

การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน  
และแนวทางการป้องกัน

ANALYSIS OF LIGHTNING PHENOMENA FOR  
UNDERGROUND PETROLEUM PIPELINE SYSTEM AND  
IT'S PROTECTION SCHEME

บุญเลิศ โตประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดิน  
และแนวทางการป้องกัน

บุญเลิศ โตประดิษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน  
และแนวทางการป้องกัน

Analysis of Lightning Phenomena for Underground Petroleum  
Pipeline System and It's Protection Scheme

ชื่อ - นามสกุล

นายบุญเลิศ โตประดิษฐ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนพงศ์ สุวรรณศรี, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา

2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วันชัย ทรัพย์สิงห์, Ph.D.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประมุข อุณหเลขกะ, วศ.ด.)

..... กรรมการ

(อาจารย์บุญยั้ง ปลั่งกลาง, Dr.-Ing.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชนพงศ์ สุวรรณศรี, Dr.-Ing.)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 10 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดิน และแนวทางการป้องกัน
ชื่อ - นามสกุล	นายบุญเลิศ โตประดิษฐ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์, Ph.D.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนพงศ์ สุวรรณศรี, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2555

### บทคัดย่อ

โดยปกติแล้วท่อส่งปีโตรเลียมจะถูกฝังอยู่ใต้ดินขนานกับเส้นทางคมนาคมและแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นต้น ซึ่งเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าขึ้นในพื้นที่หรือบริเวณใกล้เคียงกับแนวท่อที่ฝังอยู่ใต้ดินส่งผลให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน (Cathodic Protection) จนวนท่อ รวมถึงตัวท่อส่วนที่เป็นโลหะ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกัน โดยพิจารณาจากความต่อเนื่องทางไฟฟ้าขณะฟ้าผ่าลงสู่พื้นดินเพื่อทราบถึงผลของสภาวะชั่วคราวที่ปรากฏในระบบท่อด้วยโปรแกรมจำลองสภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า

วิธีการวิเคราะห์โดยการเปลี่ยนคุณลักษณะของดิน จนวนท่อ ท่อโลหะ และสายตัวนำไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนให้เป็นคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อวิเคราะห์ผลของฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น จากผลการจำลองด้วยวิธีดังกล่าวพบที่เกิดแรงดันชั่วคราวปรากฏที่ท่อนั้นสูงขึ้นเมื่อความยาวท่อมากขึ้น และสูงเกินกว่าค่าความปลอดภัยของอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนที่เชื่อมต่อกับท่อโดยตรง

สำหรับแนวทางการป้องกันนั้น ได้พิจารณาคูสมบัตินี้ของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าที่เหมาะสม จากผลการจำลองด้วยวิธีข้างต้นร่วมกับแนวทางการป้องกันพบว่าสามารถควบคุมแรงดันชั่วคราวได้ตามมาตรฐาน BS 60950 โดยมีค่าแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนน้อยกว่า 1,500 โวลต์ และยังสามารถช่วยลดแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อได้ด้วยเช่นกัน

คำสำคัญ : ท่อส่งปีโตรเลียม ฟ้าผ่า แรงดันช่วงก้าว อิมพีแดนซ์ แรงดันเหนี่ยวนำ



<b>Thesis Title</b>	Analysis of Lightning Phenomena for Underground Petroleum Pipeline System and It's Protection Scheme
<b>Name-Surname</b>	Mr. Boonlerd Topradith
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Krischonme Bhumkittipich, Ph.D.
<b>Thesis Co-advisor</b>	Assistant Professor Thanapong Suwanasri, Dr.-Ing.
<b>Academic Year</b>	2012

## ABSTRACT

Typically, petroleum pipelines are buried underground parallel along roadside or high voltage transmission line, etc. When the lightning phenomenon occurs nearby the buried underground pipeline, causes damage to the cathodic protection device, pipe coating, and metal pipes. This thesis presents an analysis of the phenomenon of lightning for underground petroleum pipeline and its protection scheme. By considering the electrical continuity while the lightning is discharging into the ground to study the transient effect on pipeline system by using power system program (ATP-EMTP).

The research methodology will transfer the characteristics of soil, pipe coating, pipe's metal, and corrosion protection conductor into electrical circuit in order to study the effect of lightning. The simulation result has found that the transient voltage on the pipe will be higher when its length is longer and always higher than safety level of cathodic protection device which directly connected to the pipe.

For its protection scheme which considered the characteristics of suitable lightning protection devices, the simulation results showed that transient voltage was limited as BS-60950 and the transient voltage appeared to cathodic protection device was less than 1,500 volts and also limited lightning voltage on pipeline.

**Keywords:** pipeline, lightning, step voltage, impedance, induced voltage

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี เพราะได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือ จากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนพงศ์ สุวรรณศรี ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดจนชี้แนะแนวทางอันเป็น ประโยชน์อย่างสูงในการจัดทำวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ทรัพย์สิงห์ ประธานการ สอบวิทยานิพนธ์ ดร.บุญยัง ปลั่งกลาง กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมุข อุณหเลขกะ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่าง สูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้บริหารบริษัท ท่อส่งปิโตรเลียมไทยจำกัด เป็นอย่างสูงที่ได้สนับสนุน ทุนการศึกษาในครั้งนี้ ขอขอบคุณพี่ น้อง เพื่อนพนักงานทุกท่านที่ได้ช่วยเหลือและสนับสนุนข้อมูล เกี่ยวกับ ไปป์ไลน์เป็นอย่างดี ขอขอบคุณบริษัท นาคา อินจิเนียริ่ง จำกัด บริษัท บลูสโตน จำกัด และห้าง หุ้นส่วนจำกัดยนต์พาณิชย์เจริญ ที่ได้สนับสนุนมาตรฐาน IEC เกี่ยวกับการป้องกันฟ้าผ่าอันเป็นประโยชน์ อย่างมาก ขอขอบคุณรุ่นพี่นักศึกษาระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชภัฏวชิรบุรี ได้แก่ คุณทิตววรรณ สิ้นจันทร์ และคุณเสกสิทธิ์ เข้มทอง ที่ได้สนับสนุนโปรแกรม จำลองสภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า (ATP-EMTP) ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาระดับปริญญาโทรุ่นที่ 6 ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านจากชั้นอนุบาลถึงระดับปริญญาโทที่ได้ประสิทธิ์ประสาท วิชาจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการทางคณิตศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ มาประยุกต์ใช้และอ้างอิงใน งานวิจัยครั้งนี้

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

บุญเลิศ โตประดิษฐ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฎ
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน.....	3
1.6 ข้อจำกัดของวิทยานิพนธ์.....	4
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.2 ความเป็นมาของปัญหา.....	8
2.3 ทฤษฎีฟ้าผ่า.....	8
2.4 ทฤษฎีแรงดันช่วงก้ำว.....	18
2.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน.....	20
2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนทอส่งปีโตรเลียมใต้ดินชนิด FBE.....	21
2.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของทอส่งปีโตรเลียมใต้ดินชนิด โลหะ.....	22
2.8 ทฤษฎีการป้องกันการสุกร่อนแบบคาโธดิก.....	24
2.9 มาตรฐานและวิธีการวางทอส่งปีโตรเลียมใต้ดิน.....	29
2.10 ย่านการการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบทอส่งปีโตรเลียมใต้ดิน.....	31

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.11	มาตรฐานการจัดแบ่งพื้นที่อันตรายของยุโรปและอเมริกาเหนือ..... 35
2.12	การใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP ..... 38
3	การวิเคราะห์และการคำนวณ..... 45
3.1	การหาขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนที่ไหลลงดิน..... 45
3.2	การหาค่าแรงดันช่วงก้าว..... 45
3.3	พารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูล ..... 46
3.4	พารามิเตอร์แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า..... 51
3.5	แบบจำลองไฟฟ้าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดิน ..... 52
3.6	การคำนวณด้วยโปรแกรม ATP-EMTP..... 53
3.7	การคำนวณด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ความยาวท่อ 1 เมตร..... 55
3.8	การคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วย Matlab Simulink ที่ความยาวท่อ 1 เมตร ..... 57
4	ผลการจำลอง..... 75
4.1	กรณีไฟฟ้าล้าแรก..... 75
4.2	กรณีไฟฟ้าล้าต่อมา..... 95
4.3	สรุปผลการวิเคราะห์..... 116
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 121
5.1	สรุปผลการวิจัย..... 121
5.2	ข้อเสนอแนะ..... 122
	รายการอ้างอิง..... 124
	ภาคผนวก..... 127
	ภาคผนวก ก Mathematics Solution ..... 128
	ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่..... 137
	ประวัติผู้เขียน..... 174

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าลำแรก..... 11
2.2	ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าของลำฟ้าผ่าลำต่อมา..... 11
2.3	ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าของลำฟ้าผ่าช่วงเวลายาว ..... 11
2.4	ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและน้ำ ..... 20
2.5	ค่าความต้านทานต่อส่งปีโตรเลียมชนิดโลหะ ..... 22
2.6	ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจากวัสดุในดินและน้ำ..... 25
2.7	มาตรฐานสำหรับงานวางระบบไปป์ไลน์ใต้ดินบางส่วน..... 29
2.8	การจัดแบ่งประเภทของพื้นที่ที่มีสารไวไฟของยุโรปและอเมริกา..... 35
2.9	การเปรียบเทียบมาตรฐานการจัดแบ่งกลุ่มสารไวไฟของยุโรปและอเมริกา..... 36
2.10	มาตรฐานการใช้เทคนิคป้องกันการระเบิดตามมาตรฐานของ IEC และ NEC ..... 38
3.1	ค่าพารามิเตอร์ของดิน..... 47
3.2	ค่าความเก็บประจุของฉนวนต่อส่งปีโตรเลียม ..... 47
3.3	ค่าความความต้านทานของฉนวนต่อส่งปีโตรเลียม ..... 47
3.4	ค่าความเหนียวนำของต่อส่งปีโตรเลียม ..... 50
3.5	ค่าพารามิเตอร์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อน ..... 51
3.6	ค่าพารามิเตอร์แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า..... 51
4.1	ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อ จากความยาวท่อ 300 เมตร ..... 76
4.2	ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อ จากความยาวท่อ 600 เมตร ..... 78
4.3	ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อ จากความยาวท่อ 900 เมตร ..... 80
4.4	ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อ ร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 300 เมตร..... 82
4.5	ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อ ร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร..... 83

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่สุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร.....	86
4.7 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	88
4.8 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	91
4.9 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร .....	94
4.10 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	96
4.11 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	97
4.12 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 900 เมตร .....	100
4.13 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่สุกร่อนจากความยาวท่อ 300 เมตร.....	102
4.14 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่สุกร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร.....	104
4.15 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่สุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร.....	107
4.16 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	110
4.17 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	112
4.18 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร .....	116

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.19	สรุปค่าแรงคืนและกระแสไฟฟ้าล่าช้าแรกปรากฏที่ต่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ ของท่อ..... 117
4.20	สรุปค่าแรงคืนและกระแสไฟฟ้าล่าช้าแรกปรากฏที่ต่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อน ..... 118
4.21	สรุปค่าแรงคืนและกระแสไฟฟ้าล่าช้าแรกปรากฏที่ต่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกัน..... 119
4.22	สรุปค่าแรงคืนและกระแสไฟฟ้าล่าช้าต่อมาปรากฏที่ต่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกัน .. 120





## สารบัญญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 อุปกรณ์ป้องกันท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินผู้กร่อน ได้รับความเสียหายจากฟ้าผ่า .....	8
2.2 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน เบญจามิน แฟรงคลิน ได้พิสูจน์ว่าก้อนเมฆมีประจุไฟฟ้า..	9
2.3 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า.....	10
2.4 ล่าฟ้าผ่าในวาบฟ้าผ่า.....	12
2.5 การกระจายของกระแสฟ้าผ่า.....	13
2.6 แนวท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินในแนวรัศมีแรงดันช่วงก้ำว.....	19
2.7 วงจรสมมูลของดิน .....	20
2.8 วงจรสมมูลของฉนวนท่อส่งปิโตรเลียมที่สมบูรณ์.....	21
2.9 วงจรสมมูลของท่อส่งชนิดโลหะ .....	23
2.10 องค์ประกอบทางไฟฟ้าของท่อและฉนวนท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน .....	23
2.11 การผู้กร่อนของท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน .....	26
2.12 วงจรไฟฟ้าอุปกรณ์ป้องกันการผู้กร่อนของท่อ.....	26
2.13 โครงสร้างพื้นฐานการป้องกันท่อผู้กร่อน.....	28
2.14 วงจรสมมูลสายไฟฟ้าใต้ดิน.....	28
2.15 ลักษณะการวางท่อส่งส่งปิโตรเลียมใต้ดินทางกายภาพบางส่วน .....	29
2.16 การวางท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน โดยการเจาะท่อลอด .....	30
2.17 การวางท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน โดยการดันท่อลอด.....	30
2.18 การวางท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน โดยการเปิดผิวดิน .....	31
2.19 โชนการป้องกันฟ้าผ่า.....	32
2.20 แรงดันเสิร์จกับจุดอ้างอิง .....	33
2.21 คุณลักษณะแรงดันและกระแสของกับดักเสิร์จ .....	34
2.22 การปรับตั้งค่าโปรแกรม ATP-EMTP .....	39
2.23 การเขียนวงจรจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP.....	40
2.24 การกำหนดค่าพารามิเตอร์แหล่งกำเนิดฟ้าผ่าของโปรแกรม ATP-EMTP .....	40
2.25 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สายไฟฟ้าของโปรแกรม ATP-EMTP .....	41
2.26 การกำหนดค่าพารามิเตอร์กับดักเสิร์จ .....	42
2.27 การกำหนดค่าพิกัดแรงดันและกระแสของกับดักเสิร์จ.....	43

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.28 การคำนวณของโปรแกรม ATP-EMTP .....	44
2.29 การเลือกค่าเพื่อแสดงผลด้วยกราฟ .....	44
3.1 การวัดค่าความเหนี่ยวนำของท่อส่งปีโตรเลียม.....	49
3.2 การวัดค่าพารามิเตอร์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อน .....	50
3.3 แบบจำลองกรณีพิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งปีโตรเลียม.....	52
3.4 แบบจำลองกรณีพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งปีโตรเลียมร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อน .....	52
3.5 แบบจำลองแนวทางการป้องกัน .....	53
3.6 การจำลองกระแสฟ้าผ่าแบบไม่ต่อลงดินและแบบต่อลงดิน.....	54
3.7 รูปคลื่นแรงดันจากการจำลองกระแสฟ้าผ่าแบบไม่ต่อลงดินและแบบต่อลงดิน.....	54
3.8 วงจรสมมูลระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดิน .....	55
3.9 รูปคลื่นแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า 10/350 ไมโครวินาที.....	56
3.10 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า .....	56
3.11 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดิน .....	57
3.12 วงจรสมมูลท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินร่วมกับแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า.....	58
3.13 อิมพีแดนซ์ $Z_{T1}$ .....	59
3.14 อิมพีแดนซ์ $Z_{T2}$ .....	60
3.15 อิมพีแดนซ์ $Z_{T3}$ .....	62
3.16 อิมพีแดนซ์ $Z_T$ .....	64
3.17 แรงดันปรากฏที่แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า .....	66
3.18 แบบจำลอง Matlab Simulink หาค่าแรงดันปรากฏที่แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า .....	66
3.19 รูปคลื่นแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า 10/350 ไมโครวินาที ขนาด 1 แอมแปร์ .....	67
3.20 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า .....	67
3.21 แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ $Z_{T2}$ .....	68
3.22 แบบจำลอง Matlab Simulink หาค่าแรงดันปรากฏที่ $Z_{T2}$ .....	70
3.23 รูปคลื่นแรงดันปรากฏที่ $Z_{T2}$ .....	70
3.24 อิมพีแดนซ์ $Z_{T5}$ .....	71

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.25 แบบจำลอง Matlab Simulink หาค่าแรงดันปรากฏที่ $Z_5$ .....	72
3.26 รูปคลื่นแรงดันปรากฏที่ $Z_5$ (แรงดันตกคร่อมท่อที่มีความยาวท่อ 1 เมตร) .....	72
3.27 Editor Program.....	74
4.1 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	75
4.2 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	76
4.3 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	77
4.4 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	77
4.5 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 900 เมตร (0-600 เมตร) .....	78
4.6 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 900 เมตร (700-900 เมตร) .....	79
4.7 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 900 เมตร (0-600 เมตร) .....	79
4.8 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 900 เมตร (700-900 เมตร) .....	80
4.9 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 300 เมตร.....	81
4.10 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 300 เมตร.....	81
4.11 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร.....	82
4.12 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร.....	83

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.13 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร.....	84
4.14 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร.....	84
4.15 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร.....	85
4.16 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร.....	85
4.17 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	87
4.18 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	87
4.19 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	88
4.20 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	89
4.21 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	89
4.22 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	90
4.23 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร .....	91
4.24 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร .....	92
4.25 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร .....	92

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.26 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลุ่มแรกปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท้อ 900 เมตร .....	93
4.27 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ท้อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท้อจากความยาวท้อ 300 เมตร .....	95
4.28 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ท้อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท้อจากความยาวท้อ 300 เมตร .....	95
4.29 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ท้อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท้อจากความยาวท้อ 600 เมตร .....	96
4.30 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ท้อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท้อจากความยาวท้อ 600 เมตร .....	97
4.31 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ท้อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท้อจากความยาวท้อ 900 เมตร (0-600 เมตร) .....	98
4.32 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ท้อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท้อจากความยาวท้อ 900 เมตร (700-900 เมตร) .....	98
4.33 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ท้อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท้อจากความยาวท้อ 900 เมตร (0-600 เมตร) .....	99
4.34 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ท้อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท้อจากความยาวท้อ 900 เมตร (700-900 เมตร) .....	99
4.35 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ท้อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท้อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่ผู้กร่อนจากความยาวท้อ 300 เมตร .....	100
4.36 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ท้อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท้อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่ผู้กร่อนจากความยาวท้อ 300 เมตร .....	101
4.37 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท้อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่ผู้กร่อนจากความยาวท้อ 300 เมตร .....	101
4.38 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลุ่มต่อมาปรากฏที่ท้อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท้อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่ผู้กร่อนจากความยาวท้อ 600 เมตร .....	102

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.39 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร.....	103
4.40 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร.....	103
4.41 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร .....	105
4.42 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร.....	105
4.43 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร (0-500 เมตร)..	106
4.44 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร (600-900 เมตร).....	106
4.45 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร (600-900 เมตร).....	107
4.46 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	108
4.47 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	108
4.48 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	109
4.49 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร .....	109
4.50 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	110

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.51 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล้าต่อมาปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	111
4.52 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล้าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	111
4.53 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล้าต่อมาปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร .....	112
4.54 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล้าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร (0-600 เมตร) .....	113
4.55 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล้าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร (700-900 เมตร) .....	113
4.56 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล้าต่อมาปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร .....	114
4.57 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล้าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร (0-700 เมตร) .....	114
4.58 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล้าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร (800-900 เมตร) .....	115
4.59 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล้าต่อมาปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร .....	115
5.1 แนวทางการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบไปป์ไลน์ใต้ดิน .....	122



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ ( $m^2$ )
C Coating	ค่าเก็บประจุของฉนวนท่อนต่อตารางเมตร
C Soil	ค่าเก็บประจุของดินต่อเมตร
$h$	สัมประสิทธิ์การแก้ไขสำหรับกระแสค่ายอด
$I_0$	กระแสค่ายอดคลื่น
$i_{(t)}$	กระแสไฟฟ้า (กิโลแอมแปร์)
$I_S$	กระแสไฟฟ้าช่วงก้ำวที่ดิน
$kA / \mu S$	กิโลแอมแปร์ต่อไมโครวินาที
$L_{Pipe}$	ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของท่อส่งปีโตรเลียมชนิดโลหะ ต่อความยาว 1 เมตร
$n$	ค่าตัวประกอบความชันของกระแสไฟฟ้า
R Coating / Rc	ค่าความต้านทานฉนวนท่อนต่อ
$Q_S$	ประจุของลำไฟฟ้าช่วงสั้น
$Q_1$	ประจุของลำไฟฟ้าช่วงยาว
$R_p$	ค่าความต้านทานท่อโลหะต่อความยาว 1 เมตร
R Soil	ค่าความต้านทานดินต่อเมตร
$S$	ระยะช่วงก้ำว
$t$	เวลา (ไมโครวินาที)
$T_1$	ช่วงเวลาหน้าคลื่น
$T_2$	ช่วงเวลาถึงครึ่งหนึ่งของกระแสค่ายอดคลื่น
$V_S$	แรงดันที่แหล่งจ่าย
$V_{ZT2}$	แรงดันปรากฏที่ฉนวนท่อนต่อความยาว 1 เมตร
$V_{ZT5}$	แรงดันปรากฏที่ท่อโลหะต่อความยาว 1 เมตร
W/R	พลังงานจำเพาะ
$x_{(t)}$	เวลาและกระแสที่เพิ่มขึ้น
$y_{(t)}$	เวลาและกระแสที่ลดลง

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$Z_T$	ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบท่อโดยรวมต่อความยาว 1 เมตร
$Z_{T2}$	ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อและฉนวนท่อต่อความยาว 1 เมตร
$Z_{T5}$	ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อโลหะต่อความยาว 1 เมตร
$di_{(t)} / dt$	อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส (ค่าความชันหน้าคลื่น)
$\epsilon_0$	สภาพการยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสูญญากาศ (Space Permittivity)
$\epsilon_r$	ค่าคงตัวไดอิเล็กตริก
$\rho$	ความต้านทานจำเพาะของดิน
$\Delta U$	ความต่างศักย์ไฟฟ้า
$\Delta V$	แรงดันช่วงก๊าว
$\tau_1$	ค่าคงที่ทางเวลาทางหน้าคลื่น (ไมโครวินาที)
$\tau_2$	ค่าคงที่ทางเวลาทางหางคลื่น (ไมโครวินาที)
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society of Testing and Materials
ATP-EMTP	Alternative Transients Program-Electromagnetic Transients Program
BS	British Standard
CP	Cathodic Protection
EMI	Electromagnetic Interference
FBE	Fusion Bonded Epoxy
GPR	Ground Potential Rise
HDD	Horizontal Directional Drilling Crossings
IEC	International Electrotechnical Commission
K	Kelvin
LEL	Lower Explosive Limit
LPZ	Lightning Protection Zones
MOV	Metal Oxide Varistor

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

คำย่อ	ความหมาย
NACE	National Association of Corrosion Engineering
NEC	National Electrical Code
SPD	Surge Protection Device



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากประเทศไทยได้มีการขยายการลงทุนและการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีภาคอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง จึงมีความต้องการด้านพลังงานมากตามความเจริญเติบโตทางด้านอุตสาหกรรม น้ำมันเป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งซึ่งมีความต้องการตั้งแต่ระดับครัวเรือน ยานยนต์ การขนส่ง สถานีไฟฟ้า ภาคอุตสาหกรรม และอื่นๆ อีกมากมายที่ต้องการนำน้ำมันมาแปรรูปเป็นพลังงานในรูปแบบที่แตกต่างกันไป จากความต้องการใช้น้ำมันย่อมเกิดขบวนการการสูบถ่าย การขนส่งน้ำมันจากแหล่งกำเนิดต้นทาง ผ่านขั้นตอนการขุดเจาะ เข้าสู่ขบวนการกลั่นน้ำมัน ขนส่งสู่คลังน้ำมัน สถานีน้ำมัน โรงงานอุตสาหกรรม และครัวเรือน ตามความต้องการที่แตกต่างกันไป การขนส่งสู่ตัวเมืองชุมชนส่วนใหญ่จะขนส่งโดยรถบรรทุกน้ำมัน การขนส่งผ่านทางรถไฟเป็นการขนส่งสู่ตัวเมืองอำเภอ จังหวัดใหญ่ที่มีเส้นทางรถไฟผ่าน การขนส่งทางเรือเป็นรูปแบบการขนส่งจากโรงกลั่นชายฝั่งสู่คลังน้ำมันชายฝั่งข้ามจังหวัด การขนส่งน้ำมันทางท่อเป็นการขนส่งน้ำมันสู่ภูมิภาคของประเทศเพื่อเป็นศูนย์กลางกระจายสู่ลูกค้าหรือหน่วยงานที่มีความต้องการปริมาณน้ำมันค่อนข้างมากอย่างต่อเนื่องเช่น สนามบินสุวรรณภูมิ เป็นการขนส่งที่สะดวก รวดเร็ว มีความปลอดภัยสูง ค่าพลังงานในการขนส่งต่อหน่วยต่ำเมื่อเทียบกับการขนส่งแบบที่กล่าวถึงข้างต้น โดยปกติแล้วการขนส่งน้ำมันทางท่อ ท่อจะถูกฝังอยู่ใต้ดินที่ความลึกประมาณ 1.5 เมตร จากผิวดินขนานกับเส้นทางหลัก ถนนหลวง เส้นทางรถไฟ เส้นทางแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ตามความคล่องตัวและเหมาะสม จากสถานีต้นทางจนถึงปลายทาง ท่อน้ำมันเป็นโลหะถูกหุ้มด้วยฉนวนเพื่อป้องกันการสัมผัสกับดินโดยตรงในสภาพดินที่แตกต่างกันไปอันนำไปสู่การผุกร่อน ปกติแล้วจะมีการป้องกันการผุกร่อนเรียกว่าการป้องกันการผุกร่อนแบบคาโธดิก อาศัยหลักการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันประมาณลบ 0.85 โวลต์ ตลอดความยาวท่อส่งปิโตรเลียมใต้ผิวดิน

ระบบท่อส่งปิโตรเลียมที่ฝังอยู่ใต้ดินในพื้นที่หรือบริเวณที่มีความเสี่ยงต่อการถูกฟ้าผ่าโดยตรงหรือโดยทางอ้อมก็ดี หรือในพื้นที่ที่อาจเกิดความผิดปกติในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง ระบบท่อที่อยู่ใต้พื้นดินนั้นย่อมมีโอกาสได้รับอิทธิพลและผลกระทบจากปรากฏการณ์ดังกล่าว ทั้งหมดย่อมสร้างความเสียหายต่อระบบท่อส่งปิโตรเลียม อุปกรณ์ควบคุมระบบท่อ ผลที่เกิดขึ้นได้สร้างความเสียหายในระดับเล็กน้อยไปจนถึงระดับรุนแรงสร้างความเสียหายต่อทรัพย์สินส่งผลกระทบต่อธุรกิจการขนส่งปิโตรเลียม

อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน (Cathodic Protection: CP) เมื่อพิจารณาวงจรภายในแล้วเป็นเพียงแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 0.85 โวลต์ จ่ายไฟเข้าที่ท่อเพื่อป้องกันการสุกร่อนของท่อ จากข้อมูลพบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวได้รับความเสียหายหลายครั้งจากฟ้าผ่าโดยจุดที่ได้รับความเสียหายนั้นจะเป็นส่วนเชื่อมต่อเข้ากับท่อโดยตรง ถึงแม้ว่าจะมีอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าในระบบแล้วก็ตามก็ยังไม่สามารถทำหน้าที่ป้องกันฟ้าผ่าได้ หากพิจารณาสายตัวนำลงดินของกับดักเสร็จแล้วเป็นการต่อผ่านสายอาโนดซึ่งในทางปฏิบัติแล้วสายอาโนดจะมีความยาวประมาณ 150 เมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของดินและการออกแบบ จากความยาวสายที่มีค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเป็นหลักจึงเกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากของสายอาโนด มีผลให้แรงดันส่วนเกินที่กับดักเสร็จต้องระบายลงสู่ดินนั้นมีแรงดันตกคร่อมสูง การป้องกันฟ้าผ่าจึงมีประสิทธิภาพต่ำลงหรือไม่สามารถป้องกันได้

ความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบป้องกันท่อสุกร่อนเป็นปัญหาที่เกิดจากการที่มีกระแสฟ้าผ่าชั่วคราว (Lightning Current) เข้ามาในระบบไฟฟ้า โดยทำให้เกิดแรงดันเกิน (Over Voltage) เมื่อผ่านค่าอิมพีแดนซ์ในระบบไฟฟ้าโดยมีแหล่งที่มาดังนี้

- ก) แรงดันเกินที่เกิดขึ้นจากการตัดต่อวงจรไฟฟ้าของโหลดขนาดใหญ่
- ข) แรงดันเกินชั่วขณะที่เกิดจากความผิดปกติในระบบไฟฟ้า
- ค) แรงดันเกินที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

ในบริเวณที่ได้รับกระแสฟ้าผ่าจะได้รับความเสียหาย เนื่องจากพลังงานของลำฟ้าผ่า เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายออกไปรบกวนระบบไฟฟ้าและระบบสื่อสาร เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ท่อและอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนจากความต่อเนื่องทางไฟฟ้า เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในระบบวงจรไฟฟ้าวิ่งไปตามสายไฟเข้าสู่อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูง

ปัจจุบันปัญหาดังกล่าวข้างต้น ยังส่งผลกระทบต่อระบบท่อส่งน้ำมันใต้ดินและอุปกรณ์ควบคุมระบบท่อ ถือเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติซึ่งเป็นการยากแก่การควบคุมและป้องกัน จึงเป็นที่มาของการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกันเพื่อประโยชน์แก่ทางด้านวิศวกรรม ด้านการพัฒนาการป้องกันฟ้าผ่าในระบบท่อน้ำมันที่ถูกต้อง รวมถึงประโยชน์แก่อุตสาหกรรมและภาคธุรกิจที่เกี่ยวข้องโดยรวมของประเทศ

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ในขณะที่เกิดฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินในลักษณะของความต่อเนื่องทางไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อศึกษาแนวทางการลดแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดิน ตามมาตรฐาน IEC และมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

### 1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

เมื่อกระแสฟ้าผ่าสิ้นสุดที่พื้นดิน กระแสและแรงดันไฟฟ้าจะแพร่กระจายไหลลงไปในดิน โดยรอบ หากท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินและระบบควบคุมระบบท่ออยู่ในแนวรัศมีการแพร่กระจายของกระแสฟ้าผ่าย่อมจะได้รับผลกระทบจากการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า การควบคุมแรงดันไฟฟ้าปรากฏในแต่ละอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องตามมาตรฐานจะสามารถลดแรงดันเกินจากฟ้าผ่าในระบบท่อส่งปีโตรเลียมและระบบป้องกันท่อผู้ก่อนได้

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 วิเคราะห์ปรากฏการณ์การเกิดแรงดันชั่วคราวในระบบท่อจากกระแสฟ้าผ่ารูปคลื่น 10/350 ไมโครวินาที ตามมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย อันมีผลจากค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินชนิดโลหะ

1.4.2 วิเคราะห์ปรากฏการณ์การเกิดแรงดันชั่วคราวในระบบท่อและอุปกรณ์ป้องกันท่อผู้ก่อนที่มีผลจากค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินชนิดท่อโลหะร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อผู้ก่อน

1.4.3 วิเคราะห์แนวทางการป้องกันฟ้าผ่าที่อุปกรณ์ป้องกันท่อผู้ก่อน

### 1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

สำหรับขั้นตอนการดำเนินการของโครงการที่นำเสนอนี้ ซึ่งได้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกันโดยพิจารณาจากความต่อเนื่องทางไฟฟ้าในขณะที่ฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน ได้นำพารามิเตอร์ของดิน ท่อน้ำมัน ฉนวนท่อบางส่วนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้ทำการสำรวจพื้นที่ใช้เครื่องมือวัดค่าวัดค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทางภาคสนาม อาทิเช่น ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของท่อขนาดต่างๆ ค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อผู้ก่อน ค่าเก็บประจุของฉนวนท่อแบบ Fusion Bonded Epoxy (FBE) ค่าความต้านทานดินในบริเวณที่วางท่อเพื่อเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ Matlab Simulink Version 7.1 และโปรแกรมจำลองสถานะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า (ATP-EMTP) โดยจัดเรียงความสำคัญของหัวข้อที่ได้ศึกษาค้นคว้าตามลำดับ ดังนี้

1.5.1 ศึกษาความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา รวบรวมข้อมูล ประวัติฟ้าผ่า ความเสียหาย ผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดิน รวมถึงศึกษาและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดจากแรงดันเกินในระบบไฟฟ้า

#### 1.5.2 ศึกษาทฤษฎีเบื้องต้น

ก) ศึกษาทำความเข้าใจกับมาตรฐานที่เกี่ยวข้องประกอบด้วยมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย มาตรฐาน IEC 62305-1, IEC 61312-1, BS 69050

