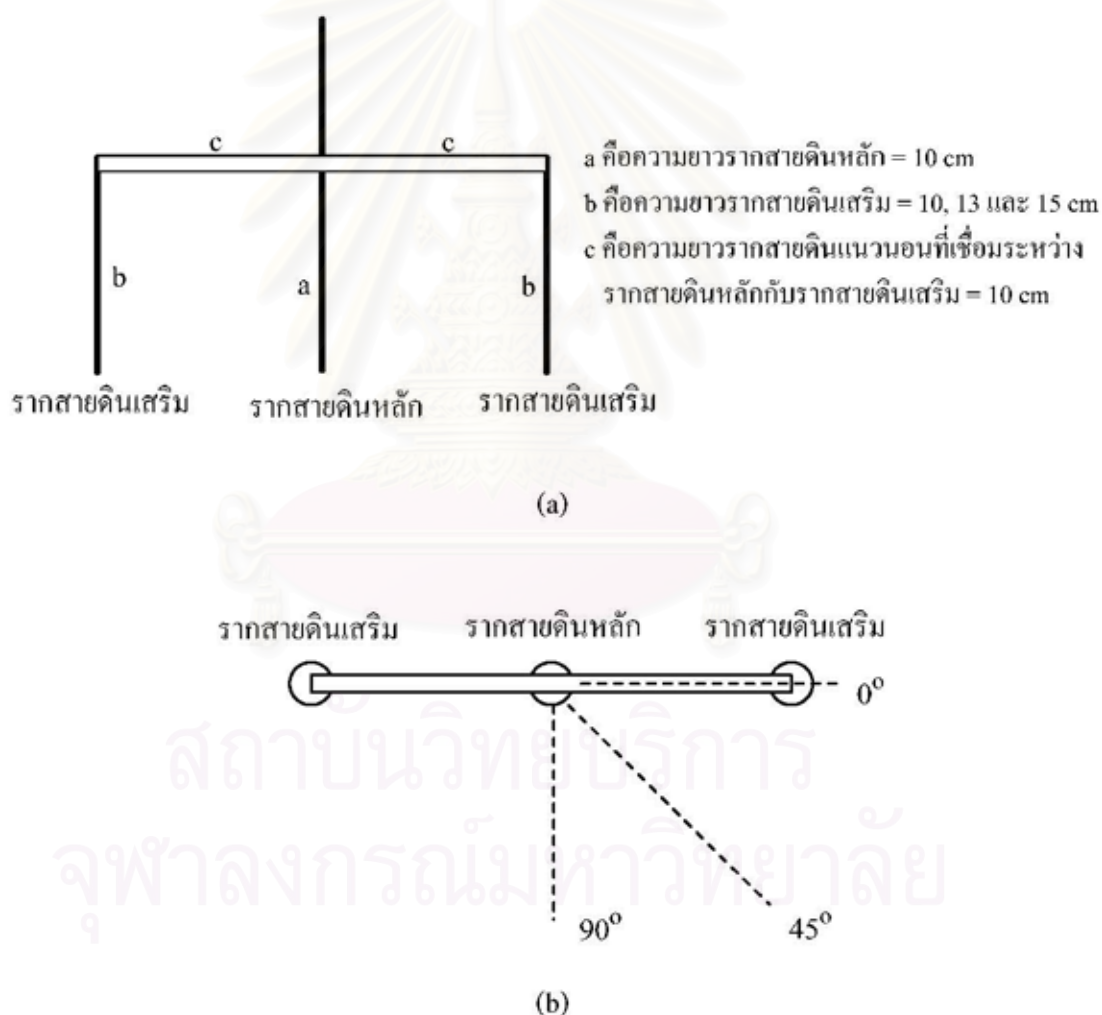


รูปที่ 7.23 ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายแรงดันบนผิวสารละลายกับระยะห่างสำหรับกราวด์กริดวงกลมและกราวด์กริดสี่เหลี่ยมภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น  $1 \mu\text{s}$

แรงดันช่วงก้ำวของระบบรากสายดินที่เป็นกราวด์กริดจะมีค่าแรงดันช่วงก้ำวภายในพื้นที่กราวด์กริดต่ำกว่าภายนอกกราวด์กริด โดยกราวด์กริดสี่เหลี่ยมจะให้ค่าแรงดันช่วงก้ำวที่ต่ำกว่ากราวด์กริดวงกลม การติดตั้งกราวด์กริด โดยรอบอาคารก็จะเป็นการช่วยลดอันตรายที่เกิดขึ้นจากแรงดันช่วงก้ำว

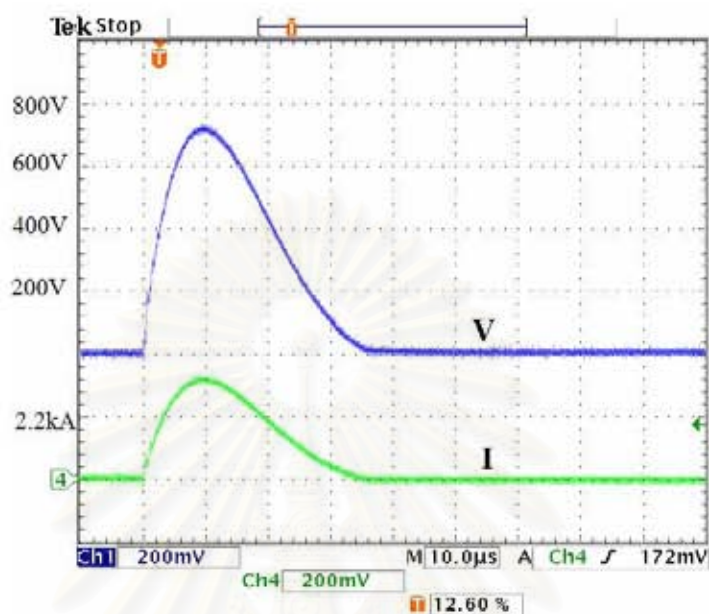
#### 7.3.4 อิทธิพลของรากสายดินเสริม

การศึกษาอิทธิพลของรากสายดินเสริมที่มีต่อแรงดันช่วงก้ำวจะทำโดยการป้อนกระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s ให้กับรากสายดินทดสอบซึ่งประกอบด้วยรากสายดินหลักและรากสายดินเสริมดังรูปที่ 7.24 (a) แล้วทำการวัดการกระจายแรงดันตามแนว  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  และ  $90^\circ$  ดังรูปที่ 7.24 (b)

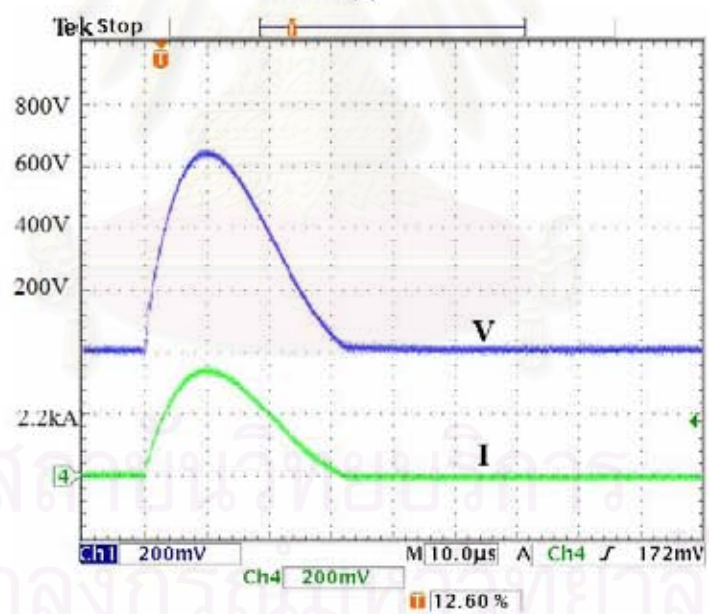


รูปที่ 7.24 (a) รากสายดินเสริม (b) การวัดแรงดันช่วงก้ำวสำหรับรากสายดินเสริม

ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันที่ผิวสารละลายและรูปคลื่นกระแสของรากสายดินเสริมที่ระยะห่างจากจุดปล่อยกระแส 5 cm แนว 45° แสดงดังรูปที่ 7.25 (a) รากสายดินเสริมยาว 10cm และ (b) รากสายดินเสริมยาว 15cm



(a)



(b)

รูปที่ 7.25 ผลการทดลองรากสายดินเสริมที่ระยะ 5 cm แนว 45°

(a) ความยาว 10 cm (b) ความยาว 15 cm

จากผลการทดลองภายใต้ระยะห่างจากจุดปล่อยกระแสและแนวของการวัดแรงดันที่เหมือนกัน พบว่ารากสายดินเสริมความยาว 10 cm จะมีค่าแรงดันนอมัลไลซ์ 0.204 ซึ่งมีค่ามากกว่าแรงดันนอมัลไลซ์ของรากสายดินเสริมความยาว 15 cm ที่มีค่า 0.155



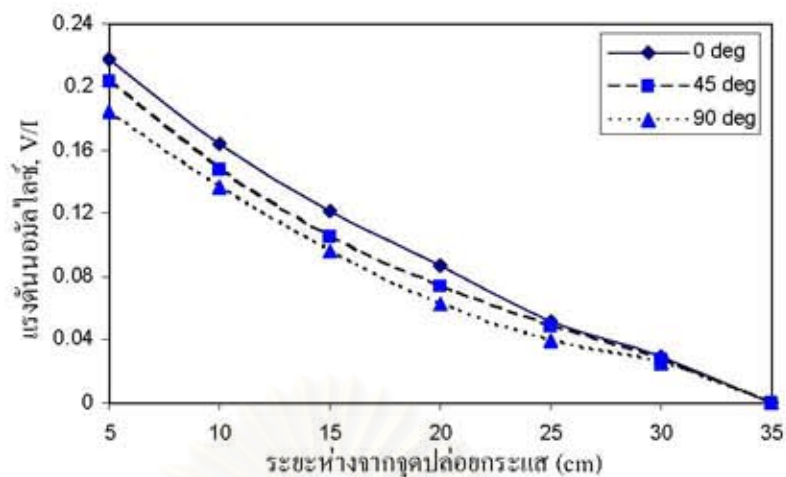
รายละเอียดผลการทดลองแรงดันนอมัลไลซ์กระแสที่ระยะห่างต่างๆ ภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s ของรากสายดินเสริมความยาว 10 cm, 13 cm และ 15 cm แสดงดังตารางที่ 7.8

ตารางที่ 7.8 ผลการทดลองแรงดันช่วงก้าวสำหรับรากสายดินเสริม

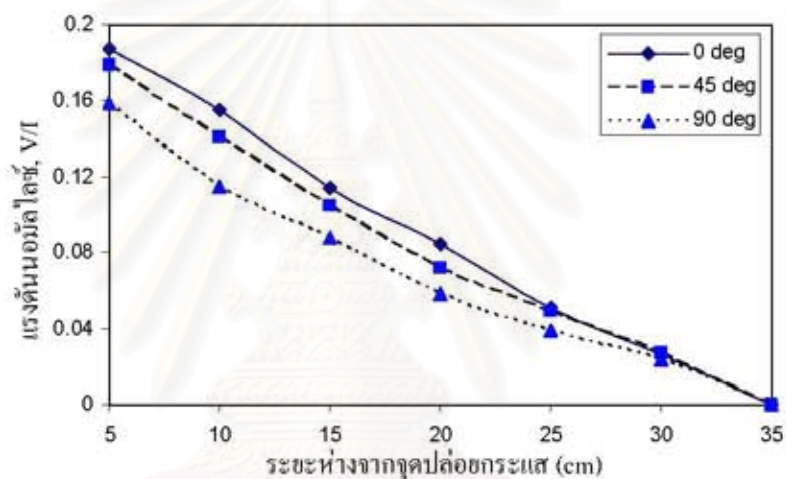
ระยะ (cm)	รากสายดินเสริม 10 cm			รากสายดินเสริม 13 cm			รากสายดินเสริม 15 cm		
	0°	45°	90°	0°	45°	90°	0°	45°	90°
5	0.218	0.204	0.184	0.187	0.179	0.159	0.172	0.155	0.142
10	0.164	0.148	0.137	0.155	0.141	0.115	0.142	0.113	0.102
15	0.122	0.105	0.096	0.114	0.105	0.088	0.104	0.084	0.069
20	0.087	0.074	0.063	0.084	0.072	0.058	0.082	0.068	0.052
25	0.052	0.049	0.040	0.051	0.049	0.039	0.049	0.038	0.034
30	0.029	0.027	0.025	0.026	0.027	0.024	0.025	0.022	0.021
35	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

จากตารางที่ 7.8 เมื่อเปรียบเทียบการกระจายแรงดันของรากสายดินเสริมในแนวแกนต่างๆ พบว่าในแนวแกน 0° จะมีค่าแรงดันนอมัลไลซ์กระแสมากที่สุด รองลงมาจะเป็นค่าแรงดันในแนวแกน 45° และในแนวแกน 90° จะมีค่าน้อยที่สุดเนื่องจากในแนวแกน 0° เป็นแนวการวางตัวของรากสายดิน ทำให้ได้รับอิทธิพลจากกระแสที่ไหลอยู่ภายในตัวนำรากสายดินมากกว่าในแนว 45° และแนว 90°

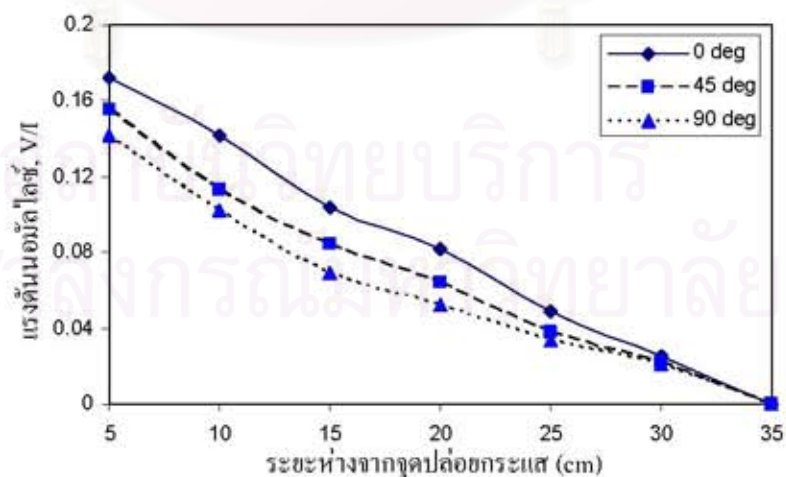
ความสม่ำเสมอของแรงดันช่วงก้าวรอบรากสายดินหลักจะอธิบายได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากจุดปล่อยกระแสกับแรงดันนอมัลไลซ์รอบรากสายดินหลักในแนวต่างๆ ดังรูปที่ 7.26 สำหรับรากสายดินเสริมที่มีความยาว (a) 10 cm (b) 13 cm (c) 15 cm โดยรากสายดินเสริมความยาว 10 cm จะมีค่าแรงดันช่วงก้าวรอบรากสายดินหลักสม่ำเสมอมากกว่ากรณีของรากสายดินเสริมความยาว 13 cm และ 15 cm เนื่องรากสายดินเสริมความยาว 10 cm ซึ่งเป็นความยาวเดียวกับรากสายดินหลักจะมีความสามารถในการกระจายกระแสที่ใกล้เคียงกับรากสายดินหลัก



(a)



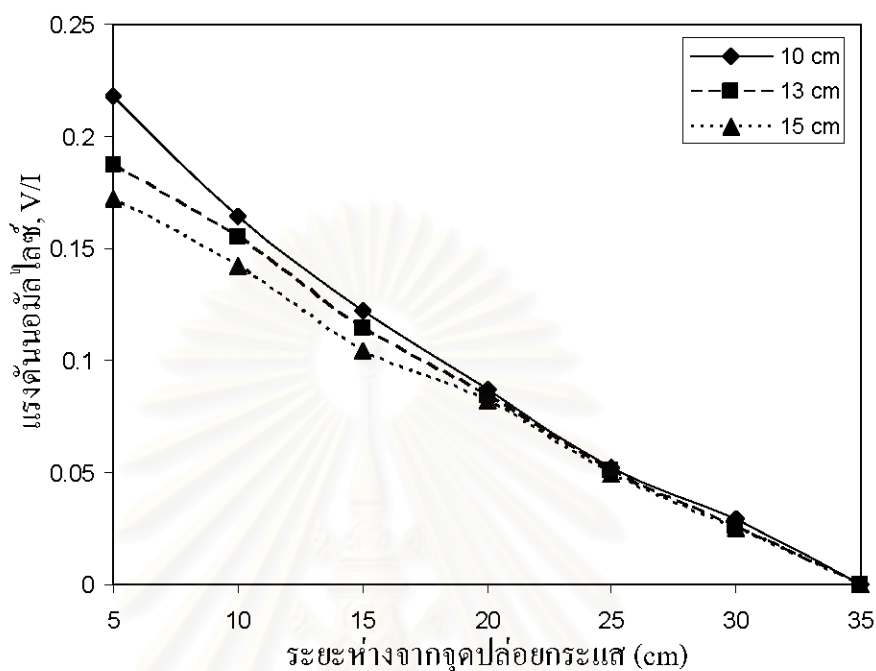
(b)



(c)

รูปที่ 7.26 แรงดันช่วงก้าวรอบรากสายดินหลักสำหรับ  
รากสายดินเสริมความยาว (a) 10 cm (b) 13 cm (c) 15 cm

และเมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของความยาวรากสายดินเสริมที่มีต่อแรงดันช่วงก้ำวในแนว  $0^\circ$  ที่รากสายดินวางตัวอยู่ดังแสดงในรูปที่ 7.27 พบว่าค่าแรงดันช่วงก้ำวจะมีค่าลดลงตามความยาวของรากสายดินเสริมที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 7.27 เปรียบเทียบแรงดันช่วงก้ำวในแนว  $0^\circ$  สำหรับรากสายดินเสริม ความยาว 10 cm, 13 cm และ 15 cm

จากผลการทดลองของรากสายดินเสริมได้แสดงถึงข้อจำกัดของการติดตั้งรากสายดินเสริมที่มีความยาวมากกว่ารากสายดินหลัก แม้ว่าแรงดันช่วงก้ำวในแนวการวางตัวของรากสายดินจะมีค่าลดลงตามความยาวของรากสายดินเสริมแต่ค่าแรงดันช่วงก้ำวรอบรากสายดินหลักก็จะมีค่าไม่สม่ำเสมอมากขึ้นตามความแตกต่างของความยาวระหว่างรากสายดินเสริมกับรากสายดินหลัก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 8

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุปผล

พฤติกรรมของระบบรากสายดินภายใต้สภาวะทรานเซียนต์จะมีความแตกต่างจากพฤติกรรมในช่วงความถี่ต่ำ เนื่องจากการไหลของกระแสบนรากสายดินจะถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ ทำให้การกระจายกระแสและแรงดันมีลักษณะไม่เชิงเส้น (nonlinear) เกิดศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นบนรากสายดิน (ground potential rise, GPR) โดยเฉพาะตรงจุดต่อลงดิน รวมทั้งเกิดแรงดันช่วงก้าวซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการป้องกันอันตรายจากฟ้าผ่าของระบบรากสายดิน

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบดังกล่าวด้วยแบบจำลองและการทดลอง ในส่วนการศึกษาแรงดันที่เพิ่มขึ้นตรงจุดต่อลงดินจะใช้แบบจำลองทฤษฎีสายส่งปรับปรุงที่มีการคำนวณค่าต่อหน่วยด้วยสมการสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องมากขึ้น การกระจายกระแสและแรงดันบนรากสายดินจะหาได้จากการแก้สมการ Telegrapher โดยใช้เทคนิค finite difference-time domain (FDTD) ซึ่งเป็นเทคนิคการคำนวณที่ต้องการทรัพยากรบนเครื่องคอมพิวเตอร์และเวลาประมวลผลที่ไม่สูงมาก การตรวจสอบผลของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับผลจากงานวิจัยอื่นและผลการทดลองย่อส่วนจากห้องปฏิบัติการพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

การศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินเกี่ยวข้องกับความยาวประสิทธิผลของรากสายดินเดี่ยวและขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริด ซึ่งเป็นขนาดสูงสุดที่ยังสามารถทำให้การกระจายกระแสบนตัวนำเพิ่มขึ้นและแรงดันตรงจุดปล่อยกระแสมีค่าลดลง จากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์กับความยาวรากสายดินสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชันกำลัง การวิเคราะห์ค่าความยาวประสิทธิผลของรากสายดินแท่งแนวตั้งและรากสายดินแนวนอนจะใช้วิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยความยาว สำหรับการวิเคราะห์หขนาดประสิทธิผลของกราวด์กริดก็จะใช้วิธีอิมพีแดนซ์ต่อหน่วยพื้นที่ ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับนิยามที่กล่าวไป ค่าความยาวประสิทธิผลและขนาดประสิทธิผลมีค่าลดลงตามเวลาหน้าคลื่นและความต้านทานดินความสามารถในการกระจายกระแสของรากสายดินนอกจากขึ้นอยู่กับความยาวประสิทธิผลหรือขนาดประสิทธิผลแล้วยังขึ้นอยู่กับความเร็วตัวของรากสายดินด้วย ซึ่งรากสายดินแท่งแนวตั้งจะมีความสามารถในการกระจายกระแสดีกว่ารากสายดินแนวนอน โดยเฉพาะในดินที่มีความต้านทานดินสูง



ในส่วนของการศึกษาแรงดันช่วงก้ำว จะเป็นการวิเคราะห์ผลกระทบจากปัจจัยต่างๆของ รากสายดินที่มีต่อแรงดันช่วงก้ำว โดยใช้ชุดการทดลองย่อส่วนที่ใช้สารละลายน้ำเกลือมาจำลอง แทนดินทำให้การวัดแรงดันที่กระจายอยู่ตรงผิวสารละลายมีความถูกต้องมากขึ้น และเนื่องจาก รากสายดินแต่ละประเภทมีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกันทำให้การเปรียบเทียบผลที่ได้จะใช้เป็นค่า แรงดันนอมัลไลซ์กระแส (V/I) ซึ่งการพิจารณาค่าแรงดันช่วงก้ำวจะดูได้จากความชันของกราฟ แรงดันนอมัลไลซ์กระแสตรงผิวสารละลายกับระยะห่างจากจุดปล่อยกระแส

ลักษณะของระบบรากสายดินจะมีผลต่อแรงดันช่วงก้ำว โดยแรงดันช่วงก้ำวจะมีค่าลดลง ตามความยาวรากสายดินและมีแนวโน้มมีค่าเมื่อรากสายดินมีความยาวมากถึงค่าๆหนึ่ง จำนวนกิ่ง ก้านของระบบรากสายดินจะช่วยลดค่าแรงดันช่วงก้ำว การติดตั้งรากสายดินแท่งแนวตั้งเพิ่มเติมจะ ช่วยให้แรงดันช่วงก้ำวของระบบรากสายดินต่ำลง รากสายดินแบบกรวดกริดมีค่าแรงดันช่วงก้ำว ภายในกรวดกริดน้อยกว่าภายนอกกรวดกริด กรวดกริดที่เหลี่ยมจะช่วยลดค่าแรงดันช่วงก้ำว ได้ มากกว่ากรวดกริดวงกลมเนื่องจากความยาวตัวนำทองแดงที่อยู่โดยรอบของกรวดกริดที่เหลี่ยมมี มากกว่ากรวดกริดวงกลม แรงดันช่วงก้ำวจะมีค่าลดลงตามความยาวรากสายดินเสริมอย่างไรก็ตาม ควรคำนึงถึงความความไม่สม่ำเสมอของแรงดันช่วงก้ำวรอบรากสายดินหลักประกอบด้วย

ผลที่ได้จากการศึกษาจะเป็นความรู้ที่ช่วยให้เข้าใจถึงพฤติกรรมของรากสายดินภายใต้ สภาวะทรานเซียนต์ โดยสามารถใช้เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์พฤติกรรมของรากสายดินที่มี ลักษณะซับซ้อนและสามารถนำความรู้ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับงานจริงได้แก่ การออกแบบสร้าง ระบบรากสายดินที่มีประสิทธิภาพในการป้องกันผลกระทบที่เกิดจากกระแสฟ้าผ่าด้วยต้นทุนที่ เหมาะสม การปรับปรุงคุณสมบัติทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินเดิมและการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น จากฟ้าผ่าด้วยระบบรากสายดิน

## 8.2 ข้อพิจารณาในการใช้รากสายดิน

ในการออกแบบระบบรากสายดินควรจะมีการตระหนักถึงพฤติกรรมที่เปลี่ยนไปภายใต้ กระแสฟ้าผ่า จากผลการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ทำให้ได้ข้อพิจารณาในการออกแบบและเลือกใช้ รากสายดินดังนี้

1) การเลือกใช้รากสายดินแท่งแนวตั้งจะใช้ตัวนำที่น้อยกว่ารากสายดินแนวนอนภายใต้ คุณสมบัติการป้องกันที่เท่ากันทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการลงทุน

2) กรณีที่ไม่สามารถดอรากสายดินแท่งแนวตั้งให้ลึกได้ ก็สามารถจะใช้เป็นลักษณะของ กรวดกริดที่จะช่วยในเรื่องของการกระจายกระแสและการลดค่าแรงดันช่วงก้ำวภายในพื้นที่ของ กรวดกริด โดยจะเสริมความสามารถในการกระจายกระแสด้วยการปรับปรุงค่าความต้านทานดิน

3) ความยาวรากสายดินแท่งแนวดิ่งและรากสายดินแนวนอนไม่ควรเกินค่าความยาวประสิทธิผล ส่วนขนาดของกรวดกรัดก็ไม่ควรเกินขนาดประสิทธิผล ซึ่งทั้งค่าความยาวประสิทธิผลและขนาดประสิทธิผลนี้จะต้องเลือกใช้ให้สอดคล้องกับค่าความต้านทานดิน

4) การเลือกค่าความยาวประสิทธิผลควรคำนึงถึงรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าโดยเฉพาะกระแสฟ้าผ่าตาม 0.25/100  $\mu$ s เนื่องจากกระแสฟ้าผ่าตามจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้า  $V_L = L(dI/dt)$  ที่มีค่าสูงบนรากสายดินมากกว่ากระแสฟ้าผ่าแรก

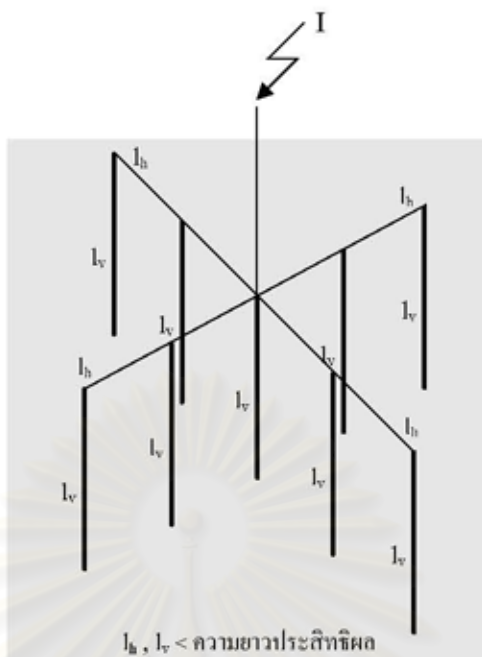
5) การติดตั้งรากสายดินแท่งแนวดิ่งเพิ่มเติมจะช่วยลดทั้งค่าแรงดันทรานเซียนต์ที่เพิ่มขึ้นบนรากสายดินและค่าแรงดันช่วงก้าวที่เกิดขึ้นรอบรากสายดิน

6) การที่ความยาวประสิทธิผลมีค่าลดลงตามค่าความต้านทานดิน เนื่องจากในดินที่มีความต้านทานดินต่ำรากสายดินสามารถกระจายกระแสออกจากตัวนำไปยังดินได้มาก ดังนั้นเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายของตัวนำจึงควรมีการปรับปรุงค่าความต้านทานดินเช่น การเลือกใช้วัสดุที่มีความต้านทานต่ำ (low resistive material) มาปกคลุม โดยรอบรากสายดินเพื่อทำให้ค่าความต้านทานดินลดลง

7) จากผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อพฤติกรรมรากสายดินภายใต้กระแสอิมพัลส์ สามารถสรุปเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานจริงได้ดังนี้

- ค่าความจุไฟฟ้าระหว่างระบบรากสายดินกับดินจะช่วยในการระบายกระแสตามขวาง ( $I_C - jI_C$ ) ที่ไหลออกจากรากสายดิน ในการออกแบบจึงควรจะทำให้ระบบรากสายดินมีค่าความจุไฟฟ้ามาก โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างระบบรากสายดินกับดินเช่นเลือกใช้ตัวนำแบบแผ่นหรือแบบแถบ
- ค่าความเหนียวนำของรากสายดินจะมีผลทำให้ค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินเพิ่มขึ้นส่งผลให้การไหลของกระแสอิมพัลส์บนตัวนำไม่สม่ำเสมอ ในการติดตั้งระบบรากสายดินจึงควรเลือกใช้ตัวนำแบบแถบเพื่อลดผลของตัวเหนียวนำ
- ความต้านทานที่เกิดขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสของตัวนำกับดินจะมีอิทธิพลต่อการระบายกระแสของรากสายดิน การลดค่าความต้านทานเพื่อให้การระบายกระแสได้มากขึ้นสามารถทำได้โดยเพิ่มจำนวนการต่อขนานของรากสายดินแท่งแนวดิ่งที่มีความยาวไม่เกินค่าความยาวประสิทธิผล

8) การจัดเรียงรากสายดินที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทั้งในด้านความถี่ต่ำและด้านความถี่สูงด้วยการกำหนดให้ทั้งค่าความต้านทานและค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์มีค่าต่ำ ในกรณีที่ไม่สามารถทำให้ค่าความต้านทานดินต่ำด้วยรากสายดินเพียงแท่งเดียว ก็สามารถจะใช้การต่อขนานของรากสายดินแท่งแนวดิ่งขนาดความยาว  $L_v$  ที่มีค่าไม่เกินความยาวประสิทธิผลจำนวนหลายแท่งที่เชื่อมถึงกันด้วยรากสายดินแนวนอนความยาว  $L_h$  ดังรูปที่ 8.1 ซึ่งจะช่วยลดได้ทั้งค่าความต้านทานและค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์ของระบบรากสายดิน



รูปที่ 8.1 การใช้งานรากสายดินแท่งแนวตั้งและรากสายดินแนวนอน

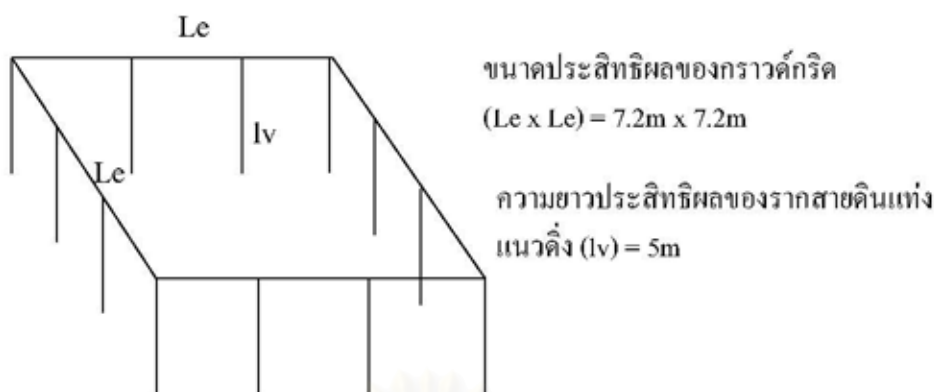
นอกจากนี้สามารถจะ ใช้การติดตั้งรากสายดินแท่งแนวตั้งเสริมกับกราวด์กริดสี่เหลี่ยมที่มีขนาดไม่เกินขนาดประสิทธิผลก็จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบรากสายดิน ได้ดังตัวอย่างการออกแบบระบบรากสายดิน ในตอนเริ่มต้นถ้าใช้รากสายดินแท่งแนวตั้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ( $d$ ) 40 mm ความยาว 3 m จำนวน 1 แท่งฝังลงในดินที่มีค่าความต้านทานดิน ( $\rho$ ) 50  $\Omega \cdot m$  จะคำนวณค่าความต้านทานของรากสายดิน ได้ดังสมการที่ (2.3)

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[ \log_e \left( \frac{8l}{d} \right) - 1 \right]$$

$$= 14.31 \Omega$$

พบว่าค่าความต้านทานดังกล่าวยังมีค่าสูงอยู่ จึงปรับปรุง โดยเพิ่มความยาวของรากสายดินจนถึงค่าความยาวประสิทธิผลดังตารางที่ 6.3 ด้วยความยาว 5 m จะได้ค่าความต้านทานของระบบรากสายดินใหม่มีค่า 3  $\Omega$  ซึ่งค่าดังกล่าวก็ยังคงสูงอยู่ การจะลดค่าความต้านทานลง โดยการเพิ่มความยาวรากสายดินให้มากกว่าความยาวประสิทธิผล ย่อมส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบรากสายดินภายใต้สภาวะทรานเซียนต์แย่ลง ดังนั้นจะ ใช้การจัดเรียงรากสายดินเป็นกราวด์กริดสี่เหลี่ยมเสริมด้วยรากสายดินแท่งแนวตั้ง 4 แท่งต่อขนานกัน โดยขนาดของกราวด์กริดมีค่าสอดคล้องกับขนาดประสิทธิผลเพื่อรักษาคุณสมบัติการป้องกันภายใต้สภาวะทรานเซียนต์ จากตารางที่ 6.7 ได้ความยาวด้าน 7.2 m และมีระยะห่างระหว่างรากสายดินแท่งแนวตั้งแต่ละท่อน 1.8 m ดังแสดงในรูปที่ 8.2





รูปที่ 8.2 การจัดเรียงรากสายดินแบบกราวด์กริดสี่เหลี่ยมเสริมด้วยรากสายดินแห่งแนวตั้ง

ส่วนคุณสมบัติการป้องกันที่ความถี่ต่ำจะพิจารณาจากความต้านทานของระบบรากสายดินในกรณีที่ไม่มีวัตถุวางกลางจะคำนวณได้ตามสมการที่ (2.4)

$$R_n = R \left( \frac{1 + \lambda a}{n} \right)$$

$$\text{เมื่อ } a = \frac{\rho}{2\pi R s} = 0.53$$

จะได้

$$R_n = 3 \times \left( \frac{1 + (2.1 \times 0.53)}{10} \right) = 0.6 \Omega$$

ด้วยวิธีดังกล่าวจะทำให้ระบบรากสายดินมีค่าความต้านทานต่ำลงและยังคงรักษาประสิทธิภาพในการป้องกันผลกระทบจากฟ้าผ่า

### 8.3 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของระบบรากสายดินภายใต้สภาวะทรานเซียนต์มีข้อเสนอแนะที่สามารถนำไปพัฒนาเพื่อศึกษาต่อดังนี้

- 1) รากสายดินที่ทำการวิเคราะห์เป็นรากสายดินพื้นฐาน ซึ่งในระบบรากสายดินจริงอาจจะมีรูปร่างและการเรียงตัวของตัวนำที่ซับซ้อน เพื่อให้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กว้างขึ้นจึงควรมีการศึกษาถึงรูปร่างและการเรียงตัวของระบบรากสายดินแบบต่างๆเพิ่มเติม
- 2) การทำให้ความต้านทานดินต่ำเป็นอีกวิธีที่ช่วยให้กระแสฟ้าผ่าสามารถระบายออกจากรากสายดินได้ดีขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาถึงวัสดุความต้านทานต่ำที่ใช้คลุมรากสายดินเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันผลกระทบจากกระแสฟ้าผ่าของระบบรากสายดิน



3) ชุดการทดลองย่อยส่วนที่ออกแบบสร้างขึ้นเพื่อใช้ศึกษาพฤติกรรมของระบบรากสายดิน ภายใต้กระแสมัลส์ฟ้าผ่า จะใช้ถังบรรจุสารละลายขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 cm ถึง 71 cm ทำให้การทดลองกับรากสายดินทดสอบถูกจำกัดด้วยขนาดถัง เพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องตามหลักการทดลองย่อยส่วน จึงต้องใช้กระแสมัลส์ทดสอบที่มีเวลาหน้าคลื่นสั้น ซึ่งการสร้างกระแสดังกล่าวจะถูกจำกัดโดยวงจรเครื่องกำเนิดกระแสมัลส์ ดังนั้นเพื่อให้สามารถทดลองกับรากสายดินที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและหลีกเลี่ยงข้อจำกัดในการสร้างกระแสมัลส์ จึงควรมีการออกแบบชุดการทดลองย่อยส่วนที่มีภาชนะบรรจุสารละลายขนาดใหญ่ขึ้น

4) ควรมีการศึกษาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์รูปแบบอื่นเพื่อเปรียบเทียบกับฟังก์ชันกำลังในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความยาวของรากสายดินเช่น ฟังก์ชันโพลิโนเมียล หรือฟังก์ชันไฮเปอร์โบลิก

5) เนื่องจากในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมทรานเซียนต์ของระบบรากสายดินที่ฝังอยู่ในดินที่มีลักษณะสม่ำเสมอ (uniform soil) ซึ่งในทางปฏิบัติดินอาจจะมีลักษณะที่ไม่สม่ำเสมอ (nonuniform soil) เช่นมีความแตกต่างของชั้นดินแนวนอน (horizontal-layered soils) หรือมีความแตกต่างของชั้นดินแนวตั้ง (vertical-layered soils) เพื่อให้ครอบคลุมเงื่อนไขที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติดังกล่าว จึงควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมทั้งในด้านการสร้างแบบจำลองและการออกแบบชุดการทดลองย่อยส่วน

## รายการอ้างอิง

- [1] IEEE Std. IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems. New York: IEEE Press, 1991.
- [2] NEC Std. National Electrical Code Section recommended practice for grounding. New York: NEC Press, 2002.
- [3] สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.). มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 2. มาตรฐาน ว.ส.ท. ; 2003-43. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2546.
- [4] IEC Std. Protection Against Lightning Electromagnetic Impulse. Part I. IEC Publication No. 62305-3. Geneva: IEC Press, 2006.
- [5] WCS Company. Recommended earthing and lightning protection. Bangkok: WCS, 2001.
- [6] Lightning and Insulator Subcommittee of the T&D Committee. Parameters of Lightning Strokes: A Review. *IEEE Trans. Power Delivery* 20, 1 (January 2005) : 346-358.
- [7] Geri, A.; Garbagnati, E. and Veca et al , G. M. Non-linear behavior of ground electrodes under lightning surge currents: computer modeling and comparison with experimental results. *IEEE Trans. Magazine* 28, 2 (March 1992): 1442-1445.
- [8] Mardiguian, M. Grounding and Bonding. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [9] Darveniza, M. Lightning and Lightning Protection. (Cont. Educ. Course). Queensland: University of Queensland, 1990.
- [10] Gonos, I.F.; Topalis, F.V. and Stathopoulos, I.A. Transient impedance of grounding rods. *High Voltage Engineering* 467, 2 (May 1999): 272-275.
- [11] Bustamante, F. Bitemas, J. borjas, J. Martinez and Baker, A. Methods to improve the reliability in 24kV Boscan field distribution lines. Transmission & Distribution Conference 4 (August 2006): 1-9.
- [12] Rakov, V.A. and Uman M.A M. Lightning physics and effects. (Training Course). London: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 1955.
- [13] ANSI/IEEE Std. IEEE guide for safety in AC substation grounding. New York, 1986.
- [14] Sunde, E. D. Earth conduction effects in transmission systems. New York: Bell Telephone Laboratories, 1949.
- [15] Geri, A. Behavior of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation. *IEEE Trans. Power Delivery* 14, 3 (July 1999): 1008-1017.