ข) ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อและฉนวนท่อ

ค) ศึกษาทฤษฎีการป้องกันท่อสุกร่อนแบบคาโรติก

ง) ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน

จ) ศึกษาทฤษฎีฟ้าผ่าและแรงดันช่วงก้าว

ฉ) ศึกษาพฤติกรรมของการเกิดแรงดันชั่วคราวในระบบท่อจากกระแสฟ้าผ่า

ช) ศึกษาทฤษฎีการป้องกันฟ้าผ่า

ซ) ศึกษาการใช้งานของโปรแกรม ATP-EMTP

#### 1.5.3 วัดค่าพารามิเตอร์ของระบบท่อภาคสนาม

#### 1.5.4 จำลองปรากฏการณ์ฟ้าผ่าด้วยโปรแกรมสำหรับระบบท่อในเงื่อนไขต่างๆ

#### 1.5.5 วิเคราะห์ผลการจำลองในแต่ละขั้นตอนการจำลอง

#### 1.5.6 สรุปผลการวิจัย

### 1.6 ขั้นตอนในการดำเนินงาน

สำหรับงานวิจัยศึกษาและวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินฉบับนี้ ซึ่งไม่สามารถวัดค่าระดับแรงดันและกระแสฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นจริงจากภาคสนามได้ จึงกำหนดพารามิเตอร์กระแสฟ้าผ่ารูปคลื่น 10/350 ไมโครวินาที ตามมาตรฐาน IEC และมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย พิจารณานาขนาดกระแสฟ้าผ่าจากสถิติฟ้าผ่าประเทศไทยที่ 20 kA [1] กำหนดจุดฟ้าผ่าลงดิน โดยตรงห่างจากท่อใต้ดินเป็นจำนวน 5 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ 14 นิ้ว โดยกำหนดความยาวท่อ 300, 600 และ 900 เมตร ค่าความต้านทานจำเพาะของดินชนิดดินกรวดแห้งที่ 1,000 โอห์มต่อเมตร เพื่อเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์หาค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อและปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนรวมถึงแนวทางการป้องกันฟ้าผ่าที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนโดยไม่พิจารณาผลิตภัณฑ์ปีโตรเลียมภายในท่อ ซึ่งใช้โปรแกรมจำลองสถานะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า ATP-EMTP เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ผล



## 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ทราบถึงสถานะชั่วคราวทางไฟฟ้าในระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินขณะฟ้าผ่า

1.7.2 เป็นการเผยแพร่ผลการวิจัยในการประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้า

1.7.3 เป็นฐานข้อมูลด้านการพัฒนาและวิจัยในอนาคตสำหรับภาคอุตสาหกรรมท่อส่งปีโตรเลียมและท่อส่งก๊าซธรรมชาติ

1.7.4 งานวิจัยนี้มุ่งหวังว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้บนพื้นฐานทางคณิตศาสตร์จะเป็นแนวทางเพื่อใช้ออกแบบระบบป้องกันความเสียหายจากฟ้าผ่าของระบบท่อส่งปีโตรเลียมและท่อส่งก๊าซใต้ดินรวมถึงการพัฒนาฉนวนท่อเพื่อลดผลกระทบจากฟ้าผ่าในอนาคต

1.7.5 การควบคุมแรงดันฟ้าผ่าปรากฏในระบบท่อจะสามารถสร้างความน่าเชื่อถือ สร้างเสถียรภาพของระบบท่อส่งปีโตรเลียมและท่อส่งก๊าซโดยรวมของประเทศ ได้จากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดของบทนี้ เป็นการกล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้หลายทฤษฎีโดยเฉพาะทางด้านฟ้าผ่า หลักการทางด้านไฟฟ้าแรงสูง มาตรฐาน IEC มาตรฐานการป้องกันแม่เหล็กไฟฟ้าจากฟ้าผ่าของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ รวมถึงการศึกษาบทความที่มีความสัมพันธ์และเกี่ยวข้องกับฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินรวมถึงแนวทางการป้องกัน เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับการวิจัยครั้งนี้ให้เกิดประโยชน์และมีความปลอดภัยสูงสุด โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การจัดทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจงานวิจัยที่ถูกตีพิมพ์ทั้งในและต่างประเทศ สำหรับประเทศไทยนั้นยังไม่พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยตรง ได้พิจารณาหลักการพื้นฐาน ทฤษฎี แนวทางการวิเคราะห์ ที่สอดคล้องกับงานวิจัยฉบับนี้ เพื่อใช้เป็นเอกสารอ้างอิงประกอบการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ศึกษาและสรุปพอสังเขปดังนี้

**2.1.1 นาดยา คล้ายเรื่อง, 2548 [1]** นำเสนอวิธีการวิเคราะห์หาสนามไฟฟ้า ที่เกิดจากฟ้าผ่าลงดิน ในบริเวณใกล้เคียงกับแนววางสายเคเบิลใต้ดิน ไม่ว่าจะเป็นการผ่าลงดินโดยตรง ผ่านเสาตัวนำระบบป้องกันฟ้าผ่าอาคาร หรือผ่าลงต้นไม้ ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อฉนวนเคเบิลใต้ดินที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงได้ โดยการวิเคราะห์ใช้ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาตำแหน่งและรูปแบบการวางสายเคเบิลที่เหมาะสม โดยที่ฉนวนไม่เกิดความเสียหายเมื่อเกิดฟ้าลงดิน รวมทั้งตำแหน่งที่เหมาะสมในการปักกราสายดิน เพื่อไม่ให้กระแสฟ้าผ่าที่ไหลลงดินสร้างความเสียหายกับระบบเคเบิลใต้ดิน

**2.1.2 ทิตววรรณ สิ้นจันทร์, 2552 [2]** นำเสนอแนวทางการปรับปรุงระบบการต่อลงดินและระบบกราสายดิน เพื่อลดผลจากแรงดันเกินฟ้าผ่า โดยใช้วิธีการประสานสัณฐานที่เหมาะสมให้กับอาคารสถานีส่งวิทยุและเครื่องช่วยเดินอากาศ ศูนย์ควบคุมการบิน ที่ได้รับผลกระทบจากแรงดันเกินฟ้าผ่าส่งผลให้ระบบไฟฟ้าและอุปกรณ์เครื่องช่วยเดินอากาศเกิดความเสียหาย ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดแรงดันชั่วคราวที่ตกคร่อมกราสายดินก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่าแรงดันตกคร่อมกราสายดินมีค่าลดลง และค่าความเหนี่ยวนำของระบบกราสายดินมีค่าลดลง ค่าแรงดันตกคร่อมค่าความเหนี่ยวนำมีค่าลดลง

**2.1.3 Nor Emyliah, Binti Husin, 2011 [3]** ได้นำเสนอการศึกษาความเป็นไปได้ของการชำรุดของสายเคเบิลใต้ดิน ในลักษณะของการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าจากฟ้าผ่าตรงในประเทศมาเลเซียโดยการจำลองด้วยโปรแกรม (ATP - EMTP) เพื่อตรวจสอบว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากฟ้าผ่าสามารถทำให้เกิดความเสียหายกับสายไฟในระดับแรงดัน 132 กิโลโวลต์ หรือไม่ โดยในการจำลองใช้ข้อมูลสายเคเบิลใต้ดินชนิด CU / XLPE / SCW / MDPE มีระยะ 150 เมตร ด้วยขนาดกระแสฟ้าผ่า 40 กิโลแอมแปร์ รูปคลื่น 1 / 50 ไมโครวินาที จากข้อสรุปของงานวิจัยฉบับนี้พบว่าในกรณีของฟ้าผ่าไม่อาจสร้างความเสียหายจนจนสายเคเบิล

**2.1.4 Hitoshi Kijima, Kenji Takato, Kazuo Murakawa [4]** นำเสนองานวิจัยการป้องกันความเสียหายของฉนวนท่อ Gas-Pipelines ที่อยู่ใกล้สิ่งปลูกสร้างสูงซึ่งได้รับผลกระทบจากฟ้าผ่า โดยมุ่งเน้นตัวฉนวนที่ใช้สำหรับเคลือบผิวท่อจากพลาสติกสังเคราะห์ งานวิจัยดังกล่าวได้ประเมินความเป็นได้ต่อการชำรุดเสียหายโดยใช้การจำลอง Finite Element Method ด้วยการวิเคราะห์ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าเมื่อกระแสฟ้าผ่าไหลเข้าไปในดินใกล้ๆ ท่อส่งก๊าซ พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ฉนวนท่อและท่อส่วนที่เป็นโลหะ

**2.1.5 Konstantinos Kopsidas [5]** ได้ศึกษาการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้ายังท่อส่งน้ำมันเปรียบเทียบกับท่อกวางทองนากันยาวถึง 10 กิโลเมตร แสดงให้เห็นว่า การเหนี่ยวนำได้สร้างแรงดันขึ้นในไปป์ไลน์เมื่อฟ้าผ่าและเสิร์จทางไฟฟ้าขึ้น โดยความยาวของไปป์ไลน์ที่ขนานกันมากขึ้นทำให้แรงดันปรากฏในไปป์ไลน์มากขึ้นเช่นกัน ด้วยหลักการ Fourier Transform

**2.1.6 D. Caulker, H. Ahmad, and M. S Mohamed Ali [6]** ได้นำเสนองานวิจัยการศึกษาผลกระทบของฟ้าผ่าท่อก๊าซโลหะด้วยโปรแกรม ATP-EMTP และแบบจำลองท่อทรงกลมระยะสั้นวางขนาน 2 ท่อ โดยจำลองการกระโดดข้ามของแรงดันด้านข้างด้วยเครื่องกำเนิดแรงดันสูงผ่านฉนวนอากาศ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าระยะห่างระหว่างท่อ 167 เซนติเมตร ของท่อ 2 เส้นจะไม่เกิดการกระโดดข้ามของแรงดัน 0.6 kV/cm ดังนั้นการวางท่อก๊าซต้องรักษาระยะห่างเพื่อหลีกเลี่ยงการกระโดดข้ามของแรงดัน

**2.1.7 Pan Zhuo Hong, Zhang Lu, Tan Bo [7]** ได้นำเสนองานวิจัยศึกษาผลการรบกวนของสายส่งไฟฟ้าแรงสูงกับระบบท่อก๊าซธรรมชาติที่ฝังอยู่บริเวณใกล้เคียง จากความซับซ้อนของปัญหาได้ประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์จำลองด้วยวิธีการ Fast Fourier Transform (FFT) โดยการแก้ค่าพารามิเตอร์อย่างถูกต้องของระบบท่อก๊าซ สิ่งก่อสร้างสูง ระบบสายดิน ภายใต้สภาวะฟ้าผ่าโดยตรง การตอบสนองในโดเมนเวลา จากผลการจำลองโดยวิธีการ FFT สามารถจัดการกับการคำนวณอย่างมีประสิทธิภาพให้ความแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูง

## 2.2 ความเป็นมาของปัญหา

จากข้อมูลพบว่าอุปกรณ์ป้องกันการฟุ่ร่อนของท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินนั้นได้รับความเสียหายหลายครั้งจากฟ้าผ่า [8] ดังแสดงตามภาพที่ 2.1 เพื่อเป็นการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นเชิงวิชาการ อันนำไปสู่แนวทางการป้องกันที่ถูกต้อง จึงเป็นที่มาของการศึกษาวิจัย “การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกัน” เพื่อประโยชน์แก่งานด้านวิศวกรรมด้านการพัฒนาการป้องกันฟ้าผ่าในระบบไปป์ไลน์



ภาพที่ 2.1 อุปกรณ์ป้องกันท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินฟุ่ร่อนได้รับความเสียหายจากฟ้าผ่า [8]

## 2.3 ทฤษฎีฟ้าผ่า

### 2.3.1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติ เมื่อ ค.ศ. 1752 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกันชื่อ เบนจามิน แฟรงคลิน ได้พิสูจน์ให้รู้กันแน่นอนว่าฟ้าผ่าคือการสปาร์กทางไฟฟ้า (Lightning is Electric Spark) ระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือภายในก้อนเมฆเดียวกันเป็นฟ้าแลบ (Air Discharge) เป็นผลของการเกิดดีสชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ การสะสมประจุในก้อนเมฆหากมีปริมาณมากพอทำให้ก้อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูงตั้งแต่ 10 เมกะโวลต์ ถึง 100 เมกะโวลต์ และเกิดการดีสชาร์จระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกเป็นวาบฟ้าผ่า (Ground Flash) ระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆหรือภายในก้อนเมฆเดียวกันเป็นฟ้าแลบ (Air Discharge) ฟ้าผ่าและฟ้าแลบมีโอกาสเกิดขึ้นพร้อมกันอุณหภูมิที่แกนลำฟ้าผ่าสูงถึง 30,000 องศาเซลวิน จึงทำให้เกิดเพลิงไหม้แก่สิ่งที่ถูกฟ้าผ่า [9]



ภาพที่ 2.2 นักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกัน เบนจามิน แฟรงคลิน ได้พิสูจน์ว่าก้อนเมฆมีประจุไฟฟ้า [10]

จากภาพที่ 2.2 เบนจามิน แฟรงคลิน ได้ทำการทดลองไฟฟ้าอันเลื่องชื่อเมื่อปี ค.ศ. 1752 โดยชักว่าวที่ผูกกุญแจโลหะเพื่อพิสูจน์ว่าฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งท่านได้ให้ข้อสรุปเกี่ยวกับปรากฏการณ์ฟ้าผ่าว่าเกิดจากกระแสไฟฟ้า แฟรงคลินได้ให้ความสนใจศึกษาเรื่องไฟฟ้าและฟ้าผ่าที่สำคัญคือวิธีป้องกันความเสียหายของทรัพย์สินจากฟ้าผ่าการทดลองของแฟรงคลินก่อให้เกิดการประดิษฐ์สายล่อฟ้าเพื่อป้องกันฟ้าผ่าในเวลาต่อมา [10]

### 2.3.2 กระบวนการเกิดฟ้าผ่า

โดยทั่วไปการเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าจะเริ่มต้นที่ก้อนเมฆเกิดการสะสมประจุไฟฟ้าที่ระดับความสูง 1.5-10 กิโลเมตรเหนือพื้นโลก ซึ่งมีการกระจายตัวของประจุไฟฟ้าโดยที่ฐานของก้อนเมฆจะเป็นประจุไฟฟ้านลบ จุดเริ่มต้นการเกิดฟ้าผ่าส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่กลุ่มประจุไฟฟ้านลบบริเวณฐานก้อนเมฆใกล้พื้นโลก เมื่อความเครียดสนามไฟฟ้ามีค่าถึงจุดวิกฤต ( $E_c$ ) ในก้อนเมฆประมาณ 10 kV/cm (ในบรรยากาศที่ระดับพื้นโลก  $E_c \approx 30$  kV/cm) จะเกิดการไอออไนเซชันตามหลักการเกิดดิซชาร์จในก๊าซ [9]

การเกิดไอออไนเซชันของอากาศจะเกิดเป็นลีดเดอร์ (Leader) หรือหัวนำร่องมีทิศทางลงสู่พื้นโลกในลักษณะจังหวะก้าว (Stepped Leader) แบบสุ่มๆ มีช่วงก้าวตั้งแต่ 3 เมตร ถึง 200 เมตร โดยมีช่วงก้าวเฉลี่ยประมาณ 50 เมตร เมื่อหัวนำร่องเข้าใกล้พื้นโลกจะทำให้เกิดประจุเหนี่ยวนำที่พื้นโลกในส่วนที่มีความสูงเช่น ยอดแหลมของอาคารสิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ เป็นต้น เกิดไอออไนซ์เป็นสตรีมเมอร์วิ่งเข้าหาหัวนำร่องจนมาบรรจบกันจะเกิดเป็นลำฟ้าผ่า (Main Stroke) มีแสงจ้าจากพื้นโลกวิ่งไปหาก้อนเมฆด้วยความเร็วสูงกว่าประมาณ  $50 \times 10^3$  กิโลเมตรต่อวินาที ตามแนวหัวนำร่องการเคลื่อนที่ของประจุในลำฟ้าผ้านั้นคือกระแสฟ้าผ่า [9]

### 2.3.3 ลักษณะของการเกิดฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าเกิดจากการคายประจุไฟฟ้าของก้อนเมฆ โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นด้วยกัน 4 ลักษณะดังนี้

ก) ฟ้าผ่าระหว่างก้อนเมฆ “ฟ้าร้องหรือฟ้าลั่น” เกิดจากประจุลบบนก้อนเมฆก้อนหนึ่งวิ่งไปหาประจุบวกบนก้อนเมฆอีกก้อนหนึ่ง

ข) ฟ้าผ่าภายในก้อนเมฆก้อนเดียวกัน (ฟ้าแลบ) เกิดจากประจุลบวิ่งเข้าหาประจุบวกในก้อนเมฆเดียวกัน

ค) ฟ้าผ่าจากก้อนเมฆสู่ดิน (ฟ้าผ่าลง) เป็นการปลดปล่อยประจุออกจากก้อนเมฆลงสู่พื้นโลกเรียกว่าฟ้าผ่าแบบลบสามารถแบ่งตามประจุที่เคลื่อนที่ได้เป็น 2 กรณี

ฟ้าผ่าลงชั่วลบ พบประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์

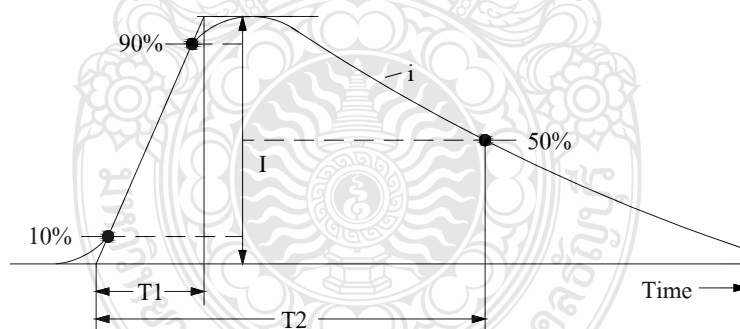
ฟ้าผ่าลงชั่วบวก พบน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

ง) ฟ้าผ่าจากพื้นดินสู่ก้อนเมฆ (ฟ้าผ่าขึ้น) สามารถแบ่งตามเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าได้เป็น 2 กรณี

ฟ้าผ่าขึ้นชั่วลบ

ฟ้าผ่าขึ้นชั่วบวก

### 2.3.4 กระแสฟ้าผ่า



โดยที่

$I$  = กระแสค่ายอดคลื่น

$T_1$  = ช่วงเวลาหน้าคลื่น

$T_2$  = ช่วงเวลาถึงครึ่งหนึ่งของกระแสค่ายอดคลื่น

ภาพที่ 2.3 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า [11]

จากภาพที่ 2.3 แสดงลักษณะของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าโดยประกอบด้วยช่วงเวลาน้ำคัลีน และช่วงเวลาหางคัลีน ช่วงเวลาน้ำคัลีน (Front Time: T1) หมายถึงช่วงเวลา 1.25 เท่าของเวลาในช่วงที่กระแสเพิ่มค่าจาก 10% ถึง 90% ของค่ายอด ซึ่งจุดเริ่มต้นของกระแสเพิ่มค่าคือจุดตัดระหว่างแกนนอนกับเส้นตรงที่ลากผ่านจุด 10% และ 90% ของค่ายอดที่ด้านน้ำคัลีน และช่วงเวลาหางคัลีน (Tail Time: T2) หมายถึงเวลาดั้งแต่จุดเริ่มต้นของรูปคลื่นจนถึงค่าที่กระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอดโดยที่ I คือกระแสค่ายอด

ตารางที่ 2.1 ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าลำแรก [12]

ค่าพารามิเตอร์ของกระแส	ระดับการป้องกัน		
	1	2	3-4
ค่ากระแส I กิโลแอมแปร์ (kA)	200	150	100
ช่วงเวลาน้ำคัลีน T1 ไมโครวินาที (us)	10	10	10
เวลาถึงครึ่งหนึ่งของค่ายอด T2 ไมโครวินาที (us)	350	350	350
ประจุของลำฟ้าผ่าช่วงสั้น Q <sub>s</sub> คูลอมป์ (C)	100	75	50
พลังงานจำเพาะ W/R เมกกะจูล/โอห์ม (MJ/Ω)	10	5.6	2.5

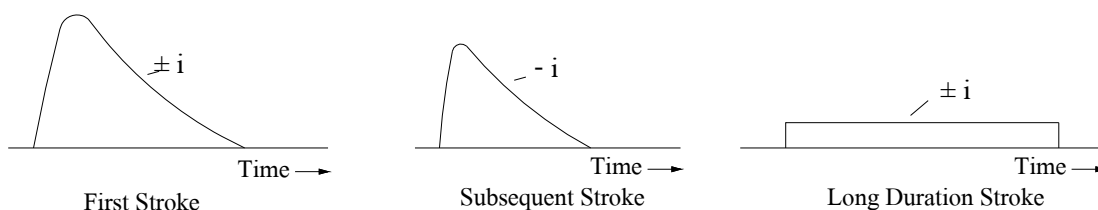
ตารางที่ 2.2 ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าของลำฟ้าผ่าลำต่อมา [12]

ค่าพารามิเตอร์ของกระแส	ระดับการป้องกัน		
	1	2	3-4
ค่ากระแส I กิโลแอมแปร์ (kA)	50	37.5	25
ช่วงเวลาน้ำคัลีน T1 ไมโครวินาที (us)	0.25	0.25	0.25
เวลาถึงครึ่งหนึ่งของค่ายอด T2 ไมโครวินาที (us)	100	100	100
ความชันเฉลี่ย I/T1 กิโลแอมแปร์/ไมโครวินาที (kA/us)	200	150	100

ตารางที่ 2.3 ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าของลำฟ้าผ่าช่วงเวลายาว [12]

ค่าพารามิเตอร์ของกระแส	ระดับการป้องกัน		
	1	2	3-4
ประจุ Q <sub>1</sub> คูลอมป์ (C)	200	150	100
ช่วงเวลา T วินาที (s)	0.5	0.5	0.5





ภาพที่ 2.4 ล้ำฟ้าผ่าในวาบฟ้าผ่า [12]

จากภาพที่ 2.4 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าซึ่งทางมาตรฐาน IEC และมาตรฐานการป้องกันแม่เหล็กไฟฟ้าจากสนามแม่เหล็กได้ให้นิยามรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าออกเป็น 3 ช่วงโดยมีพารามิเตอร์ตามตารางที่ 2.1 ถึง 2.3

รูปคลื่นของกระแสฟ้าผ่าที่ 10/350 ไมโครวินาที เป็นรูปคลื่นขนาดใหญ่ที่เกิดจากการคายประจุ (Discharge) ครั้งแรกของการเกิดฟ้าผ่าฟ้า โดยมีช่วงเวลาหน้าคลื่นเป็น 10 ไมโครวินาทีและช่วงเวลาหางคลื่นที่คายประจุลง 50 เปอร์เซ็นต์ เป็น 350 ไมโครวินาที ลักษณะของรูปคลื่นประเภทนี้จะมีพลังงานสูงมาก [13] ส่วนรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมจะมีลักษณะของรูปคลื่นเป็น 0.25/100 ไมโครวินาที มีขนาดเล็กกว่ารูปคลื่นฟ้าผ่าล่าแรกเนื่องจากพลังงานถูกลดทอนลงไปบางส่วนแล้ว โดยมีช่วงเวลาหน้าคลื่นเป็น 0.25 ไมโครวินาทีและช่วงเวลาหางคลื่นที่ 50 เปอร์เซ็นต์เป็น 100 ไมโครวินาที ลักษณะของรูปคลื่นประเภทนี้จะมีขนาดพลังงานลดลงจากประเภทแรก ค่าความชันหน้าคลื่นคืออัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสเรียกว่าความชัน ( $di/dt$ ) เป็นกิโลแอมแปร์ต่อไมโครวินาที (kA/us) ซึ่งมีผลสำคัญทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายตัวนำ ท่อโลหะ ที่มีค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า และเป็นองค์ประกอบหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินรวมถึงแนวทางการป้องกัน ดังสมการที่ 2.1

$$\Delta U = L_{pipe} \frac{di_{(t)}}{dt} \quad (2.1)$$

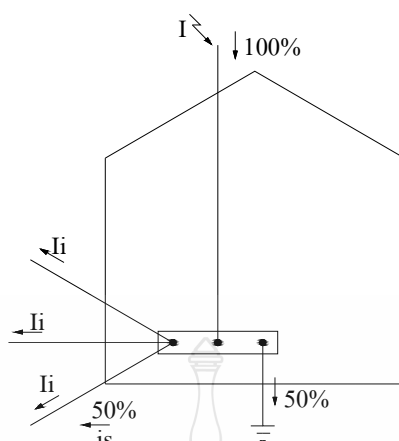
โดยที่

$\Delta U$  = แรงดันเหนี่ยวนำ

$i_{(t)}$  = กระแสฟ้าผ่า

$L_{pipe}$  = ค่าความเหนี่ยวนำของท่อส่งปิโตรเลียมชนิดโลหะต่อความยาว 1 เมตร

$t$  = เวลา



ภาพที่ 2.5 การกระจายของกระแสฟ้าผ่า [11]

จากการกระจายของกระแสฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 1312 - 1 ดังภาพที่ 2.5 ซึ่งได้กำหนดกระแสฟ้าผ่าสูงสุดมีค่าถึง 200 กิโลแอมแปร์ ที่รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า 10 / 350 ไมโครวินาที ซึ่งอธิบายให้เห็นว่าเมื่อมีฟ้าผ่าต่อสิ่งปลูกสร้างกระแสฟ้าผ่า 50 เปอร์เซ็นต์จะกระจายลงดินและส่วนที่เหลือจะกระจายเข้าสู่ระบบต่างๆ ในอาคารเช่นระบบไฟฟ้า สายโทรศัพท์หรือระบบสื่อสาร โดยมีสถิติขนาดกระแสฟ้าผ่าประเทศไทย 20 กิโลแอมแปร์ [14]

ดังนั้นกระแสฟ้าผ่าส่วนที่เหลือลงดินเมื่อฟ้าผ่าลงสิ่งปลูกสร้างควรพิจารณาให้มีความสอดคล้องตามมาตรฐาน IEC ดังภาพที่ 2.5 ซึ่งได้กำหนดขนาดกระแสฟ้าผ่าส่วนที่กระจายไหลลงสู่ดินเป็นจำนวน 50 เปอร์เซ็นต์ของสถิติกระแสฟ้าผ่าประเทศไทยโดยมีค่าเป็น 10 กิโลแอมแปร์

### 2.3.5 ฟังก์ชันรูปคลื่นของกระแสในการวิเคราะห์

กระแสฟ้าผ่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกัน ซึ่งประกอบด้วย ค่ายอด (Peak Value) เวลา และความชันหน้าคลื่นของกระแสฟ้าผ่า ซึ่งสามารถใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าได้ในหลายรูปแบบ [1]

#### ก) Double Exponential Model

Bruce and Golde (1941) ได้นำเสนอฟังก์ชัน Double Exponential สำหรับใช้ในการวิเคราะห์กระแสฟ้าผ่าโดย [1]

$$i_{(t)} = I_0 [exp(-\alpha t) - exp(-\beta t)] \quad (2.2)$$

โดยที่

$I_0$	=	ค่ายอดกระแสฟ้าผ่า
$\alpha$	=	เวลาคงตัวของหน้าคลื่น
$\beta$	=	เวลาคงตัวของหางคลื่น
$t$	=	เวลา

Uman and McLain (1969) ได้เปลี่ยนรูปแบบฟังก์ชันเดิมโดยเพิ่มตัวประกอบการแก้ไข (Correction Factor) ของค่ายอดกระแสฟ้าผ่าทำให้ฟังก์ชันเปลี่ยนรูปเป็น

$$i_{(t)} = \frac{I_0}{h} \cdot [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 Dennis และ Pierce แนะนำให้ใช้พารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์สมการฟ้าผ่าเพิ่มเติมโดยกำหนดค่าดังนี้ [1]

สำหรับฟ้าผ่าแรก

$$\alpha = 2 \times 10^4 / \text{s}$$

$$\beta = 2 \times 10^5 / \text{s}$$

$$I_0 = 30 \text{ kA}$$

สำหรับฟ้าผ่าซ้ำ

$$\alpha = 1.4 \times 10^4 / \text{s}$$

$$\beta = 6 \times 10^6 / \text{s}$$

$$I_0 = 10 \text{ kA}$$

ข) Heidler Model

Heidler (1999) นำเสนอฟังก์ชันสำหรับการวิเคราะห์กระแสฟ้าผ่าอีกรูปแบบหนึ่ง โดยแยกฟังก์ชันออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วยส่วนแรกเป็นเวลาที่กระแสเพิ่มขึ้น (Current Rise Time:  $x_{(t)}$ ) และส่วนที่สองเป็นค่าของเวลาที่กระแสลดลง (Current Decay Time:  $y_{(t)}$ ) ดังนั้นฟังก์ชันของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.4

$$i_{(t)} = I_0 \cdot x_{(t)} \cdot y_{(t)} \quad (2.4)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} I_0 &= \text{ค่าขอดกระแสฟ้าผ่า} \\ X_{(t)} &= \text{ค่าของเวลาและกระแสที่เพิ่มขึ้น} \\ y_{(t)} &= \text{ค่าของ เวลาและกระแสที่ลดลง} \end{aligned}$$

ในย่านการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสเพิ่มขึ้นต่อเวลา  $x_{(t)}$  และการลดลงของกระแสฟ้าผ่าต่อเวลา  $y_{(t)}$  จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันกำลังและเอกซ์โปเนนเชียล (Power and Exponential Function) ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้ ดังนี้

$$x_{(t)} = \frac{K_s^n}{(1 + K_s^n)} \quad (2.5)$$

$$y_{(t)} = \exp(-t / \tau_2) \quad (2.6)$$

โดยที่

$$K_s = t / \tau_1 \quad (2.7)$$

นำสมการที่ 2.7 แทนค่าลงในสมการที่ 2.5 จะได้สมการที่ 2.8

$$x_{(t)} = \frac{(t / \tau_1)^n}{1 + (t / \tau_1)^n} \quad (2.8)$$

เมื่อนำสมการที่ 2.6 รวมกับสมการที่ 2.8 จะได้สมการที่ 2.9

$$i = I_0 \cdot \frac{(t / \tau_1)^n}{1 + (t / \tau_1)^n} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.9 จำเป็นต้องมีสัมประสิทธิ์การแก้ไขสำหรับกระแสขอด ( $h$ ) ดังนั้นจึงเขียนสมการรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าใหม่เพื่อให้ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์และคำนวณออกมามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ตามสมการที่ 2.10

$$i_{(t)} = \frac{I_0}{h} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) \quad (2.10)$$

โดยที่

$i_{(t)}$	=	กระแสฟ้าผ่า (กิโลแอมแปร์)
$I_0$	=	กระแสค่ายอด (กิโลแอมแปร์)
$h$	=	สัมประสิทธิ์การแก้ไขสำหรับกระแสค่ายอด
$t$	=	เวลา (ไมโครวินาที)
$\tau_1$	=	ค่าคงที่ทางเวลาทางหน้าคลื่น (ไมโครวินาที)
$\tau_2$	=	ค่าคงที่ทางเวลาทางหางคลื่น (ไมโครวินาที)
$n$	=	ค่าตัวประกอบความชันของกระแส

สำหรับการวิจัยฉบับนี้ได้พิจารณาใช้สมการของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าค่าแรกและฟ้าผ่าซ้ำค่าต่อมา [12] ตามสมการที่ 2.10

### 2.3.6 ความเสียหายจากการเกิดฟ้าผ่า

ความเสียหายที่เกิดจากผลของฟ้าผ่า ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งมีชีวิตและทรัพย์สิน สิ่งปลูกสร้าง ระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ไฟฟ้าและอื่นๆ โดยความเสียหายที่เกิดขึ้นจากฟ้าผ่าสามารถแยกออกได้เป็น 3 ประเภทดังนี้ [9]

#### 1. ความร้อน

เมื่อเกิดฟ้าผ่าขึ้นจะมีลำแสงเจ็ดจ้าของฟ้าผ่า ลำแกนมียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเป็นเซนติเมตร มีความร้อนที่เกิดขึ้นโดยมีอุณหภูมิสูงถึง 30,000 องศาเคลวิน (Kelvin: K) เพียงพอที่จะสร้างความเสียหายแก่ชีวิตและทรัพย์สินได้ อุณหภูมิที่สูงมากย่อมทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ ถึงแม้ว่ากระแสฟ้าผ่าที่ไหลผ่านวัตถุนั้นเป็นช่วงเวลาสั้นมากก็ตาม

#### 2. แรงบิดทางกล

เมื่อวัตถุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้รับอิทธิพลจากกระแสฟ้าผ่า นอกจากจะเกิดความร้อนแล้วยังเกิดแรงบิดที่วัตถุนั้น โดยเกิดจากกระแสไหลผ่านตัววัตถุนั้นทำให้เกิดแรงดูดแรงผลักจากผลของกระแสกำลังสอง เกิดการแกว่งตัวได้เช่น ในกรณีสายไฟฟ้า สายตัวนำลงดินเป็นต้น ถ้าลักษณะการวางสายเป็นแบบขนานกันกระแสฟ้าผ่าจะทำให้เกิดการดูดและผลักกันของตัวนำทั้งสอง เป็นผลทำให้สิ่งที่ถูกฟ้าผ่าเกิดความร้อน การระเบิด พังทลาย และความเสียหายของวัตถุนั้นๆ ได้

### 3. ผลทางไฟฟ้า

กระแสฟ้าผ่าทำให้เกิดสถานะชั่วคราวหรือเสีจขึ้นในระบบสายส่งไฟฟ้าแรงสูง สามารถสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าได้ เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากระจายตัวโดยรอบ เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในตัวนำไฟฟ้าในบริเวณฟ้าผ่า ซึ่งผลทางไฟฟ้าโดยแบ่งออกเป็น 6 ลักษณะ