- [16] Liu, J.; Ye, L.Y.; Zhang, X.P. and Xia, G.R. Study on the High Current Impulse Properties of Grounding Electrodes with Long-Effective Low Resistivity Materials. High Voltage Engineering 18, 3 (July 2003): 994-1001.
- [17] He, J. L.; Zeng, R. S.; Chen, M. S.; Li, Y. and Wu, W.H. Impulse characteristics of grounding systems of transmission-line towers in the regions with high soil resistivity. IEEE Trans. Power System Technology 5 (August 1998): 156–162.
- [18] He, J.L.; Zeng, R.; Tu, Y.P.; Zou, J.S.; Chen, M. and Guan, Z.C. Laboratory investigation of impulse characteristics of transmission tower grounding devices. IEEE Trans. Power Delivery 18, 3 (July 2003): 994-1001.
- [19] He, J.L.; Zeng, R.; Tu, Y.P. Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials. IEEE Tran. Power Delivery 21,3 (July 2006): 1706-1713.
- [20] IEC Std. Protection Against Lightning Electromagnetic Impulse. Part I. IEC Publication No. 62305-1. Geneva: IEC Press, 2006.
- [21] BS Std. Code of practice for earthing. BS Publication No. 7430. London: BS Press, 1998.
- [22] Nahman, J. M. and Djordjevic, V.B. Maximum Step voltages of Combined grid-multiple rods ground electrodes. IEEE Trans. Power Delivery 13, 3 (July 1998): 757-761.
- [23] Gao, Y.Q.; He, J. L.; Zeng, R. and Liang, X.D. Impulse transient characteristic of grounding grids. Inter Sym. (May 2002): 276-280.
- [24] Tanabe, K. and Asakawa A. Computer analysis of transient performance of grounding grid element based on the finite-difference time – domain method. Inter Sym. (May 2003): 209-212.
- [25] Zang, B.; Cui, X.; Zhao, Z. and He, J. L. Numerical Analysis of the Influence between large grounding grids and two-end grounded cables by the moment method coupled with circuit equations. IEEE Trans. Power Delivery 20, 2 (April 2005): 731-737.
- [26] Andre, M. and Mattos, F. Grounding grids transient simulation. IEEE Trans. Power Delivery 20, 2 (April 2005): 1370-1378.
- [27] Greev, L. and Arnautovski, V. Grounding systems modeling for high frequencies and transients: some fundamental considerations. Power Tech Conference Proceedings. 3 (June 2003): 23-26.
- [28] Greev, L. Modeling of grounding systems for better protection of communication installations against effects from electric power system and lightning. IEE Conference. 484 (October 2001): 461-468.



- [29] Mazzettie, C. and Veca, G. M. Impulse behavior of grounding electrodes. IEEE Trans. Power Application System 102, 9 (September 1983): 3148-3154.
- [30] He, J. L.; Zeng, R. S.; Chen, M. S.; Li, Y. and Wu, W. H. Impulse characteristics of grounding systems of transmission-line towers in the regions with high soil resistivity. IEEE Trans. Power System Technology 1 (August 1998): 156-162.
- [31] Farag, A.S.; Cheng, T.C. and Penn, D. Grounding terminations of lightning protective systems. IEEE Trans. Dielectrics Electrical Insulator 5, 6 (1998): 869-877.
- [32] Lorentzou, M.I. and Hatziaargriou, N.D. Modelling of long grounding conductors using EMTP. International Conference on Power System Transients 4 (June 1999): 20-24.
- [33] Gupta, B. P. and Thapar, B. Impulse characteristics of grounding electrodes. J. Inst. Eng. (India) 64, 4 (February 1981): 178-182.
- [34] Gao, Y.Q.; He, J. L.; Zeng, R.; Liang, X.D.; Zou, J. and Chang, S. Effective length of counterpoise wire under lightning current. IEEE Trans. Power Delivery 20, 2 (April 2005): 1585-1591.
- [35] Liu, Y.; Theethayi, N. and Thottappillil, R. Investigating the validity of existing definitions and empirical equations of effective length/area of grounding wire/grid for transient studies. Journal of Electrostatics 2, 2 (May 2004): 329-335.
- [36] C. R. Paul. Analysis of Multiconductor Transmission Lines. New York: Wiley, 1991.
- [37] Liu, Y.; Theethayi, N. and Thottappillil, R. An Engineering Model for Transient Analysis of Grounding System Under Lightning Strikes: Nonuniform Transmission-Line Approach. IEEE Trans. Power Delivery 20, 2 (April 2005): 722-730.
- [38] Gupta, B. P. and Thapar, B. Impulse Impedance of Grounding Grids. IEEE Trans. Power Application System 6 (November 1980): 2357-2362.
- [39] Greev, L.D. and Heimbach, M. Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding system. IEEE Trans. Power Delivery 17,1 (January 1997): 172-178.
- [40] Silvrio, V. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. IEEE Tran. Power Delivery 22, 1 (January 2007): 381-386.
- [41] Bewley, L.V. Theory and tests of the counterpoise. Elec. Eng. 53 (August 1934): 1163-1172.
- [42] Bewley, L.V. The counterpoise. G. E. Rev. 37 (August 1934): 73-81.
- [43] Bewley, L.V. Two-dimensional fields in electrical engineering. Dover Publication, 1963.



- [44] Bellaschi, P.L. Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds, part III effect of lead in ground installation. *AIIEE Transactions* 62 (May 1943): 334-345.
- [45] Verma, R. and Mukhedkar, D. Impulse to impedance of buried ground wires. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 99, 5 (September 1980): 2003-2007.
- [46] Mazzetti, C. and Veca, G.M. Impulse behavior of grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 102, 9 (May 1983): 3148-3156.
- [47] Velazquez, R. and Mukhedkar, D. Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 103, 6 (September 1984): 1314-1322.
- [48] Lorenzou, M.I.; Hatziaargyriou, N.D. and Papadias, B.C. Time domain analysis of grounding electrodes impulse response. *IEEE Trans. Power Delivery* 18, 2 (April 2003): 517-524.
- [49] Greev, L. and Dawalibi, F. An electromagnetic model for transients in grounding system. *IEEE Transactions on Power Delivery* 5 (November 1990): 1773-1781.
- [50] Burke, G.J. Modling antennas near to and penetrating a lossy interfscce. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 32, 10 (October 1984): 1040-1049.
- [51] Greev, L. Computation of transient voltages near complex grounding systems caused by lightning currents. *Proceeding of IEEE 1992 International Symposium on EMC*. (August 1992): 393-399.
- [52] Greev, L. and Menter, F.E. Transient electromagnetic fields near large earthing systems. *IEEE Trans. Magnetics* 32, 3 (May 1996): 1525-1528.
- [53] Greev, L. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. *IEEE Trans. Power Delivery* 11 (April 1996): 815-823.
- [54] Sommerfeld, A. Uber die ausbritung der wellen in der draftlosen telegraphie. *Annalen der Physik* 28 (Febuary 1909): 665-736.
- [55] Miller, E.K.; Poggio, A. J.; Burke, G.J. and Selden, E.S. Analysis of a wire antenna in the presence of a conductive half space. Part 1: the vertical antenna in a free space, part two: the horizontal antenna in free space. *Canada Journal of Physiscs* 50 (1970): 879-888.
- [56] Nekhoul, B.; Cuerin, C.; Labie, P.; Meunier, G. and Feuilekhoullet, R. A finite element method for calculating the electromagnetic fields generated by substation grounding systems. *IEEE Trans. Magnetics* 31, 3 (May 1995): 2150-2153.
- [57] Nekhoul, B.; Labie, P.; Zgainski, F.X. and Meunier, G. Calculating the impedance of a grounding system. *IEEE Trans. Magnetics* 32, 3 (May 1996): 1509-1512.

- [58] Brunotte, X.; Meunier, G. and Bonigiraud, J. P. Ship magnetizations modeling by finite element method. *IEEE Trans. Magnetics* 29, 2 (May 1993): 1970-1975.
- [59] Brunotte, X.; Meunier, G. and Imhoff, J. F. Finite element solution of unbounded problems using transformation: a rigorous powerful and easy solution. *IEEE Trans. Magnetics* 25, 2 (March 1992): 1663-1666.
- [60] Dawalibi, F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried conductors, part I- single conductor. *IEEE Trans. Power Delivery* 4 (May 1986): 105-111.
- [61] Dawalibi, F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried conductors, part II- ground networks. *IEEE Transactions on Power Delivery* 4 (May 1986): 112-119.
- [62] Andolfato, R.; Bernadi, L.; Fellin, L. Aerial and grounding system analysis by the shifting complex images method. *IEEE Trans. Power Delivery* 15, 3 (July 2000): 1001-1009.
- [63] Meliopoulos, A.P. and Moharam, M.G. Transient analysis of grounding systems. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems* 2 (1983): 389-399.
- [64] Gupta, B. P. and Thapar, B. Behavior grounding systems under impulse and high frequency currents. *Central Board of Irrigation and Power* 16 (March 1978): 23-38.
- [65] Ramamoorthy, M.; Babu Narayanan, M. and Parameswaran et al, S. Transient performance of grounding grids. *IEEE Trans. Power Delivery* 4, 3 (October 1989): 2053-2059.
- [66] Meliopoulos, A.P. and Moharam, M.G. Transient analysis of grounding systems. *IEEE Trans. Power Application System* 2, (February 1983): 112-119.
- [67] Papalexopoulos, A.D. and Meliopoulos, A.P. Frequency dependent characteristics of grounding systems. *IEEE Trans. Power Delivery* 2, 4 (October 1987): 1073-1081.
- [68] Menter, F. and Greev, L. EMTP-based model for grounding system analysis. *IEEE Trans. Power Delivery* 9, 4 (October 1994): 1838-1847.
- [69] Mazzetti, C. and Veca, G. M. Impulse behavior of grounding electrodes. *IEEE Trans. Power Application System* 9, (September 1983): 3148-3156.
- [70] Liu, Y.; Zitnik, M. and Thottappillil, R. An improved transmission-line model of grounding system. *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility* 43, 3 (August 2001): 348-355.
- [71] Velazquez, R. and Mukhedkar, D. Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior. *IEEE Trans. Power Application System* 6, (June 1984): 1314-1322.
- [72] Yaqing, L. Transient response of grounding systems caused by lightning: modeling and experiments. Ph.D Electrical Engineering Acta Universitatis Upsaliensis, 2004.

- [73] Otero, A.F.; Cidras, J. and del Alamo, J.L. Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique. *IEEE Trans. Power Delivery* 14, 3 (July 1999): 873-878.
- [74] Kopeyntsef, A.B. Simulation of impulse property of grounding device. *Elektpitestvo*. 5, (1958): 31-35.
- [75] Liu, J.; He, J. L.; Zeng, R. S.; Chen, M. S. and Li, Y. Study on the High Current Impulse Properties of Grounding Electrodes with Long-Effective Low Resistivity Matenals. *High Voltage Engineennng* 4 (May 1981): 281-287.
- [76] Stojkovic, Z. and Savic, M.S. Sensitivity analysis of experimentally determined grounding grid impulse characteristics. *IEEE Trans. Power Delivery* 13, 4 (October 1998): 1136–1142.
- [77] He, J. L.; Zeng, R. S.; Chen, M. S. and Li, Y. Laboratory investigation of impulse characteristics of transmission tower grounding devices. *IEEE Trans. Power Delivery* 18, 3 (July 2003): 994-1001.
- [78] Tu, Y.P.; He, J.L. and Zeng, R. Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials. *IEEE Tran. Power Delivery* 21,3 (July 2006): 1706-1713.
- [79] Oettle, E.E. The Characteristics of electrical breakdown and ionization processes in soil. *The Transactions of the SA Institute of Electrical Engineers* 5 (December 1988): 63-70.
- [80] Liu, Y.; Theethayi, N. and Thottappillil, R. The residual resistivity in soil ionization region around grounding system for different experimental reults. *Journal of Electrostatics* 65 (2007): 329–335.
- [81] Mousa, A.M. The soil ionizatoin gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes. *IEEE Tran. Power Delivery* 9, 3 (May 1994): 1669 - 1677.
- [82] Thapar, B.; Gerez, V.; Balakrishnan, A. and Blank, D.A. Simplified equations for mesh and step voltages in an AC substation. *IEEE Tran. Power Delivery* 6, 2 (April 1991): 601 - 607.
- [83] Nahman, J.M. and Djordjevic, V.B. Maximum step voltages of combined grid-multiple Rods ground electrodes. *IEEE Trans. Power Delivery* 13, 3 (July 1998): 757-761.
- [84] Yanqing Gao; Rong Zeng; Xidong Liang; Jinliang He; Weimin Sun and Qi Su. Safety analysis of grounding grid for substations with different structure. *IEEE Trans. Power System* 3 (December 2000): 1487 - 1492.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก อุปกรณ์วัดที่ใช้ในการทดลอง

## 1. ขยตซิจต โทตโศป Tektronix TDS 3034B



- มบนตวัดท 300 MHz
- อำนวนซ่งตัญญานขมข้ำ 4 ซ่ง
- ซัศรากกร Sampling 2.5GS/s
- ควณตละซึศ โบนมวต้ง 9 bits
- Vertical sensitivity (/div) 1mV to 10V
- Vertical accuracy  $\pm 2\%$
- Time Base Range 2ns to 10s/div
- Time Base accuracy 20ppm

## 2. Rogowski coil

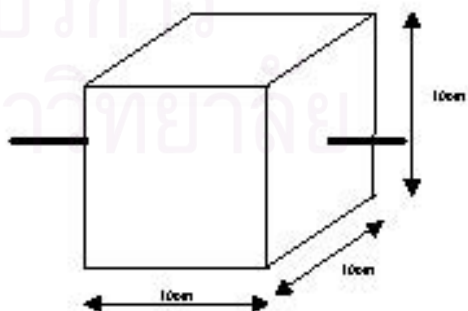


- มบนตวัดท 3.5 MHz
- ขนากกรมเสซิมพลส์ที่วัด ด้ 100 kA
- Current ratio 1V : 11kA
- ค่ำคควณคตลตล่ซึศขงกรวัด  $\pm 1\%$

## 3. เครื่องวัดความต้านทานสารละลายน้ำกลีซ



สามารถปรับค่วณคควณค้ำนทานด้ 4 ระตบ  
0.1, 1, 10 และ 100



ค่ำคควณค้ำนทานสารละลาย ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) คำนวน  
จากค่ำคควณค้ำนทาน ( $\Omega$ ) ที่วัดด้ต้งสมการ

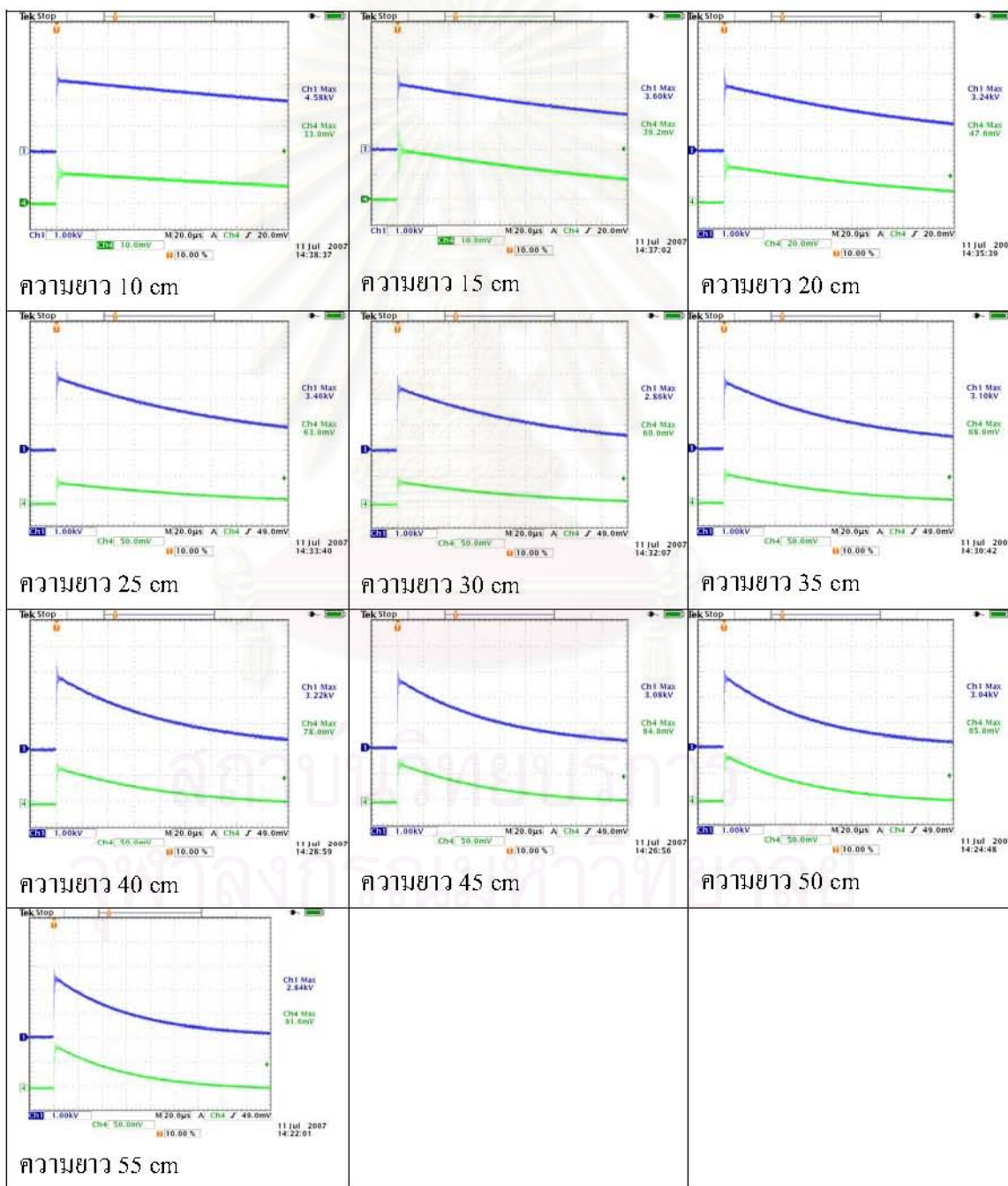
$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} = R \times \frac{100}{10} = R \times 10 \quad \Omega \cdot \text{cm}$$

ภาคผนวก ข การทดลองหาค่าแรงดันที่เพิ่มขึ้นตรงจุดปล่อยกระแส

เงื่อนไขการทดลอง

- ความต้านทานสารละลาย 190 Ω.cm
- เส้นผ่าศูนย์กลางลวดตัวนำ 1.5 mm
- รากสายดินทดสอบ: รากสายดินแห้งแนวตั้ง, รากสายดินแนวนอน และกราวด์กริด

1. ผลการทดลองรากสายดินแห้งแนวตั้ง

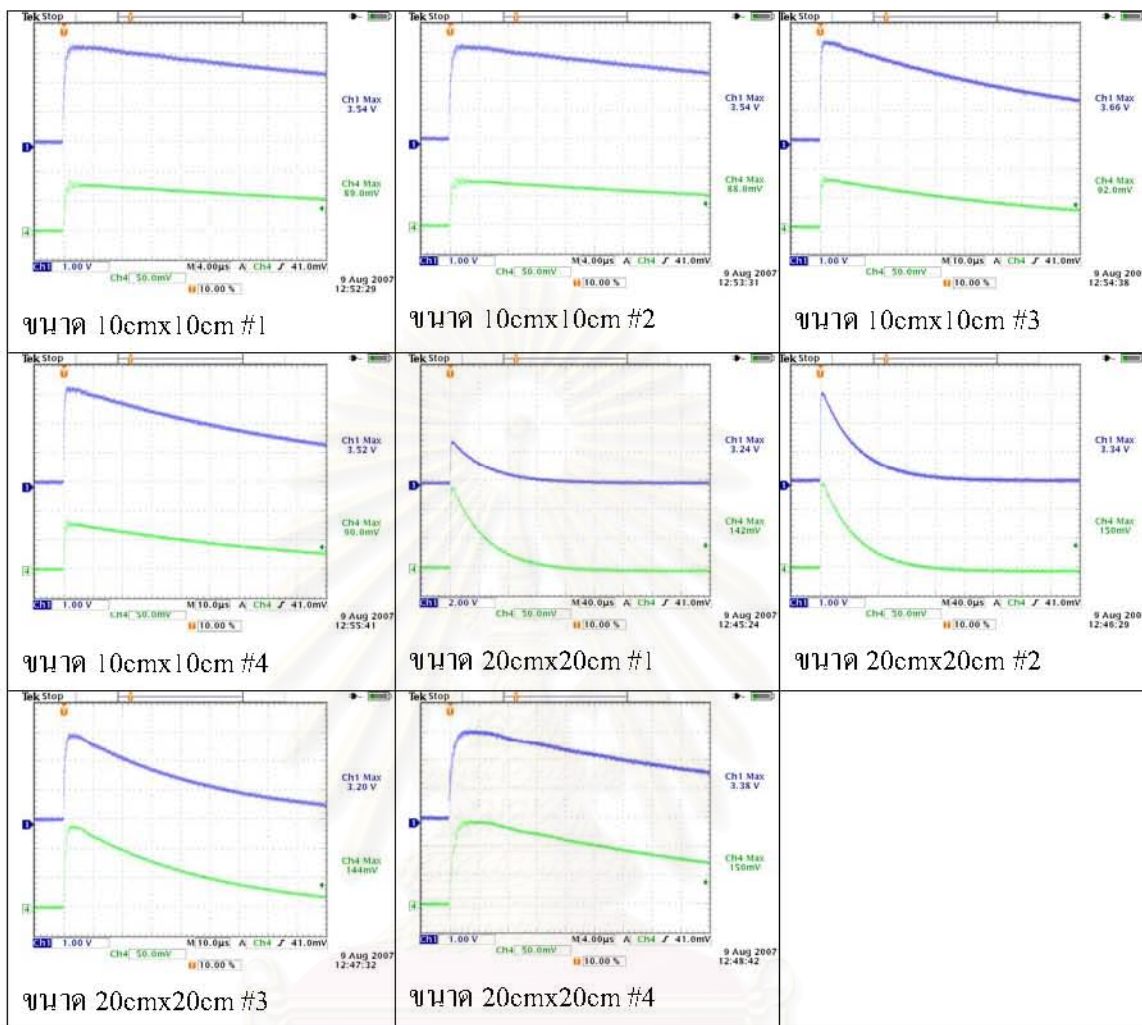


2. ผลการทดลองรากสายดินแนวนอน





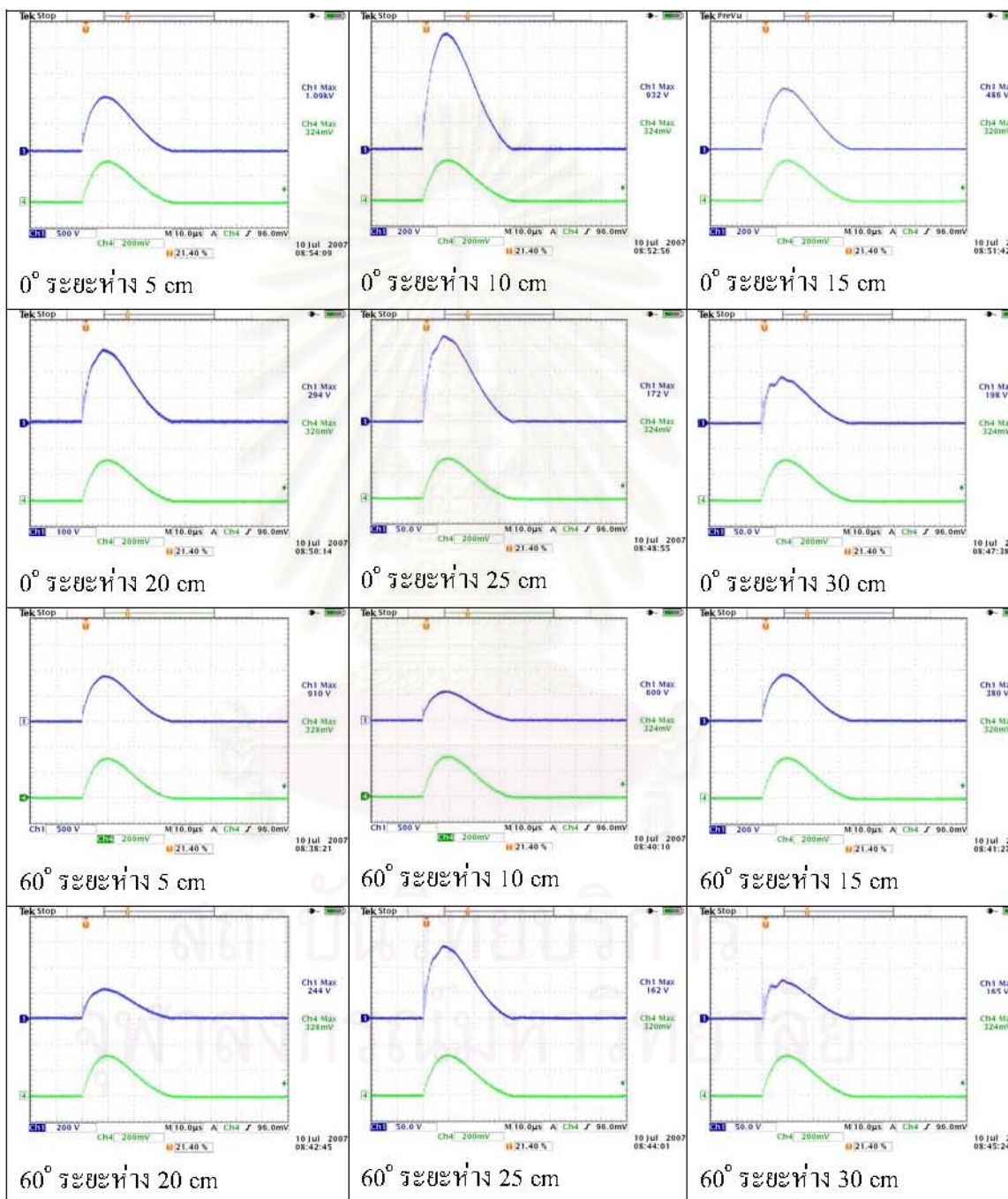
### 3. ผลการทดลองกราวด์กริด



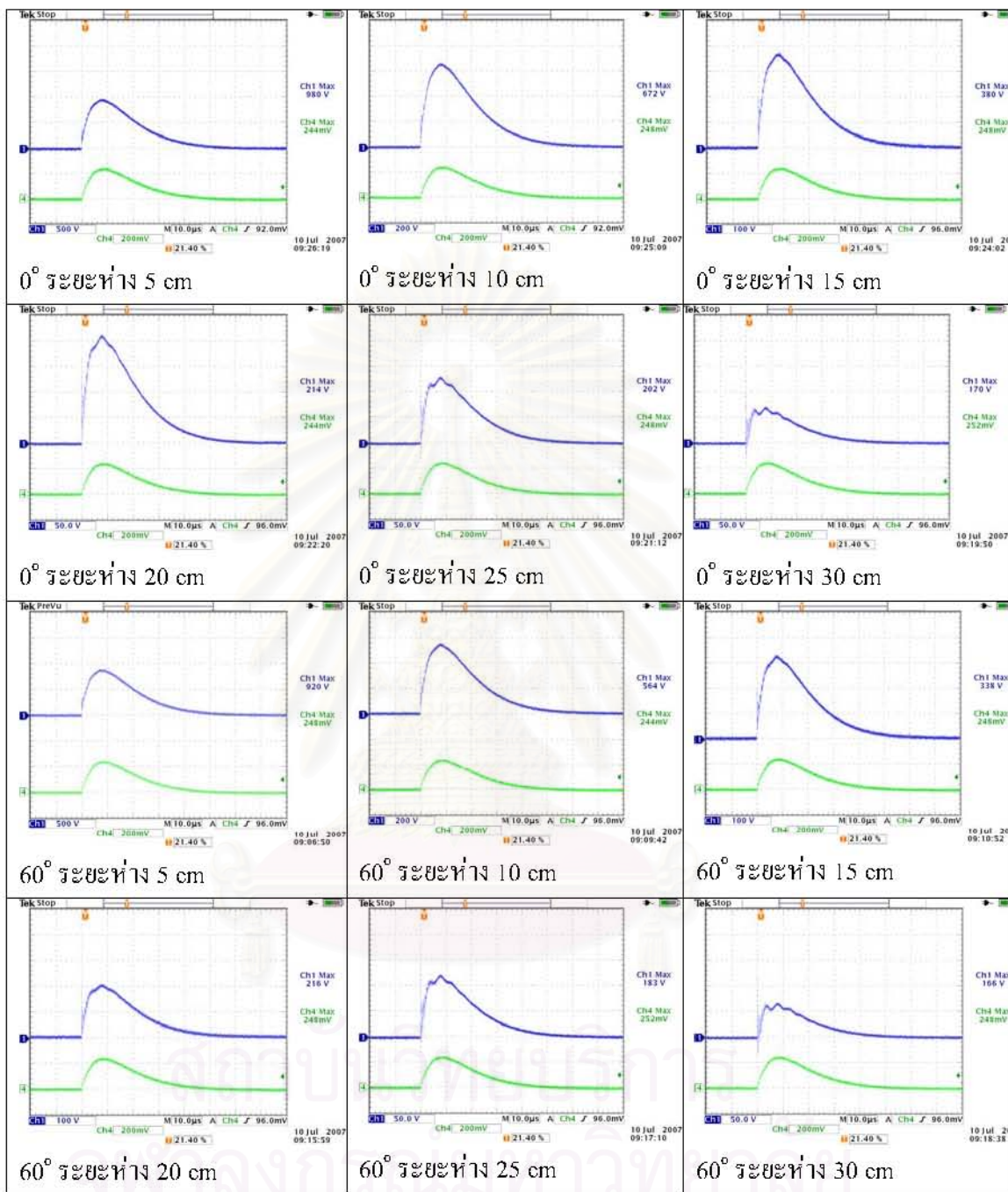
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค การทดลองหาค่าแรงดันช่วงก้าว