#### ก) การรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Interference: EMI)

กระแสฟ้าผ่าทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกไปรบกวนระบบสื่อสารสายส่งไฟฟ้า ก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูงต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นในตัวนำ หากแรงดันสูงมากพอ อาจทำให้เกิดการสปาร์กได้

#### ข) แรงดันสปาร์กด้านข้าง

ถ้ากระแสฟ้าผ่า  $i(t)$  ไหลผ่านตัวนำที่มีความเหนี่ยวนำ (L) และมีค่าความต้านทานของดิน  $R_e$  จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมความเหนี่ยวนำและความต้านทานนั้น เช่นความต้านทานระบบรากสายดินหรือความเหนี่ยวนำของสายตัวนำลงดินที่มีค่าสูง จะทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้า  $\Delta U$  มีค่าสูงเช่นกัน และอาจทำให้เกิดสปาร์กหรือกระโดดเข้าหาส่วนที่มีการต่อลงดินที่ดีกว่า ซึ่งการสปาร์กนี้อาจทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้เมื่อมีองค์ประกอบที่เหมาะสม

#### ค) แรงดันเกินในระบบส่งจ่าย

ฟ้าผ่าเปรียบเสมือนเป็นแหล่งกำเนิดกระแสขนาดใหญ่ เมื่อกระแสฟ้าผ่าถูกเหนี่ยวนำเข้าไปในระบบสายส่ง กระแสฟ้าผ่าจะวิ่งออกไปบนสายส่งจากตำแหน่งที่ฟ้าผ่าลง ย่อมมีกระแสฟ้าผ่าไหลในสายส่งเป็นผลให้เกิดแรงดันเกินในระบบจ่ายเมื่อกระแสฟ้าผ่าไปถึงอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าอาจสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์เหล่านั้นได้

#### ง) แรงดันเกินในระบบแรงต่ำ

จากผลของแรงดันเกินในระบบสายส่งแรงสูงย่อมทำให้แรงดันเกินในระบบแรงต่ำได้ด้วยเช่นกัน อาจมีค่าไม่สูงพอเหมือนในระบบสายส่ง ซึ่งผลของแรงดันที่เกิดขึ้นในระบบแรงต่ำจะทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในอาคาร บ้านเรือน เกิดความเสียหายได้โดยเฉพาะอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความไวสูง

#### จ) อันตรายจากฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นต่อคนโดยตรง

โดยธรรมชาติแล้วฟ้าจะผ่าลงในสิ่งที่มีความสูงโดดเด่นกว่า เช่นสิ่งก่อสร้างอาคารสูง ต้นไม้ หรือสิ่งอื่นๆ ที่มีความสูง หรือที่อยู่ในที่โล่งแจ้ง ทุ่งนา บริเวณที่ปราศจากต้นไม้ อยู่ในเส้นทางฟ้าผ่า เช่นหลบใต้ต้นไม้หรือยืนพิงต้นไม้ที่สูงโดดเด่น ซึ่งมักจะถูกฟ้าผ่าได้ง่าย มีโอกาสได้รับ

อันตรายจากฟ้าผ่าลงต้นไม้ เนื่องจากกระแสฟ้าผ่าที่ไหลผ่านตามต้นไม้ลงสู่ดินทำให้ต้นไม้มีศักย์ไฟฟ้าที่สูงพอและเกิดการกระโดดข้ามของแรงดันเข้าสู่คน

ฉ) อันตรายจากแรงดันช่วงก้าวและแรงดันสัมผัส

กระแสฟ้าผ่าที่ไหลลงสู่ดินซึ่งมีความต้านทานดินนั้นจะแพร่กระจายออกไปในดินเป็นวงรอบจะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างผิวดิน โดยมีระยะห่างเท่ากับช่วงก้าว ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างเท้าทั้งสองข้างในขณะก้าวเท้า สำหรับระยะช่วงก้าวของคนจะคิดเท่ากับ 1 เมตร หรือระหว่างเท้าหน้ากับเท้าหลังของสัตว์ซึ่งเรียกว่าแรงดันช่วงก้าว (Step Voltage) ส่วนแรงดันสัมผัส (Touch Voltage) คือแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมที่ร่างกายของมนุษย์ โดยเกิดจากการสัมผัสกับโครงสร้างส่วนที่เป็นโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือโครงสร้างของเสาส่งแรงสูงเป็นต้น ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจะเกิดขึ้นระหว่างจุดที่สัมผัสเทียบดินที่ยืนอยู่ทำให้มีกระแสไหลผ่านร่างกายมนุษย์

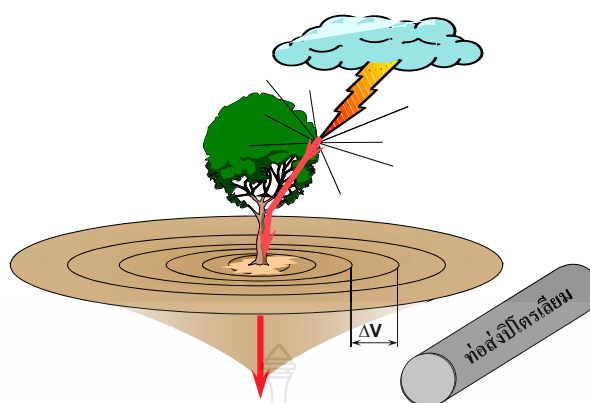
## 2.4 ทฤษฎีแรงดันช่วงก้าว

เมื่อกระแสฟ้าผ่าสิ้นสุดที่พื้นดิน ณ จุดสิ้นสุด กระแสฟ้าผ่าจะเป็นจุดที่มีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่งผลให้มีกระแสและแรงดันฟ้าผ่าแพร่กระจายไหลตามผิวดินซึ่งเป็นค่าความต้านทานเป็นบริเวณโดยรอบโดยระยะห่างของวงรอบมีค่าเท่ากับช่วงก้าวของคน ความต่างศักย์นั้นเรียกว่าแรงดันช่วงก้าว (Step Voltage) หากระบบท่อส่งปิโตรเลียม สายไฟวงจรป้องกันท่อผูกרון หรือวัตถุที่มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า อยู่ในแนวการแพร่กระจายของกระแสฟ้าผ่าและแรงดันช่วงก้าว โดยผ่านค่าความต้านทานดิน เชื่อมต่อยังฉนวนท่อ และส่วนที่เป็นท่อโลหะ ระบบท่อนั้นย่อมได้รับผลของกระแสฟ้าผ่าและแรงดันช่วงก้าวด้วยเช่นกัน ค่าของแรงดันในแต่ละช่วงก้าวในแต่ละช่วงสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.11 ดังแสดงตามภาพที่ 2.6

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{S}{d(d+S)} \right] \quad (2.11)$$

โดยที่

$\Delta V$	=	แรงดันช่วงก้าว
$\rho$	=	ความต้านทานจำเพาะของดิน
$I$	=	กระแสฟ้าผ่า
$S$	=	ระยะช่วงก้าว
$d$	=	ระยะห่างจากจุดฟ้าผ่า



ภาพที่ 2.6 แนวท่อน้ำดินที่ติดตั้งในแนวรัศมีแรงดันช่วงก้ำว [8, 15]

จากค่าแรงดันช่วงก้ำวที่เกิดจากผลของกระแสฟ้าผ่าที่ผ่าลงสู่พื้นดินตามสมการที่ 2.11 โดยสามารถประมาณค่าของกระแสฟ้าผ่าที่ไหลแพร่กระจายผ่านพื้นดินเป็นวงรอบในแต่ละช่วงก้ำวได้ด้วยกฎของโอห์ม

$$I_s = \frac{\Delta V}{R} \quad (2.12)$$

โดยที่

$I_s$  = กระแสฟ้าผ่าช่วงก้ำวที่ติด

$\Delta V$  = แรงดันช่วงก้ำว

$R$  = ค่าความต้านทานดิน

โดยที่ค่าความต้านทานดินสามารถหาได้จากสมการที่ 2.13

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.13)$$

$R$  = ค่าความต้านทานดิน

$\rho$  = ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

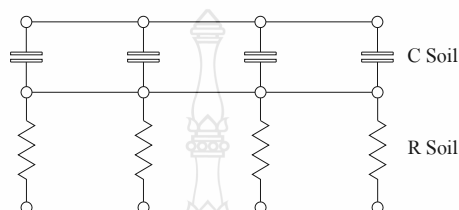
$L$  = ความยาวของดิน

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของของดิน



## 2.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน

ดินเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ต้องพิจารณา จากลักษณะการวางท่อที่ถูกฝังอยู่ใต้ผิวดินหลายงานวิจัยได้กล่าวถึงเนื่องจากมีส่วนสัมผัสโดยตรง ซึ่งมีความต่อเนื่องทางไฟฟ้าตรง เมื่อพิจารณาดินทางคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบด้วยค่าความต้านทาน (R) และค่าเก็บประจุ (C) ดังวงจรสมมูลตามภาพที่ 2.7 โดยค่าเก็บประจุของดิน (C) มีค่าเท่ากับ 221.35 พิโกฟารัดต่อเมตร [3]



ภาพที่ 2.7 วงจรสมมูลของดิน [3]

ตารางที่ 2.4 ค่าความต้านทานจำเพาะของดินและน้ำ [9]

ชนิดของดิน	$\rho$ ( $\Omega$ -m)
ดินร่วนเปียก	10...30
ดินเหนียว	50
ดินร่วนซุย	100
ดินปนทราย	150
ทรายซุย	200
ทรายแข็ง	1000
ดินกรวดซุย(Gravel)	500
ดินกรวดแข็ง	1000
หิน (Rock)	3,000 – 10,000
ซีเมนต์บริสุทธิ์	50
ซีเมนต์ 1 ทราย 3	150
ซีเมนต์ 1 กรวด 5	400
น้ำทะเล	0.15
น้ำประปา	20
น้ำกลั่น	300

ค่าความต้านทานของดินโดยรอบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินแต่ละพื้นที่อาจมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง อาทิเช่น ชนิดของเนื้อดิน ค่าความชื้น ค่าอุณหภูมิ ส่วนผสมของแร่ธาตุ ชนิดของเนื้อดิน ความแตกต่างกันของเนื้อดิน ค่าความเป็นกรดด่างของดิน สำหรับในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาค่าความต้านทานจำเพาะของดินชนิดกรวดแห้งเท่านั้น ซึ่งจะไม่พิจารณาปัจจัยอื่นที่อาจทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินบริเวณที่ท่อฝังอยู่เปลี่ยนแปลงไป โดยกำหนดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน 1,000 โอห์มต่อเมตร ตามตารางที่ 2.4

## 2.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินชนิด FBE

การเคลือบผิวท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินแบบอีพ็อกซี (Fusion Bonded Epoxy: FBE) ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนของกรด-ด่าง และตัวทำละลายอื่นๆ ได้ดีแล้วยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือค่าความต้านทานสูงมาก เมื่อพิจารณาฉนวนท่อทางคุณลักษณะทางไฟฟ้าจะประกอบด้วยค่าความต้านทาน (R) และค่าเก็บประจุ (C) โดยลักษณะของวงจรสมมูลของฉนวนท่อที่สมบูรณ์ [16] ดังวงจรสมมูลตามภาพที่ 2.8 ประกอบด้วยค่าความต้านทาน (R) จำนวนสองมิติกกล่าวคือค่าความต้านทานเชิงความยาวต่อหน่วยและค่าความต้านทานเชิงความหนาที่ 25 ไมโครเมตร ค่าความต้านทานเชิงความยาวได้จากมาตรฐาน ASTM D257 กล่าวถึงค่าความต้านทานของฉนวนท่อมี่ค่าเท่ากับ  $3.3 \times 10^{15}$  โอห์มเซนติเมตร ส่วนค่าความต้านทานเชิงความหนาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการคำนวณของความหนาฉนวนท่อที่ 25 ไมโครเมตร



โดยที่

$R_c$  = ค่าความต้านทานฉนวนท่อ

$C_c$  = ค่าเก็บประจุไฟฟ้าฉนวนท่อ

ภาพที่ 2.8 วงจรสมมูลของฉนวนท่อส่งปิโตรเลียมที่สมบูรณ์ [16]

จากภาพที่ 2.8 ค่าความเก็บประจุทางไฟฟ้าของฉนวนท่อสามารถหาได้จากสมการที่ 2.14

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (2.14)$$

โดยที่

- $C$  = ค่าความเก็บประจุ (F)  
 $\epsilon_0$  = สภาพการยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ( $8.825 \times 10^{-12}$ )  
 $\epsilon_r$  = ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกของอิพ็อกซี่ (เท่ากับ 4)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ ( $m^2$ )  
 $d$  = ระยะห่างของวัตถุ (m)

## 2.7 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินชนิดโลหะ

ตารางที่ 2.5 ค่าความต้านทานท่อส่งปีโตรเลียมชนิดโลหะ [17]

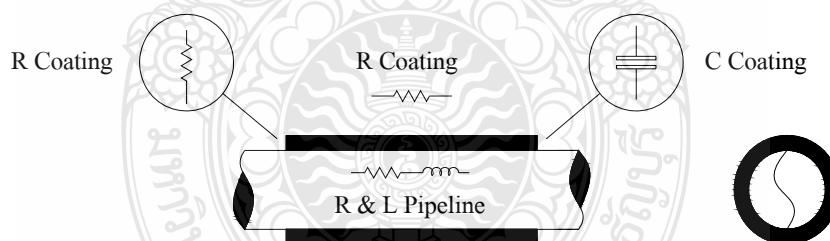
ขนาดท่อ (นิ้ว)	เส้นผ่าศูนย์กลาง รอบนอก (นิ้ว)	ความหนาท่อ (นิ้ว)	น้ำหนัก (ฟุต/ปอนด์)	ความต้านทาน (ไมโครโอห์มต่อตารางฟุต)
2	2.375	0.154	3.65	79.2
4	4.5	0.237	10.8	26.8
6	6.625	0.280	19.0	15.2
8	8.625	0.322	28.6	10.1
10	10.75	0.365	40.5	7.13
12	12.75	0.375	49.6	5.82
14	14.00	0.375	54.6	5.29
16	16.00	0.375	62.6	4.61
18	18.00	0.375	70.6	4.09
20	20.00	0.375	78.6	3.68
22	22.00	0.375	86.6	3.34
24	24.00	0.375	94.6	3.06
26	26.00	0.375	102.6	2.82
28	28.00	0.375	110.6	2.62
30	30.00	0.375	118.7	2.44
32	32.00	0.375	126.6	2.28
34	34.00	0.375	134.6	2.15
36	36.00	0.375	142.6	2.03

จากตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่าท่อมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยประกอบด้วยค่าความต้านทาน (R) ค่าความต้านทานของท่อนั้นแปรผกผันตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อชนิดโลหะซึ่งสามารถเปลี่ยนหน่วยของค่าความต้านทานเพื่อให้การคำนวณต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเกิดความคล่องตัวมากยิ่งขึ้น [18] โดย 1 ตารางฟุตจะมีค่าเท่ากับ 0.09290304 ตารางเมตร และท่อนั้นยังประกอบด้วยค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (L) ดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 วงจรสมมูลของท่อส่งชนิดโลหะ

ภาพที่ 2.9 แสดงวงจรสมมูลของท่อ โดยมีตัวเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ท่อ โดยมีสัญลักษณ์ (L) การสะสมพลังงานของตัวเหนี่ยวนำเกิดขึ้นจากการที่มีกระแสไหลผ่านเข้าไปในตัวเหนี่ยวนำหรือขดลวดทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กโดยจะมีทิศทางไปตามกฎมือขวา (Right Hand Rule) ซึ่งฟลักซ์แม่เหล็กนี้จะคล้องอยู่กับขดลวดโดยการเปลี่ยนแปลงใดๆ ของฟลักซ์ที่คล้องอยู่จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น



ภาพที่ 2.10 องค์ประกอบทางไฟฟ้าของท่อและฉนวนท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน

จากภาพที่ 2.10 แสดงถึงองค์ประกอบทางไฟฟ้าของท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินต่อความยาวหนึ่งหน่วย ซึ่งประกอบด้วยฉนวนท่อตามหัวข้อ 2.6 โดยมีค่าความต้านทานและค่าเก็บประจุทางไฟฟ้าของฉนวนท่อและท่อส่วนที่เป็นโลหะซึ่งประกอบด้วยค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า โดยที่ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่อความยาวหนึ่งหน่วยของท่อนั้น สามารถคำนวณหาค่าได้จากตารางที่ 2.5 ตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

## 2.8 ทฤษฎีการป้องกันการผุกร่อนแบบคาโรติก

การป้องกันการผุกร่อนของท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินชนิดโลหะโดยทั่วไปที่นิยมนำมาป้องกันระบบท่อจะมีวิธีการ 2 ลักษณะดังนี้ [19]

### 2.8.1 การเคลือบผิวภายนอกด้วย Coating

ท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินปกติแล้วจะเป็นท่อเหล็ก คุณภาพของท่อต้องเป็นไปตามมาตรฐาน API และ ASME ท่อเหล็กจะถูกเคลือบที่ผิวด้านนอกเพื่อป้องกันการผุกร่อน และการทำลายจากสารเคมีใต้ดิน การเคลือบผิวด้านนอกของท่อมีหลายชั้นหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์และการออกแบบ สำหรับงานวิจัยนี้จะพิจารณาการเคลือบแบบ Fusion Bonded Epoxy (FBE) ซึ่งมีคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนของกรด-ด่าง และตัวทำละลายอื่นๆ ได้ดีและยังมีคุณสมบัติเด่นทางไฟฟ้าคือมีค่าความต้านทานสูง

### 2.8.2 การป้องกันแบบคาโทด

การเคลือบผิวภายนอกท่อเหล็กด้วยวัสดุดังกล่าวข้างต้น สามารถป้องกันการผุกร่อนของท่อได้ดีและเพื่อให้การป้องกันการผุกร่อนเป็นไปอย่างสมบูรณ์สูงสุดจึงต้องมีการป้องกันเพิ่มเติมด้วยวิธีที่เรียกว่า Cathodic Protection (CP) ซึ่งเป็นวิธีป้องกันการผุกร่อนที่ได้ผลดี สามารถยืดอายุการใช้งานของท่อเหล็กได้หลายปี โดยใช้การฝังด้วยวัสดุ เช่น แมกนีเซียม ที่มีศักย์ต่ำ (Sacrificial Anode) และใช้กระแสไฟฟ้าตรงแรงดันประมาณ 0.85 โวลต์ [17] จ่ายเข้าไปในระบบท่อ (Impress Current) ซึ่งยังสามารถป้องกันการลุกลามของการผุกร่อนได้อย่างสมบูรณ์ การผุกร่อนของท่อเหล็กคือการเสื่อมสภาพหรือเป็นการสูญเสียเนื้อของวัสดุเนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับสภาพแวดล้อม องค์ประกอบของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างวัสดุกับสภาพแวดล้อมซึ่งต้องมีองค์ประกอบ 3 อย่าง [20]

#### 1. ขั้วไฟฟ้า (Electrodes)

อโนด (Anode) จะเป็นบริเวณที่เกิดการผุกร่อนหรือเสียเนื้อโลหะ คือจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โลหะสูญเสียอิเล็กตรอนและหลุดออกไปเป็นไอออนบวกในสารละลาย

คาโทด (Cathode) เป็นบริเวณที่ไม่มีการผุกร่อนของเนื้อโลหะเกิดขึ้นและบริเวณนี้จะรับอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ด้านนี้จะเรียกเป็นปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction)

อโนดและคาโทดอาจเป็นโลหะต่างชนิดกันหรือชนิดเดียวกันก็ได้แต่มีความเข้มข้นของสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

#### 2. สารละลาย (Electrolyte)

เป็นสื่อกลางของอิเล็กตรอน (Electron) เคลื่อนที่จากอโนดไปยังคาโทด

### 3. ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Electric Potential)

ความต่างศักย์ไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ให้อิเล็กตรอน (Electron) เคลื่อนที่จากอานอด (Anode) ไปยังคาโทด (Cathode) ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของเนื้อวัสดุในรูปของโครงสร้างชนิดของวัสดุและองค์ประกอบของวัสดุนั้น

ตารางที่ 2.6 ค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าจากวัสดุในดินและน้ำ [17]

วัสดุ	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)
Carbon, Graphite, Coke	0.3
Mill Scale on Steel	-0.2
High Silicon Cast Iron	-0.2
Copper, Brass, Bronze	-0.2
Mild Steel in Concrete	-0.2
Lead	-0.5
Cast Iron (Not Graphitized)	-0.5
Mild Steel (Rusted)	-0.2 to -0.5
Mild Steel (Clean and Shiny)	-0.5 to -0.8
Commercially Pure Aluminum	-0.8
Aluminum Alloy (5% Zinc)	-1.05
Zinc	-1.1
Magnesium Alloy (6% Al, 3% Zn, 0.15% Mn)	-1.6
Commercially Pure Magnesium	- 1.75

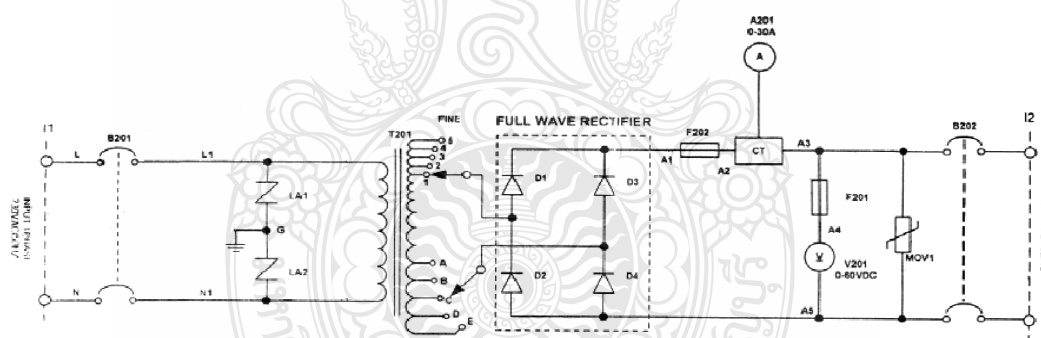
ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเหล็กมาใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อตอบสนองทางด้านอุตสาหกรรม ทั้งในวัสดุอุปกรณ์และเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป แต่ก็จะมีปัญหาเกิดขึ้นกับเหล็กคือการเกิดสนิมและเกิดการผุกร่อน สาเหตุของการเกิดการผุกร่อนนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะในสภาวะที่มีไอออนคลอไรด์

ตารางที่ 2.6 แสดงความต่างศักย์ทางไฟฟ้าสำหรับโลหะและวัสดุอื่นๆ ในดินและน้ำ โดยมีคาร์บอนมีศักย์ทางไฟฟ้าเป็นบวกมากที่สุดและแมกนีเซียมมีศักย์ทางไฟฟ้าลบมากที่สุด ซึ่งนิยมนำมาเป็นหลักการป้องกันไม่ให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนอันนำไปสู่การผุกร่อนของวัสดุ



ภาพที่ 2.11 การผุกร่อนของท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน [8]

การกัดกร่อนผิวท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินด้านนอกตามภาพที่ 2.11 ที่ฝังหรือจมอยู่ใต้ดินโดยผ่านจุดบกพร่องขนาดเล็กๆ ของฉนวนเคลือบท่อ (Coating) การปล่อยแรงดันและกระแสไฟฟ้าจากอุปกรณ์ป้องกันท่อผุกร่อน (Cathodic Protection) เพื่อป้องกันท่อผุกร่อนเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อน



ภาพที่ 2.12 วงจรไฟฟ้าอุปกรณ์ป้องกันการผุกร่อนของท่อ [8]

จากภาพที่ 2.12 เป็นวงจรพื้นฐานของหม้อแปลงไฟฟ้าอุปกรณ์ป้องกันการผุกร่อนของท่อ ซึ่งประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด พันอยู่บนแกนเหล็กร่วมกันได้แก่ ขดลวดปฐมภูมิ (Primary Winding) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) ทั้งนี้เพื่อให้เส้นแรงของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดปฐมภูมิไปตัดกับขดลวดทุติยภูมิและเกิดการเหนี่ยวนำ โดยป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเข้ากับขดลวดปฐมภูมิและมีแรงดันด้านออกต่อกับด้านทุติยภูมิ ดังสมการที่ 2.15

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.15)$$

โดยที่

$E_p$	=	แรงดันด้านปฐมภูมิ (Primary Voltage)
$E_s$	=	แรงดันด้านทุติยภูมิ (Secondary Voltage)
$N_p$	=	จำนวนรอบขดลวดด้านปฐมภูมิ (Primary Winding)
$N_s$	=	จำนวนรอบขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding)
$I_p$	=	กระแสด้านปฐมภูมิ (Primary Current)
$I_s$	=	กระแสด้านทุติยภูมิ (Secondary Current)

อุปกรณ์ป้องกันการผุกร่อนของท่อเมื่อพิจารณาตามโครงสร้างทางวงจรไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ต่อร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันต่ำเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงแรงดันประมาณ 0.85 โวลต์ ไปยังท่อซึ่งเป็นคาโทด (Cathode) และแรงดันไฟฟ้าด้านบวกต่อกับจุดอ้างอิงอานอด (Anode) มีระยะห่างในแนวตั้งฉากกับท่อ โดยวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ต่อร่วมกับหม้อแปลงไฟฟ้าด้านขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) สามารถคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ได้ โดยจะให้แรงดันเอาต์พุตทุกๆ ครึ่งรอบของแรงดันไฟสลับที่เข้ามาทั้งซีกบวกและซีกลบ มีค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตเป็น 0.636 เท่าของแรงดันไฟสูงสุด ดังสมการที่ 2.16

$$V_{dc} = \frac{2V_p}{\pi} = 0.636V_p \quad (2.16)$$

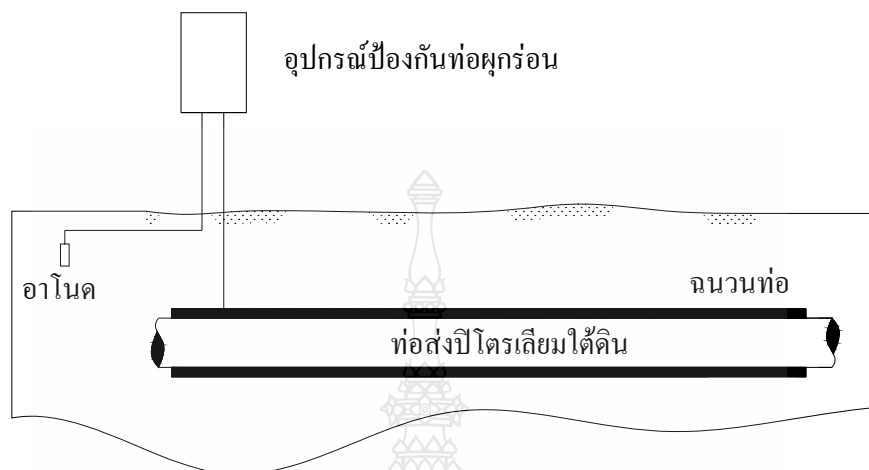
โดยที่

$V_{dc}$	=	แรงดันไฟตรงเฉลี่ย
$V_p$	=	แรงดันไฟสูงสุด

การผุกร่อนเกิดขึ้นกับท่อ อุปกรณ์ป้องกันการท่อผุกร่อน (Cathodic Protection: CP) แบบป้อนแรงดันจึงเป็นกระบวนการที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าไปที่ผิวท่อเหล็กเพื่อให้ท่อไม่เกิดการสูญเสียเนื้อเหล็ก ด้วยกระแสไฟฟ้าเป็นแบบชนิดกระแสตรงจากหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อลดแรงดันโดยรักษาระดับกระแสไฟฟ้าให้ต่อเนื่อง จ่ายกระแสผ่านสายไฟฟ้าคาโนดไปยังผิวท่อโดยมีอานอดเป็นจุดอ้างอิง

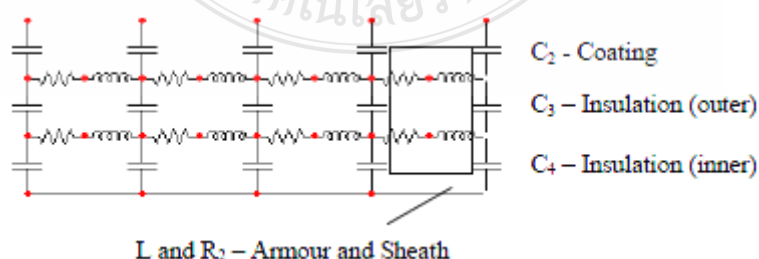


เพื่อให้การป้องกันการผุกร่อนของท่อนั้นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ ตามโครงสร้างพื้นฐานของการป้องกันการผุกร่อน ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างพื้นฐานการป้องกันการผุกร่อน [8]

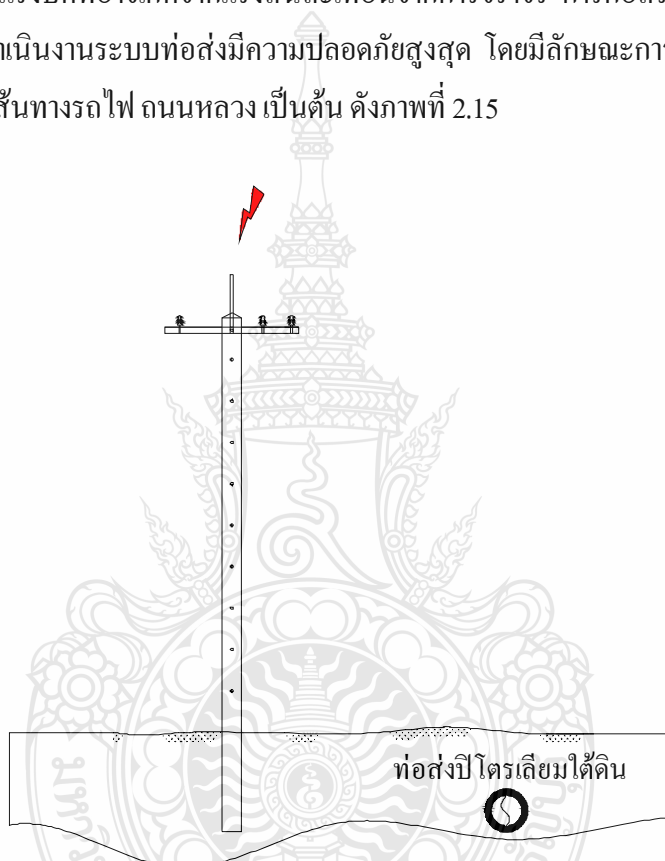
ท่อส่งปิโตรเลียมที่ถูกฝังอยู่ใต้ดินย่อมมีโอกาสผุกร่อนจากฉนวนท่อชำรุดอันอาจเกิดขึ้นจากฟ้าผ่า การก่อสร้าง การเคลื่อนตัวของดิน เป็นต้น เพื่อเป็นการป้องกันการผุกร่อนและยืดอายุการใช้งานของท่อเหล็ก อุปกรณ์ป้องกันการผุกร่อน (Cathodic Protection) จะจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่แรงดันต่ำไปยังท่อ โดยผ่านสายตัวนำไฟฟ้าเมื่อพิจารณาสายตัวนำไฟฟ้าตามคุณลักษณะทางไฟฟ้าจะประกอบด้วยค่าความต้านทาน (R) ค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าเก็บประจุ (C) ค่าความเหนี่ยวนำของสายตัวนำไฟฟ้าวงจรป้องกันการผุกร่อนจะมีความสัมพันธ์กับแรงดันเหนี่ยวนำโดยตรง โดยมีลักษณะการวิเคราะห์คล้ายกับงานวิจัยศึกษาผลกระทบสายไฟใต้ดินที่ได้รับผลกระทบจากฟ้าผ่า [3] ดังวงจรสมมูลตามภาพที่ 2.14



ภาพที่ 2.14 วงจรสมมูลสายไฟใต้ดิน [3]

## 2.9 มาตรฐานและวิธีการวางท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน

การวางท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน มีส่วนประกอบย่อยต่างๆ เช่น วาล์ว การเคลือบท่อ การทดสอบอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งต้องเป็นไปตามมาตรฐานสากล เช่น มาตรฐาน API, ASME, NACE เป็นมาตรฐานที่นิยมใช้สำหรับงานวางระบบท่อซึ่งได้กำหนดรายละเอียดการออกแบบก่อสร้าง การตรวจสอบ การรักษาความปลอดภัย ซึ่งคำนึงถึงกรณีที่เกิดวิกฤตเป็นผลจากสิ่งแวดล้อม น้ำหนักกดทับจากการจราจร น้ำหนักจากโครงสร้าง รวมถึงค่าแรงบิดที่อาจเกิดจากแรงสั่นสะเทือนจากการจราจร การก่อสร้าง และสภาพของดิน เป็นต้น เพื่อให้การดำเนินงานระบบท่อส่งมีความปลอดภัยสูงสุด โดยมีลักษณะการวางท่อยาวนานกับแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เส้นทางรถไฟ ถนนหลวง เป็นต้น ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 ลักษณะการวางท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินทางกายภาพบางส่วน [8]