1) รากสายดินแบบ 3 ขา ภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s

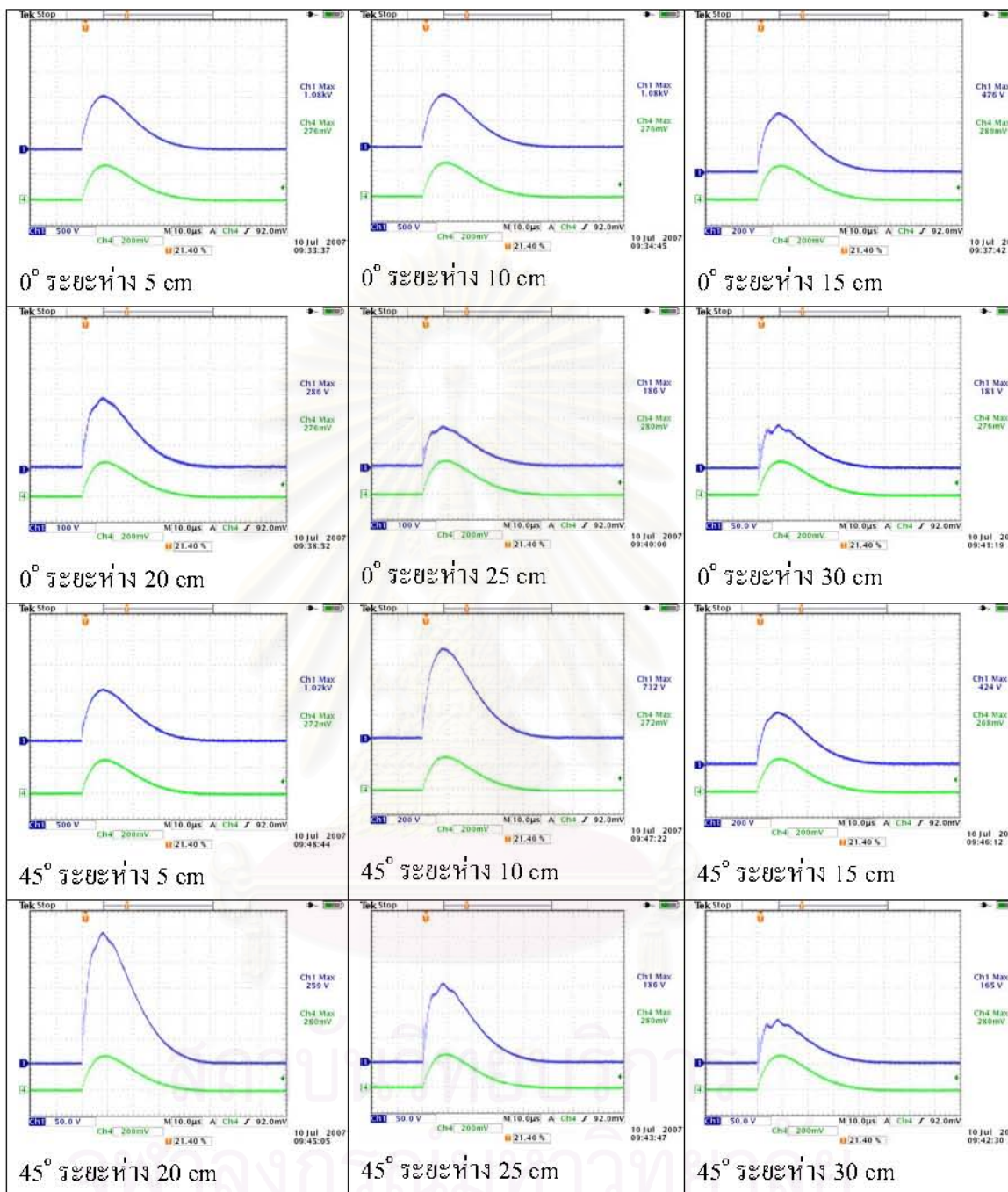


2) รากสายดินแบบ 3 แฉก ภายใต้กระแสไฟฟ้าสลับหน้าคลื่น 8  $\mu$ s



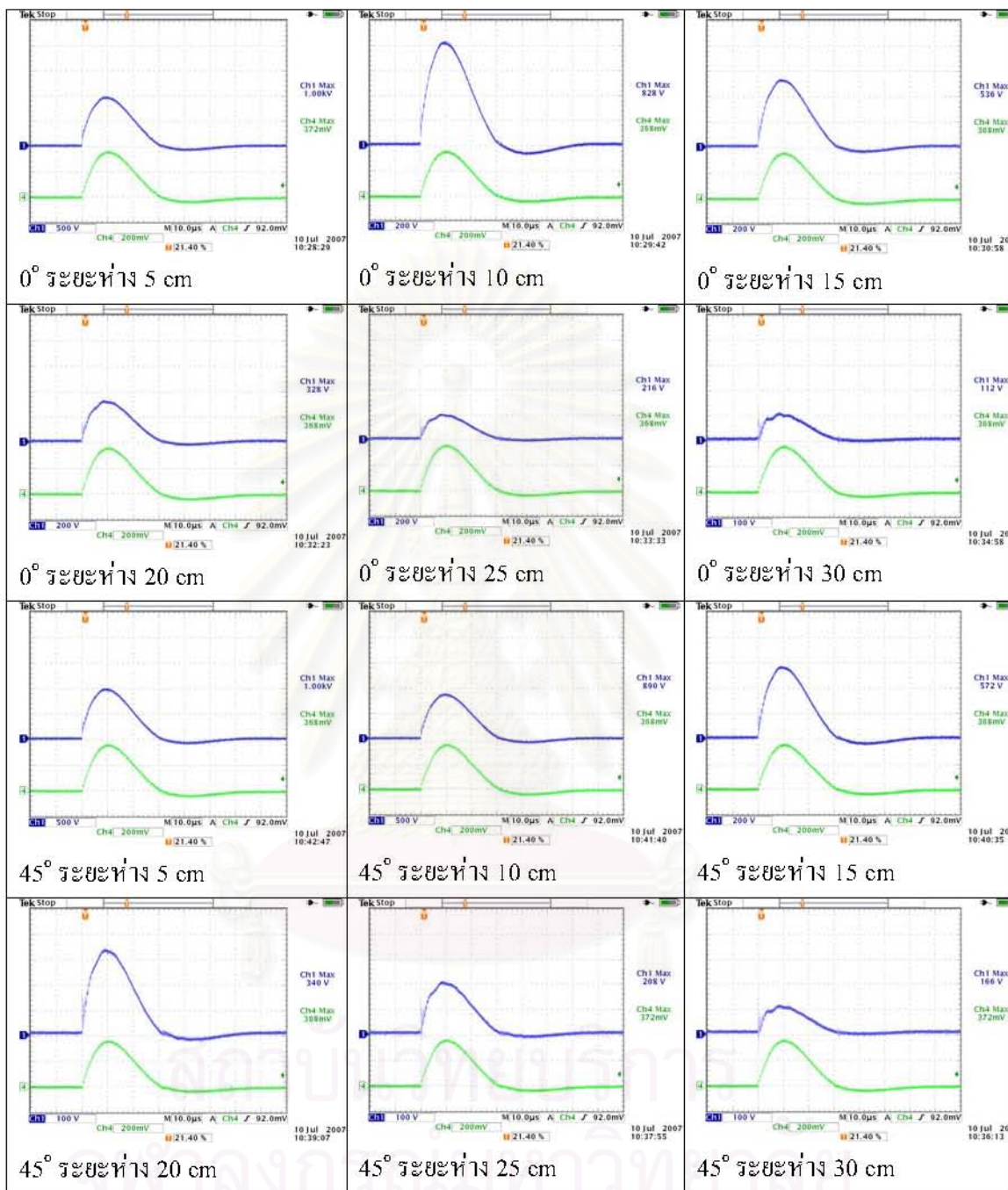


3) รากสายดินแบบ 4 แฉก ภายใต้กระแสไฟฟ้าสลับหน้าคลื่น 8  $\mu$ s

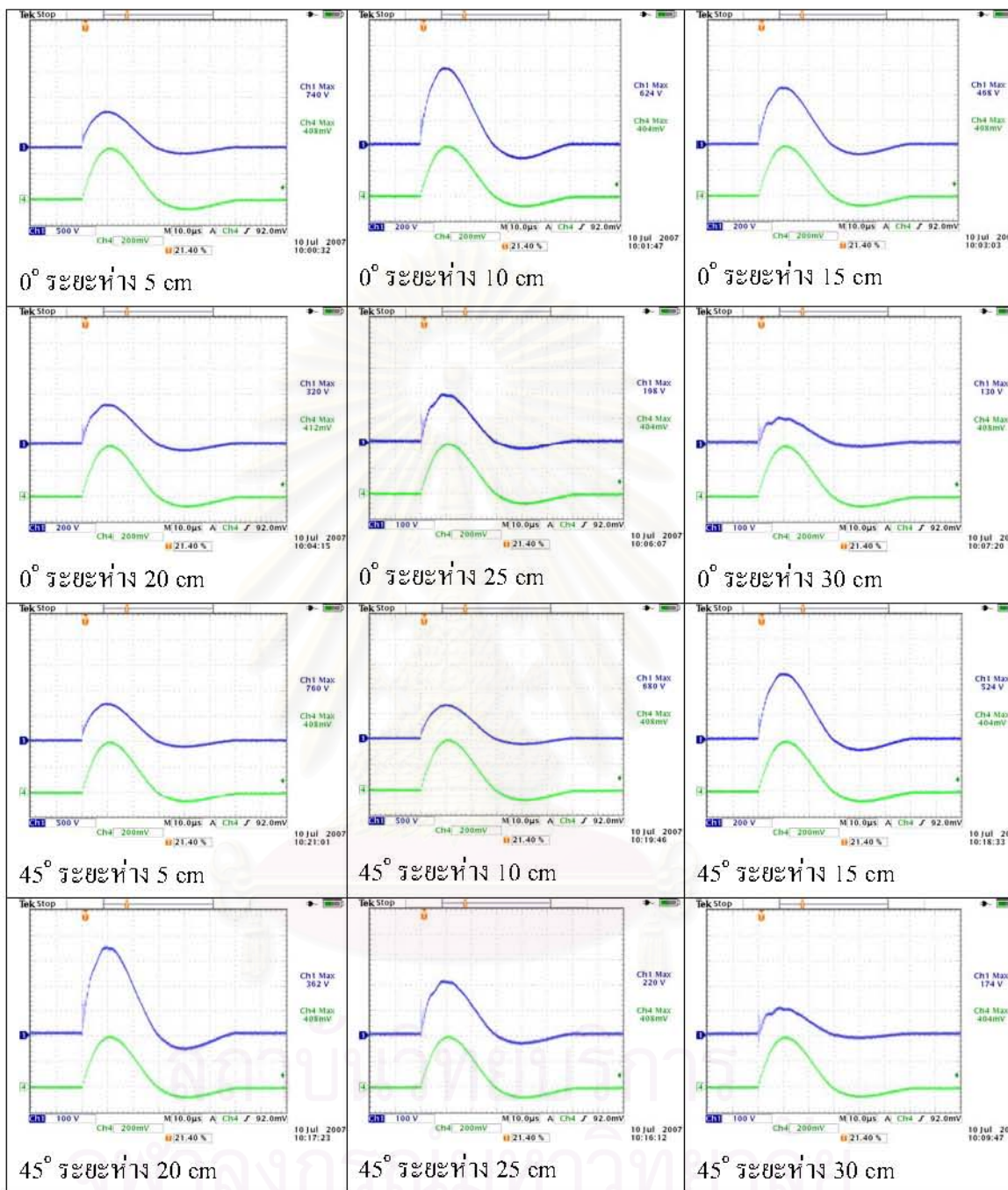




4) กราฟที่กริดวงกลม ภายใต้กระแสพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s



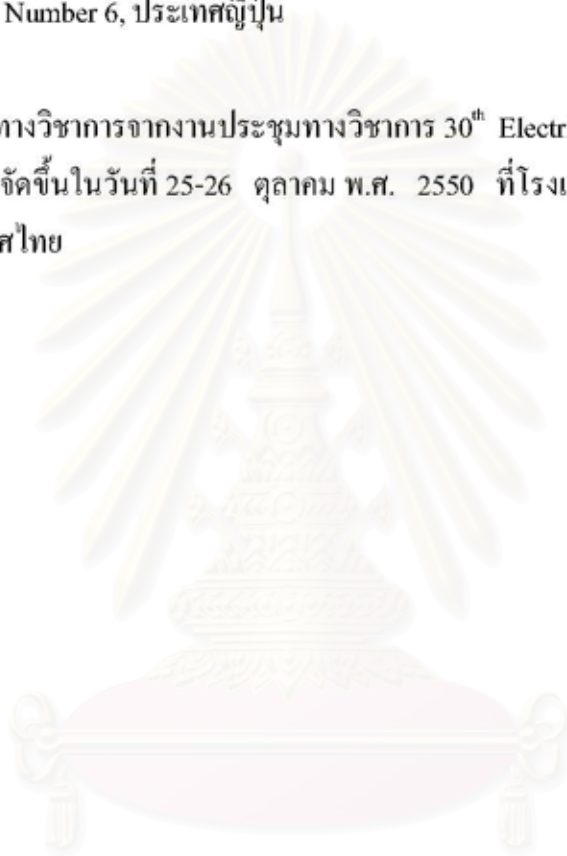
5) กราฟวัดคริตส์เหลี่ยม ภายใต้กระแสอิมพัลส์หน้าคลื่น 8  $\mu$ s



### ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

บทความทางวิชาการเรื่อง “Effective Length Consideration with the Minimize Per-Unit Length Impulse Impedance Method” ตีพิมพ์ลงในวารสารระดับนานาชาติ The Institute of Electrical Engineers of Japan (IEEJ) Transactions on Power and Energy ในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2551 Volume 128 Number 6, ประเทศญี่ปุ่น

บทความทางวิชาการจากงานประชุมทางวิชาการ 30<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-30) ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 25-26 ตุลาคม พ.ศ. 2550 ที่โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แควรีสอร์ท, กาญจนบุรี ประเทศไทย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ความยาวประสิทธิผลของสายดินภายใต้กระแสฟ้าผ่า

### Effective length of ground rod under lightning impulse current

พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์ และ ดร.วีระพันธ์ ริงส์วีจิตรประภา  
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 254 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
 E-mail: Pongpan.Pa@Student.chula.ac.th

#### บทคัดย่อ

ในการออกแบบระบบกราวด์สายดินนอกจากการลดค่าความต้านทานดินแล้ว ผู้ออกแบบควรต้องคำนึงถึงการลดค่าอิมพีแดนซ์อินทิเกรต ซึ่งการเพิ่มความยาวสายดินเป็นอีกวิธีที่ช่วยลดค่าความต้านทานดิน แต่เมื่อความยาวมีค่าสูงถึงระดับหนึ่งแล้วค่าอิมพีแดนซ์อินทิเกรตจะลดน้อยลง เพราะสายดินมีความยาวประสิทธิผล ในบทความนี้ได้นำเสนอความยาวประสิทธิผลของสายดินที่ระดับการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์อินทิเกรตของสายดินเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนความยาวของสายดินจากร้อยละ 1 - 20 ซึ่งจะได้ค่าความยาวประสิทธิผลของสายดิน 12 m - 2 m ภายใต้ค่าความต้านทานดิน 190 Ω.cm

คำสำคัญ: รากสายดิน, ระบบรากสายดิน, ความยาวประสิทธิผล, กระแสอิมพัลส์ฟ้าผ่า, การทดลองอัตราส่วน

#### Abstract

In grounding system design, engineer has to concern not only earth resistance but also lightning impulse impedance. One way to reduce the resistance is increasing the length of the ground rod. On contrary, when the increasing of ground rod length reaches certain value, the lightning impulse impedance is rarely reduced because the ground rod has effective length. In this paper, we have given a value of effective length, which depends on the level of impulse impedance changing compare with the changing of ground rod length starting from 1% to 20%. The effective length will vary from 12 meters to 2 meters for soil resistivity 190 Ω.cm.

Keywords: ground rod, grounding system, effective length, lightning impulse current, scaling experiment

#### 1. คำนำ

ระบบรากสายดินมีความสำคัญอย่างมากในการป้องกันอันตรายให้กับบุคคลที่ไปสัมผัสส่วนที่เป็นโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้า เนื่องจากมีกระแสฟ้าผ่ารั่วหรือจากการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันอันตรายที่เกิดจากแรงดันช่วงก้าว (step voltage) และแรงดันสัมผัส (touching voltage) ในขณะที่มีกระแสฟ้าผ่า ซึ่งความสามารถในการป้องกันนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางอิมพีแดนซ์ของระบบรากสายดิน

การลดอิมพีแดนซ์อินทิเกรตขึ้นเป็นส่วนสำคัญในการปรับปรุงคุณสมบัติการป้องกันของระบบรากสายดิน เมื่อฟ้าผ่าลงสายส่งหรือสายล่อฟ้า กระแสอิมพัลส์ขนาดสูงจะไหลผ่านรากสายดินและกระจายลงสู่ดิน มีหลายงานวิจัยที่แสดงว่าคุณสมบัติของรากสายดินที่มีต่อกระแสอิมพัลส์ขนาดสูงจะแตกต่างกันมากกับคุณสมบัติของรากสายดินที่มีต่อกระแสความถี่ต่ำ เนื่องจากผลของความเหนี่ยวนำในระบบรากสายดินจะส่งผลมากกว่าผลของความต้านทาน และเมื่อขนาดกระแสสูงมากพอ ก็จะทำให้ดินที่อยู่รอบๆ รากสายดินเกิดการแตกตัวเปลี่ยนสภาพเป็นตัวนำ (soil ionization) [1]

ในการออกแบบระบบรากสายดินนอกจากจะคำนึงถึงคุณสมบัติการป้องกันอันตรายและเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าแล้ว ยังจะต้องคำนึงถึงต้นทุนในการก่อสร้าง ถ้าผู้ออกแบบสามารถจะทราบถึงการลงทุนในส่วนที่ให้ผลได้ไม่คุ้มกับค่าใช้จ่าย ในขณะที่คุณสมบัติการป้องกันยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้แล้ว ก็จะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการลงทุนลง

การศึกษาคุณสมบัติทางเรขาคณิตของระบบรากสายดินมีการศึกษามาอย่างต่อเนื่อง [2] - [5] ทั้งจากการทดลองและการจำลองด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในงานวิจัย [6] กล่าวถึงค่าอิมพีแดนซ์อินทิเกรต ที่บางครั้งจะมีค่ามากกว่าความต้านทานของรากสายดิน ซึ่งในทางปฏิบัติการติดตั้งระบบรากสายดินมักจะคำนึงถึงการลดความต้านทานของรากสายดิน แต่ยังไม่พบว่าคุณสมบัติการป้องกันฟ้าผ่าของระบบรากสายดินยังไม่มีความ



**2. ความยาวประสิทธิผล (effective length)**

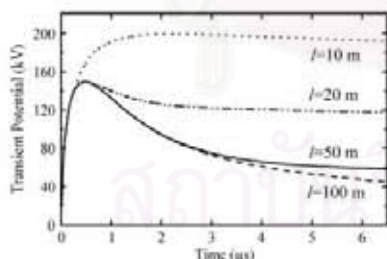
ในหลายบทความได้มีการวิเคราะห์ถึงความยาวประสิทธิผลของรากสายดิน Mazzetti และ Vacca [2] ได้นิยามว่าเป็นความยาวรากสายดินที่เพียงพอให้กระแสที่ค่าส่วนใหญ่กระจายลงสู่ดิน จากผลการศึกษาในดินความต้านทานค่าความยาวประสิทธิผลจะสั้น และจะเพิ่มขึ้นตามความต้านทานดินที่เพิ่มขึ้น

Gupta และ Thapar [6] พบว่าจากความยาวรากสายดินทั้งหมดนั้น จะมีความยาวแค่บางส่วนนับจากจุดรับกระแสที่สามารถไปกำหนดอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของระบบรากสายดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังสมการที่ (1)

$$l_e = A(\rho \cdot \tau)^{0.5} \tag{1}$$

เมื่อ  $\rho$  ความต้านทานดิน และ  $\tau$  เป็นเวลาหน้าคลื่น และสัมประสิทธิ์ A มีค่าเปลี่ยนแปลงตามลักษณะรากสายดินและจุดรับกระแสที่ค่า อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์นี้ยังไม่ได้นำถึงผลของการแตกตัวของดินและผลของรูปคลื่นกระแสอิมพีแดนซ์

ในงานวิจัย Junliang He. [7] ได้เสนอแบบจำลองของความยาวประสิทธิผลที่รวมผลการแตกตัวของดิน จากการจำลองพบว่าเมื่อความยาวรากสายดินมีค่าเกินค่าหนึ่งแล้วค่ายอดของแรงดันที่เกิดขึ้นตรงจุดรับกระแสจะเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 อิทธิพลของความยาวต่อแรงดันที่ทรานเซียนต์

ความยาวประสิทธิผลจะคำนวณได้จากค่าอนุพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินเทียบกับความยาวที่ไม่เกินค่า tangent ของมุมดังสมการที่ (2) โดยค่า  $\alpha$  ที่เลือกคือ 5°

$$-\frac{dZ_l}{dl} \leq \text{tg}\alpha \tag{2}$$

ในปัจจุบันนี้คำจำกัดความของความยาวประสิทธิผลของตัวนำภายใต้กระแสอิมพีแดนซ์สามารถสรุปได้ 2 แบบคือ

1. ความยาวที่มีผลต่อค่ายอดของรูปคลื่นแรงดันน้อย
2. ความยาวที่ให้ค่าอนุพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของรากสายดินเทียบกับความยาวที่ไม่เกินค่าที่กำหนด

ในบทความนี้จะทำการทดลองเพื่อจำลองหาค่าความยาวประสิทธิผล โดยกำหนดการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์เทียบกับความยาวหรือขนาดอนุพันธ์ที่ไม่เกินค่าที่กำหนด

**3. การทำ scaling**

การทำการทดลองด้วยขนาดที่เท่ากับของจริงจะมีข้อจำกัดได้แก่ การควบคุมตัวแปรต่างๆ โดยไม่ไปกระทบกับตัวแปรอื่นจะทำให้ยาก ขนาดพื้นที่การทดสอบ ขนาดเครื่องกำเนิดกระแสอิมพีแดนซ์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีการ scaling [8] จากการเปรียบเทียบผลการทดลองภาคสนามกับการทดลองด้วยการ scaling [9] มีการยืนยันว่าให้ผลที่สอดคล้องกัน หลังจากนั้นมีการนำทฤษฎีการ scaling มาใช้ในอีกหลายงานวิจัยได้แก่ ผลตอบสนองของอุปกรณ์รากสายดิน (grounding device) [10] และ คุณสมบัติของระบบรากสายดินที่คลุมด้วยวัสดุที่มีความต้านทานต่ำ (low resistivity materials) [11] รายละเอียดการ scaling แสดงดังสมการ (3) และ (4)

$$\Pi_a = \frac{i}{\rho^{x_1} I^{x_2} E_0^{x_3}} \tag{3}$$

$$\Pi_b = \frac{z}{\rho^{y_1} I^{y_2} E_0^{y_3}} \tag{4}$$

เมื่อ i คือกระแสอิมพีแดนซ์

z คืออิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ของระบบรากสายดินที่คำนวณได้จากอัตราส่วนค่ายอดแรงดันอิมพีแดนซ์  $u(t)$  ต่อค่ายอดกระแสอิมพีแดนซ์  $i(t)$  ที่ไหลผ่านรากสายดิน