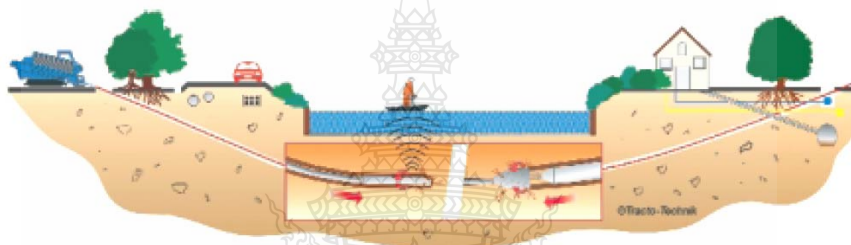
### ตารางที่ 2.7 มาตรฐานสำหรับงานวางระบบไปป์ไลน์ใต้ดินบางส่วน [19]

รหัสมาตรฐาน	รายละเอียด
API SPEC.5L	Specification For Line Pipe
API SPEC.5LX	Specification For High Test Line Pipe
NACE RP-01-69	Controls of External Corrosion on Underground And Submerged Metallic Pipeline Systems (Cathodic Protection)

การวางท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินถึงแม้ว่าจะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการวางทอบนผิวดินโดยทั่วไป ซึ่งเมื่อพิจารณาเหตุผลทางด้านความปลอดภัยนั้นย่อมเกิดความปลอดภัย ความน่าเชื่อถือสูงสุด ซึ่งในการวางท่อใต้ดินนั้นจะกล่าวถึงสามวิธีที่ได้รับความนิยม [19]

### 2.9.1 การวางท่อโดยการเจาะท่อลอด (Horizontal Direction Drilled Crossings)

การวางท่อโดยวิธีการเจาะท่อลอด เป็นการวางท่อแบบไม่เปิดหน้าดินโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Horizontal Directional Drilling Machine (HDD) นิยมใช้สำหรับการเป็นการวางท่อผ่านสิ่งกีดขวางเช่น แม่น้ำ ถนน พื้นที่ที่ไม่สามารถขุดเปิดหน้าดินได้ เป็นต้น การวางท่อโดยการเจาะท่อลอดจึงเป็นวิธีการวางท่อเพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการขุดเปิด



ภาพที่ 2.16 การวางท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินโดยการเจาะท่อลอด [19]

### 2.9.2 การวางท่อโดยการดันท่อลอด (Boring/Jacking)

การวางท่อส่งปิโตรเลียมโดยการดันท่อลอด จะใช้เพื่อลดผลกระทบสิ่งแวดล้อม เช่น สิ่งปลูกสร้างที่กีดขวางแนวการวางท่อๆ แหล่งน้ำ ถนน เป็นต้น เพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นจากการขุดเปิดหน้าดินจึงเหมาะสำหรับการวางท่อช่วงสั้นๆ โดยการขุดบ่อส่งท่อและบ่อรับท่อมีระดับความลึกประมาณ 4-5 เมตร จากผิวดิน



ภาพที่ 2.17 การวางท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน โดยการดันท่อลอด [19]

### 2.9.3 การวางท่อโดยการเปิดผิวดิน (Open-Cut)

เป็นการขุดเปิดหน้าดินบริเวณที่จะทำการวางท่อส่งปีโตรเลียมโดยมีความลึกจากผิวดินประมาณ 1.5 เมตรสามารถดำเนินการในพื้นที่ทั่วไปเช่นพื้นที่เกษตรกรรม การวางท่อส่วนใหญ่จะใช้วิธีการขุดเปิดหน้าดินในแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เส้นทางรถไฟเป็นต้น



ภาพที่ 2.18 การวางท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินโดยการเปิดผิวดิน [21]

## 2.10 ย่านการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดิน

### 2.10.1 ย่านป้องกันฟ้าผ่า [22]

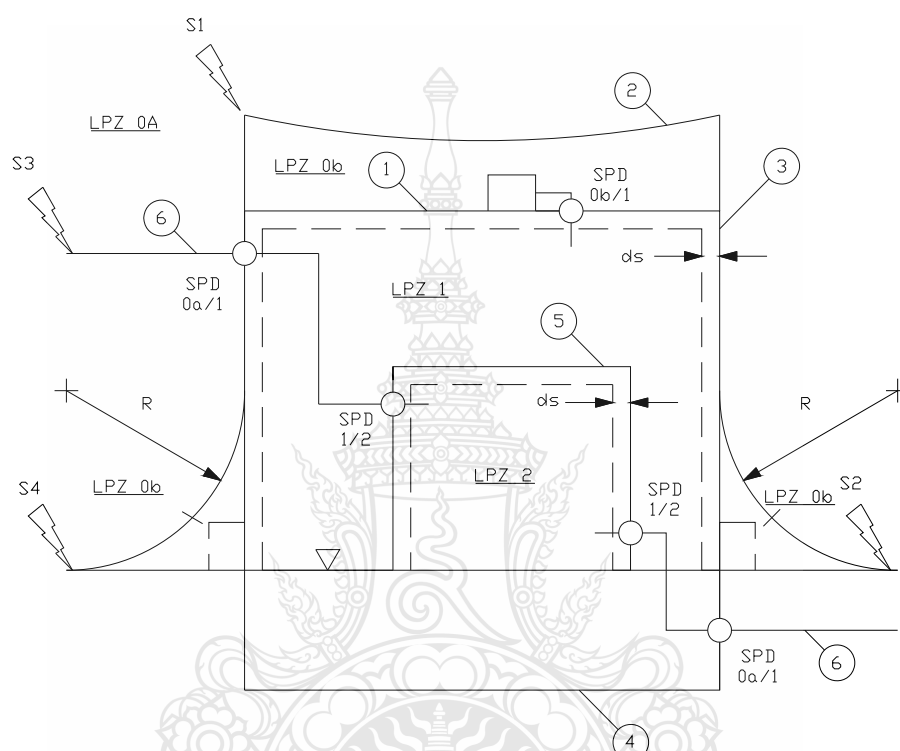
จากมาตรฐาน IEC 62305-1 ได้กำหนดย่านการป้องกันฟ้าผ่าออกเป็นย่านต่างๆ ซึ่งในแต่ละย่านการป้องกันจะมีการต่อประสานเพื่อเป็นการลดทอนศักย์ไฟฟ้าในแต่ละย่านการป้องกัน โดยมาตรฐานดังกล่าวยังได้กล่าวถึงย่านการป้องกันใต้ผิวดินซึ่งสอดคล้องกับการป้องกันระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดิน โดยที่อุปกรณ์ส่วนใหญ่จะอยู่ในใต้ดิน การกำหนดย่านการป้องกันต่างๆ จะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันเสร็จให้เหมาะสมกับขนาดของเสร็จที่ผ่านเข้ามาในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จะป้องกัน การแบ่งย่านป้องกันหรือโซนการป้องกันนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 โซนดังนี้

LPZ 0A คือ โซนที่ถูกฟ้าผ่าโดยตรง เป็นบริเวณที่ได้รับกระแสฟ้าผ่าและสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด

LPZ 0B คือ โซนที่ไม่ถูกฟ้าผ่าโดยตรง เป็นบริเวณที่ได้รับผลของฟ้าผ่าบางส่วนหรือจากการเหนี่ยวนำ ยังคงมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุด

LPZ 1 คือ โชนที่ไม่ถูกฟ้าผ่าโดยตรง เป็นบริเวณที่ได้รับผลของฟ้าผ่าบางส่วนหรือจากการเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกลดทอนลง

LPZ 2 คือ โชนที่ไม่ถูกฟ้าผ่าโดยตรง เป็นบริเวณที่ได้รับผลของฟ้าผ่าจากการเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าถูกลดทอน

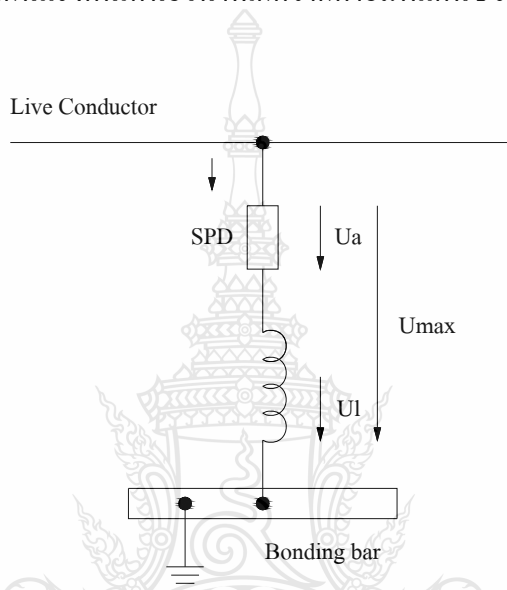


- |   |   |
|---|---|
| 1 สิ่งปลูกสร้าง (กำบังของ LPZ 1)            | S1 วาบฟ้าผ่าลงสิ่งปลูกสร้าง                           |
| 2 ระบบตัวนำล่อฟ้า                           | S2 วาบฟ้าผ่าใกล้สิ่งปลูกสร้าง                         |
| 3 ระบบตัวนำลงดิน                            | S3 วาบฟ้าผ่าลงระบบสาธารณูปโภคที่ต่อกับสิ่งปลูกสร้าง   |
| 4 ระบบรากสายดิน                             | S4 วาบฟ้าผ่าใกล้ระบบสาธารณูปโภคที่ต่อกับสิ่งปลูกสร้าง |
| 5 ห้อง (กำบังของ LPZ 2)                     | R รัศมีทรงกลมกลิ้ง                                    |
| 6 ระบบสาธารณูปโภคที่ต่อกับสิ่งปลูกสร้าง     | ds ระยะห่างปลอดภัยจากสนามแม่เหล็กที่สูงเกิน           |
| ∇ ระดับพื้นดิน                              |   |
| ○ การประสานให้สัณฐานโดยอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ |   |

ภาพที่ 2.19 โชนการป้องกันฟ้าผ่า [22]

### 2.10.2 ตำแหน่งอุปกรณ์ป้องกันลัดวงจร

การติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรทางไฟฟ้าควรคำนึงและพิจารณาย่านป้องกันฟ้าผ่าตามมาตรฐาน IEC 62305-1 ตามภาพที่ 2.20 ต่อประสานเข้าด้วยกับระบบกราวด์หรือสายตัวนำลงดิน เพื่อให้กระแสฟ้าผ่าถูกถ่ายเทลงสู่ระบบบรากสายดินที่รอยต่อระหว่างย่านและเพื่อให้การป้องกันได้ประสิทธิภาพสูงสุด สายเคเบิลที่ใช้ต่อเข้ากับอุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรควรมีระยะความยาวที่สั้นเท่าที่จะสามารถกระทำได้ เพื่อป้องกันแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำลงดิน



โดยที่

- $U_a$  = จุดตัดแรงดันของ SPD  
 $U_1$  = แรงดันเหนี่ยวนำ  
 $U_{max}$  = แรงดันสูงสุดระหว่างสายตัวนำกับจุดอ้างอิง

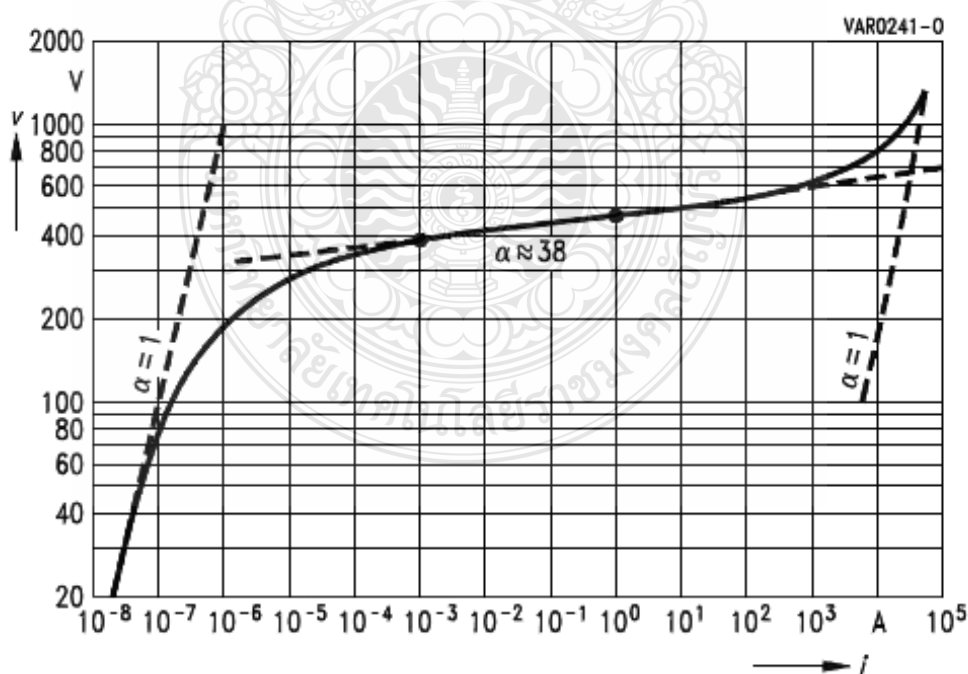
ภาพที่ 2.20 แรงดันลัดวงจรกับจุดอ้างอิง [22]

### 2.10.3 อุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรทางไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ

อุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรทางไฟฟ้านั้นมีหลายชนิดให้พิจารณาเลือกใช้ การเลือกใช้งานต้องมีความสอดคล้องกับมาตรฐาน IEC 62305-1 ที่กล่าวถึง โชนการป้องกัน พิกัดแรงดันต่ำสุด พิกัดการทนกระแสสูงสุดที่จะนำมาป้องกันอุปกรณ์ให้มีความปลอดภัยจากฟ้าผ่า ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 2 ชนิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ดังนี้

ก) อุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรชนิด Air Spark Gap เป็นอุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรแบบ Lightning Current Arresters มีความสามารถรับกระแสฟ้าผ่าจากย่าน LPZ-0B และ LPZ-1 มีความสามารถดับอาร์คที่เกิดจาก Main Follow Current ของระบบได้ ช่วยลดแรงดันเกินที่เกิดจากลัดวงจรให้เหลือน้อยลง ในขณะที่อุปกรณ์ป้องกันดังกล่าวทำงานจะมีกระแสบางส่วนจากระบบไฟฟ้าไหลลงดิน ซึ่งถ้าปล่อยให้กระแสไหลเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการลัดวงจร เซอร์กิตเบรกเกอร์ในระบบไฟฟ้าที่เป็นตัวควบคุมอาจจะทริปได้ ดังนั้นการออกแบบที่ดีจึงจำเป็นต้องควบคุม Spark Gap ให้สามารถดับอาร์คได้ในระดับหนึ่งโดยฟิวส์ป้องกัน [22]

ข) อุปกรณ์ป้องกันลัดวงจรชนิด Metal Oxide Varistor (MOV) เป็นกัปดักลัดวงจรชนิดที่ไม่มีช่องว่างอากาศ ทำหน้าที่เป็นกัปดักแรงดันไฟฟ้าไม่ให้เกินค่าความปลอดภัยของอุปกรณ์ที่จะป้องกันมีความตอบสนองต่อแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่สูงในช่วงเวลาสั้นได้เร็ว โดยจะรับแรงดันลัดวงจรย่าน LPZ-1 และ LPZ-2 [22] เป็นตัวต้านทานที่มีคุณสมบัติพิเศษโดยมีค่าความต้านทาน 2 สถานะคือค่าความต้านทานสูงมากที่เมื่อความต่างศักย์ต่ำและค่าความต้านทานต่ำมากที่ค่าความต่างศักย์สูง ซึ่งในสภาวะปกติจะมีค่าความต้านทานสูงมากมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสแบบไม่เป็นเชิงเส้น [23] สามารถประมาณค่าได้ตามสมการที่ 2.17 โดยความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า (VI Curve) ได้แสดงเป็นตัวอย่างดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 คุณลักษณะแรงดันและกระแสของกัปดักลัดวงจร [24]

$$I = KV^\alpha \quad (2.17)$$

$I$	=	กระแส (แอมแปร์)
$K$	=	ค่าคงที่
$V$	=	แรงดัน (โวลต์)
$\alpha$	=	ค่าคงที่ความไม่เป็นเชิงเส้น (ปกติมีค่าระหว่าง 10 – 50)

โดยที่สามารถประมาณค่า  $\alpha$  ได้จากสมการที่ 2.18 [24]

$$\alpha = (\log I_2 - \log I_1) / (\log V_2 - \log V_1) \quad (2.18)$$

## 2.11 มาตรฐานการจัดแบ่งพื้นที่อันตรายของยุโรปและอเมริกาเหนือ

พื้นที่อันตรายถูกจัดแบ่งประเภทตามคุณสมบัติของสารไวไฟที่อาจมีใช้หรือเก็บรักษาอยู่ในพื้นที่นั้นๆ แก๊สหรือไอระเหยที่ปนอยู่ในบรรยากาศจะทำให้เกิดส่วนผสมของเชื้อเพลิงและออกซิเจนที่เหมาะสม (Ignitable Concentration) ที่จะจุดติดไฟได้ ควรหลีกเลี่ยงการติดตั้งระบบไฟฟ้าในบริเวณพื้นที่อันตรายแต่ถ้าไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในทางปฏิบัติ ผู้ออกแบบจะต้องเลือกใช้อุปกรณ์ชนิดพิเศษที่ได้มาตรฐานการป้องกันการระเบิด (Explosion Proof: Ex) เพื่อใช้กับพื้นที่อันตรายที่มีการจัดแบ่งประเภทไวไฟตามมาตรฐาน [25]

นอกจากคุณสมบัติการป้องกันการแรงดันเกินชั่วขณะทางไฟฟ้าแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงและพิจารณาเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดความปลอดภัยในพื้นที่ที่อาจมีไอระเหยของสารไวไฟ การเลือกอุปกรณ์ป้องกันต้องมีความสอดคล้องและเหมาะสมกับพื้นที่อันตราย เมื่อจำเป็นที่จะติดอุปกรณ์ป้องกันเสร็จทางไฟฟ้าในพื้นที่อันตราย ควรพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ชนิดพิเศษ ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การจัดแบ่งประเภทของพื้นที่ที่มีสารไวไฟของยุโรปและอเมริกา [25]

มาตรฐาน	มีแก๊สไวไฟอยู่เป็นประจำ	มีแก๊สไวไฟอยู่ในสภาวะปกติ	มีแก๊สไวไฟอยู่ในสภาวะไม่ปกติ
IEC / CENELEC	Zone 0	Zone 1	Zone 2
NEC 500	Class I: Division 1		Class I: Division 2
NEC 505	Zone 0	Zone 1	Zone 2



ตารางที่ 2.9 การเปรียบเทียบมาตรฐานการจัดแบ่งกลุ่มสารไวไฟของยุโรปและอเมริกา [25]

Typical Material	มาตรฐาน IEC และ CENELEC	มาตรฐาน NEC 500 และ CEC
Acetylene	Group IIC	Class I / Group A
Hydrogen	Group IIC	Class I / Group B
Ethylene	Group IIB	Class I / Group C
Propane	Group IIA	Class I / Group D
Methane	Group I	Gaseous Mines
Metal Dust	-	Class II / Group E
Coal Dust	-	Class II / Group F
Grain Dust	-	Class II / Group G
Fibers	-	Class III

### 2.11.1 ความหมายของพื้นที่อันตราย [25]

พื้นที่อันตรายโซน 0 (Class I: Division 1) หมายถึงพื้นที่ที่มีไอแก๊สหรือไอระเหยผสมอยู่ในอากาศด้วยความเข้มข้นที่เหมาะสมสามารถจุดติดไฟได้ อยู่เป็นประจำหรือเป็นช่วงเวลานาน เช่น

- ก) พื้นที่ภายในถังบรรจุสารไวไฟ
- ข) พื้นที่ใกล้ช่องเปิดของถังบรรจุ

ในพื้นที่โซน 0 มีโอกาสที่จะมีความเข้มข้นของไอระเหยของสารอันตรายสูงเกินกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ของค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ของแก๊สหรือไอระเหยขั้นต่ำที่ผสมกับอากาศจนเกิดเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมอาจทำให้เกิดการติดไฟได้ (Lower Explosive Limit: LEL) ในภาวะปกติมากกว่า 1,000 ชั่วโมงต่อปี

พื้นที่อันตรายโซน 1 (Class I: Division 1) หมายถึงพื้นที่ที่มีไอแก๊สหรือไอระเหยผสมอยู่ในอากาศด้วยความเข้มข้นที่เหมาะสมเพียงพอต่อการจุดติดไฟได้ ในระหว่างที่มีการทำงานที่ปกติของอุปกรณ์ หรือช่วงเวลาที่มีการซ่อมบำรุงรวมถึงช่วงที่มีความผิดพลาดในกระบวนการทำงาน เช่น

- ก) บริเวณรอบช่องเปิดของถังบรรจุ
- ข) บริเวณบริเวณใกล้กับชิลของปั๊ม
- ค) จุดเปลี่ยนถ่ายสารไวไฟ
- ง) บริเวณที่มีการบรรจุแก๊ส
- จ) บริเวณที่มีการพ่นสี

ฉ) ห้องที่มีการใช้สารไวไฟที่ไม่มีการระบายอากาศที่เหมาะสม

พื้นที่ในโซน 1 จะมีโอกาสที่จะมีความเข้มข้นของไอระเหยของสารอันตรายเกินกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ของค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ของแก๊สหรือไอระเหยขั้นต่ำที่ผสมกับอากาศจนเกิดเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการติดไฟได้ (Lower Explosive Limit: LEL) ของสารนั้นในภาวะปกติ ระหว่าง 10 ถึง 1,000 ชั่วโมงต่อปี

พื้นที่อันตรายโซน 2 (Class I: Division 2) หมายถึงพื้นที่ที่มีไอแก๊สหรือไอระเหยผสมอยู่ในอากาศด้วยความเข้มข้นที่เหมาะสมเพียงพอต่อการจุดติดไฟได้ ในช่วงเวลาสั้นๆ ตัวอย่างของพื้นที่ในลักษณะนี้ เช่น

- ก) พื้นที่ที่สามารถเกิดการรั่วไหลของไอแก๊สหรือสารไวไฟเนื่องจากการเกิดอุบัติเหตุ
- ข) พื้นที่ที่เก็บถังบรรจุสารไวไฟที่อาจเกิดมีรอยแตกรั่วของถังบรรจุ
- ค) พื้นที่ที่มีการใช้สารไวไฟและไม่มีรั่วไหลของสารไวไฟออกมา โดยที่ขั้นตอนการปฏิบัติงานตามปกติ
- ง) พื้นที่ที่มีส่งถ่ายของสารไวไฟทางท่อและอาจเกิดการรั่วไหลเนื่องจากความบกพร่องของข้อต่อหรือวาล์ว
- จ) พื้นที่ที่อยู่ติดกับพื้นที่ในโซน 1

พื้นที่ในโซน 2 จะมีโอกาสที่จะมีความเข้มข้นของไอระเหยของสารอันตรายเกินกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ของค่าปริมาณเปอร์เซ็นต์ของแก๊สหรือไอระเหยขั้นต่ำที่ผสมกับอากาศจนเกิดเป็นส่วนผสมที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการติดไฟได้ (Lower Explosive Limit: LEL) ของสารนั้นในภาวะปกติ น้อยกว่า 10 ชั่วโมงต่อปี

### 2.11.2 มาตรฐานอุปกรณ์ป้องกันการระเบิด

วิธีการออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าและส่วนประกอบในการติดตั้งระบบไฟฟ้าที่สามารถป้องกันการระเบิดเกิดจากแนวคิดพื้นฐานที่ว่า การเกิดเพลิงไหม้จะต้องมีองค์ประกอบ 3 อย่างคือสารไวไฟปริมาณมากพอ ออกซิเจน และแหล่งจุดติดไฟ ดังนั้นวิธีการป้องกันการระเบิดจึงใช้แนวคิดพื้นฐานในการป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนสูงที่ผิวเครื่องห่อหุ้มหรือเกิดประกายไฟได้ แต่ถ้าเกิดมีประกายไฟขึ้นภายในเครื่องห่อหุ้มก็จะไม่ทำให้เกิดไฟไหม้ลุกลามออกสู่ภายนอกได้ ดังนั้นอุปกรณ์ไฟฟ้าถือเป็นแหล่งกำเนิดประกายไฟและเป็นตัวจุดไฟในสภาวะที่ผิดปกติ ซึ่งอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในพื้นที่อันตรายควรพิจารณาชนิดของการป้องกันการระเบิดตามมาตรฐาน [25] ดังตารางที่ 2.10 โดยแบ่งตามพื้นที่อันตรายและเทคนิคการป้องกัน ดังนั้นอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จทางไฟฟ้าเมื่อจำเป็นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 2.10 มาตรฐานการใช้เทคนิคป้องกันการระเบิดตามมาตรฐานของ IEC และ NEC [25]

เทคนิคการป้องกันการระเบิด	รหัสมาตรฐาน	พื้นที่อันตรายที่ใช้ได้	
		มาตรฐาน IEC	มาตรฐาน NEC
Flameproof	d	Zone 1 และ 2	Division 1 หรือ 2
Intrinsically Safe	ia	Zone 0, 1 และ 2	Division 1 หรือ 2
Intrinsically Safe	ib	Zone 1 และ 2	Division 2
Purge or Pressurization	p	Zone 1 และ 2	Division 1 หรือ 2
Increased Safety	e	Zone 1 และ 2	Division 2
Immersed in Oil	o	Zone 1 และ 2	Division 2
Filled with Powder / Sand	q	Zone 1 และ 2	Division 2
Encapsulated / Molding	m	Zone 1 และ 2	Division 2
Non-Sparking / Nonincendive	n	Zone 2	Division 2

## 2.12 การใช้งานโปรแกรม ATP-EMTP

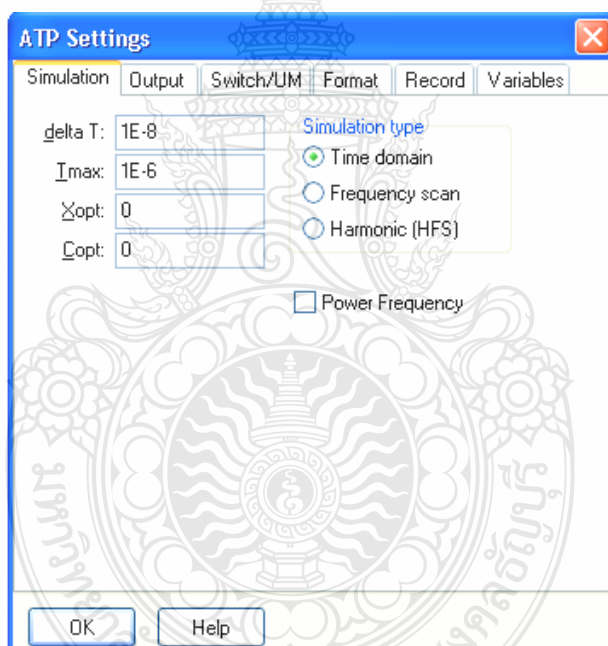
โปรแกรม ATP-EMTP เป็นโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการจำลองเหตุการณ์สภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้ากำลังเชิงเวลา (Time Domain Analysis) เป็นการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังที่ได้ผลตอบสนองของแรงดันหรือกระแสเป็นขนาดในแต่ละช่วงเวลา การวิเคราะห์ในลักษณะดังกล่าวเหมาะสมกับการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดหรืออยู่ในสภาวะชั่วคราว เช่น การสับปลด (Switching Operation) การเกิดความผิดปกติ (Fault) หรือการรบกวนภายนอกอื่นๆ เช่น ไฟฟ้า ซึ่งเป็น

สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้เป็นเวอร์ชัน 2007 ซึ่งได้รับการพัฒนาช่วยให้เกิดความสะดวกในการใช้งาน โดยมีเครื่องมือให้เลือกใช้หลากหลาย เพียงใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องให้ถูกต้องและครบถ้วน ให้ผลการคำนวณถูกต้อง ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการใช้งานเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเท่านั้น

### 2.12.1 การตั้งค่าข้อมูลโปรแกรม

ก่อนที่จะให้โปรแกรม ATP-EMTP ทำการคำนวณและจำลองเหตุการณ์ตามวงจรสมมูลที่ได้กำหนดไว้แล้วนั้นต้องกำหนดค่าเวลาการคำนวณก่อนเสมอเพื่อให้ผลตอบสนองทางด้านการคำนวณและการพล็อตกราฟมีความละเอียดสูง สามารถปรับตั้งค่าได้ที่เมนู “ATP” และเลือกเมนูย่อย “Setting” โดยมี 2 ค่าที่ต้องปรับตั้งค่า ดังนี้

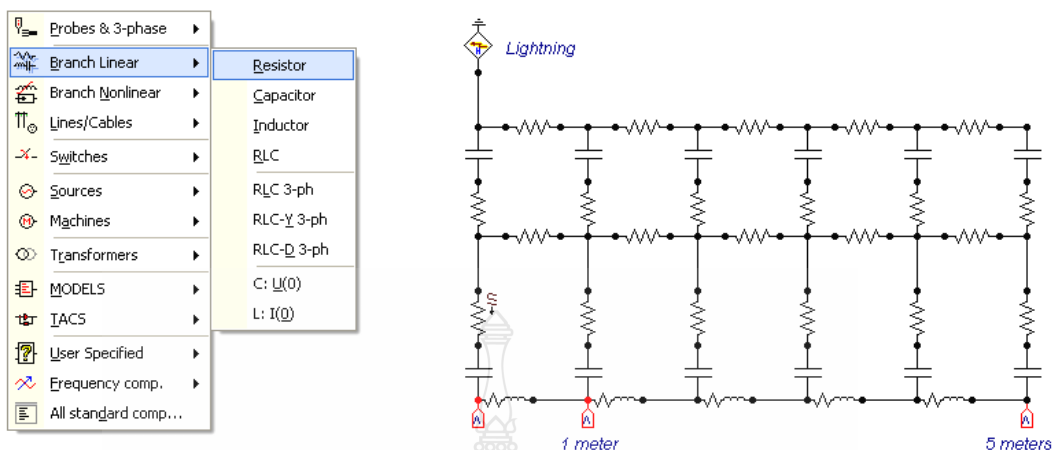
โดยที่	
$\Delta T$	= ช่วงเวลาที่โปรแกรมใช้ในการคำนวณมีหน่วยเป็นวินาที (s) ค่าที่กำหนดสำหรับการคำนวณ เท่ากับ $1E-8$ ( $1 \times 10^{-8}$ ) วินาที
$T_{max}$	= เวลาที่สิ้นสุดการคำนวณมีหน่วยเป็นวินาที (s) ค่าที่กำหนดสำหรับรูปคลื่นกระแส เท่ากับ $1E-6$ ( $1 \times 10^{-6}$ ) วินาที
$X_{opt}$	= “0” ค่าความเหนี่ยวนำ (L) จะมีหน่วยเป็นมิลลิเฮนรี (mH) “1” ค่าความเหนี่ยวนำ (L) จะมีหน่วยเป็นโอห์ม ( $\Omega$ )
$C_{opt}$	= “0” ค่าเก็บประจุจะมีหน่วยเป็นไมโครฟาราด (uF) “1” ค่าเก็บประจุจะมีหน่วยเป็นไมโครโม (uMho)
$Freq$	= ความถี่ของระบบ (Hz)



ภาพที่ 2.22 การปรับตั้งค่าโปรแกรม ATP-EMTP

### 2.12.2 การเขียนวงจรจำลอง ATP-EMTP

เริ่มต้นจากคลิกขวาที่เมาส์ในพื้นที่ว่างของหน้าต่าง (Circuit Window) จะปรากฏสัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าต่างๆ ที่ต้องการเช่น ต้องการเลือกใช้อุปกรณ์ RLC เพื่อสร้างวงจรก็สามารถคลิกขวาเลือก “Branch Linear” และเลือก “RLC” เพื่อใส่ค่าต่อไป



ภาพที่ 2.23 การเขียนวงจรจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP

### 2.12.3 แหล่งกำเนิดฟ้าผ่า

แหล่งกำเนิดฟ้าผ่า Heidler Type 15 มีคุณสมบัติของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าต่างๆ เพียงพอกับงานวิจัยสามารถแก้ไขเปลี่ยนแปลงได้ง่าย เลือกใช้โดยคลิกขวาที่เมาส์ในพื้นที่ว่างของหน้าต่าง (Circuit Window) จะปรากฏสัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าต่างๆ ให้เลือกที่ “Sources” และเลือก “Heidler Type 15” ดับเบิลคลิกที่เมาส์ด้านซ้ายเพื่อใส่ค่าโดยพารามิเตอร์ที่ต้องปรับตั้งดังภาพที่ 2.24

Component: HEIDLER

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Ampere	150.150	HEI	1	
T <sub>f</sub>	s	1.9E-5			
tau	s	0.000465			
n		10			
T <sub>start</sub>	s	0			
T <sub>stop</sub>	s	1000			

Copy Paste entire data grid Order: 0 Label:

Comment:

Type of source  
 Current  Voltage  
 Hide  Lock

Edit definitions OK Cancel Help

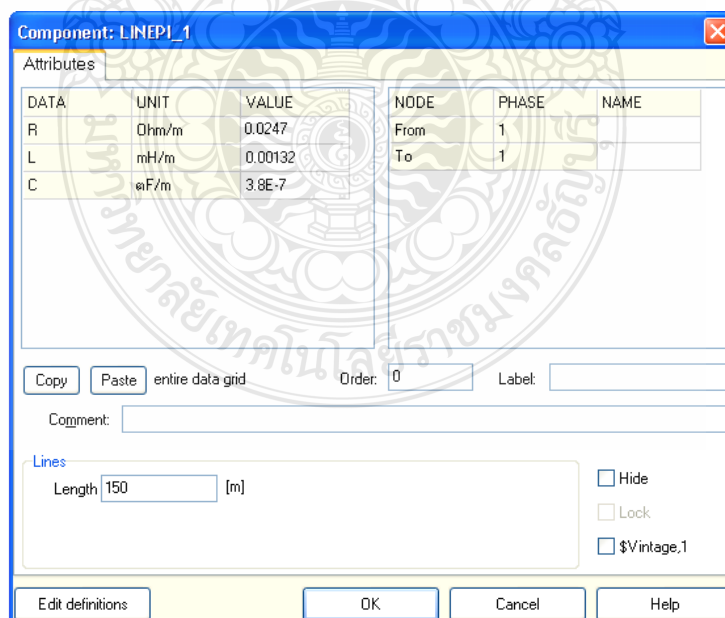
ภาพที่ 2.24 การกำหนดค่าพารามิเตอร์แหล่งกำเนิดฟ้าผ่าของโปรแกรม ATP-EMTP

โดยที่

$Amplitude$	=	ขนาดของกระแสมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)
$T_f$	=	ช่วงเวลาหน้าคลื่นมีหน่วยเป็นวินาที (s)
$\tau$	=	ช่วงเวลาถึงครึ่งหนึ่งของค่ายอดมีหน่วยเป็นวินาที (s)
$n$	=	ค่าตัวประกอบความชันของกระแส
$T_{start}$	=	เวลาเริ่มต้นของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวินาที (s)
$T_{stop}$	=	เวลาสิ้นสุดของแหล่งกำเนิดไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวินาที (s)

#### 2.12.4 สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อน

การเลือกใช้งานแบบจำลองสายไฟฟ้าของโปรแกรม ATP-EMTP สามารถเลือกได้หลายแบบด้วยกัน ซึ่งในที่นี้จะขอกล่าวถึงการใช้งานแบบจำลองสายไฟฟ้าที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยเท่านั้น ซึ่งสามารถเลือกใช้ โดยคลิกขวาที่เมาส์ในพื้นที่ว่างของหน้าต่าง (Circuit Window) เลือก “Lines/Cables” เลือก “Lumped” เลือก “RLC Pi-Equiv” และเลือก “1 Phase” ดับเบิลคลิกที่เมาส์ด้านซ้ายเพื่อใส่ค่าโดยพารามิเตอร์ของสายไฟฟ้าต่อหน่วยความยาวเมตร ประกอบด้วยค่าความต้านทานของสาย (R) ค่าความเหนี่ยวนำของสาย (L) ค่าเก็บประจุของสาย (C) และกำหนดความยาวสายที่ต้องการ หลังจากนั้นกดปุ่ม ‘OK’ ดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สายไฟฟ้าของโปรแกรม ATP-EMTP

โดยที่

- $R$  = ค่าความต้านทานสายไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โอห์มต่อเมตร (Ohm/m)  
 $L$  = ค่าความเหนี่ยวนำของสายไฟฟ้ามีหน่วยเป็นมิลลิเฮนรีต่อเมตร (mH/m)  
 $C$  = ค่าเก็บประจุระหว่างสายสายไฟฟ้ามีหน่วยเป็นไมโครฟาราดต่อเมตร (uF/m)  
 $Length$  = ความยาวสายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่ออุปกรณ์มีหน่วยเป็นเมตร (m)

### 2.12.5 รายละเอียดของกัปดักเสิร์จ MOV Type 92

การเลือกใช้งานกัปดักเสิร์จทางไฟฟ้าสามารถกระทำได้โดย คลิกขวาที่เมาส์ในพื้นที่ว่างของหน้าต่าง (Circuit Window) เลือก “Branch Nonlinear” เลือก “MOV Type 92” หลังจากนั้นดับเบิลคลิกที่เมาส์ด้านซ้ายเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์กัปดักเสิร์จ สามารถกำหนดได้โดยจะปรากฏเมนู “Attributes” เพื่อกำหนดคุณสมบัติของกัปดักเสิร์จดังภาพที่ 2.26 แล้วเลือก “Characteristic” เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของกัปดักเสิร์จดังภาพที่ 2.27 โดยที่ค่าความสัมพันธ์นั้นได้จากผู้ผลิตกัปดักเสิร์จ หลังจากกำหนดค่าเรียบร้อยแล้วกดปุ่ม “OK”

ก) เมนู Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Vref	Volts	2000	From	1	
Vflash	<0: No gap	0	To	1	
Vzero	Volts	0			
#COL		1			
#SER		1			
ErrLim	pu	0.05			

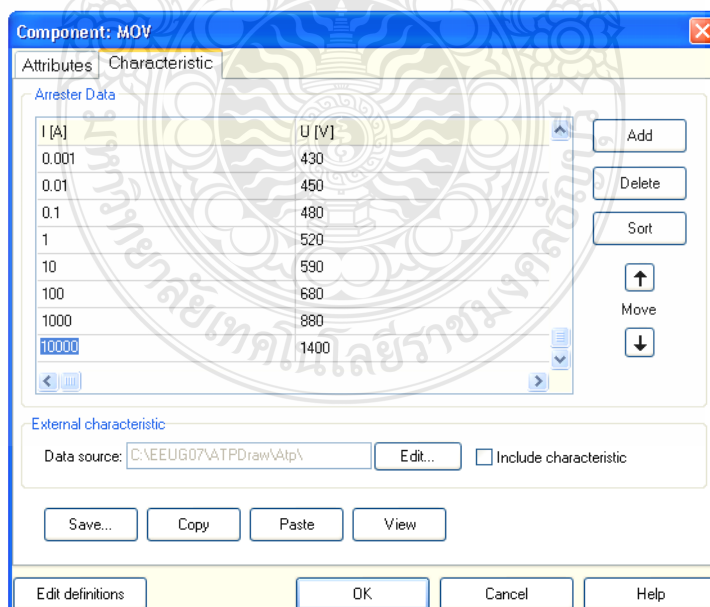
ภาพที่ 2.26 การกำหนดค่าพารามิเตอร์กัปดักเสิร์จ

โดยที่

- Vref = เป็นขนาดพิกัดแรงดันอ้างอิง
- Vflash = เป็นพิกัดแรงดันหนึ่งหน่วยที่ทำให้เกิดการ Flash Overvoltage ของแรงดันอ้างอิงแต่ในกรณีที่กัปดักเสิร์จไม่มีช่องว่าง (Gap) ให้กำหนดเป็นจำนวนที่ติดลบ “-1”
- Vzero = เป็นขนาดพิกัดของแรงดันเริ่มต้นมีหน่วยเป็น โวลต์
- COL = เป็นองค์ประกอบตัวคูณรวมในกรณีที่กัปดักเสิร์จเป็นบล็อกเดี่ยว (Single Branch of Blocks) ป้อนเป็น “1” , “0” หรือเว้นเป็นช่องว่างในกรณีต้องการบล็อกสองสาขา (Two Branches in Parallel) ป้อนเป็น “2”
- SER = เป็นจำนวนบล็อกที่ต่ออนุกรมกันในแต่ละสาขา

#### ข) เมนู Characteristic

เป็นการกำหนดขนาดพิกัดแรงดันและกระแส (VI Curve) ของกัปดักเสิร์จ โดยกดปุ่ม “Add” เพื่อกำหนดค่ากระแสของกัปดักเสิร์จในช่อง “I [A]” และค่าแรงดันเสิร์จ “U [V]” และกดปุ่ม “Add” เพิ่มค่าตามความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ หลังจากใส่ค่าทั้งหมดแล้วกดปุ่ม “OK” ดังภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 การกำหนดค่าพิกัดแรงดันและกระแสของกัปดักเสิร์จ



### 2.12.6 การรันโปรแกรม ATP

การจำลองเหตุการณ์เพื่อศึกษาสถานะชั่วคราวในระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน ตามวงจรที่ได้สร้างไว้ สามารถทำได้โดยเลือกที่เมนูบาร์ ATP และเลือกที่เมนูย่อย Run ATP จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณและจำลองเหตุการณ์ ซึ่งในขณะคำนวณจะมีหน้าจอของปรากฏดังภาพที่ 2.28

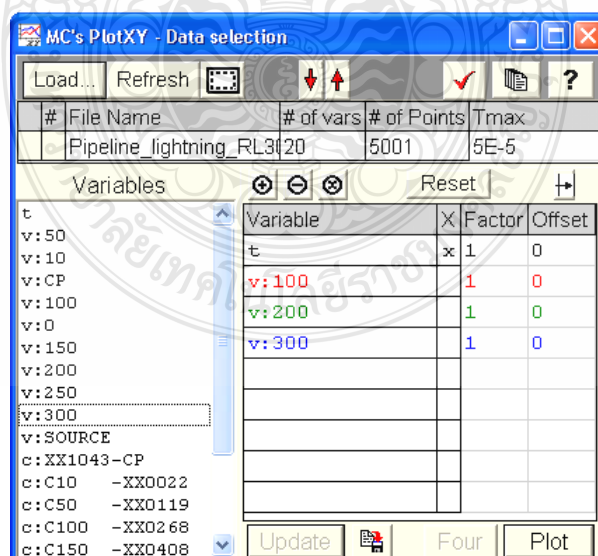
```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 4.400E-14 0 XX0501XX0424
4.4E-8 0
Series R-L-C. 1.000E+03 0.000E+00 0.000E+00 0 XX0502XX0501 1
.E3 0
Series R-L-C. 1.000E+03 0.000E+00 0.000E+00 0 XX0498XX0500 1
.E3 0
Series R-L-C. 1.000E+03 0.000E+00 0.000E+00 0 XX0499XX0502 1
.E3 0
Series R-L-C. 1.000E+03 0.000E+00 0.000E+00 0 XX0425XX0407 1
.E3 0
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 4.400E-14 0 XX0503XX0425 1
4.4E-8 0
Series R-L-C. 1.000E+03 0.000E+00 0.000E+00 0 XX0501XX0503 1
.E3 0
Series R-L-C. 1.000E+03 0.000E+00 0.000E+00 0 XX0426C60 1
.E3 0
Series R-L-C. 0.000E+00 0.000E+00 4.400E-14 0 XX0433XX0426 1
4.4E-8 0
Series R-L-C. 1.000E+03 0.000E+00 0.000E+00 0 XX0503XX0433 1
.E3 0
Blank card ending branches. IBR, NTOT = 531 459 !BLANK BRANCH
Comment card. NUMDCD = 550. !C < n 1> < n 2> < Tclose > < Top
Ide > < !e > < UF/CLOP > < type >
Permanently-closed switch used for metering. ! XX0005XX0006
MEASURING 1
  
```

ภาพที่ 2.28 การคำนวณของโปรแกรม ATP-EMTP

### 2.12.7 การแสดงผลด้วยกราฟ PlotXY

เป็นคำสั่งแสดงผลด้วยกราฟจากการรันโปรแกรม ATP โดยเลือกจากเมนูบาร์ ATP และเลือกที่เมนูย่อย Run Plot เลือกตัวแปรที่ต้องการให้แสดงผล (Variables) และเลือก Plot ดังภาพที่ 2.29



ภาพที่ 2.29 การเลือกค่าเพื่อแสดงผลด้วยกราฟ

## บทที่ 3

### การวิเคราะห์และการคำนวณ

#### 3.1 การหาขนาดกระแสไฟฟ้าส่วนที่ลงดิน

จากหัวข้อ 2.3.4 กล่าวถึงสถิติขนาดกระแสไฟฟ้าประเทศไทยมีขนาด 20 kA ในกรณีที่ฟ้าผ่าลงสิ่งปลูกสร้างกระแสไฟฟ้าจะกระจายไหลลงดินโดยมีค่าเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของค่ากระแสสูงสุดตามมาตรฐาน IEC-61312-1 ตามภาพที่ 2.5 สำหรับการวิเคราะห์ในงานวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดเป็นฟ้าผ่าลงดินโดยตรง ดังนั้นขนาดของกระแสไฟฟ้าที่ไหลลงดินที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงมีค่าเท่ากับ 20 kA

#### 3.2 การหาค่าแรงดันช่วงก้าว

จากสมมติฐานที่ตั้งต้นได้กำหนดจุดฟ้าผ่าลงดินโดยตรงโดยมีระยะห่างจากท่อใต้ดิน 5 เมตร และจากวงจรสมมูลแบบจำลองการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ของดินเป็นจำนวน 1 เมตร ต่อรวมอยู่กับวงจรสมมูลของท่อ ดังนั้นการหาค่าแรงดันช่วงก้าวจึงพิจารณาที่ระยะห่าง 4 เมตร

จากสมการที่ 2.11 
$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{S}{d(d+S)} \right]$$

โดยที่

$\Delta V =$  แรงดันช่วงก้าว

$\rho =$  1,000  $\Omega / m$

$I =$  20 kA

$S =$  1 เมตร

$d =$  4 เมตร

ดังนั้น 
$$\Delta V = \frac{20 \cdot 1000}{2\pi} \left[ \frac{1}{4(4+1)} \right]$$

$$= \frac{20 \cdot 1000}{2\pi} \cdot (0.05)$$

$$\Delta V = 159.155 \text{ kV}$$

จากสมการที่ 2.13  $R = \frac{\rho L}{A}$

โดยที่

$R$  = ค่าความต้านทานดิน

$\rho$  = 1,000  $\Omega / m$

$L$  = ค่าความยาวของดิน 1 เมตร

$A$  = พื้นที่หน้าตัดของดิน 1 ตารางเมตร

ดังนั้น  $R = \frac{1,000 * 1}{1}$

ค่าความต้านทานดิน = 1,000  $\Omega$

จากค่าแรงดันช่วงก้ำวและค่าความต้านทานดินสามารถหากระแสได้จากกฎของโอห์ม

$$I_s = \frac{\Delta V}{R} \quad (3.1)$$

โดยที่

$\Delta V$  = แรงดันช่วงก้ำว

$I_s$  = กระแสช่วงก้ำว

$$I_s = \frac{159.155 * 1,000}{1,000}$$

$$= 159.155 \text{ Amp}$$

ดังนั้นกระแส  $I_s$  เท่ากับ 159.155 แอมแปร์ จึงเป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโปรแกรม ATP-EMTP

### 3.3 พารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูล

#### 3.3.1 พารามิเตอร์ของดิน

จากหัวข้อ 2.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน ดินประกอบด้วยค่าความต้านทาน ( $R$ ) และค่าเก็บประจุของดิน ( $C$ ) สำหรับค่าพารามิเตอร์ของดินที่ใช้ในการวิเคราะห์ มีค่าดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของดิน

ค่าพารามิเตอร์ของดินที่ใช้ในงานวิจัย	
ค่าความต้านทานจำเพาะของดินกรวดแห้ง	1,000 โอห์มเมตร
ค่าเก็บประจุของดิน	221.35 พิโคฟาราดต่อเมตร

### 3.3.2 พารามิเตอร์ของฉนวนท่อ

ค่าเก็บประจุของฉนวนท่อชนิด Fusion Bonded Epoxy (FBE) ซึ่งได้จากการวัดภาคสนามด้วยเครื่องมือ LCR Meter Model BK PRECISION โดยการป้อนความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ต่อพื้นที่ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าความเก็บประจุของฉนวนท่อส่งปิโตรเลียม

ค่าเก็บประจุของฉนวนท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินชนิด Fusion Bonded Epoxy	
วัดครั้งที่	ค่าความเก็บประจุของฉนวนท่อส่งปิโตรเลียมชนิด FBE ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร (pF/cm <sup>2</sup> )
1	10.4
2	10.5
3	10.4
4	10.6
5	10.2
ค่าเฉลี่ย	10.42

จากสภาพการวัดค่าเก็บประจุของฉนวนท่อชนิด Fusion Bonded Epoxy (FBE) ภาคสนามซึ่งไม่สามารถควบคุมปัจจัยภายนอกได้ จึงได้กำหนดจุดวัดแล้วหาค่าเฉลี่ยเพื่อลดผลกระทบอันอาจเกิดจากหน้าสัมผัสในขั้นตอนการวัด โดยมีพื้นที่ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 10.42 pF/cm<sup>2</sup> ดังค่าตามตารางที่ 3.2

พื้นที่ (A) ตามสมการที่ 2.4 นั้นมีค่าต่อหน่วยตารางเมตร ซึ่งจากผลการวัดค่าเก็บประจุของฉนวนท่อที่ได้จากภาคสนามนั้นมีค่าต่อหน่วยตารางเซนติเมตร เพื่อสะดวกต่อการคำนวณยังส่วนที่เกี่ยวข้องได้นำค่าเก็บประจุของฉนวนท่อที่วัดได้มาคำนวณหาค่าเก็บประจุของฉนวนท่อต่อหน่วยตารางเมตร โดยสามารถกระทำได้ดังนี้

$$1\text{cm}^2 = 0.0001\text{m}^2$$

$$1\text{m}^2 = \frac{1}{0.0001}$$

$$= 10,000\text{cm}^2$$

$$\therefore \text{ค่าเก็บประจุ} = 10.42E^{-12} * 10,000\text{cm}^2$$

$$= 0.1042\ \mu\text{F}$$

ค่าความต้านทาน (R) ได้พิจารณาเป็นสองมิติกล่าวคือค่าความต้านทานเชิงความยาวต่อหน่วยและค่าความต้านทานเชิงความหนา จากมาตรฐาน ASTM D257 กล่าวถึงค่าความต้านทานของฉนวนที่มีค่าเท่ากับ  $3.3 \times 10^{15}$  โอห์มเซนติเมตร และเนื่องจากค่าความหนาของฉนวนที่มีค่าเท่ากับ 25 ไมโครเมตร ซึ่งได้สรุปค่าความต้านทานของฉนวนท่อ ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าความต้านทานของฉนวนท่อส่งปิโตรเลียม

ค่าความต้านทานของฉนวนท่อส่งปิโตรเลียมชนิด Fusion Bonded Epoxy (FBE)		
ค่าความต้านทานฉนวนท่อตามมาตรฐาน ASTM D257 โอห์มต่อเซนติเมตร ( $\Omega\text{-cm}$ )	ค่าความต้านทานฉนวนท่อเชิงความยาว โอห์มต่อเมตร ( $\Omega\text{-m}$ )	ค่าความต้านทานฉนวนท่อเชิงความหนา โอห์มต่อไมโครเมตร ( $\Omega\text{-um}$ )
$3.3 \times 10^{15}$	$3.3 \times 10^{17}$	$3.3 \times 10^{11}$

### 3.3.3 พารามิเตอร์ของท่อ

จากตารางที่ 2.5 เส้นผ่าศูนย์กลางท่อส่งปิโตรเลียมขนาด 14 นิ้ว มีความต้านทานเท่ากับ 5.29 ไมโครโอห์มต่อตารางฟุต ซึ่งสามารถเปลี่ยนหน่วยเป็นต่อตารางเมตรได้ดังนี้

$$1\ \text{feet}^2 = 0.09290304\ \text{m}^2$$

$$1\ \text{m}^2 = \frac{1}{0.0929}$$

$$= 10.76391042\ \text{feet}^2$$

$$R_{\text{pipe}} = 5.29E^{-6} * 10.76391042$$

$$\therefore R_{pipe} = 56.94 \mu\Omega / m^2$$

สำหรับค่าความเหนี่ยวนำของท่อส่งปิโตรเลียมโดยเฉลี่ย ได้จากการวัดภาคสนามด้วยเครื่องมือ LCR Meter Model BK PRECISION โดยการป้อนความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ผ่านท่อโลหะที่มีความยาวท่อ 1 เมตร ดังตารางที่ 3.4



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.1 การวัดค่าความเหนี่ยวนำของท่อส่งปิโตรเลียม

ภาพที่ 3.1 (ก) เป็นการเก็บข้อมูลต่างๆ ของท่ออาทิ เช่น ค่าความหนาของท่อ ค่าความยาวของท่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ เป็นต้น กำหนดจุดวัดจำนวน 5 จุดและทำความสะอาดผิวท่อเพื่อลดผลกระทบจากหน้าสัมผัส

ภาพที่ 3.1 (ข) เป็นการวัดค่าความเหนี่ยวนำของท่อด้วยเครื่องวัด LCR มิเตอร์ เนื่องด้วยค่าความเหนี่ยวนำของท่อนั้นมีค่าน้อยมากๆ ดังนั้นในการวัดจึงต้องใช้สายต่อพ่วงเพื่อขยายย่านการอ่านค่า ค่าที่อ่านได้นั้นต้องลบด้วยค่าความเหนี่ยวนำของสายต่อพ่วง ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าความเหนี่ยวนำของท่อส่งปิโตรเลียม

ค่าความเหนี่ยวนำของท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินชนิดโลหะที่ใช้ในงานวิจัย	
วัดครั้งที่	ค่าความเหนี่ยวนำ (uH/m)
1	0.450
2	0.572
3	0.554
4	0.450
5	0.450
ค่าเฉลี่ย	0.495

### 3.3.4 พารามิเตอร์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อน

สายไฟฟ้าประกอบด้วยค่าความต้านทานสาย (R) ค่าความเหนี่ยวนำ (L) และค่าเก็บประจุ (C) จากข้อมูลสายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนมีขนาด 16 ตารางมิลลิเมตร Phelps dodge PD-NYY 750 โวลต์ 70 องศาเซลเซียส วัดค่าด้วยเครื่องมือ LCR Meter Model BK PRECISION โดยการป้อนความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่อความยาวสาย 1 เมตร



ภาพที่ 3.2 การวัดค่าพารามิเตอร์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อน

การวางสายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนนั้นจะวางในลักษณะตั้งฉากกับท่อตามแนวระนาบ ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาระยะความยาวของสายอาโนด (Anode) เท่ากับ 150 เมตร และความยาวสายคาโทด (Cathode) มีค่าเท่ากับ 10 เมตร เพื่อเป็นพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรม ATP-EMTP

### ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อน

ค่าพารามิเตอร์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนขนาด 16 ตารางมิลลิเมตร Phelps dodge PD-NYY 750 โวลต์ 70 องศาเซลเซียส ที่ความยาวสาย 1 เมตร			
วัดครั้งที่	ค่าความต้านทาน (Ohm/m)	ค่าความเหนี่ยวนำ (uH/m)	ค่าเก็บประจุ (pF/m)
1	0.029	1.3	0.3
2	0.027	1.4	0.4
3	0.026	1.4	0.3
4	0.028	1.2	0.5
5	0.027	1.3	0.4
ค่าเฉลี่ย	0.0247	1.32	0.38

### 3.4 พารามิเตอร์แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า

ค่าพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าสำหรับการวิเคราะห์งานวิจัยฉบับนี้ ได้กำหนดเป็นแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่ารูปคลื่น 10/350 ไมโครวินาที โดยมีค่าพารามิเตอร์ ดังตารางที่ 3.6

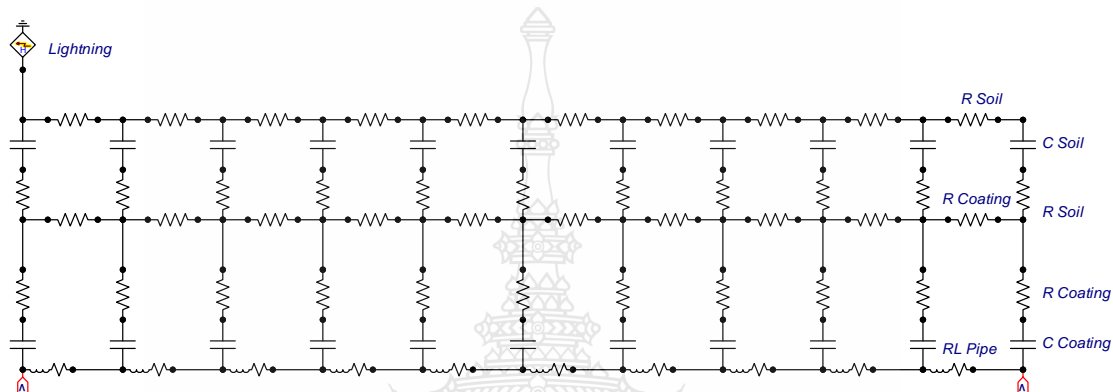
### ตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า

พารามิเตอร์แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่าโปรแกรม ATP-EMTP		
ค่าพารามิเตอร์	ฟ้าผ่าลำแรก	ฟ้าผ่าลำต่อมา
กระแสฟ้าผ่า	159.155 แอมแปร์	39.79 แอมแปร์
ค่าคงที่ทางเวลาด้านหน้าคลื่น	19.5 ไมโครวินาที	0.454 ไมโครวินาที
ค่าคงที่ทางเวลาด้านหางคลื่น	485 ไมโครวินาที	143 ไมโครวินาที
ค่าตัวประกอบความชันของกระแส	10	10
เวลาเริ่มต้น	0 วินาที	0 วินาที
เวลาสิ้นสุด	1000 วินาที	1000 วินาที

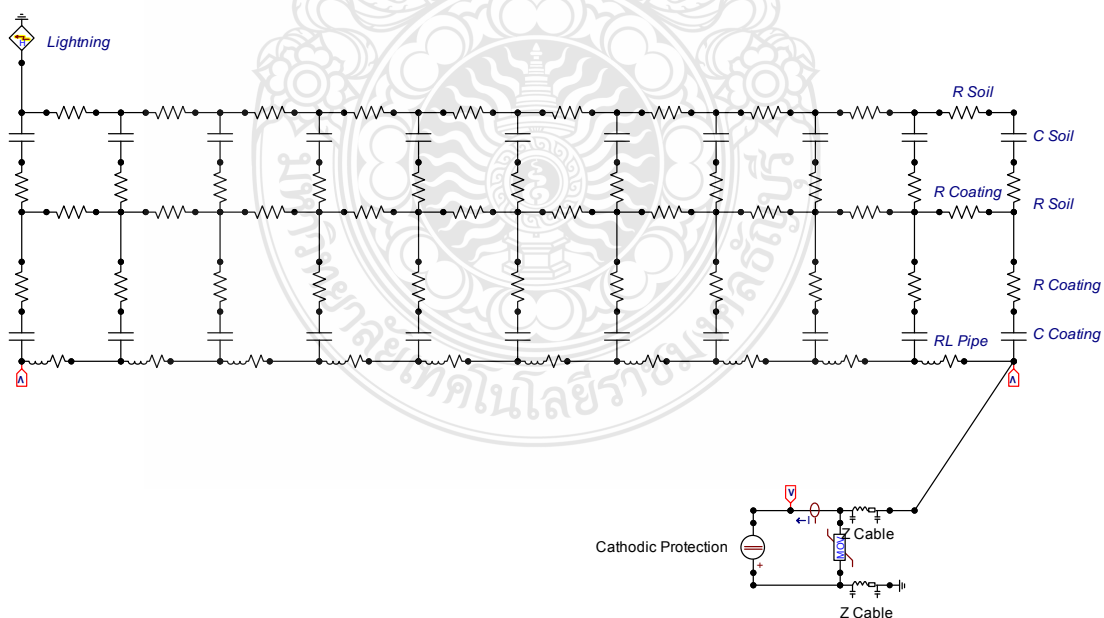


### 3.5 แบบจำลองฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน

จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กล่าวถึงข้างต้น สามารถกำหนดค่าลงในวงจรสมมูลของระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินได้โดยแบ่งการจำลองออกเป็นสามกรณี 1) พิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งปิโตรเลียม 2) พิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อส่งปิโตรเลียมร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าแรงดันป้องกันท่อสุกร่อน 3) แนวทางการป้องกันกรณีที่สอง ดังภาพที่ 3.3 ถึง 3.5



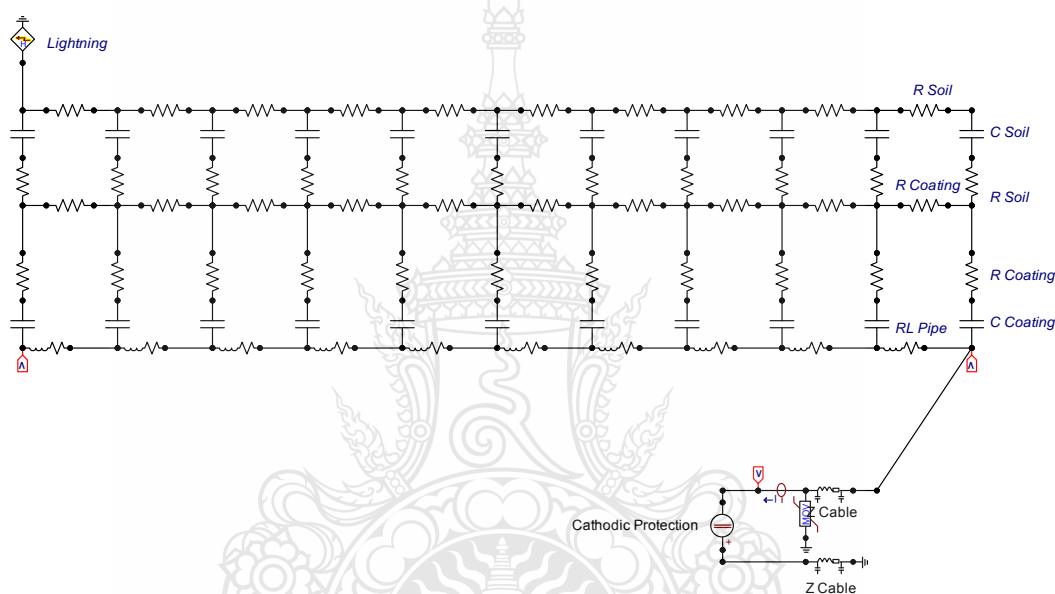
ภาพที่ 3.3 แบบจำลองกรณีพิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งปิโตรเลียม



ภาพที่ 3.4 แบบจำลองกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อส่งปิโตรเลียมร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าแรงดันป้องกันท่อสุกร่อน

จากภาพที่ 3.3 เป็นแบบจำลองฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน โดยพิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของระบบท่อ ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่าโดยมีพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.6 มีค่าอิมพีแดนซ์ของดินต่อขนานตลอดแนวท่อ และค่าอิมพีแดนซ์ของระบบท่อซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นฉนวนท่อและส่วนที่เป็นท่อโลหะ

จากภาพที่ 3.4 มีองค์ประกอบพื้นฐานเช่นเดียวกับภาพที่ 3.3 โดยเพิ่มอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนและแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงลบ 0.85 โวลต์ และจากวงจรประกอบด้วยอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าในเบื้องต้น

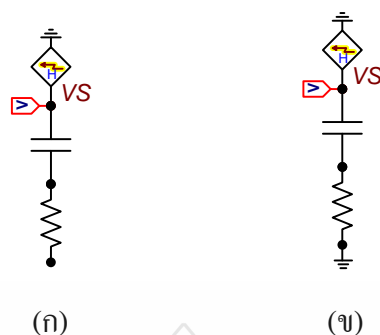


ภาพที่ 3.5 แบบจำลองแนวทางการป้องกัน

จากภาพที่ 3.5 เป็นแบบจำลองแนวทางการป้องกันแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน กรณีพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งปิโตรเลียมร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อน โดยได้พิจารณาลดค่าความยาวสายตัวนำลงดินของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าให้มีความยาวน้อยที่สุดเพื่อลดค่าแรงดันเหนี่ยวนำอันเกิดจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำลงดิน

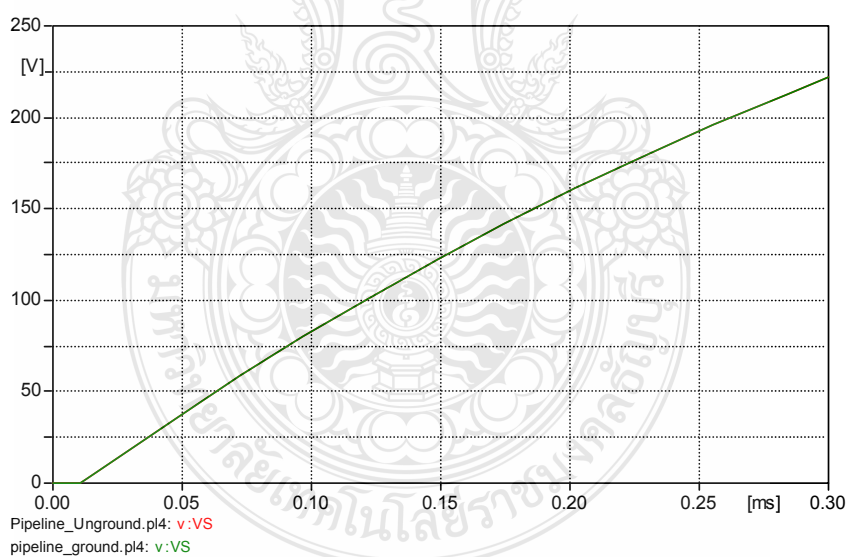
### 3.6 การคำนวณด้วยโปรแกรม ATP-EMTP

จากภาพที่ 3.6 (ก) ประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่าขนาด 1 แอมแปร์ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) ขนาด 1 ไมโครฟารัด และค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ขนาด 1 โอห์ม โดยไม่ได้ต่อลงดินเมื่อจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ตำแหน่ง Vs เท่ากับ 222.12 โวลต์ ที่เวลา 300 ไมโครวินาที