ค่าตัวเลขยกกำลัง  $x_1, x_2, x_3, y_1, y_2, y_3$  หาได้จากการทำการวิเคราะห์ทางขนาดได้ค่าดังนี้

$$x_1 = -1, x_2 = 2, x_3 = 1$$

$$y_1 = 1, y_2 = -1, y_3 = 0$$

นำไปแทนค่าในสมการ (3) และ (4) แล้วกำหนดให้เท่ากันเนื่องจากทั้งสองระบบมีเงื่อนไขเหมือนกัน

$$\Pi_a = \Pi_b \tag{5}$$

จะให้ความสัมพันธ์ระหว่างผลการจำลอง (a) และขนาดจริง (b) กรณีความยาวรากสายดินดังสมการ (6) กระแสอิมพีแดนซ์กับและแรงดันอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (7) และ (8) และอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (9)

$$I_a = nI_b \tag{6}$$

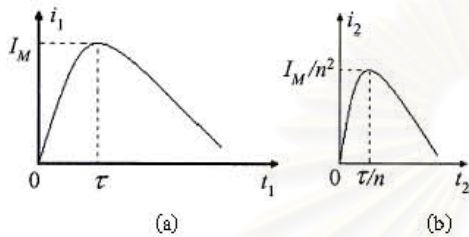
$$i_a = n^2 i_b \tag{7}$$

$$u_a = nu_b \tag{8}$$

$$Z_{Ia} = \frac{1}{n} Z_{Ib} \tag{9}$$

ในการทดลอง เวลาหน้าคลื่นจริงของกระแสพัลส์ จะทำ scaling ด้วยอัตราส่วน n เท่าคั้งสมการ (10) และรูปที่ 2

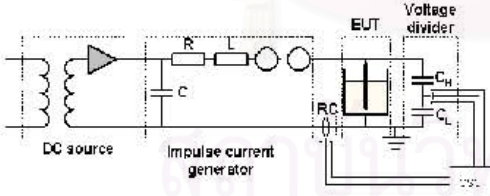
$$\tau_a = n \tau_b \tag{10}$$



รูปที่ 2 (a) กระแสพัลส์จริง (b) กระแสพัลส์จำลอง

4. การทดสอบ

การจำลองหาความยาวประสิทธิผลของรอกสายคิน ภายใต้กระแสฟ้าค่า 10/350us จะทำโดยใช้เครื่องกำเนิดกระแสพัลส์สร้างกระแส 1/35us ซึ่งได้ค่า n = 10 ไปป้อนให้กับรอกสายคินทดสอบที่ตั้งอยู่ในแนวตั้งขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางกลาง 1.5 มม. บรรจุในถังอลูมิเนียมรูปทรงกระบอกเส้นผ่าศูนย์กลาง 70 ซม. ภายในบรรจุน้ำเกลือที่ใช้แทนดิน โดยปรับค่าความต้านทานสารละลายเพื่อให้ได้รูปคลื่นที่ต้องการ ซึ่งได้ความต้านทานสารละลาย 190 Ω.cm วงจรทดสอบแสดงดังรูปที่ 3



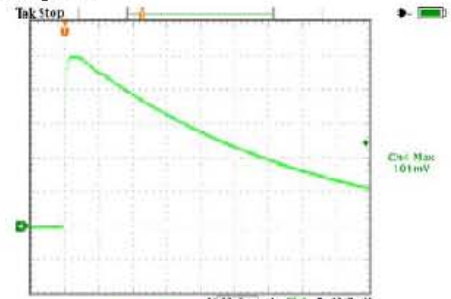
รูปที่ 3 วงจรทดสอบหาค่าความยาวประสิทธิผล

การทดสอบหาค่าความยาวประสิทธิผลจะทำโดยการวัดแรงดันคร่อมรอกสายคิน และกระแสพัลส์ที่ไหลผ่านรอกสายคินตามความยาวที่เปลี่ยนไปเพื่อจะได้นำมาคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์แล้วพล็อตกราฟเพื่อหาจุดที่ให้ขนาดความชันกราฟที่ต้องการ

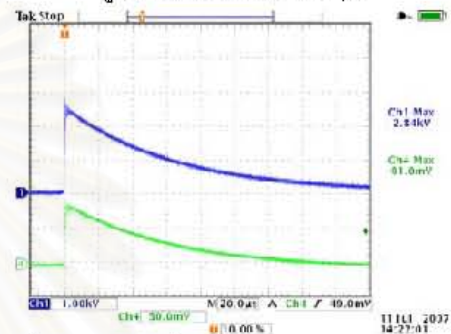
5. ผลการทดสอบ

กระแสพัลส์ 1/35 μs ที่สร้างจากเครื่องกำเนิดกระแสพัลส์เพื่อใช้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 4 และตัวอย่าง

รูปคลื่นกระแสพัลส์และแรงดันอิมพัลส์ที่ผ่านรอกสายคินแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 กระแสพัลส์ 1/35 μs



รูปที่ 5 ตัวอย่างรูปคลื่นกระแส (Ch4) และแรงดัน (Ch1)

จากผลการทดลองจะให้ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองและค่าจริงด้วยอัตราส่วน n=10 แสดงดังตารางที่ 1 ผลการทดลองที่ขยายเป็นค่าจริงแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ในการทดลองและค่าจริง

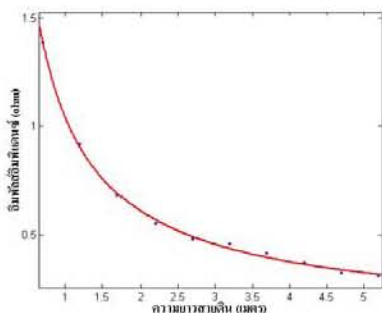
พารามิเตอร์	ค่าในการทดลอง	ค่าจริง
เวลาหน้าคลื่น	1 μs	10 μs
เวลาหลังคลื่น	35 μs	350 μs
ขนาดกระแส	1 kA	100 kA
เส้นผ่าศูนย์กลางรอกสายคิน	1.5 มม.	15 มม.
ความยาวรอกสายคิน	7 cm – 52 cm	0.7 m – 5.2 m

ตารางที่ 2 ผลการทดลอง

rod length, L (cm)	V at injection point (kV)	Injected current (kA)	Z = V/I (Ω)	scaling rod length, n*L (m)	scaling Z/n (Ω)
52	2.84	0.91	3.12	5.2	0.312
47	3.04	0.95	3.20	4.7	0.320
42	3.08	0.84	3.67	4.2	0.367
37	3.22	0.78	4.13	3.7	0.413
32	3.10	0.68	4.56	3.2	0.456
27	2.86	0.60	4.77	2.7	0.477
22	3.46	0.63	5.49	2.2	0.549
17	3.24	0.48	6.81	1.7	0.681
12	3.60	0.39	9.18	1.2	0.918
7	4.58	0.33	13.88	0.7	1.388



นำผลมาพล็อตกราฟได้ดังรูปที่ 6 และได้ความสัมพันธ์ของค่าอิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความยาวรากสายดินดัง (11)



รูปที่ 6 กราฟอิมพัลส์อิมพีแดนซ์กับความยาวรากสายดิน

$$Z_1 = 1.052L^{-0.76}, R\text{-square: } 0.9966 \quad (11)$$

ความยาวประสิทธิผลคำนวณได้จากเงื่อนไขขนาดอนุพันธ์ของอิมพัลส์อิมพีแดนซ์เทียบกับความยาวรากสายดินไม่เกินค่าที่กำหนด k ดังสมการที่ (12) โดยค่าคงที่ k เปลี่ยนแปลงได้ตามเงื่อนไขการออกแบบ ซึ่งทำให้ได้ค่าของความยาวประสิทธิผลที่ค่า k ต่างๆแสดงดังตารางที่ 3

$$\left| \frac{dR_f}{dL} \right| \leq k \quad (12)$$

ตารางที่ 3 ค่าความยาวประสิทธิผล

K	ความยาวประสิทธิผล (m)	อิมพัลส์อิมพีแดนซ์
1%	12.05	0.1586
5%	4.83	0.3178
10%	3.25	0.4287
15%	2.58	0.5107
20%	2.19	0.5783

ตามข้อเสนอแนะใน [7] ค่า K ที่ใกล้เคียงคือ 10% ซึ่งจะได้ความยาวประสิทธิผล 3.25 m ที่ความต้านทานดิน 190 Ω.cm

6. สรุป

จากแนวคิดของการทำ scaling ช่วยให้สามารถทำการทดลองหาความยาวประสิทธิผลสำหรับกระแสอิมพัลส์ 10/350 μs ซึ่งมีค่า 3.25 m ที่ความต้านทานดิน 190 Ω.cm และด้วยแนวคิดนี้สามารถคำนวณความยาวประสิทธิผลสำหรับค่าความต้านทานดินต่างๆ และนำไปใช้เป็นค่าอ้างอิงในการออกแบบระบบรากสายดินภายใต้ระดับป้องกันที่ยอมรับได้

เอกสารอ้างอิง

[1] A. Geri and G. M. Veca, "Non-linear behavior of ground electrodes under lightning surge currents: computer model and comparison with experimental results," *IEEE Trans. Magn.*, pp.1442–1445, 1992.

[2] C. Mazzette and G. M. Veca, "Impulse behavior of grounding electrodes," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 102, no. PAS-9, pp. 3148–3154, Sep. 1983.

[3] A. F. Otero, J. Cidras, and C. Garrido, "Frequency analysis of grounding systems," in *Proc. Conf.*, 1998.

[4] D. G. Leonid and M. Heimbach, "Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding systems," *IEEE Trans. Power Del.*, 1997.

[5] A. Geri, "Behavior of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 3, Jul. 1999.

[6] B. P. Gupta and B. Thapar, "Impulse characteristics of grounding electrodes," *J. Inst. Eng.*, Feb. 1981.

[7] J. L. He, Y.Q. Gao, R. Zeng, J. Zou, X.D. Liang, B. Zang, J.B. Lee and S. Chang, "Effective length of counterpoise wire under lightning current," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, Apr. 2005.

[8] A. B. Kopcyntsef, "Simulation of impulse property of grounding device," *Elektipitstvo*, pp. 31–35, 1958.

[9] J Liu, L Y Ye, X P Zhang, and G R Xia, "Study on the High Current Impulse Properties of Grounding Electrodes with Long-Effective Low Resistivity Matenals," *High Voltage Engineenng*, no 4, 1981.

[10] J. L. He, R. Zeng, Y.P. Tu, J. Zou, S. M. Chen and Z.C. Guan, "Laboratory investigation of impulse characteristics of transmission tower grounding devices," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, Jul. 2003.

[11] Y.P. Tu, J. L. He and R. Zeng, "Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials," *IEEE Tran. Power Del.*, Jul. 2006.

ประวัติผู้เขียนบทความ



พงศ์พันธุ์ ปิรัชยวงศ์ จบการศึกษาระดับปริญญาตรีจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และปริญญาโทจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปัจจุบันกำลังศึกษาปริญญาเอกที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สนใจงานวิจัยสนามแม่เหล็ก



ดร. วีระพันธ์ รั้งสิ่วจิตรประภา จบการศึกษาระดับปริญญาตรีและปริญญาโทจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จบการศึกษาระดับปริญญาเอกจาก University of Hannover งานวิจัยที่สนใจได้แก่ งานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีฉนวนสำหรับไฟฟ้าแรงสูง

# Effective Length Consideration with the Minimize Per-Unit Length Impulse Impedance Method

Pongpan Pariyavong\*, Non-member  
Weerapun Rungseevijitprapa\*, Non-member

In practice, sometimes long grounding wires are applied to decrease the grounding resistance but the lightning performance of the grounding system is still poor because the grounding wires have an effective length. This paper presents an analysis of effective length for horizontal/vertical grounding wires using the minimize per-unit length impulse impedance method. The grounding response due to lightning current was simulated by solving Telegrapher’s equations with the finite-difference time-domain (FDTD) technique. During the simulation, the voltage distribution was low enough to limit the electric field intensity not exceeding the critical value for soil ionization,  $E_c$ . The results of the simulation were proved with scaling experiments. The simulation analysis showed that the effective length of the horizontal/vertical grounding wires decreases with front time of impulse current. For example, in soil resistivity of  $50 \Omega.m$ , the effective lengths of the vertical grounding wire are 29 m and 5.3 m for impulse currents of 10/350  $\mu s$  and 0.25/100  $\mu s$ , respectively.

**Keywords :** effective length, grounding system, grounding electrode, lightning current, scaling experiment

## 1. Introduction

A good performance of grounding system from a DC source to high frequency due to lightning current is considered indispensable. In particular, at high frequency, the grounding system will distribute the lightning charge into the soil without causing dangerous potential differences. If the grounding performance is poor, high potential difference will occur during the discharge process and this may affect humans through step and touch voltages.

While discharging current to ground, the resistance and impulse impedance of the grounding system are necessary to determine its performance. The grounding system characteristics must address low grounding impedance as well as low resistance. The impedance of the grounding system depends on many factors, e.g. soil properties, the geometry of the grounding electrode and the frequency of discharge current. The inductive behavior of electrode impedance, under a lightning, becomes increasingly important with respect to its resistive term. Even if the grounding electrode length is increased, the performance of the grounding system is still poor because of an effective length. Knowing the effective length do not only contribute to efficient grounding system design but also minimize the cost of construction of the grounding system. However, there are insufficient details about the effective length for basic electrodes, so it is difficult for engineers to apply the effective length concept when they are designing a grounding system.

In an attempt to resolve this constraint, this paper systematically introduce the consideration of

effective length of horizontal/vertical grounding wires at various soil resistivities. The ground potential rise (GPR) was simulated by solving Telegrapher’s equations with the finite-difference time-domain (FDTD) technique<sup>(1)-(2)</sup>. The validity of the calculation was proved with a scaling experiment. The effective lengths were analyzed by using the proposed minimize per-unit length impulse impedance method.

## 2. Effective length

There are some definitions available for evaluating the effective length. Greev<sup>(3)</sup> proposed a formula for critical length in terms of characteristic frequency  $F_c$ . This characteristic frequency depends on soil resistivity  $\rho$ , electrode length and location of the discharge point. The equation for critical length ( $l_c$ ) is

$$l_c = 0.6(\rho / F_c)^{0.43} \dots\dots\dots(1)$$

Gupta and Thapar<sup>(4)</sup> proposed an equation to calculate the effective length ( $l_e$ ) of horizontal grounding wire in terms of front time  $\tau$

$$l_e = A(\rho.\tau)^{0.5} \dots\dots\dots(2)$$

where  $A$  depends on the position of the injection point.

He<sup>(5)</sup> defined the effective length of the grounding electrode as the length when the decreased value of grounding impedance with the increment of the length is smaller than a fixed value of  $\tan\alpha$  as:

$$-\frac{dZ_l}{dl} \leq tg\alpha \dots\dots\dots(3)$$



where  $\alpha$  is the inclined angle of the tangent through selected point. The suggested value of  $\alpha$  is  $5^\circ$ .

Recently, Liu and Theethayi<sup>(6)</sup> have defined the effective length of a single horizontal grounding wire as having maximum transient impedance at the injection point 3% larger than its final asymptotic value. This is under the assumption that the difference in the maximum transient impedance at the injection point between two successive lengths ( $l_a, (l_a + 1)$  m) is not more than  $0.001 \Omega$ . The derived inequality is

$$Z_{max}(l_a) - Z_{max}(l_a + 1) < 0.001 \dots\dots (4)$$

However, equation (1) is difficult to define the characteristic frequency of the exciting impulse current which has a different waveform. The constant value  $A$  in (2) did not provide more in detail and can not apply to the vertical grounding wire. The last two equations still require additional supporting information.

In this paper, the effective length is defined as the length of the grounding conductor, beyond which the transient voltage at injection point is length independent, for a given lightning impulse and soil properties. The impulse impedance of the grounding system was defined<sup>(7)</sup> as the ratio of the maximum value of voltage to the maximum value of current. This means that the per-unit length impulse impedance is the minimum at the effective length. Therefore, a definition based on mathematical optimum analysis called minimize per-unit length impulse impedance is proposed to find the minimum point.

Under lightning impulse current, a grounding electrode is a nonuniform conductor as described in many papers<sup>(4)-(11)</sup>. Clearly, the impulse impedance decreases with the grounding wire's length and it tends to saturation when its length reaches a certain value.

The calculating procedures of the minimize per-unit length impulse impedance method for effective length of the horizontal/vertical grounding wires are as follows:

1) Define the relationship between impulse impedance ( $Z$ ) and length of grounding wire ( $L$ ) to be a power function:

$$Z = aL^b + c \dots\dots\dots (5)$$

where  $a, b$  and  $c$  are constants.

2) Derive the per-unit length impulse impedance by dividing (5) by length  $L$ :

$$\frac{Z}{L} = \frac{aL^b + c}{L} = aL^{b-1} + cL^{-1} \dots\dots\dots (6)$$

3) Take the derivative of  $Z/L$  with respect to  $L$  and set it to be zero:

$$\frac{d(Z/L)}{dL} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

The equation of the effective length ( $L_{eh}$ ) can be obtained as:

$$L_{eh} = \left| \frac{c}{a(b-1)} \right|^{1/b} \dots\dots\dots (8)$$

When the impulse current is fed into one end of the grounding wire located in soil with resistivity  $\rho_0$  as shown in Fig. 1 (a) and (b), the peak voltage is solved with the Telegrapher's equations for a grounding wire using the FDTD technique. The coefficients  $a, b$  and  $c$  are derived by curve fitting of the relationship between impulse impedance and length of grounding wire.

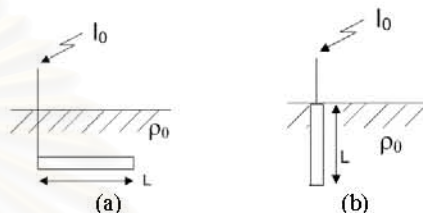


Fig. 1. Simulation models: (a) horizontal grounding wire (b) vertical grounding wire

### 3. Transient analysis by FDTD

The transient behavior of the grounding conductor can be simulated using Telegrapher's equations (9a) and (9b)

$$-\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = r_c I(x,t) + l(x,t) \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} \dots\dots\dots (9a)$$

$$-\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = g(x,t) V(x,t) + c(x,t) \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} \dots\dots\dots (9b)$$

where  $V(x,t)$  and  $I(x,t)$  are the unknown distributed voltage and current along the conductor.  $r_c$  is the per-unit length series resistance.  $l(x,t)$ ,  $g(x,t)$  and  $c(x,t)$  are the per-unit length inductance, conductance and capacitance of the conductor, respectively, at position  $x$  and time  $t$ . Telegrapher's equations (9a) and (9b) are solved using FDTD method<sup>(1)-(2)</sup>. The conductor is assumed as a thin wire and divided into  $n$  small segments in order to calculate the per-unit length parameter matrixes<sup>(2)</sup>.

The important stage during solving Telegrapher's equations is to estimate the per-unit length inductance, conductance and capacitance of the conductor. The per-unit length parameters, such as self and mutual inductance, earth resistance and susceptance, can be derived based on electromagnetic field theory<sup>(12)</sup>. The image principle should be used for the calculation of the earth resistance and susceptance parameters. For the inductance, the image does not exist, because air and soil are non-magnetic materials with the permeability of  $\mu_0$ .