ภาพที่ 3.6 การจำลองกระแสฟ้าผ่าแบบไม่ต่อลงดินและแบบต่อลงดิน

ตามภาพที่ 3.6 (ข) มีองค์ประกอบทางไฟฟ้าเช่นเดียวกับวงจรภาพ 3.6 (ก) จากลักษณะของวงจรมีการต่อลงดินที่ตัวความต้านทาน และเมื่อจำลองด้วยกระแสฟ้าผ่าขนาด 1 แอมแปร์ ด้วยโปรแกรม ATP-EMTP พบค่าแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ตำแหน่ง Vs เท่ากับ 222.12 โวลต์ ซึ่งมีค่าเท่ากับวงจรภาพที่ 3.6 (ก) เช่นเดียวกัน



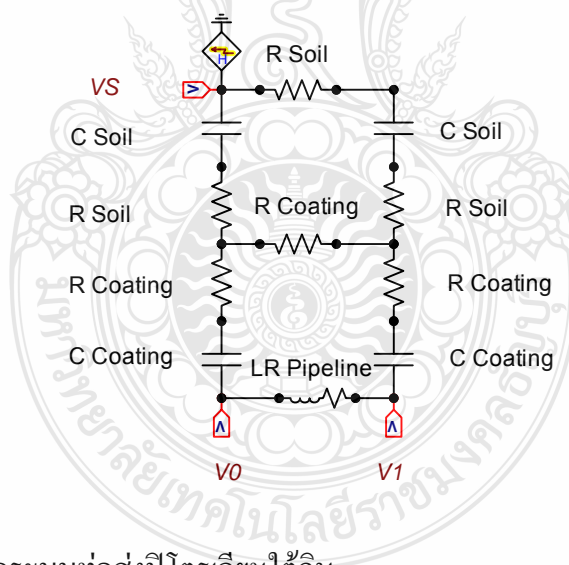
ภาพที่ 3.7 รูปคลื่นแรงดันจากการจำลองกระแสฟ้าผ่าแบบไม่ต่อลงดินและแบบต่อลงดิน

จากภาพที่ 3.7 เป็นผลการจำลองกระแสฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ตามวงจรภาพที่ 3.6 (ก) แบบไม่ต่อลงดินและวงจรภาพที่ 3.6 (ข) แบบต่อลงดิน ทั้งสองวงจรให้ค่าแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ตำแหน่ง  $V_s$  นั้นมีค่าเท่ากันจากกระแสฟ้าผ่าที่ต้องการครบวงจรที่พื้นดิน

ดังนั้นวิธีการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกันนี้ จะพิจารณาใช้หลักการทางไฟฟ้าและคณิตศาสตร์ ด้วยวงจรสมมูลที่มีการต่อลงดินเพื่อครบวงจรทางไฟฟ้า

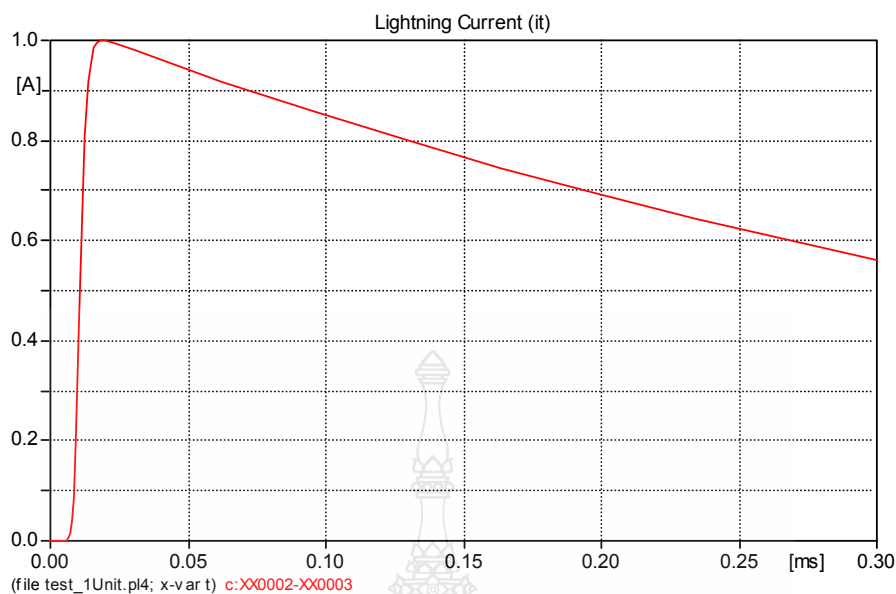
### 3.7 การคำนวณด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ความยาวท่อ 1 เมตร

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นหลัก เพื่อเปรียบเทียบผลกับการคำนวณทางคณิตศาสตร์และจำลองด้วยโปรแกรม Matlab Simulink เพื่อเป็นการทบทวน ตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองทั้งสองวิธี โดยกำหนดค่า RLC ของวงจรสมมูลมีค่าเท่ากับหนึ่งหน่วยทั้งหมดซึ่งเป็นเงื่อนไขตั้งต้น โดยจะพิจารณาค่าแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่เกิดขึ้นในระบบท่อจากค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าและค่าความต้านทานของท่อที่เป็นโลหะ ค่าแรงดันปรากฏดังกล่าวจะเป็นแรงดันที่จะสร้างผลกระทบต่อระบบท่อและระบบที่เกี่ยวข้องกัน โดยตรงเมื่อก่อนนั้นมีความยาวมากขึ้น รวมถึงเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์ห่ออกแบบการควบคุมป้องกัน การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม ATP-EMTP นั้นสามารถกระทำได้ตามที่กล่าวถึงในบทที่ 2



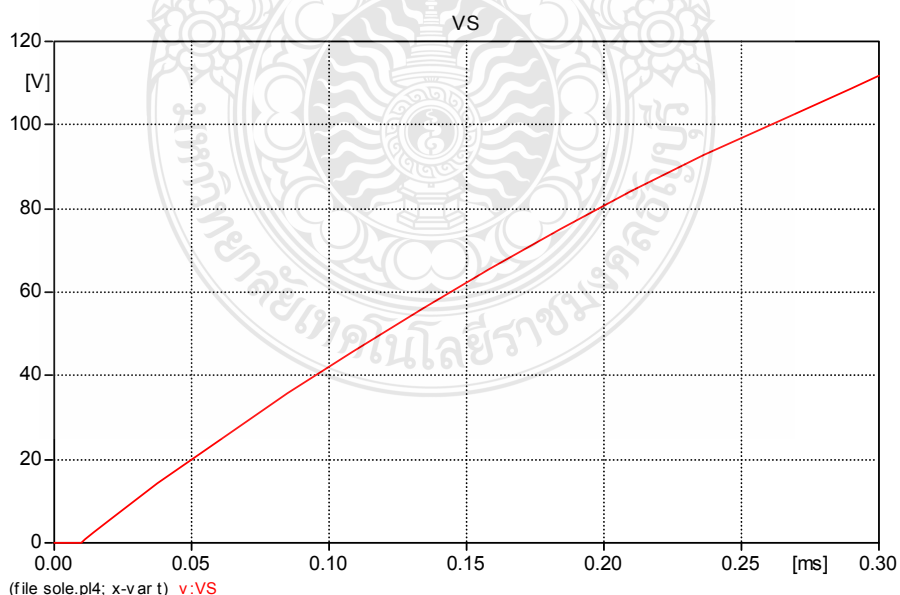
ภาพที่ 3.8 วงจรสมมูลระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน

จากภาพที่ 3.8 มีส่วนประกอบ 3 ส่วน 1) ดิน โดยดินมีค่าความต้านทานดินต่อเมตร (R) และค่าเก็บประจุของดินต่อเมตร (C) 2) ฉนวนท่อ มีค่าความต้านทานฉนวนต่อความยาว ค่าความต้านทานฉนวนต่อความหนา (R) และค่าเก็บประจุของฉนวนต่อตารางเมตร (C) 3) ท่อโลหะ ประกอบด้วยค่าความต้านทานท่อต่อความยาว (R) และค่าความเหนี่ยวนำ (L)



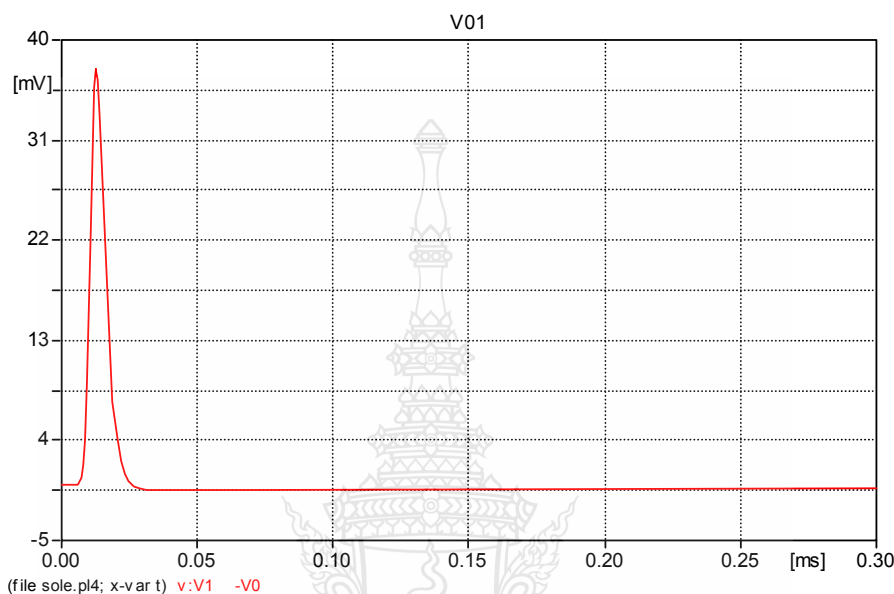
ภาพที่ 3.9 รูปคลื่นแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า 10/350 ไมโครวินาที

จากภาพที่ 3.9 เป็นการจำลองกระแสฟ้าผ่าด้วยโปรแกรม ATP-EMTP สำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินที่มีความยาวท่อ 1 เมตร โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ประกอบด้วยกระแสฟ้าผ่าขนาด 1 แอมแปร์  $R = 1$  โอห์ม  $L = 1$  ไมโครเฮนรี  $C = 1$  ไมโครฟารัด ซึ่งเป็นเงื่อนไขตั้งต้น



ภาพที่ 3.10 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า

จากภาพที่ 3.10 ที่แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ามีค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V_s$ ) ปรากฏเท่ากับ 111.62 โวลต์ ที่เวลา 300 ไมโครวินาที เป็นผลจากค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ประกอบ RLC ซึ่งเป็นไปตามกฎของ โอห์มกล่าวคือเมื่อมีแหล่งจ่ายกระแสผ่านค่าอิมพีแดนซ์ย่อมเกิดแรงดันตกคร่อม

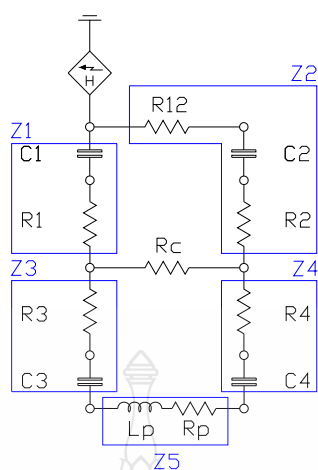


ภาพที่ 3.11 รูปคลื่นแรงดันตกคร่อมที่ส่งไปโตรเลียมใต้ดิน

จากภาพที่ 3.11 มีค่าแรงดันสูงสุดปรากฏที่ต่อระหว่างจุดเริ่มต้นของท่อกับตำแหน่งความยาวท่อที่ 1 เมตร (V01) เท่ากับ 37.2 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นผลจากค่าความเหนี่ยวนำของท่อ (L) และค่าความต้านทานของท่อ (R)

### 3.8 การคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วย Matlab Simulink ที่ความยาวท่อ 1 เมตร

Matlab Simulink เป็นโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ที่ได้รับความนิยมใช้งานวิเคราะห์ทางด้านวิศวกรรม มีเครื่องมือที่สามารถเลือกใช้ได้สะดวก ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เป็นเวอร์ชัน 7.1 โดยเขียนแบบจำลองเปรียบเทียบผลที่ได้กับโปรแกรม ATP-EMTP และเนื่องจากงานวิเคราะห์ฉบับนี้มิได้กล่าวถึงความถี่ของไฟฟ้า ดังนั้นการคำนวณหาอิมพีแดนซ์ของระบบที่ต่อความยาวหนึ่งหน่วยนั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้คุณสมบัติของการแปลงลาปลาซทรานส์ฟอร์มโดยอิมพีแดนซ์  $Resistance = R$ ,  $Inductance = sL$ ,  $Capacitance = 1/sC$  จากวงจรภาพที่ 3.12 สามารถหาอิมพีแดนซ์ของระบบได้โดยแทนค่าที่ได้จากการคำนวณลงในแบบจำลอง Matlab Simulink



ภาพที่ 3.12 วงจรสมมูลท่อนส่งปีโทรเลียมได้ดินร่วมกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= R_1 + \frac{1}{sC_1} \\
 &= \frac{R_1 \cdot sC_1 + 1}{sC_1}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$$Z_2 = (R_{12} + R_2) + \frac{1}{sC_2}$$

โดยที่

$$R_{12} = (R_{12} + R_2)$$

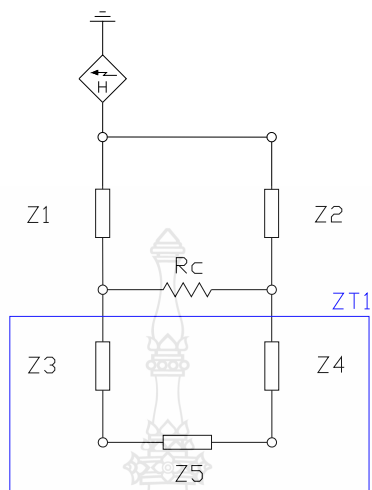
$$\therefore Z_2 = \frac{R_{12} \cdot sC_2 + 1}{sC_2} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
 Z_3 &= R_3 + \frac{1}{sC_3} \\
 &= R_3 \cdot sC_3 + \frac{1}{sC_3}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned}
 Z_4 &= R_4 + \frac{1}{sC_4} \\
 &= \frac{R_4 \cdot sC_4 + 1}{sC_4}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$Z_5 = R_p + Ls \tag{3.6}$$

### 3.8.1 วิธีหาค่าอิมพีแดนซ์ $Z_{T1}$



ภาพที่ 3.13 อิมพีแดนซ์  $Z_{T1}$

$$Z_{T1} = Z_3 + Z_4 + Z_5 \quad (3.7)$$

$$= \left( R_3 + \frac{1}{sC_3} \right) + \left( R_4 + \frac{1}{sC_4} \right) + (R_p + Ls)$$

โดยที่

$$R_{T1} = (R_3 + R_4 + R_p)$$

$$Z_{T1} = R_{T1} + \left( \frac{1}{sC_3} + \frac{1}{sC_4} \right) + Ls$$

$$= R_{T1} + \left( \frac{sC_4 + sC_3}{s^2 C_3 \cdot C_4} \right) + Ls$$

$$= R_{T1} + \frac{(C_3 + C_4)s}{s^2 C_3 \cdot C_4} + Ls$$

$$= \frac{R_{T1} \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^2 + (C_3 + C_4) \cdot s + Ls \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^2}{s^2 \cdot C_3 \cdot C_4}$$

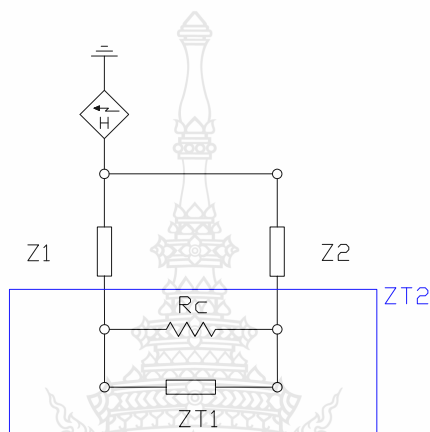
$$\therefore Z_{T1} = \frac{L \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^3 + R_{T1} \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^2 + (C_3 + C_4) \cdot s}{s^2 \cdot C_3 \cdot C_4} \quad (3.8)$$



จากสมการที่ 3.8 กำหนดค่า  $R_{T1} = 3$  โอห์ม,  $L = 1$  ไมโครเฮนรี่,  $C_3 = C_4 = 1$  ไมโครฟารัด

$$\therefore Z_{T1} = \frac{1E^{-18} \cdot s^3 + 3E^{-12} \cdot s^2 + 2E^{-6} \cdot s}{1E^{-12} \cdot s^2} \quad (3.9)$$

### 3.8.2 วิธีหาค่าอิมพีแดนซ์ $Z_{T2}$



ภาพที่ 3.14 อิมพีแดนซ์  $Z_{T2}$

$$Z_{T2} = Z_{T1} // R_C \quad (3.10)$$

$$= \left\{ \frac{\left[ \frac{L \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^3 + R_{T1} \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^2 + (C_3 + C_4) \cdot s}{C_3 \cdot C_4 \cdot s^2} \right] \cdot R_C}{\left[ \frac{L \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^3 + R_{T1} \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^2 + (C_3 + C_4) \cdot s}{C_3 \cdot C_4 \cdot s^2} \right] + R_C} \right\} \quad (3.11)$$

จากสมการที่ 3.11 หา ค.ร.น. ของส่วน

$$\text{ค.ร.น.} = \left\{ \frac{\left[ L \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^3 + R_{T1} \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^2 + (C_3 + C_4) \cdot s \right] + R_C \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^2}{C_3 \cdot C_4 \cdot s^2} \right\} \quad (3.12)$$

ดังนั้น จากสมการที่ 3.11 จึงสามารถจัดรูปสมการใหม่โดยนำ ค.ร.น. ของส่วนที่ได้จากสมการที่ 3.12 เข้าเป็นส่วนแทนแล้วคูณไขว้ดังสมการที่ 3.13

$$Z_{T2} = \left\{ \left[ \frac{L.C_3.C_4.R_C.s^3 + R_{T1}.C_3.C_4.R_C.s^2 + (C_3 + C_4).s}{s^2.C_3.C_4} \right] \cdot \left[ \frac{s^2.C_3.C_4}{L.C_3.C_4.s^3 + R_{T1}.C_3.C_4.s^2 + (C_3 + C_4).s + R_C.C_3.C_4.s^2} \right] \right\} \quad (3.13)$$

$$\therefore Z_{T2} = \frac{L.C_3.C_4.R_C.s^3 + R_{T1}.R_C.C_3.C_4.s^2 + (C_3 + C_4).R_C.s}{L.C_3.C_4.s^3 + (R_{T1} + R_C).C_3.C_4.s^2 + (C_3 + C_4).s} \quad (3.14)$$

จากสมการที่ 3.14 พบว่ามีหลายตัวแปรที่สร้างความซับซ้อนในขั้นตอนการคำนวณ สามารถกำหนดตัวแปรเพื่อลดรูปของสมการได้โดยกำหนด  $R_C = 1$  โอห์ม,  $L = 1$  ไมโครเฮนรี่  $C_3$  และ  $C_4 = 1$  ไมโครฟารัด เพื่อหาค่า  $Z_{T2}$

$$\begin{aligned} A_1 &= L.C_3.C_4.R_C & a_1 &= L.C_3.C_4 \\ &= 1E^{-18} & &= 1E^{-18} \\ A_2 &= R_{T1}.R_C.C_3.C_4 & a_2 &= (R_{T1} + R_C).C_3.C_4 \\ &= 3E^{-12} & &= 4E^{-12} \\ A_3 &= (C_3 + C_4).R_C & a_3 &= (C_3 + C_4) \\ &= 2E^{-6} & &= 2E^{-6} \end{aligned}$$

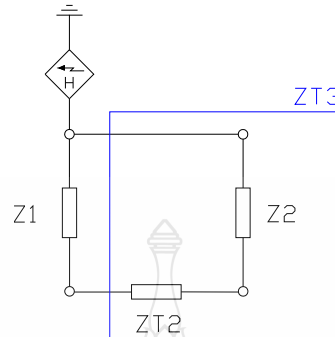
จากนั้นแทนค่าตัวแปร  $A_1, A_2, A_3, a_1, a_2, a_3$  ที่ได้ลงในสมการที่ 3.14 ซึ่งเป็นสมการที่ลดรูปแล้วสามารถนำไปใช้งานหาค่าของ  $Z_{T2}$  ได้สะดวกมากยิ่งขึ้นดังสมการที่ 3.15

$$Z_{T2} = \frac{A_1.s^3 + A_2.s^2 + A_3.s}{a_1.s^3 + a_2.s^2 + a_3.s} \quad (3.15)$$

แทนค่าตัวแปร  $A_1, A_2, A_3, a_1, a_2, a_3$  ลงในสมการที่ 3.15 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์  $Z_{T2}$

$$\therefore Z_{T2} = \frac{1E^{-18}.s^3 + 3E^{-12}.s^2 + 2E^{-6}.s}{1E^{-18}.s^3 + 4E^{-12}.s^2 + 2E^{-6}.s} \quad (3.16)$$

### 3.8.3 วิธีหาค่าอิมพีแดนซ์ $Z_{T3}$



ภาพที่ 3.15 อิมพีแดนซ์  $Z_{T3}$

$$Z_{T3} = Z_{T2} + Z_2 \quad (3.17)$$

$$Z_{T3} = \left\{ \frac{A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s}{a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s} + \frac{R_{T12} \cdot s C_2 + 1}{s C_2} \right\} \quad (3.18)$$

$$Z_{T3} = \left\{ \frac{(A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s) s C_2 + [(R_{T12} \cdot s C_2) \cdot (a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s)]}{(a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s)} + \frac{(a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s)}{(a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s)} \right\}$$

$$Z_{T3} = \left\{ \frac{A_1 \cdot C_2 \cdot s^4 + A_2 \cdot C_2 \cdot s^3 + A_3 \cdot C_2 \cdot s^2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_1 \cdot s^4 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_2 \cdot s^3 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_3 \cdot s^2}{a_1 \cdot C_2 \cdot s^4 + a_2 \cdot C_2 \cdot s^3 + a_3 \cdot C_2 \cdot s^2} + \frac{a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s}{a_1 \cdot C_2 \cdot s^4 + a_2 \cdot C_2 \cdot s^3 + a_3 \cdot C_2 \cdot s^2} \right\}$$

$$Z_{T3} = \left\{ \frac{(A_1 \cdot C_2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_1) \cdot s^4 + (a_2 \cdot C_2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_2 + a_1) \cdot s^3}{a_1 \cdot C_2 \cdot s^4 + a_2 \cdot C_2 \cdot s^3 + a_3 \cdot C_2 \cdot s^2} + \frac{(A_3 \cdot C_2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_3 + a_2) \cdot s^2 + a_3 \cdot s}{a_1 \cdot C_2 \cdot s^4 + a_2 \cdot C_2 \cdot s^3 + a_3 \cdot C_2 \cdot s^2} \right\} \quad (3.19)$$

จากสมการที่ 3.19 มีตัวแปรที่สร้างความซับซ้อนในขั้นตอนการคำนวณ สามารถกำหนดตัวแปรเพื่อลดรูปของสมการได้โดยกำหนด ค่า  $C_2 = 1$  ไมโครฟารัด โดยที่  $R_{T12} = 2$  โอห์ม เพื่อหาค่า  $Z_{T3}$

$$\begin{aligned}
B_1 &= [A_1 \cdot C_2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_1] & b_1 &= a_1 \cdot C_2 \\
&= [1E^{-18} \cdot 1E^{-6} + (2) \cdot 1E^{-6} \cdot 1E^{-18}] & &= 1E^{-18} \cdot 1E^{-6} \\
&= [1E^{-24} + 2E^{-24}] & &= 1E^{-24} \\
&= 3E^{-24} \\
B_2 &= [A_2 \cdot C_2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_2 + a_1] & b_2 &= a_2 \cdot C_2 \\
&= [3E^{-12} \cdot 1E^{-6} + (2) \cdot 1E^{-6} \cdot 4e^{-12} + 1E^{-18}] & &= 4E^{-12} \cdot 1E^{-6} \\
&= [3E^{-18} + 8E^{-18} + 1E^{-18}] & &= 4E^{-18} \\
&= 12E^{-18} \\
B_3 &= [A_3 \cdot C_2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_3 + a_2] & b_3 &= a_3 \cdot C_2 \\
&= [2E^{-6} \cdot 1E^{-6} + (2) \cdot 1E^{-6} \cdot 2E^{-6} + 4E^{-12}] & &= 2E^{-6} \cdot 1E^{-6} \\
&= [2E^{-12} + 4E^{-12} + 4E^{-12}] & &= 2E^{-12} \\
&= 10E^{-12} \\
B_4 &= a_3 \\
&= 2E^{-6}
\end{aligned}$$

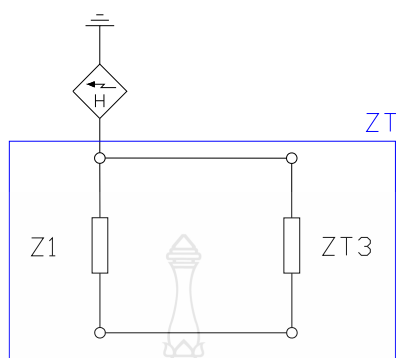
จากนั้นแทนค่าตัวแปร  $B_1, B_2, B_3, B_4, b_1, b_2, b_3$  ที่ได้ลงในสมการที่ 3.19 ซึ่งเป็นสมการที่ลดรูปแล้วสามารถนำไปใช้งานหาค่าของ  $Z_{T2}$  ได้สะดวกมากยิ่งขึ้นดังสมการที่ 3.20

$$\therefore Z_{T3} = \frac{B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2} \quad (3.20)$$

แทนค่าตัวแปร  $B_1, B_2, B_3, B_4, b_1, b_2, b_3$  ที่ได้จากการกำหนดตัวแปรลงในสมการที่ 3.20 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์  $Z_{T3}$  ดังสมการที่ 3.21 โดยค่าของ  $Z_{T3}$  ที่ได้จะต้องนำมาคำนวณทางวงจรไฟฟ้าเพื่อหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบโดยรวม ( $Z_T$ ) ซึ่งจากลักษณะการต่อวงจรตามภาพที่ 3.16 เป็นการต่อแบบขนานกับ  $Z_1$  ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

$$\therefore Z_{T3} = \frac{3E^{-24} \cdot s^4 + 12E^{-18} \cdot s^3 + 10E^{-12} \cdot s^2 + 2E^{-6} \cdot s}{1E^{-24} \cdot s^4 + 4E^{-18} \cdot s^3 + 2E^{-12} \cdot s^2} \quad (3.21)$$

### 3.8.4 วิธีหาค่าอิมพีแดนซ์ $Z_T$



ภาพที่ 3.16 อิมพีแดนซ์  $Z_T$

$$Z_T = Z_{T3} // Z_1 \quad (3.22)$$

$$Z_T = \left\{ \left( \frac{B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2} \right) \cdot \left( \frac{R_1 \cdot s \cdot C_1 + 1}{s \cdot C_1} \right) \right\} \quad (3.23)$$

$$\left\{ \left( \frac{B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2} \right) + \left( \frac{R_1 \cdot s \cdot C_1 + 1}{s \cdot C_1} \right) \right\}$$

จากสมการที่ 3.23 การแก้ไขปัญหาทางคณิตศาสตร์จำเป็นต้องหา ค.ร.น. ของส่วนเพื่อลด  
ขั้นตอนและความซับซ้อนได้โดย

$$\text{ค.ร.น.} = \left\{ \frac{\left( (B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s) \cdot s \cdot C_1 + [(R_1 \cdot s \cdot C_1 + 1) \cdot (b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2)] \right)}{(b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2) \cdot s \cdot C_1} \right\}$$

ดังนั้น จากสมการที่ 3.23 จึงสามารถจัดรูปสมการใหม่โดยนำ ค.ร.น. ของส่วนที่ได้เข้าเป็น  
ส่วนแทนแล้วคูณไขว้ ดังสมการที่ 3.24

$$Z_T = \left\{ \left[ \frac{B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2} \cdot \frac{R_1 \cdot s \cdot C_1 + 1}{s \cdot C_1} \right] \right.$$

$$\left. \cdot \left[ \frac{(b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2) \cdot s \cdot C_1}{(B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s) \cdot s \cdot C_1 + (R_1 \cdot s \cdot C_1 + 1) \cdot (b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2)} \right] \right\} \quad (3.24)$$

$$Z_T = \left\{ \frac{(B_1.R_1.C_1.s^5 + B_2.R_1.C_1.s^4 + B_3.R_1.C_1.s^3 + B_4.R_1.C_1.s^2)}{(B_1.C_1.s^5 + B_2.C_1.s^4 + B_3.C_1.s^3 + B_4.C_1.s^2) + (R_1.C_1.b_1.s^5 + R_1.C_1.b_1.s^4)} \right. \\ \left. \frac{+(B_1.s^4 + B_2.s^3 + B_3.s^2 + B_4.s)}{+R_1.C_1.b_3.s^3 + (b_1.s^4 + b_2.s^3 + b_3.s^2)} \right\} \quad (3.25)$$

$$\therefore = \left\{ \frac{B_1.R_1.C_1.s^5 + (B_2.R_1.C_1 + B_1).s^4 + (B_3.R_1.C_1 + B_2).s^3 + (B_4.R_1.C_1 + B_3).s^2}{(B_1.C_1 + R_1.C_1.b_1).s^5 + (B_2.C_1 + R_1.C_1.b_2 + b_1).s^4 + (B_3.C_1 + R_1.C_1.b_3 + b_2).s^3} \right. \\ \left. \frac{+B_4.s}{+(B_4.C_1 + b_3).s^2} \right\} \quad (3.26)$$

กำหนดค่า  $R_1 = 1$  โอห์ม  $C_1 = 1$  ไมโครฟารัด และแทนค่าตัวแปร  $B_1, B_2, B_3, B_4, b_1, b_2, b_3$  ที่ได้ลงในสมการที่ 3.26 จะได้สมการใหม่ดังนี้

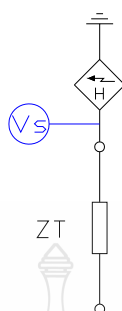
$$Z_T = \left\{ \frac{[3E^{-24} \cdot (1) \cdot 1E^{-6}] \cdot s^5 + [12E^{-18} \cdot (1) \cdot 1E^{-6} + 3E^{-24}] \cdot s^4}{[3E^{-24} \cdot 1E^{-6} + (1) \cdot 1E^{-24}] \cdot s^5 + [12E^{-18} \cdot 1E^{-6} + (1) \cdot 1E^{-6} \cdot 4E^{-18} + 1E^{-24}] \cdot s^4} \right. \\ \left. \frac{+[10E^{-12} \cdot (1) \cdot 1E^{-6} + 12E^{-18}] \cdot s^3 + [2E^{-6} \cdot (1) \cdot 1E^{-6} + 10E^{-12}] \cdot s^2}{+[10E^{-12} \cdot 1E^{-6} + (1) \cdot 1E^{-6} \cdot 2E^{-12} + 4E^{-18}] \cdot s^3} \right. \\ \left. \frac{+2E^{-6} \cdot s}{+[2E^{-6} \cdot 1E^{-6} + 2E^{-12}] \cdot s^2} \right\} \quad (3.27)$$

$$Z_T = \left\{ \frac{(3E^{-30}) \cdot s^5 + (12E^{-24} + 3E^{-24}) \cdot s^4}{(3E^{-30} + 1E^{-30}) \cdot s^5 + (12E^{-24} + 4E^{-24} + 1E^{-24}) \cdot s^4} \right. \\ \left. \frac{+(10E^{-18} + 12E^{-18}) \cdot s^3 + (2E^{-12} + 10E^{-12}) \cdot s^2 + (2E^{-6}) \cdot s}{+(10E^{-18} + 2E^{-18} + 4E^{-18}) \cdot s^3 + (2E^{-12} + 2E^{-12}) \cdot s^2} \right\} \quad (3.28)$$

การกระทำทางคณิตศาสตร์จากสมการที่ 3.27 และ 3.28 จะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบโดยรวม ( $Z_T$ ) ดังสมการที่ 3.29 ซึ่งสามารถนำค่าที่ได้แทนลงในแบบจำลอง Matlab Simulink เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าผ่าปรากฏ ดังหัวข้อถัดไป

$$\therefore Z_T = \left\{ \frac{(3E^{-30}) \cdot s^5 + (15E^{-24}) \cdot s^4 + (22E^{-18}) \cdot s^3 + (12E^{-12}) \cdot s^2 + (2E^{-6}) \cdot s}{(4E^{-30}) \cdot s^5 + (17E^{-24}) \cdot s^4 + (16E^{-18}) \cdot s^3 + (4E^{-12}) \cdot s^2} \right\} \quad (3.29)$$