\* EMC Research Lab., Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand. Pongpan.Pa@student.chula.ac.th

4. Verification of the model

The prediction of the ground potential rise (GPR) could be derived by a FDTD technique. In fact, this phenomenon depends on many physical and electrical parameters, e.g. ground resistivity, the dimensions and configuration of the grounding electrodes, the waveform of the impulse currents (rise time, time of decay and peak value) and so on. Thus, the ground potential rise cannot be predicted exactly. Therefore, an appropriate experiment is required to verify the calculation result of the ground potential rise.

Unfortunately, actual experiments have limitations, e.g. space and cost, so a scaling experiment<sup>(13)</sup> was selected where we can independently change and control the parameters. This method has been widely used in many papers<sup>(14)-(15)</sup>. The scaling concept has two parts. First, the physical environment factors of scaling subscripted with 2 and actual factors subscripted with 1 must be the same, e.g. soil resistivity ( $\rho$ ), electric field ( $E$ ) and velocity ( $v$ ):

$$\rho_1 = \rho_2 \dots\dots\dots(10)$$

$$E_1 = E_2 \dots\dots\dots(11)$$

$$v_1 = v_2 \dots\dots\dots(12)$$

Second, the physical dimensions in the experiment are scaled to actual dimensions with ratio  $n$  as

$$\tau_1 = n\tau_2 \dots\dots\dots(13)$$

$$l_1 = nl_2 \dots\dots\dots(14)$$

$$V_{p1} = nV_{p2} \dots\dots\dots(15)$$

$$I_{p1} = n^2I_{p2} \dots\dots\dots(16)$$

where  $\tau$  is the wave front time,  $l$  is the electrode length,  $V_p$  is the GPR peak value, and  $I_p$  is the current peak value. From impulse impedance<sup>(7)</sup>, we obtain

$$Z_1 = \frac{1}{n}Z_2 \dots\dots\dots(17)$$

In practice, the soil consists of basically nonconducting particles coated with water in which some salt is dissolved. This water coating provides interconnected water paths with low field during the discharge process. In addition, the impulse current generator has a limitation of capacitor and it can not provide the required current waveforms under high resistance. Therefore, soil was simulated with a low resistivity of salt solution. The advantages of salt solution are the controllable resistivity of current path and the convenient to measure distribution voltage around the testing electrode. In case of minimizing the simulation, the transient GPR of the grounding electrode should not exceed the critical

value and the soil ionization can be neglected. This dissipation current from the conductor ( $I$ ) is calculated by<sup>(16)</sup>

$$I = \frac{a.2.\pi.l.E_c}{\rho} \dots\dots\dots(18)$$

where  $a$  is the radius of conductor,  $l$  is the length of conductor, and  $\rho$  is the resistivity of solution.

The concentration of solution could be varied to obtain the required impulse current waveform. The testing circuit is shown in Fig. 2. The diameter of the stainless steel container was 70 cm. The energized electrode was submerged in the salt solution. Then, impulse currents were supplied with the same charging voltage. The transient GPR at the injection point was measured with a Tektronix attenuator 1000:1 and impulse current was measured using a Rogowski coil ratio of 11 kA:1 V.

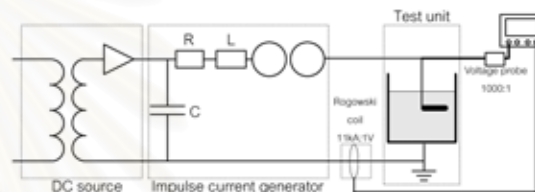


Fig. 2. Testing circuit diagram

The actual lightning currents are considered into two waveforms according to IEC standard<sup>(17)</sup>, i.e. the first stroke 10/350  $\mu$ s and subsequent stroke 0.25/100  $\mu$ s. Their frequency contents are shown in Fig. 3<sup>(18)</sup>. In the scaling experiment, a simulation impulse current with a front time of 1  $\mu$ s was generated at resistivity of 190  $\Omega$ .cm.

During the experiments, the length of vertical grounding wire was changed, and the influence of length on impulse properties was systematically analyzed. The curve fittings were done by polynomial function, exponential function and power function as shown in Fig. 4. The power function was best fit with R-square better than 0.99. Therefore, the relationship between impulse impedance ( $Z$ ) and length of grounding wire ( $L$ ) is defined by power function as mentioned in (5).

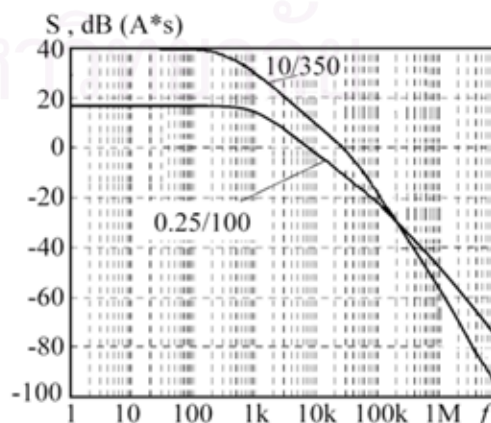


Fig. 3. Frequency spectrum of lightning currents



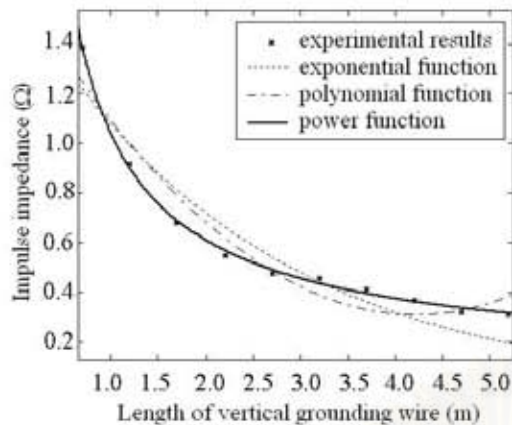


Fig. 4. Curve fitting on experimental results

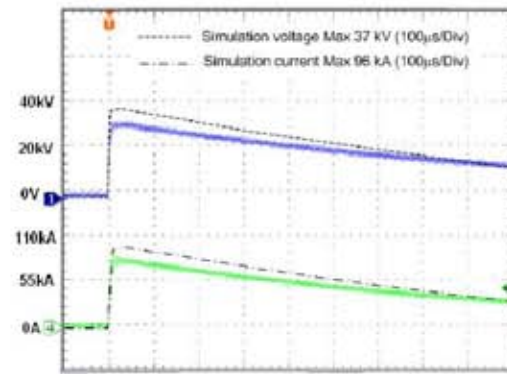
For generated impulse current, the ratio  $n$  for lightning currents of 10/350  $\mu\text{s}$  and 0.25/100  $\mu\text{s}$  is equal to 10 and 0.25, respectively. In order to verify the validity of the simulation FDTD technique, the test values of impulse current and test electrode parameters in the experiment were scaled to actual values as in Table 1.

Table 1 Actual and experimental parameters

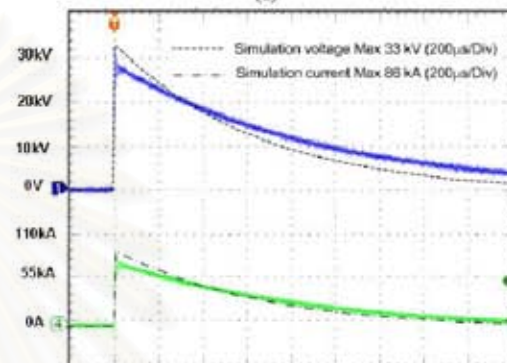
Parameter	Scaling value in experiment	Actual value for 10/350 $\mu\text{s}$	Actual value for 0.25/100 $\mu\text{s}$
Ratio, $n$	-	10	0.25
Front time ( $\mu\text{s}$ )	1 $\mu\text{s}$	10 $\mu\text{s}$	0.25 $\mu\text{s}$
Diameter of grounding electrode	1.5 mm	15 mm	0.375 mm
Depth of electrode	8 cm	80 cm	2 cm
Length of horizontal grounding wire	20,30 cm	200,300 cm	5,7.5 cm
Length of vertical grounding wire	30,40 cm	300,400 cm	7.5,10 cm

Fig. 5 and 6 show comparative waveforms of the experiments (ch1 - transient GPR, ch4 - impulse current) and the simulation FDTD technique for impulse currents of 10/350  $\mu\text{s}$  and 0.25/100  $\mu\text{s}$ , respectively. The comparative results of the experiments and the simulation FDTD technique are summarized in Tables 2 and 3 for impulse currents of 10/350  $\mu\text{s}$  and 0.25/100  $\mu\text{s}$ , respectively.

The results show that the calculating GPR obtained by FDTD technique is well fitted with the experimental results as mentioned in Liu and Theethayi<sup>(2)</sup>. The different results may arise from the estimation of tail time coefficient  $\alpha$  for double exponential  $I(t) = 1 \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ . However, the maximum of transient GPR is dependent on the front time and less affected by the tail time<sup>(1)</sup>.

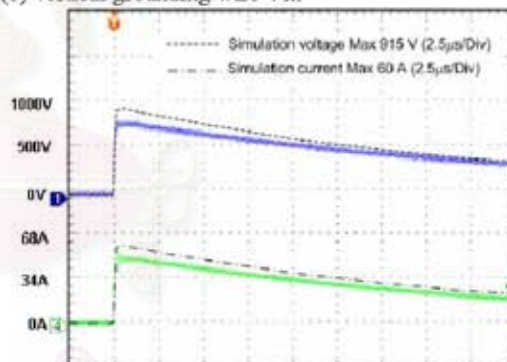


(a)

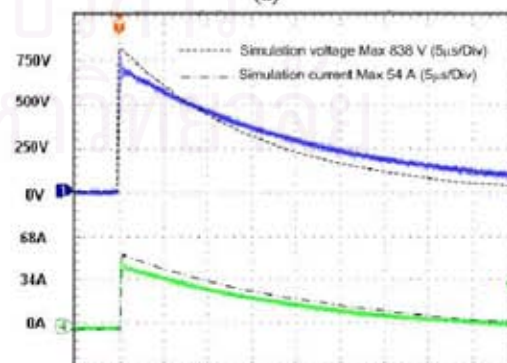


(b)

Fig. 5. Transient voltages at the injection point (V) corresponding to the simulation impulse currents (I), scaled from experimental impulse currents, of different electrode geometries (a) horizontal grounding wire 3 m (b) vertical grounding wire 4 m



(a)



(b)

Fig. 6. Transient voltages at the injection point (V) corresponding to the simulation impulse currents (I), scaled from experimental impulse currents, of different electrode geometries (a) horizontal grounding wire 7.5 cm (b) vertical grounding wire 10 cm

Table 2 Comparison between experimental and simulation FDTD results for impulse current with ratio  $n = 10$

Grounding electrode	n.Tf (μs)	n <sup>2</sup> .Ip (kA)	n.Vp (kV)	Vp(kV) by FDTD	%Diff of n.Vp and Vp
20cm horizontal grounding wire scaled to 200 cm	10	67	33.2	34.6	4.3
30cm horizontal grounding wire scaled to 300 cm	10	96	35.2	37.0	5.2
30cm vertical grounding wire scaled to 300cm	10	66	28.6	30.0	5.0
40cm vertical grounding wire scaled to 400cm	10	86	32.2	33.3	3.5

Table 3 Comparison between experimental and simulation FDTD results for impulse current with ratio  $n = 0.25$

Grounding electrode	n.Tf (μs)	n <sup>2</sup> .Ip (A)	n.Vp (V)	Vp(V) by FDTD	%Diff of n.Vp and Vp
20cm horizontal grounding wire scaled to 5 cm	0.25	42	830	889	7.1
30cm horizontal grounding wire scaled to 7.5cm	0.25	60	880	915	4.0
30cm vertical grounding wire scaled	0.25	41	715		5.5
	0.25	54	805	838	4.1

**Simulation results**

In order to obtain the effective lengths, the transient behaviors of horizontal/vertical grounding wires with different lengths buried in soil with  $\epsilon_r=4^{(2)}$ ,  $\rho = 50 - 500 \Omega.m$  and  $\mu_r = 1$  are simulated. This relative permittivity ( $\epsilon_r$ ) is used to determine the per-unit length capacitance. However the transient GPR is not greatly affected by the per-unit length capacitance. The impulse current with lightning waveshape,  $I(t)=I_0(e^{-2,100t}-e^{-370,000t})$  for 10/350 μs and  $I(t)=I_0(e^{-7,000t}-e^{-13,500,000t})$  for 0.25/100 μs, are injected at one end of the conductors. The radius of the conductors is 16mm. All horizontal grounding wires are buried at 0.8m depth.

**5.1 Horizontal grounding wire**

The influence of the length of horizontal grounding wire on the transient GPR in soils with different resistivities was considered. Examples of transient GPR of the horizontal grounding wire with various lengths, buried in soil with resistivity 50 Ω.m, are shown in Fig. 7. The magnitude of the transient GPR at injection point is decreasing and finally goes to asymptotic value when the length of the conductor is increasing due to the effective length.

The calculated impulse impedances which are the ratio between the transient GPR and current peaks at the injection point were fitted curve with power

function as mentioned in (5). The relationships between the length of horizontal grounding wire and the impulse impedance in soils with different resistivities were studied and shown in Fig. 8 and 9.

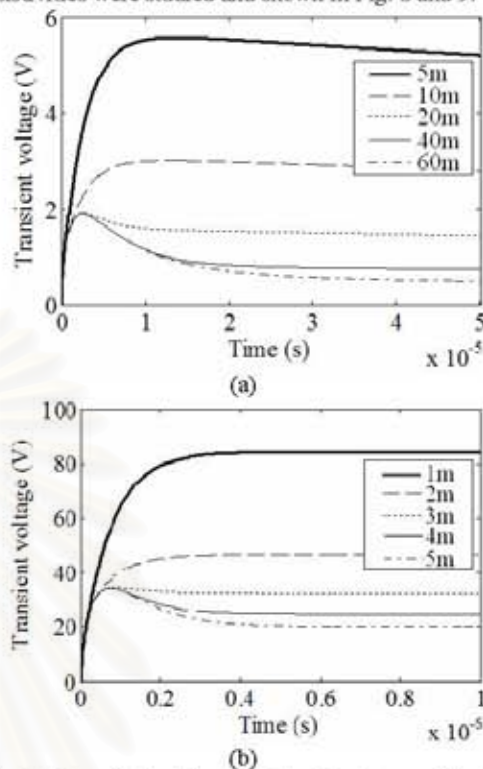


Fig. 7. Transient voltages at the injection point of a horizontal grounding wire with various lengths buried in soil with resistivity 50 Ω.m for impulse currents (a) 10/350 μs (b) 0.25/100 μs

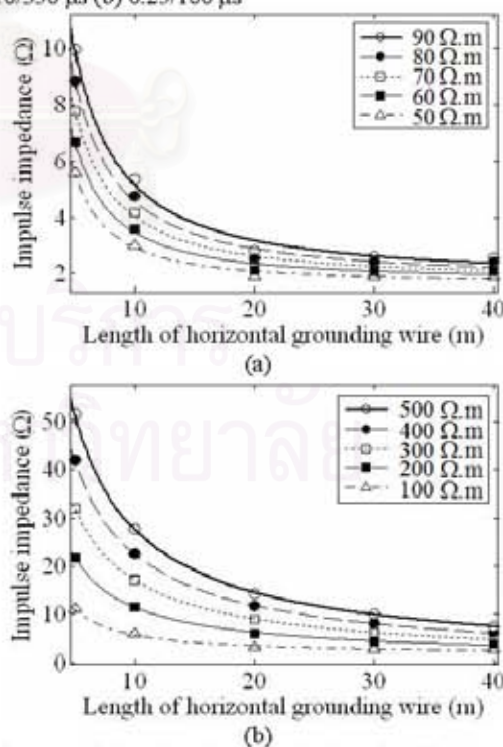


Fig. 8. Relationships between the length of horizontal grounding wire and the impulse impedance corresponding to impulse current 10/350 μs in soil resistivities (a) 50 - 90 Ω.m (b) 100 - 500 Ω.m



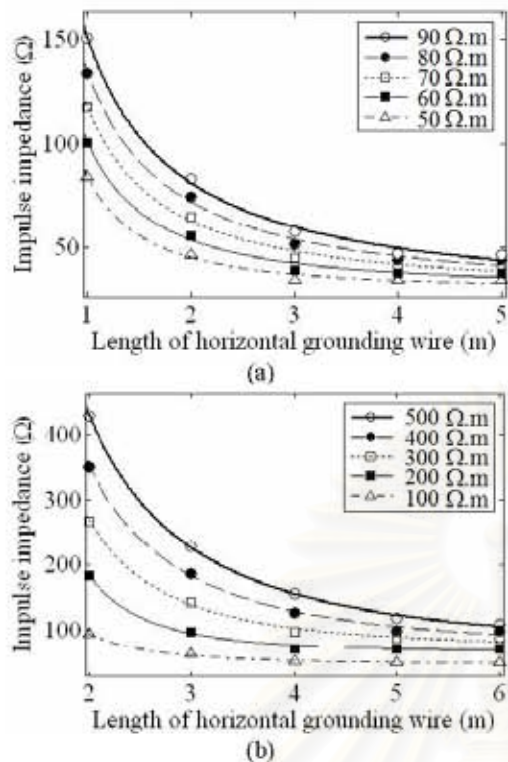


Fig. 9. Relationships between the length of horizontal grounding wire and the impulse impedance corresponding to impulse current  $0.25/100\mu\text{s}$  in soil resistivities (a) 50 - 90  $\Omega\cdot\text{m}$  (b) 100 - 500  $\Omega\cdot\text{m}$

The effective lengths of horizontal grounding wire were determined by calculating the coefficients  $a$ ,  $b$  and  $c$  of the power equation according to (8) as shown in Tables 4 and 5.

It is observed from the simulations that the effective lengths of the horizontal grounding wire buried in soil resistivity 50-500  $\Omega\cdot\text{m}$  are about 15-75 m and 3.1-9.2 m for impulse currents of  $10/350\mu\text{s}$  and  $0.25/100\mu\text{s}$ , respectively. The percentage difference of the minimize per-unit length impulse impedance method with Gupta's formula (4) tends to be higher with soil resistivity.