### 3.8.5 วิธีหาค่า $V_s$



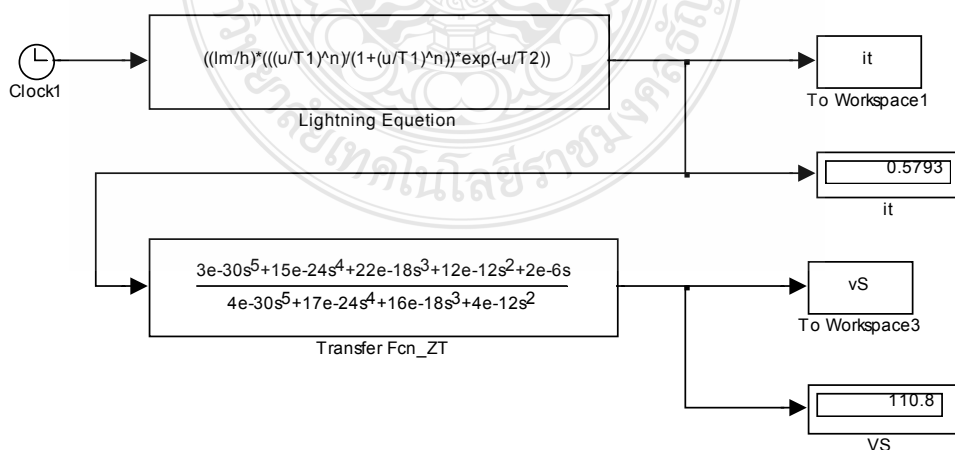
ภาพที่ 3.17 แรงดันปรากฏที่แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า

โดยที่ 
$$V_s = i_{(s)} \cdot Z_T \quad (3.30)$$

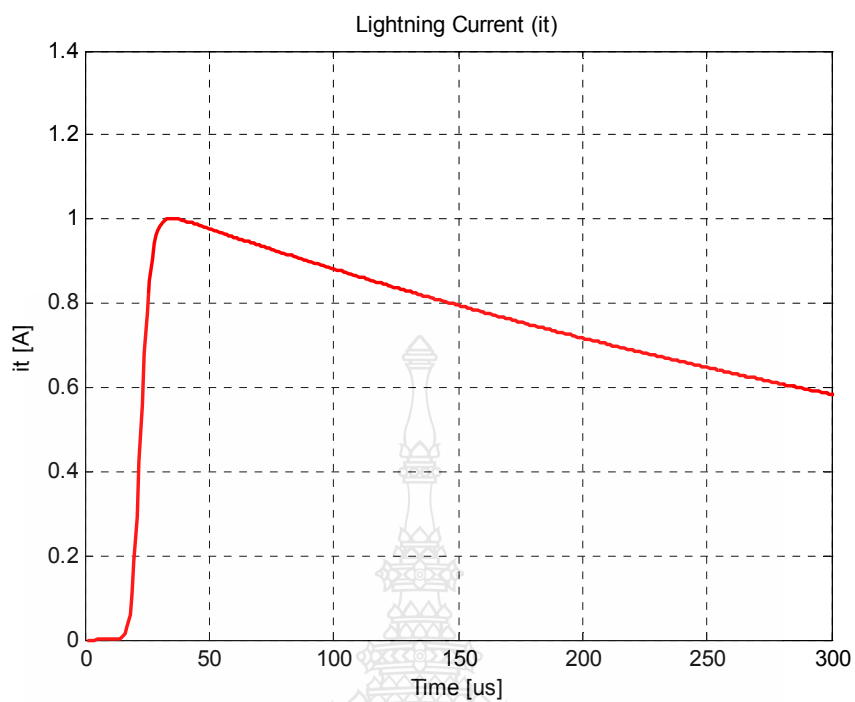
จากผลการแปลงลาปลาซ 
$$i_{(t)} = i_{(s)} \quad (3.31)$$

จากสมการที่ 2.10 
$$i_{(t)} = \frac{Im}{h} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)$$

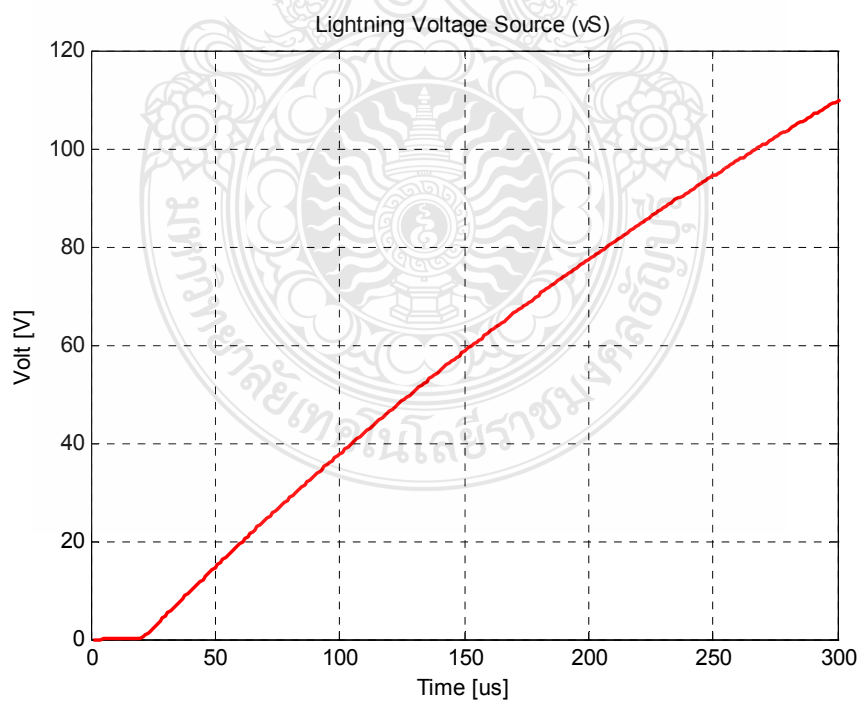
จากตารางที่ 3.6 ค่าพารามิเตอร์กระแสฟ้าผ่า  $h = 0.93$ ,  $\tau_1 = 19E^{-6} \text{ us}$ ,  $\tau_2 = 485E^{-6} \text{ us}$  ตามมาตรฐาน IEC-61312-1 กำหนดขนาดแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า  $Im = 1 \text{ Amp}$  และค่าของเวลาที่พิจารณา  $t = 300 \text{ us}$  ซึ่งเป็นเงื่อนไขตั้งต้น โดยใช้ Matlab Simulink เป็นเครื่องมือในการคำนวณดังแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 แบบจำลอง Matlab Simulink หาค่าแรงดันปรากฏที่แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า



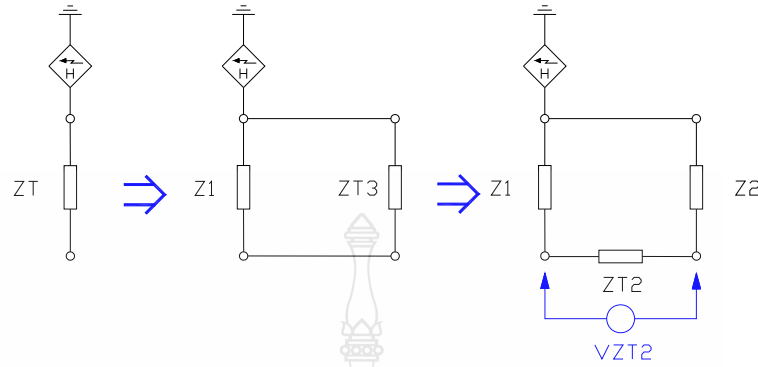
ภาพที่ 3.19 รูปคลื่นแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า 10/350 ไมโครวินาที ขนาด 1 แอมแปร์



ภาพที่ 3.20 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่แหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า



### 3.8.6 วิธีหาค่า $V_{ZT2}$



ภาพที่ 3.21 แรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์  $Z_{T2}$

$$V_{ZT2} = V_s \cdot \frac{Z_{T2}}{Z_{T3}} \quad (3.32)$$

จากสมการที่ 3.15

$$Z_{T2} = \frac{A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s}{a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s}$$

จากสมการที่ 3.20

$$Z_{T3} = \frac{B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2}$$

$$V_{ZT2} = V_s \cdot \left\{ \frac{\left[ \frac{A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s}{a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s} \right]}{\left[ \frac{B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2} \right]} \right\} \quad (3.33)$$

$$= V_s \cdot \left\{ \left[ \frac{A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s}{a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s} \right] \cdot \left[ \frac{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2}{B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s} \right] \right\}$$

$$= V_s \cdot \left\{ \frac{[(A_1 \cdot b_1) \cdot s^7 + (A_1 \cdot b_2) \cdot s^6 + (A_1 \cdot b_3) \cdot s^5]}{[(a_1 \cdot B_1) \cdot s^7 + (a_1 \cdot B_2) \cdot s^6 + (a_1 \cdot B_3) \cdot s^5 + (a_1 \cdot B_4) \cdot s^4]} \right.$$

$$\left. + \frac{[(A_2 \cdot b_1) \cdot s^6 + (A_2 \cdot b_2) \cdot s^5 + (A_2 \cdot b_3) \cdot s^4]}{[(a_2 \cdot B_1) \cdot s^6 + (a_2 \cdot B_2) \cdot s^5 + (a_2 \cdot B_3) \cdot s^4 + (a_2 \cdot B_4) \cdot s^3]} \right.$$

$$\left. + \frac{[(A_3 \cdot b_1) \cdot s^5 + (A_3 \cdot b_2) \cdot s^4 + (A_3 \cdot b_3) \cdot s^3]}{[(a_3 \cdot B_1) \cdot s^5 + (a_3 \cdot B_2) \cdot s^4 + (a_3 \cdot B_3) \cdot s^3 + (a_3 \cdot B_4) \cdot s^2]} \right\} \quad (3.34)$$

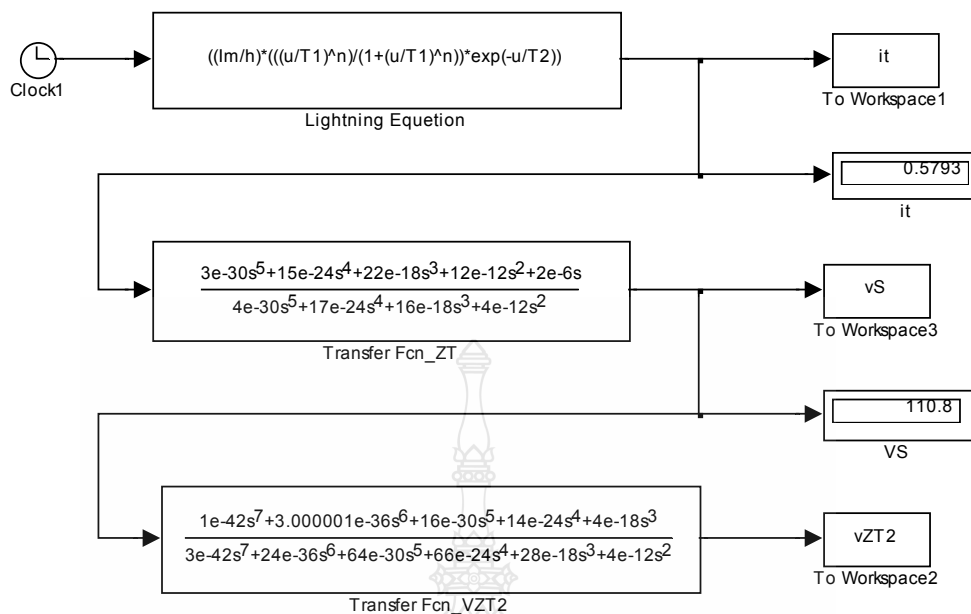
$$\therefore V_{ZT2} = V_s \cdot \left\{ \frac{(A_1.b_1).s^7 + (A_1.b_1 + A_2.b_1).s^6 + (A_1.b_3 + A_2.b_2 + A_3.b_1).s^5}{(a_1.B_1).s^7 + (a_1.B_2 + a_2.B_1).s^6 + (a_1.B_3 + a_2.B_2 + a_3.B_1).s^5} \right. \\ \left. \frac{+(A_2.b_3 + A_3.b_2).s^4 + (A_3.b_3).s^3}{+(a_1.B_4 + a_2.B_3 + a_3.B_2).s^4 + (a_2.B_4 + a_3.B_3).s^3 + (a_3.B_4).s^2} \right\} \quad (3.35)$$

จากนั้นแทนค่าตัวแปร A1, A2, A3, a1, a2, a3, B1, B2, B3, B4, b1, b2, b3 ที่ได้ลงในสมการที่ 3.35

$$V_{ZT2} = V_s \cdot \left\{ \frac{(1E^{-18}.1E^{-24}).s^7 + (1E^{-18}.1E^{-24} + 3E^{-12}.1E^{-24}).s^6}{(1E^{-18}.3E^{-24}).s^7 + (1E^{-18}.12E^{-18} + 4E^{-12}.3E^{-24}).s^6} \right. \\ \frac{+(1E^{-18}.2E^{-12} + 3E^{-12}.4E^{-18} + 2E^{-6}.1E^{-24}).s^5}{+(1E^{-18}.10E^{-12} + 4E^{-12}.12E^{-18} + 2E^{-6}.3E^{-24}).s^5} \\ \frac{+(3E^{-12}.2E^{-12} + 2E^{-6}.4E^{-18}).s^4}{+(1E^{-18}.2E^{-6} + 4E^{-12}.10E^{-12} + 2E^{-6}.12E^{-18}).s^4} \\ \left. \frac{+(2E^{-6}.2E^{-12}).s^3}{+(4E^{-12}.2E^{-6} + 2E^{-6}.10E^{-12}).s^3 + (2E^{-6}.2E^{-6}).s^2} \right\} \quad (3.36)$$

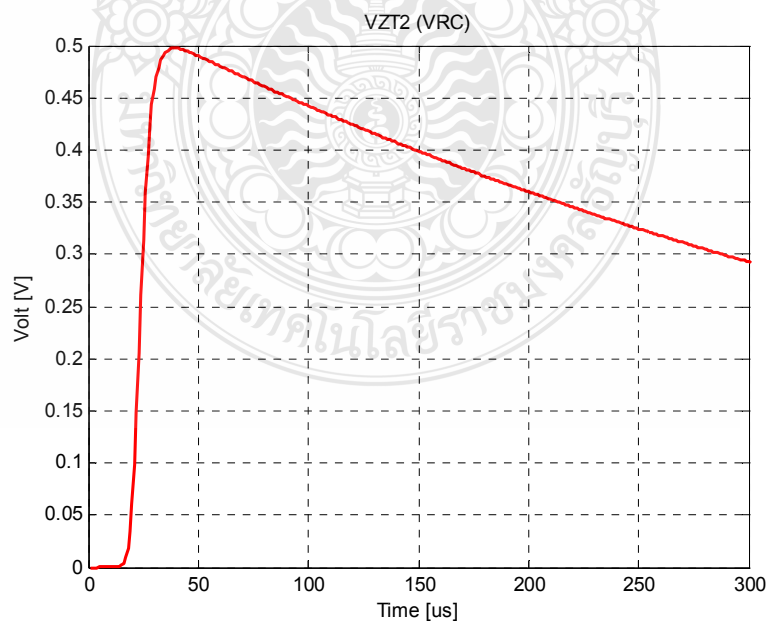
$$= V_s \cdot \left\{ \frac{(1E^{-42}).s^7 + (1E^{-42} + 3E^{-36}).s^6 + (2E^{-30} + 12E^{-30} + 2E^{-30}).s^5}{(3E^{-42}).s^7 + (12E^{-36} + 12E^{-36}).s^6 + (10E^{-30} + 48E^{-30} + 6E^{-30}).s^5} \right. \\ \left. \frac{+(6E^{-24} + 8E^{-24}).s^4 + (4E^{-18}).s^3}{+(2E^{-24} + 40E^{-24} + 24E^{-24}).s^4 + (8E^{-18} + 20E^{-18}).s^3 + (4E^{-12}).s^2} \right\} \\ \therefore V_{ZT2} = V_s \cdot \left\{ \frac{(1E^{-42}).s^7 + (3.000001E^{-36}).s^6 + (16E^{-30}).s^5}{(3E^{-42}).s^7 + (24E^{-36}).s^6 + (64E^{-30}).s^5} \right. \\ \left. \frac{+(14E^{-24}).s^4 + (4E^{-18}).s^3}{+(66E^{-24}).s^4 + (28E^{-18}).s^3 + (4E^{-12}).s^2} \right\} \quad (3.37)$$

การกระทำทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 3.36 และ 3.37 เป็นการคำนวณหาค่าแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ตำแหน่ง  $Z_{T2}$  โดยนำค่าที่ได้ไปแทนค่าลงในฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ในโปรแกรม Matlab Simulink



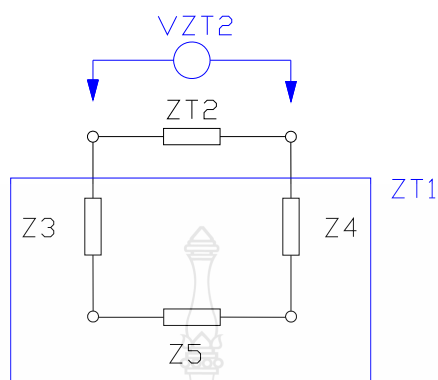
ภาพที่ 3.22 แบบจำลอง Matlab Simulink หาค่าแรงดันปรากฏที่  $Z_{T2}$

จากสมการฟ้าผ่าที่ 2.10 ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบต่อโดยรวม  $Z_T$  จากสมการที่ 3.29 และสมการแรงดันที่ฉนวนต่อ  $V_{ZT2}$  ตามสมการที่ 3.37 สามารถเขียนในรูปของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันตามภาพที่ 3.22 เพื่อหาค่าแรงดันปรากฏที่ตำแหน่ง  $Z_{T2}$  ได้โดยใช้ Matlab Simulink



ภาพที่ 3.23 รูปคลื่นแรงดันปรากฏที่  $Z_{T2}$

### 3.8.7 วิธีหาค่า $V_{Z5}$



ภาพที่ 3.24 อิมพีแดนซ์  $Z_{T5}$

จากสมการที่ 3.6

$$Z_5 = R_p + Ls$$

จากสมการที่ 3.8

$$Z_{T1} = \frac{LC_3 \cdot C_4 \cdot s^3 + R_{T1} \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^2 + (C_3 + C_4) \cdot s}{s^2 \cdot C_3 \cdot C_4}$$

$$V_{Z5} = V_{ZT2} \cdot \frac{Z_5}{Z_{T1}} \quad (3.38)$$

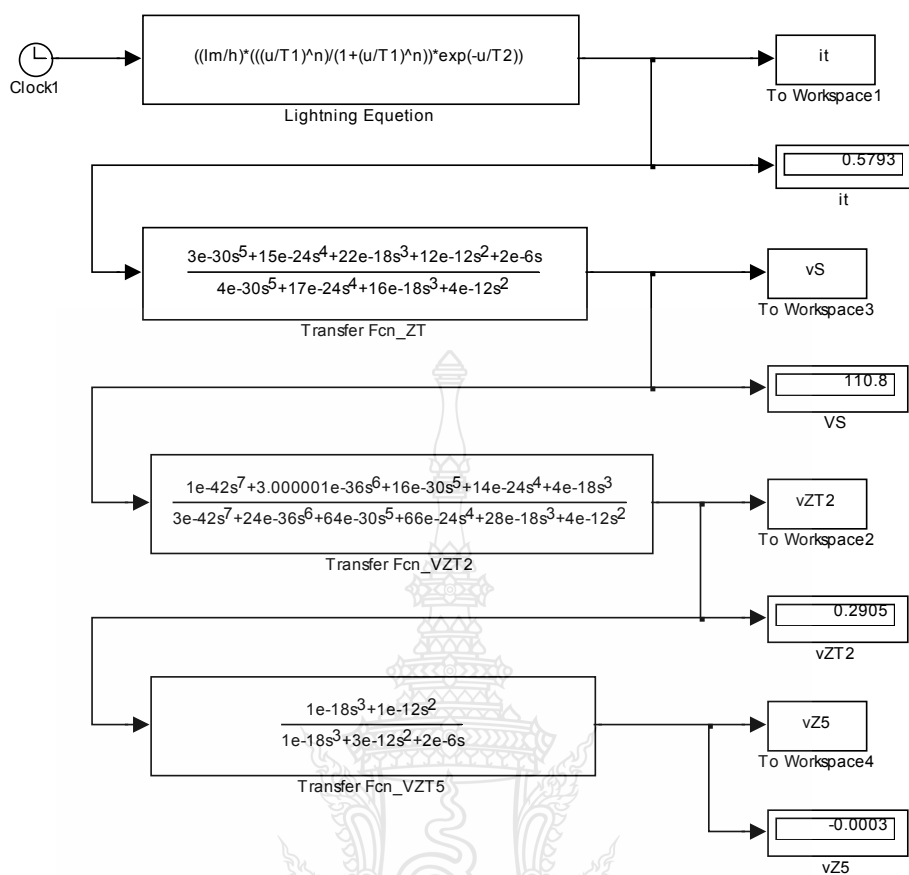
$$V_{Z5} = V_{ZT2} \cdot \frac{R_p + Ls}{\left[ \frac{LC_3 \cdot C_4 \cdot s^3 + R_{T1} \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^2 + (C_3 + C_4) \cdot s}{s^2 \cdot C_3 \cdot C_4} \right]}$$

$$= V_{ZT2} \cdot \left[ \frac{(R_p + Ls)}{LC_3 \cdot C_4 \cdot s^3 + R_{T1} \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot s^2 + (C_3 + C_4) \cdot s} \cdot \frac{s^2 \cdot C_3 \cdot C_4}{1} \right]$$

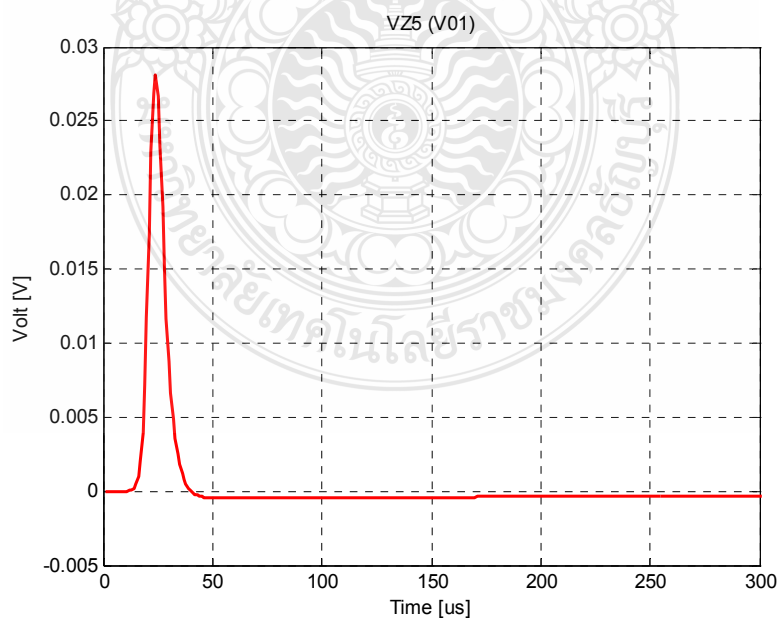
$$\therefore V_{Z5} = V_{ZT2} \cdot \left[ \frac{(LC_3 \cdot C_4) \cdot s^3 + (R_p \cdot C_3 \cdot C_4) \cdot s^2}{(LC_3 \cdot C_4) \cdot s^3 + (R_{T1} \cdot C_3 \cdot C_4) \cdot s^2 + (C_3 + C_4) \cdot s} \right] \quad (3.39)$$

จากสมการที่ 3.39 กำหนดค่า  $R_{T1} = 3$  โอห์ม  $L = 1$  ไมโครเฮนรี่ และ  $C_3 = C_4 = 1$  ไมโครฟารัด  
จะได้  $V_{Z5}$  ดังสมการที่ 3.40 นำค่าที่ได้แทนลงในแบบจำลอง Matlab Simulink ดังภาพที่ 3.25

$$V_{Z5} = V_{ZT2} \cdot \left[ \frac{(1E^{-18}) \cdot s^3 + (1E^{-12}) \cdot s^2}{(1E^{-18}) \cdot s^3 + (3E^{-12}) \cdot s^2 + (2E^{-6}) \cdot s} \right] \quad (3.40)$$



ภาพที่ 3.25 แบบจำลอง Matlab Simulink หาค่าแรงดันปรากฏที่  $Z_5$



ภาพที่ 3.26 รูปคลื่นแรงดันปรากฏที่  $Z_5$  (แรงดันตกคร่อมท่อที่มีความยาวท่อ 1 เมตร)

เนื่องจากการหาค่าแรงดันตกคร่อมท่อที่มีความยาว 1 เมตร ที่มีองค์ประกอบของค่าความเหนียวนำและค่าความต้านทานไฟฟ้าของท่อนั้น สามารถที่จะคำนวณหาค่าได้อีกวิธีหนึ่งในกรณีที่ทราบค่ากระแสไหลผ่าน ได้ดังนี้

$$\text{จากสมการที่ 2.1} \quad \Delta U = L_{\text{pipe}} \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

โดยที่  $\frac{di(t)}{dt}$  สามารถหาค่าได้จากกราฟเฟอเรนเชียลเทียบเวลาของสมการที่ 2.10

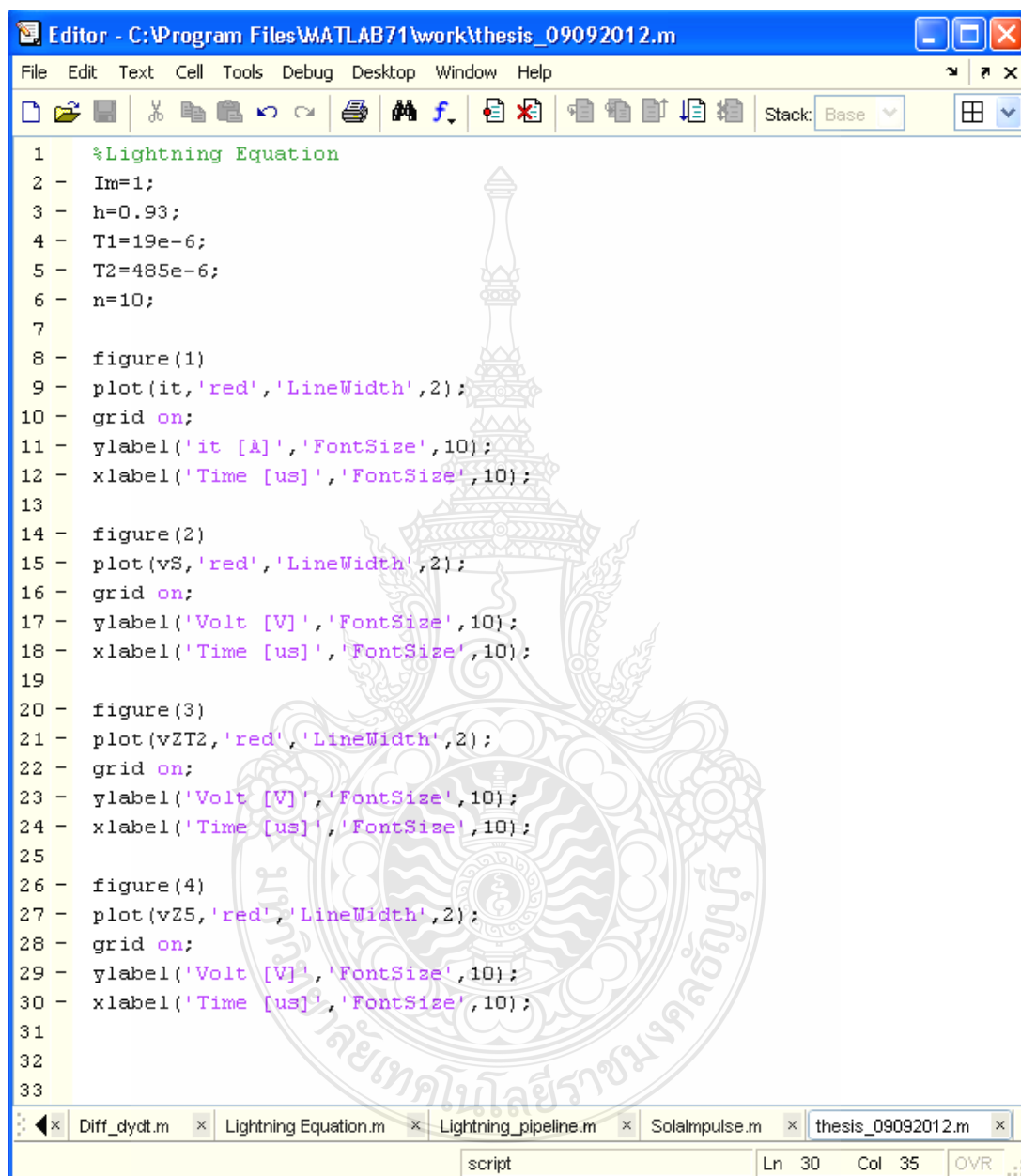
$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{I_0}{h} \cdot \left[ \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1+(t/\tau_1)^{10}} \right] \cdot \exp(-t/\tau_2) \\ \frac{di(t)}{dt} &= \frac{I_0}{h} \cdot \left\{ \left[ \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1+(t/\tau_1)^{10}} \right] \cdot \frac{d}{dt} \exp(-t/\tau_2) \right\} + \left\{ \exp(-t/\tau_2) \frac{d}{dt} \left[ \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1+(t/\tau_1)^{10}} \right] \right\} \\ \therefore \frac{di(t)}{dt} &= \frac{I_0}{h} \cdot \left\{ \left[ \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1+(t/\tau_1)^{10}} \right] \cdot \exp(-t/\tau_2) \cdot (-1/\tau_2) \right\} \\ &\quad + \left\{ \exp(-t/\tau_2) \cdot \left[ \frac{10 \cdot (t^9/\tau_1^{10})}{1+(t/\tau_1)^{10}} - \frac{10 \cdot (t^{19}/\tau_1^{20})}{[1+(t/\tau_1)^{10}]^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3.41)$$

จากภาพที่ 3.10 เป็นแรงดันปรากฏที่แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขนาด 1 แอมแปร์ ที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม ATP-EMTP และจากภาพที่ 3.20 เป็นแรงดันปรากฏที่แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านเช่นเดียวกันซึ่งค่าที่ได้เป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์และจำลองโดย Matlab Simulink ผลจากการคำนวณทั้งสองวิธีนั้นให้ค่าใกล้เคียงกันมาก

จากภาพที่ 3.11 เป็นแรงดันตกคร่อมท่อที่มีความยาวท่อ 1 เมตร ที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม ATP-EMTP และจากภาพที่ 3.26 เป็นค่าแรงดันตกคร่อมท่อเช่นเดียวกันซึ่งค่าที่ได้เป็นการคำนวณทางคณิตศาสตร์และจำลองโดย Matlab Simulink ผลจากการคำนวณทั้งสองวิธีนั้นแตกต่างกันน้อยมากเนื่องจากวิธีการคำนวณโดยที่มีองค์ประกอบของค่าความเหนียวนำนั้นต่างกัน

ในการหาค่าตอบด้วย Matlab Simulink สามารถทำได้โดยเริ่มต้นจากการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กำหนดค่าพารามิเตอร์ส่วนที่เกี่ยวข้องต่างๆ ให้ครบถ้วน กำหนดค่าพารามิเตอร์ไฟฟ้า

ลงในส่วนของ Editor Program หลังจากนั้นจึง Run Program ที่โปรแกรม Editor และ Run Program ในส่วนของ Simulink Model โดยมีรายละเอียดของ Editor Program ดังนี้



```

1 %Lightning Equation
2 - Im=1;
3 - h=0.93;
4 - T1=19e-6;
5 - T2=485e-6;
6 - n=10;
7
8 - figure(1)
9 - plot(it,'red','LineWidth',2);
10 - grid on;
11 - ylabel('it [A]','FontSize',10);
12 - xlabel('Time [us]','FontSize',10);
13
14 - figure(2)
15 - plot(vS,'red','LineWidth',2);
16 - grid on;
17 - ylabel('Volt [V]','FontSize',10);
18 - xlabel('Time [us]','FontSize',10);
19
20 - figure(3)
21 - plot(vZT2,'red','LineWidth',2);
22 - grid on;
23 - ylabel('Volt [V]','FontSize',10);
24 - xlabel('Time [us]','FontSize',10);
25
26 - figure(4)
27 - plot(vZ5,'red','LineWidth',2);
28 - grid on;
29 - ylabel('Volt [V]','FontSize',10);
30 - xlabel('Time [us]','FontSize',10);
31
32
33

```

ภาพที่ 3.27 Editor Program

## บทที่ 4

### ผลการจำลอง

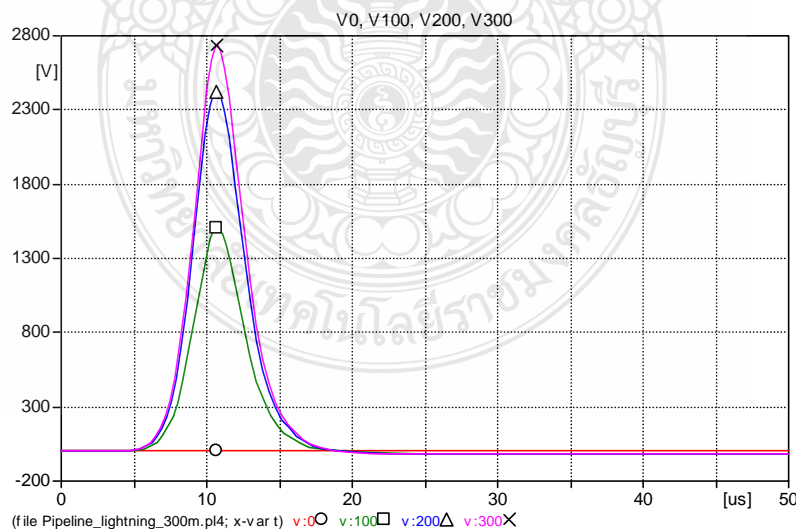
รายละเอียดของบทนี้ได้แสดงถึงผลการจำลองของวงจรสมมุติระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินด้วยโปรแกรมจำลองสภาวะชั่วคราวทางไฟฟ้า (ATP-EMTP) โดยแสดงค่าการเกิดแรงดันและกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ระบบท่อ โดยแบ่งการจำลองออกเป็นสองหัวข้อหลักประกอบด้วย กรณีฟ้าผ่าลำแรก และกรณีฟ้าผ่าลำต่อมา