Table 4 Effective length of horizontal grounding wire for  $10/350\mu\text{s}$

Soil resistivity ( $\Omega\cdot\text{m}$ )	Power function coefficient			Effective length(m)		% diff
	a	b	c	Min PU	Gupta	
50	55.34	-1.65	1.68	15.0	40.2	33
60	61.12	-1.57	1.81	17.2	44.1	37
70	67.77	-1.52	1.92	19.2	47.6	41
80	71.69	-1.45	1.99	21.9	50.9	46
90	78.86	-1.43	2.12	23.3	54.0	49
100	84.35	-1.40	2.22	25.2	56.9	53
200	241.3	-1.42	2.56	45.6	80.5	79
300	338.1	-1.38	3.29	53.4	98.6	97
400	395.4	-1.32	3.80	63.5	113.8	114
500	438.7	-1.27	4.17	75.0	127.3	132

Table 5 Effective length of horizontal grounding wire for  $0.25/100\mu\text{s}$

Soil resistivity ( $\Omega\cdot\text{m}$ )	Power function coefficient			Effective length(m)		% diff
	a	b	c	Min PU	Gupta	
50	58.53	-1.53	25.7	3.1	6.4	38
60	72.81	-1.49	28.1	3.5	7.0	44
70	85.73	-1.49	31.9	3.6	7.5	47
80	100.1	-1.45	34.2	3.9	8.0	53
90	113.9	-1.45	37.0	4.0	8.5	56
100	128.6	-1.45	39.0	4.2	9.0	59
200	404.7	-1.67	54.5	6.0	12.7	68
300	601.8	-1.60	69.1	7.1	15.6	88
400	787.1	-1.54	80.7	8.0	18.0	106
500	943.2	-1.47	90.1	9.2	20.1	128

From the simulation results, the effective length based on the minimize per-unit length impulse impedance is almost the same as basic definition. When the magnitude of impulse current is fixed by a certain value, the effective length of the horizontal grounding wire increases with soil resistivity. Silvrio<sup>(19)</sup> has mentioned that the current in grounding electrode has two components, i.e. the leakage transversal current spread into soil and the longitudinal current transferred to the remaining electrode length. In case of high soil resistivity, the leakage transversal current is reduced. On the other hand, the longitudinal current is increased and the effective length is lengthened. It can be observed in Tables 4 and 5 that the effective length is shorter for the impulse current with shorter front time. The shorter front time will enlarge the inductance effect of the grounding electrode and block the current flowing into another end.

## 5.2 Vertical grounding wire

The influence of the length of vertical grounding wire on the transient voltage in soils with different resistivities was studied. Examples of transient voltages of the vertical grounding wire buried in soil with resistivity 50  $\Omega\cdot\text{m}$  are shown in Fig. 10. It seems to be the same with horizontal grounding wire.

The calculated impulse impedances were fitted curve with power function as in (5). The relationships between the length of vertical grounding wire and impulse impedance were studied and shown in Fig. 11 and 12. The effective lengths of the vertical grounding wire were determined by calculating the coefficients of power equation according to (8) as shown in Tables 6 and 7. It is observed from the simulations that the effective lengths of the vertical grounding wire buried in soil resistivity 50-500  $\Omega\cdot\text{m}$  are about 29-109 m and 5.3-13.2 m for impulse currents of  $10/350\mu\text{s}$  and  $0.25/100\mu\text{s}$ , respectively.

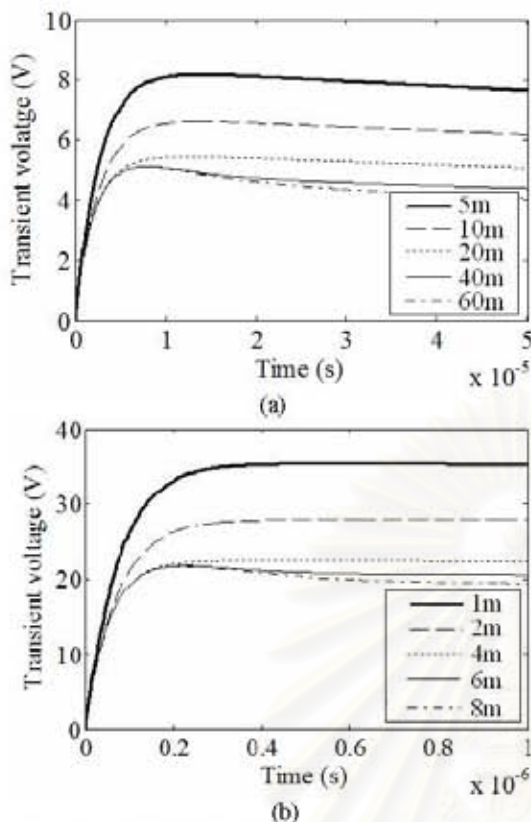


Fig. 10. Transient voltages of a vertical grounding wire buried in soil with resistivity 50 Ω.m for (a) 10/350 μs (b) 0.25/100 μs

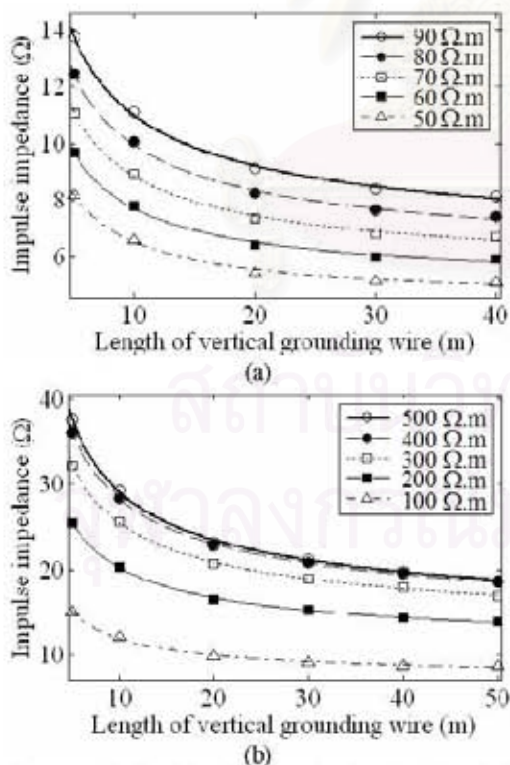


Fig. 11. Relationships between the length of vertical grounding wire and the impulse impedance corresponding to impulse current 10/350 μs in soil resistivities (a) 50 - 90 Ω.m (b) 100 - 500 Ω.m

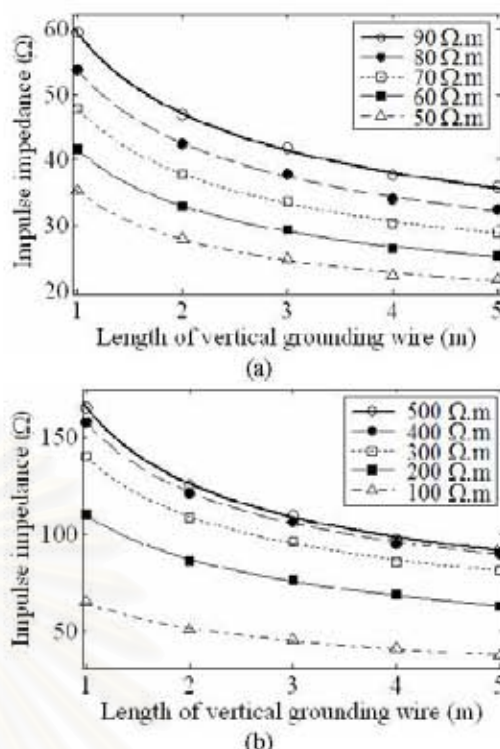


Fig. 12. Relationships between the length of vertical grounding wire and the impulse impedance corresponding to impulse current 0.25/100μs in soil resistivities (a) 50 - 90 Ω.m (b) 100 - 500 Ω.m

Table 6 Effective length of vertical grounding wire for 10/350 μs

Soil resistivity (Ω.m)	Power function coefficient				Effective length(m) by Min PU
	a	b	c	R-square	
50	9.19	-0.42	3.11	0.97	29
60	10.98	-0.42	3.59	0.97	32
70	12.71	-0.42	4.05	0.97	34
80	14.37	-0.42	4.48	0.97	36
90	16.02	-0.42	4.88	0.97	38
100	17.58	-0.41	5.25	0.98	41
200	30.39	-0.40	8.09	0.99	63
300	40.29	-0.41	9.51	0.99	78
400	46.59	-0.41	10.0	0.99	94
500	50.35	-0.42	9.81	1.00	109

Table 7 Effective length of vertical grounding wire for 0.25/100 μs

Soil resistivity (Ω.m)	Power function coefficient				Effective length(m) by Min PU
	a	b	c	R-square	
50	23.41	-0.54	11.9	1.00	5.3
60	27.92	-0.54	13.7	1.00	5.7
70	32.40	-0.53	15.4	1.00	6.2
80	36.84	-0.53	16.9	1.00	6.7
90	41.17	-0.52	18.3	1.00	7.3
100	45.35	-0.52	19.6	1.00	7.7
200	79.93	-0.51	30.3	1.00	10.4
300	103.10	-0.52	37.0	1.00	11.2
400	118.20	-0.53	39.6	1.00	12.3
500	126.20	-0.54	39.4	1.00	13.2



The effective length based on the minimize per-unit length impulse impedance is almost the same as with the basic definition. Only the limited length of the vertical grounding wire is effective in controlling the impulse impedance. The effective length of the vertical grounding wire increases with soil resistivity and front time of impulse current.

### 5.3 Analysis of applicable grounding wire

Presently, we have realized that both horizontal and vertical grounding wires have an effective length under impulse current especially with shorter front time. Comparisons of length of horizontal/vertical grounding wire with the same maximum transient GPR are presented in Fig. 13 (a) and (b) for soil resistivities of  $50 \Omega \cdot \text{m}$  and  $500 \Omega \cdot \text{m}$ , respectively.

The simulation results clearly show that the vertical grounding wire has shorter length than the horizontal grounding wire. This means that the installation of the vertical grounding wire in a grounding system has lower cost of the conductor than the horizontal grounding wire. As the length of grounding wire should not longer than the effective length, the lower DC grounding resistance can be reached by appropriate grounding geometry. For example, many short vertical ground wires ( $l_v$ ) are connected in parallel via the horizontal grounding wires ( $l_h$ ) as shown in Fig. 14.

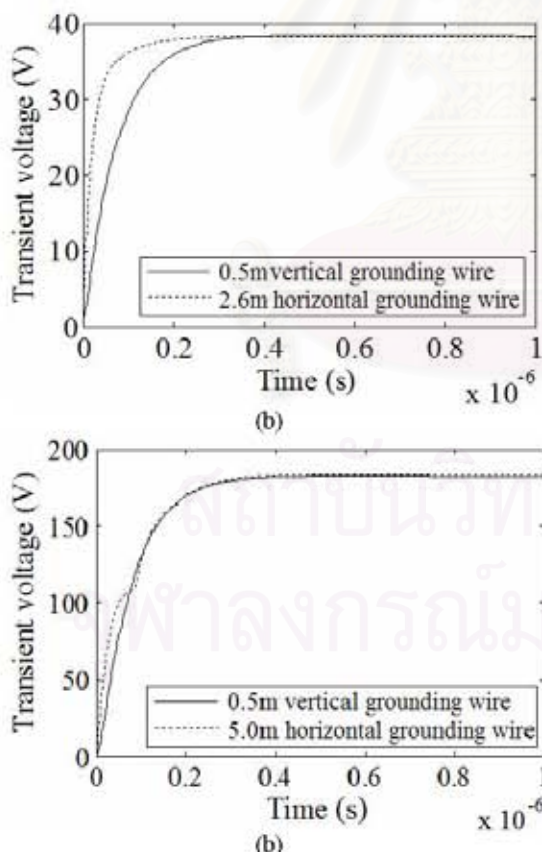


Fig. 13. Transient voltages of horizontal/vertical grounding wires corresponding to impulse current  $0.25/100 \mu\text{s}$  in soil resistivities (a)  $50 \Omega \cdot \text{m}$  (b)  $500 \Omega \cdot \text{m}$

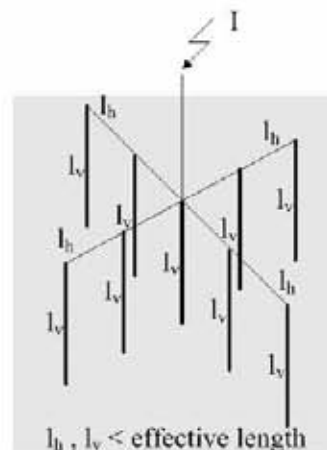


Fig. 14. Application of horizontal and vertical grounding wires

## 6. Conclusion

The effective length of grounding electrode under lightning current is one of the important parameters. Although the lower DC grounding resistances of a longer grounding wire are reduced, the lightning protection performance is still poor because of the effective length. This effective length does not only play an important role in the safe and reliable operation of power system, but also brings about considerable saving in material and working cost. When the length of a grounding electrode exceeds the effective length, the grounding conductor will not be utilized effectively.

This paper introduces the minimize per-unit length impulse impedance method for evaluating the effective length of the horizontal/vertical grounding wires in soils with different resistivities. Calculations for the transient voltage at the injection point were based on solving Telegrapher's equations with the FDTD technique. The simulation results were verified with experiments, which were in good agreement. The influences of the length of horizontal and vertical grounding wires on the transient GPR were analyzed.

The effective length of horizontal/vertical grounding wires increases with the soil resistivity and wavefront time of impulse current. This means that the effective length under subsequent stroke  $0.25/100 \mu\text{s}$  should be concerned rather than first stroke  $10/350 \mu\text{s}$ . With the same maximum transient GPR, the vertical grounding wire has shorter length than the horizontal grounding wire. The saving cost of conductor can be done by implementing the vertical grounding wires with appropriate grounding geometry.

## References

- (1) C. R. Paul : Analysis of Multiconductor Transmission Lines, Wiley, New York (1994)
- (2) Y. Liu, N. Theethayi and R. Thottappillil : "An Engineering Model for Transient Analysis of Grounding System Under Lightning Strikes: Nonuniform Transmission-Line Approach", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol.20, No.2, pp.722-730 (2005)

- (3) L. Grcev : "Modeling of grounding systems for better protection of communication installations against effects from electric power system and lightning", *IEE Conf. Pub.*, No.484, pp.461-468 (2001)
- (4) B. P. Gupta and B. Thapar : "Impulse characteristics of grounding electrodes", *J. Inst. Eng. (India)*, Vol.64, No.4, pp.178-182 (1981)
- (5) J. L. He, Y.Q. Gao, R. Zeng, J. Zou, X.D. Liang, B. Zang, J.B. Lee and S. Chang : "Effective length of counterpoise wire under lightning current", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol.20, No.2, pp.1585-1591 (2005)
- (6) Y. Liu, N. Theethayi and R. Thottappillil : "Investigating the validity of existing definitions and empirical equations of effective length/area of grounding wire/grid for transient studies", *Journal of Electrostatics*, Vol.65, pp. 329-335 (2007)
- (7) I.F. Gonos, F.V. Topalis and I.A. Stathopoulos : "Transient impedance of grounding rods", *High Voltage Engineering*, Vol.2, pp.272-275 (1999)
- (8) Y.Q. Gao, J. L. He, R. Zeng and X.D. Liang, "Impulse transient characteristic of grounding grids," *Inter Sym.*, May. 2002
- (9) A. K. Mishra, A. Ametani, N. Nagaoka and S. Okabe, "Nonuniform characteristic of a horizontal grounding electrode", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol.22, No.4, pp.2327-2334 (2007)
- (10) A. Ametani and T. Kawamura, "A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP", *Trans. Power Del.*, Vol.20, No.2, pp.867-875 (2005)
- (11) L.D. Grcev and M. Heimbach : "Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding system", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol.12, No.1, pp.172-178 (1997)
- (12) E. D. Sunde, *Earth conduction effects in transmission systems*. Bell Telephone Laboratories, 1949.
- (13) A. B. Kopyntsef : "Simulation of impulse property of grounding device", *Elektrinstvo*, No.5, pp.31-35 (1958)
- (14) J. L. He, R. Zeng, Y.P. Tu, J. Zou, S. M. Chen and Z.C.Guan : "Laboratory investigation of impulse characteristics of transmission tower grounding devices", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol.18, No.3, pp.994-1001 (2003)
- (15) Y.P. Tu, J. L. He and R. Zeng : "Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials", *IEEE Tran. Power Del.*, Vol.21, No.3, pp.1706-1713 (2006)
- (16) R. Velazquez and D. Mukhedkar, "Analytical modeling of grounding electrodes transient behavior", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 6, pp. 1314-1322, Sep., 1984.
- (17) IEC International Standard 62305-1 : "Protection Against Lightning Electromagnetic Impulse. Part I: General Principle (2006)", Geneva, Switzerland: IEC (2006)
- (18) G. G. Chavka and K. Aniserowicz, "Analysis of time-domain characteristics and special parameters of selected models of lightning current", Technical University of Bialystok, Faculty of Electrical Engineering, Poland
- (19) V. Silvrio, "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents", *IEEE Tran. Power Del.*, Vol.22, No.1, pp.381-386 (2007)

**Pongpan Pariyavong** (Non-member) was born in



Thailand, in 1973. He received the B.E. in electrical from Chiangmai University, Thailand, and the M.Sc. (Eng.) from Chulalongkorn University, Thailand, in 2001. Since the year 2005 he has been a Ph.D. student at the Division for Electricity and CEPT Laboratory, Chulalongkorn University, Thailand. His main

research areas are electromagnetic compatibility, impulse current generator and grounding system modeling.

**Weerapun Rungseevijitprapa** (Non-member) was



born in Thailand in 1969. He received the B.Sc. and the M.S. degree in electrical engineering from Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand in 1991 and 1995 respectively, and Ph.D. degrees in electrical engineering from University of Hannover, Hannover, in 2001. Since 2002 he

has been working at Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand where in 2003 he was promoted to the Head of EMC research laboratory, Center of excellence in electrical, power technology, CEPT, Chulalongkorn University. His main research interests are electromagnetic compatibility, lightning, and high voltage insulation technology



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์ เกิดวันที่ 4 ธันวาคม พ.ศ. 2516 จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในปีการศึกษา 2537 และ ปริญญาโท สาขาการเงินการธนาคาร ภาควิชาเศรษฐศาสตร์ คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2541 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544 งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแส อิมพัลส์ การออกแบบระบบวัดทางด้านไฟฟ้าแรงสูง ความเข้ากันได้ทางสนามแม่เหล็ก (Electromagnetic compatibility, EMC) มีผลงานทางวิชาการดังนี้

1. พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์ และ สำรวย สังข์สะอาด, “การออกแบบเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์”, การประชุมวิชาการของศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง, 2542.
2. พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์ และ สำรวย สังข์สะอาด, “การออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ ขนาด 75 kA”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า EECON ครั้งที่ 24, 2544.
3. พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์ และ สำรวย สังข์สะอาด, “การออกแบบสร้างโรงก่อกอปลัก้อยล์ขนาด 100 kA”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า EECON ครั้งที่ 25, 2545.
4. พงศ์พันธุ์ ปริยวงศ์ และ วีระพันธ์ รั้งสีวิจิตรประภา, “Effective length of ground rod under lightning impulse current”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า EECON ครั้งที่ 30, 2550.
5. P. Pariyavong and W. Rungseevijitprapa, “Effective Length Consideration with the Minimize Per-Unit Length Impulse Impedance Method”, IEEJ Transactions on Power and Energy, vol. 128, No.6, Jun. 2008.

ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยวิจัยในโครงการออกแบบสร้างเครื่องกำเนิดกระแสอิมพัลส์ขนาด 120 kA และโครงการสร้างกระแสอิมพัลส์รูปคลื่น 10/350  $\mu$ s เพื่อใช้ทดสอบกับดักเสิร์จตามมาตรฐาน IEC-62305