ทั้งสองหัวข้อหลักได้แบ่งออกเป็นสามส่วน 1) กรณีพิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของท่อ 2) กรณีพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อน 3) กรณีป้องกันอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน ทั้งสามส่วนได้จำลองที่ความยาวท่อ 300, 600 และ 900 เมตร โดยบันทึกค่าสภาวะชั่วคราวทุกๆ 100 เมตร ของความยาวท่อและบันทึกค่าแรงดันและกระแสปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนในกรณีที่เกี่ยวข้อง ดังผลการจำลองด้วยภาพดังต่อไปนี้

#### 4.1 กรณีฟ้าผ่าลำแรก

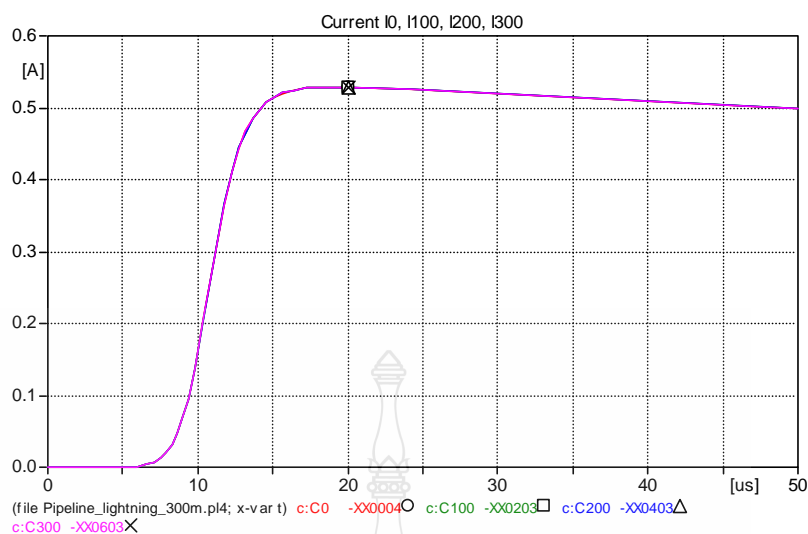
##### 4.1.1 กรณีพิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของท่อ

ก) ความยาวท่อ 300 เมตร



ภาพที่ 4.1 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 300 เมตร





ภาพที่ 4.2 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 300 เมตร

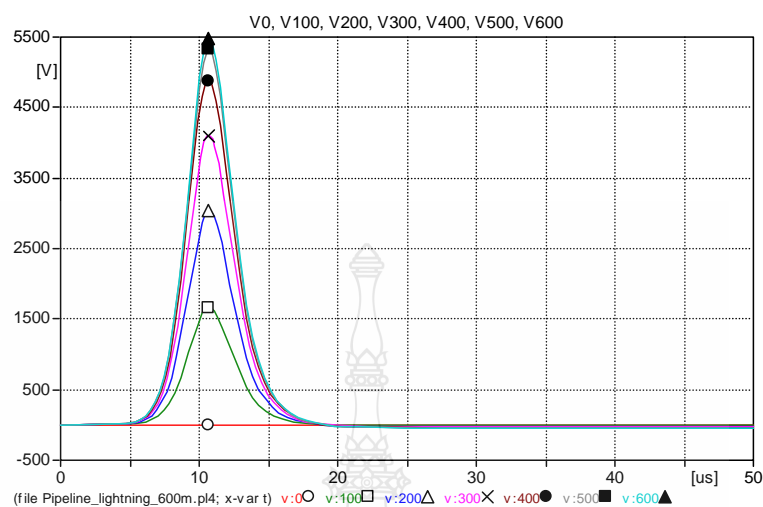
จากภาพที่ 4.1 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อจากความยาวท่อ 300 เมตร ค่าของแรงดันที่ปรากฏนั้นเป็นไปตามสมการที่ 2.1 ซึ่งแปรผันกับค่าความเหนี่ยวนำของท่อเมื่อความยาวท่อเพิ่มมากขึ้นค่าความเหนี่ยวนำนั้นย่อมเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้ค่าแรงดันปรากฏที่ท่อนั้นมีค่าสูงขึ้นตามความยาวท่อ

จากภาพที่ 4.2 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อซึ่งเป็นกระแสที่ไหลผ่านฉนวนท่อมายังท่อส่วนที่เป็นโลหะ ดังค่าตามตารางที่ 4.1 จะสังเกตว่าค่ากระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อนั้นมีค่าเท่ากันตลอดทุกช่วงความยาวท่อ ซึ่งเกิดจากค่าความอิมพีแดนซ์ของฉนวนท่อดูต่อความยาวหนึ่งหน่วยมีค่าเท่ากันและเป็นลักษณะของวงจรขนานจึงเกิดการแบ่งไหลของกระแสที่เท่ากัน

ตารางที่ 4.1 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 300 เมตร

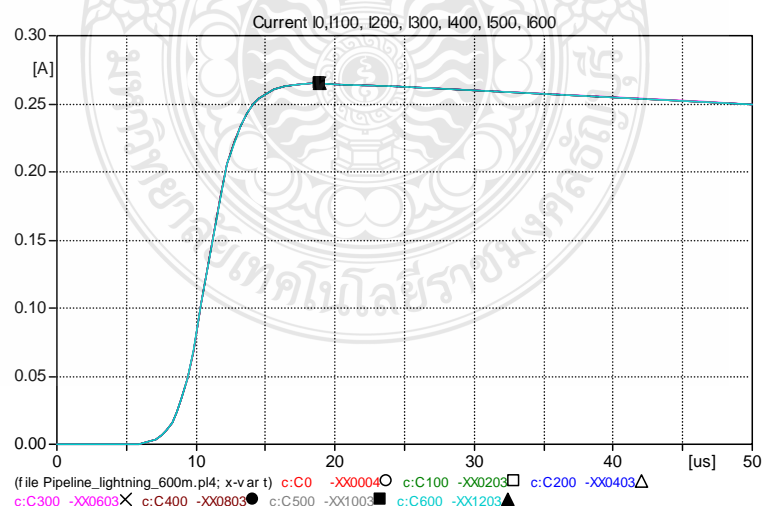
ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	0.060	0.529
100	1.508	0.529
200	2.425	0.529
300	2.733	0.529

ข) ความยาวท่อ 600 เมตร



ภาพที่ 4.3 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร

จากภาพที่ 4.3 เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตรพบว่าค่าแรงดันปรากฏที่จุดเริ่มต้นนั้นมีการลดลงเมื่อเทียบกับผลของความยาวท่อที่ 300 เมตร เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของฉนวนที่ลดลงจากลักษณะการต่อแบบขนานของความยาวท่อที่เพิ่มขึ้น



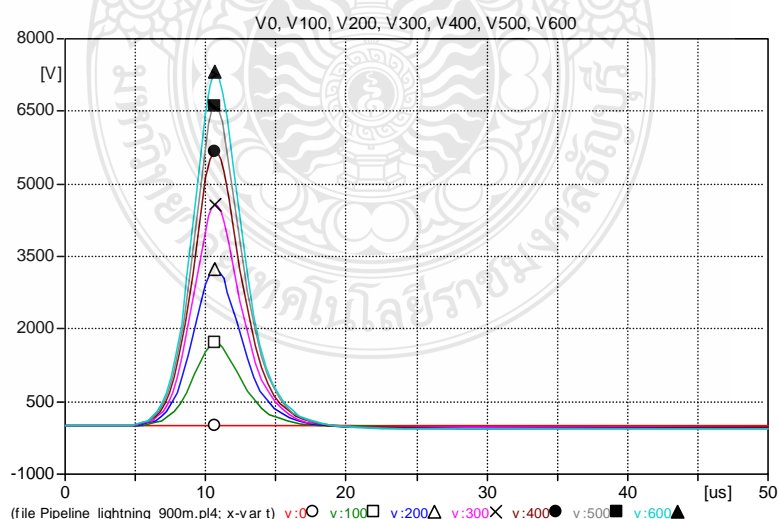
ภาพที่ 4.4 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร

จากภาพที่ 4.4 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อ โดยมีค่าลดลงเมื่อเทียบจากผลของความยาวท่อ 300 เมตรเนื่องจากจำนวนสาขาของวงจรสมมูลนั้นมีมากขึ้นจากความยาวท่อที่เพิ่มขึ้น มีผลให้ค่ากระแสปรากฏที่ท่อในแต่ละช่วงความยาวนั้นลดลง โดยที่ผลรวมของกระแสปรากฏทั้งหมดนั้นจะมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่าของโปรแกรม ATP-EMTP

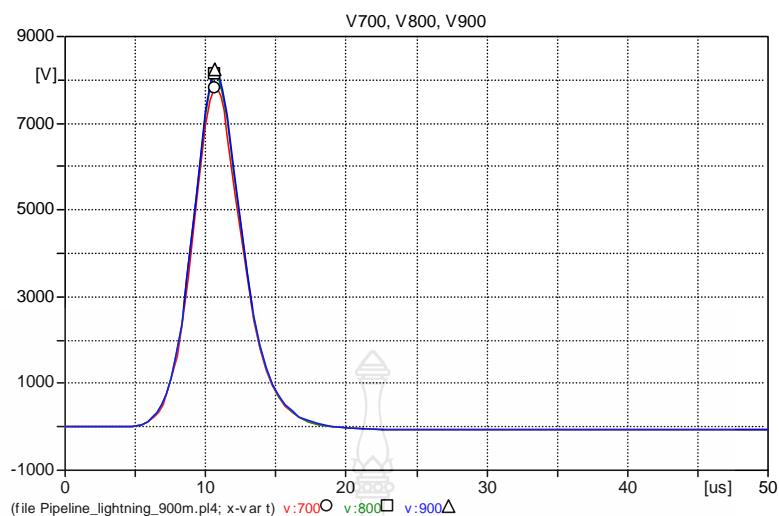
ตารางที่ 4.2 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร

ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	0.031	0.265
100	1.661	0.265
200	3.036	0.265
300	4.160	0.265
400	4.870	0.265
500	5.330	0.265
600	5.484	0.265

ค) ความยาวท่อ 900 เมตร

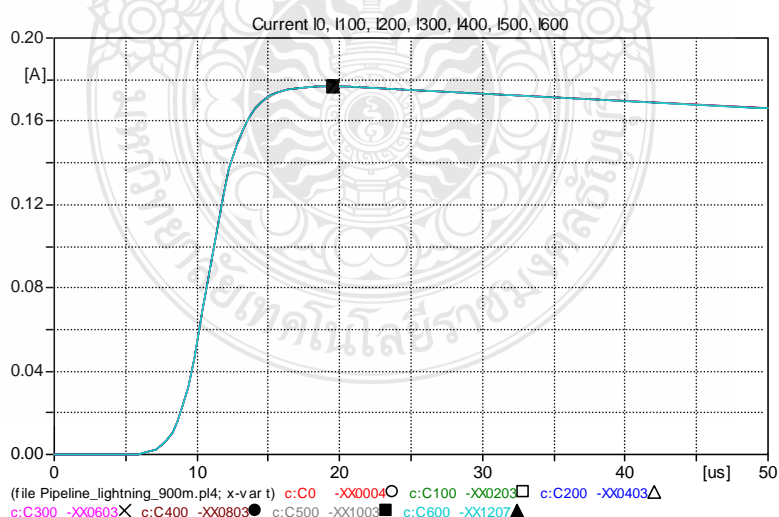


ภาพที่ 4.5 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 900 เมตร (0-600 เมตร)

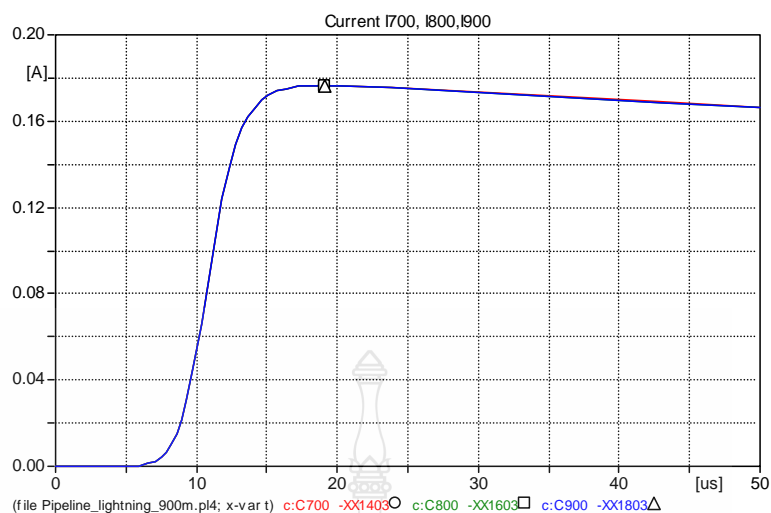


ภาพที่ 4.6 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อนิพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อกความยาว 900 เมตร (700-900 เมตร)

จากภาพที่ 4.5 และ 4.6 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อกความยาว 900 เมตร จากผลการจำลองพบว่าค่าแรงดันนั้นมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นเมื่อความยาวท่อกเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของท่อกโลหะที่มีค่ามากขึ้นตามความยาวท่อกที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดค่าแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นสูงตามความยาวท่อก



ภาพที่ 4.7 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อนิพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อกความยาว 900 เมตร (0-600 เมตร)



**ภาพที่ 4.8** รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่หอกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อกความยาว 900 เมตร (700-900 เมตร)

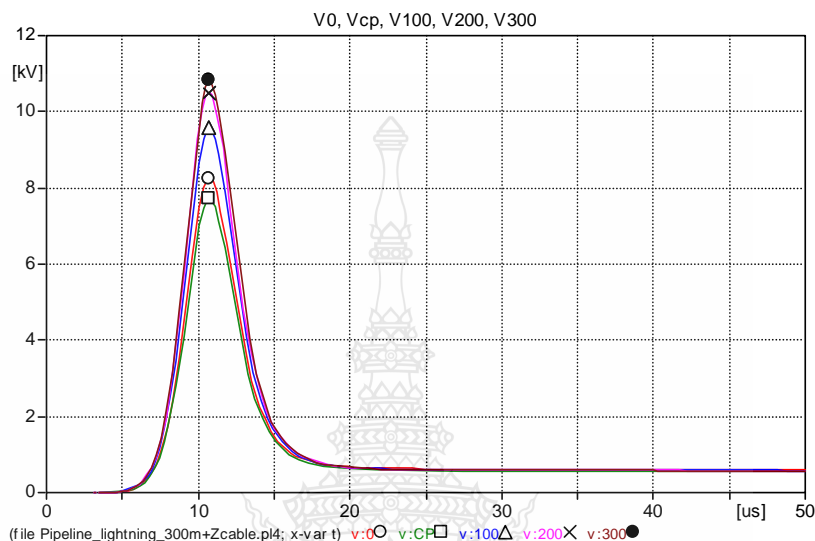
จากภาพที่ 4.7 และ 4.8 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อกความยาว 900 เมตร พบว่าค่ากระแสนั้นมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรณี 300 และ 600 เมตร เนื่องจากจำนวนสาขาของวงจรสมมูลนั้นมากขึ้นจึงเกิดการแบ่งไหลของกระแส

**ตารางที่ 4.3** ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่หอกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อกความยาว 900 เมตร

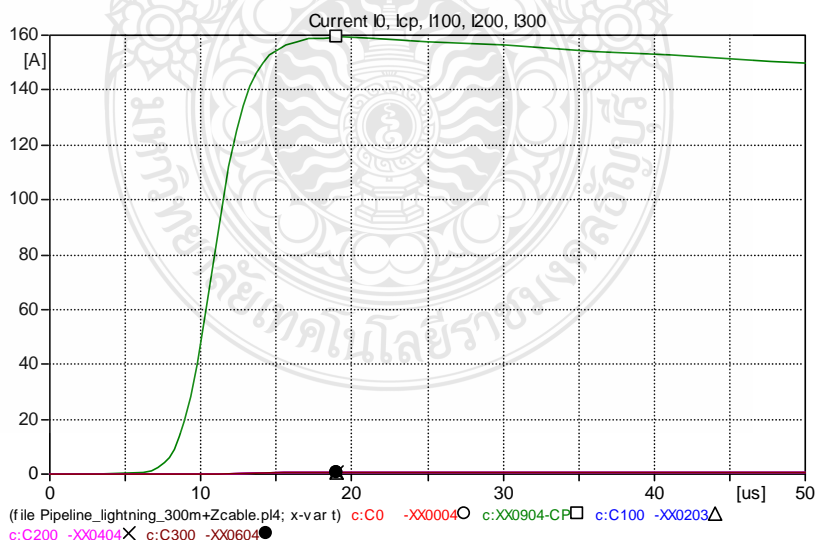
ระยะความยาวท่อก (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	0.020	0.176
100	1.712	0.176
200	3.239	0.176
300	4.563	0.176
400	5.683	0.176
500	6.600	0.176
600	7.313	0.176
700	7.823	0.176
800	8.129	0.176
900	8.232	0.176

#### 4.1.2 กรณีพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่ผู้กร่อน

ก) ความยาวท่อ 300 เมตร



ภาพที่ 4.9 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าค่าแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่ผู้กร่อนจากความยาวท่อ 300 เมตร



ภาพที่ 4.10 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าค่าแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่ผู้กร่อนจากความยาวท่อ 300 เมตร

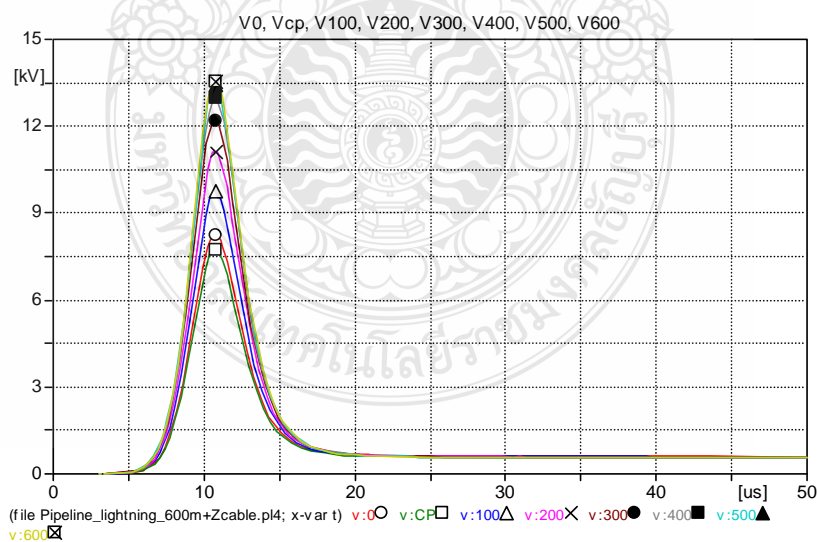
จากภาพที่ 4.9 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อ โดยที่พิจารณาจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนเพิ่มเข้ามาในการจำลอง จากลักษณะของวงจรสมมูลเป็นการต่อแบบอนุกรมทำให้แรงดันปรากฏที่ตำแหน่งต่างๆ นั้นสูงขึ้นจากหัวข้อที่ 4.1.1

จากภาพที่ 4.10 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อและอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน พบว่ากระแสปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อนั้นมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า

**ตารางที่ 4.4** ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าค่าแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 300 เมตร

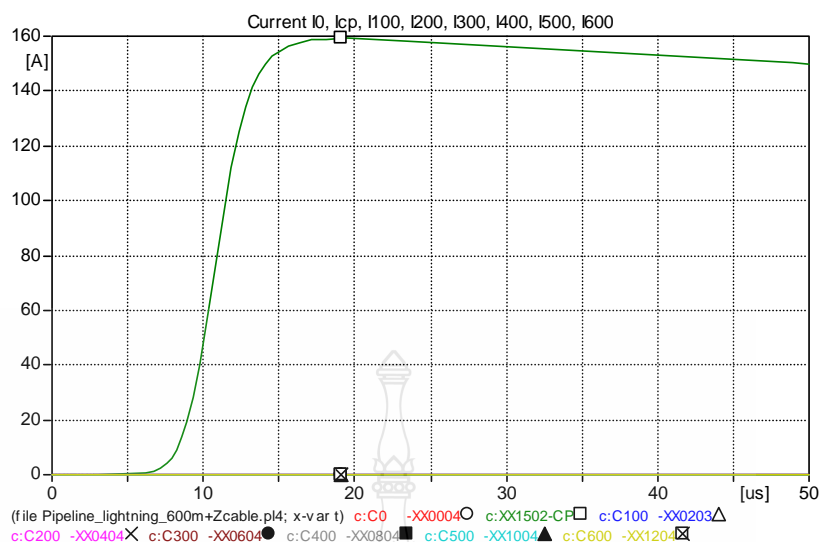
ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	8.248	0.529
CP	7.731	159.14
100	9.591	0.529
200	10.509	0.529
300	10.817	0.529

ข) ความยาวท่อ 600 เมตร



**ภาพที่ 4.11** รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าค่าแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร





ภาพที่ 4.12 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อฝกร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร

จากภาพที่ 4.11 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่าง ๆ ของท่อและปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อฝกร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร พบว่าค่าแรงดันที่ท่อนั้นสูงขึ้นจากค่าความเหนี่ยวนำของท่อ ส่วนภาพที่ 4.12 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อฝกร่อนโดยค่าของกระแสปรากฏที่ท่อมิแนวโน้มที่ค่าลดลงจากกรณี 300 เมตร ดังค่าตามตารางที่ 4.5

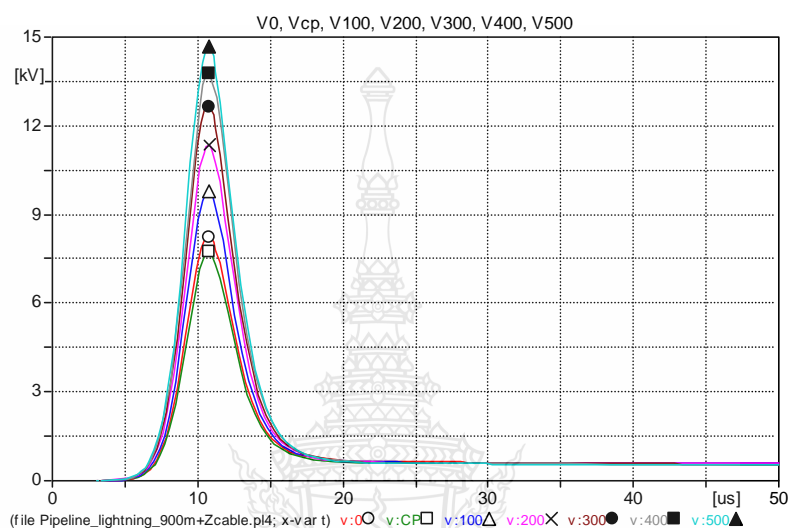
ตารางที่ 4.5 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อฝกร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร

ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	8.247	0.245
CP	7.331	159.14
100	9.742	0.245
200	11.115	0.245
300	12.183	0.245
400	12.947	0.245
500	13.405	0.245
600	13.559	0.245

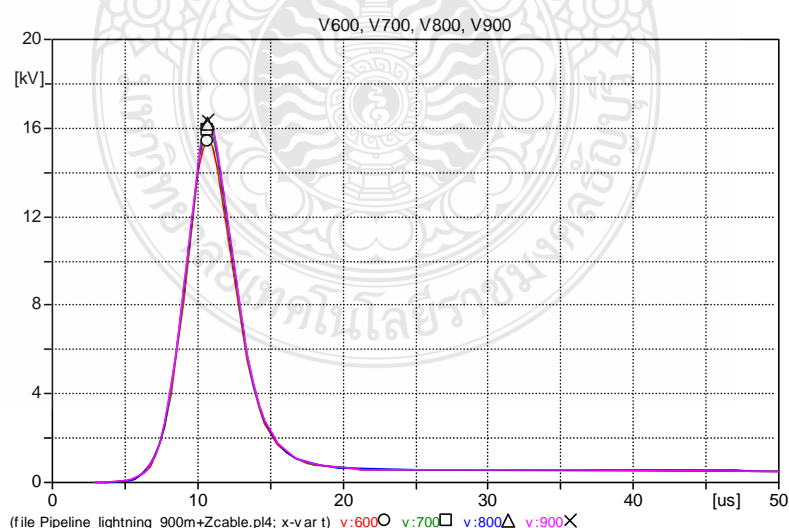


ค) ความยาวท่อ 900 เมตร

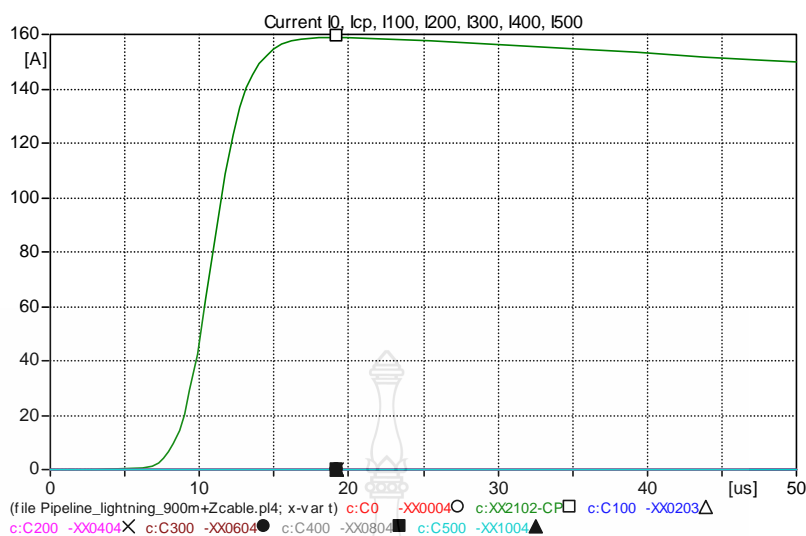
จากภาพที่ 4.13 และ 4.14 ด้านล่างเป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่าง ๆ ของท่อและปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร พบว่าค่าแรงดันปรากฏที่ท่อนั้นมีแนวโน้มที่ค่าจะสูงขึ้นเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของท่อที่เพิ่มขึ้นตามความยาวท่อ



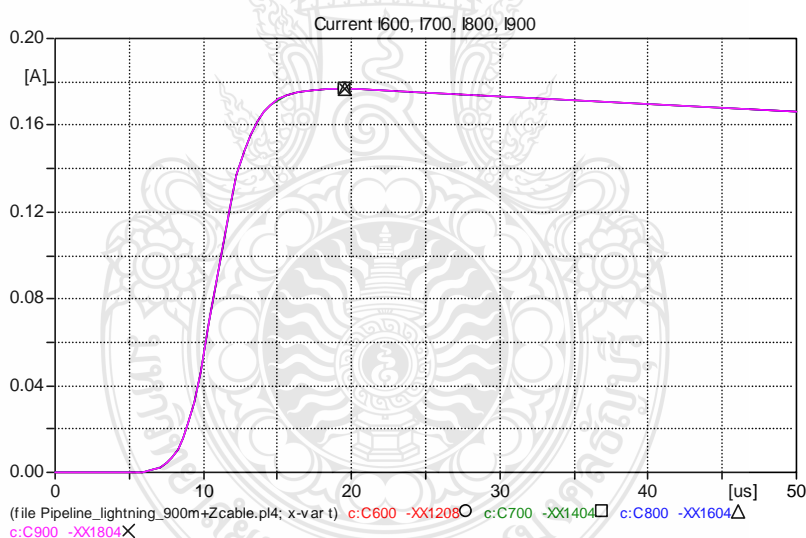
ภาพที่ 4.13 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร



ภาพที่ 4.14 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร



ภาพที่ 4.15 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าค่าแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร



ภาพที่ 4.16 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าค่าแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร

จากภาพที่ 4.15 เป็นรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าปรากฏจากระยะเริ่มต้นถึงระยะ 500 เมตร ของท่อ และค่ากระแสไฟฟ้าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร พบว่าค่ากระแสไฟฟ้าปรากฏที่ระยะต่างๆ ท่อนั้นมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับผลการจำลองที่ความยาวท่อ 300 และ 600

เมตร เนื่องจากจำนวนสาขาของวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของท่อนั้นมีค่ามากขึ้นจากความยาวท่อที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อนั้นมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าของโปรแกรม ATP-EMTP เนื่องจากกระแสไฟฟ้าทั้งหมดต้องการไหลลงดิน โดยกระแสไฟฟ้างดงกล่าวจะไหลผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบต่อจากจุดที่กระแสไฟฟ้าสัมผัสต่อซึ่งเป็นจุดเริ่มต้น ไหลผ่านท่อโลหะ สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนถึงของอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อนและไหลลงดินที่ตำแหน่งสายอาโนดของอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อน

จากภาพที่ 4.16 เป็นรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าปรากฏที่ระยะ 600 เมตร ถึงระยะ 900 เมตร ของท่อซึ่งเป็นส่วนที่เพิ่มเติมจากภาพที่ 4.15 โดยมีระยะห่างการบันทึกค่าของกระแสไฟฟ้าทุกๆ 100 เมตร เช่นเดียวกัน พบค่าของกระแสไฟฟ้าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อนั้นมีค่าเท่ากันทุกจุด เนื่องจากจำนวนสาขาของวงจรสมมูลท่อที่มีค่ามากขึ้นตามความยาวท่อ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจนวนท่อจะถูกแบ่งตามจำนวนสาขาของวงจร โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของจนวนท่อต่อหน่วยความยาวมีค่าคงที่ ซึ่งในการพล็อตรูปคลื่นของกระแสไฟฟ้านั้นไม่สามารถพล็อตในภาพเดียวกันได้ทั้งหมด เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของโปรแกรม ATP-EMTP สามารถพล็อตรูปคลื่นได้สูงสุดเป็นจำนวน 8 สัญญาณเท่านั้น ซึ่งได้สรุปค่าดังตารางที่ 4.6

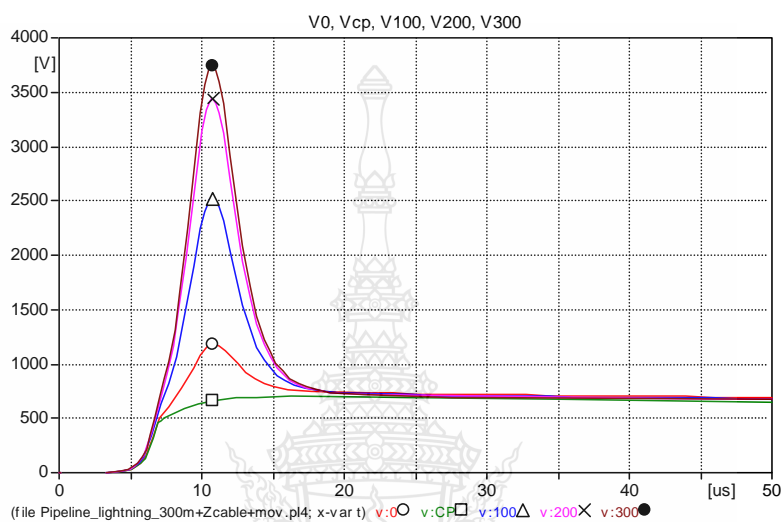
**ตารางที่ 4.6** ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าค่าแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร

ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	8.246	0.176
CP	7.731	159.14
100	9.729	0.176
200	11.319	0.176
300	12.641	0.176
400	13.760	0.176
500	14.676	0.176
600	15.396	0.176
700	15.906	0.176
800	16.213	0.176
900	16.316	0.176

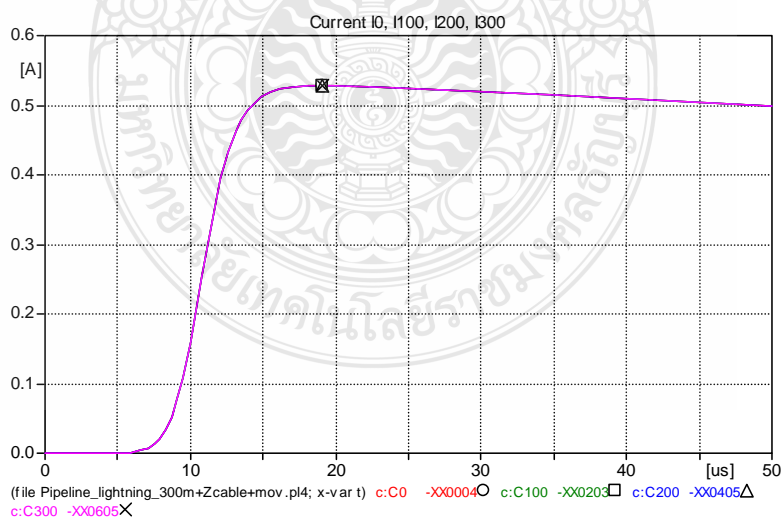
### 4.1.3 แนวทางการป้องกันอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อน

ก) ความยาวท่อ 300 เมตร

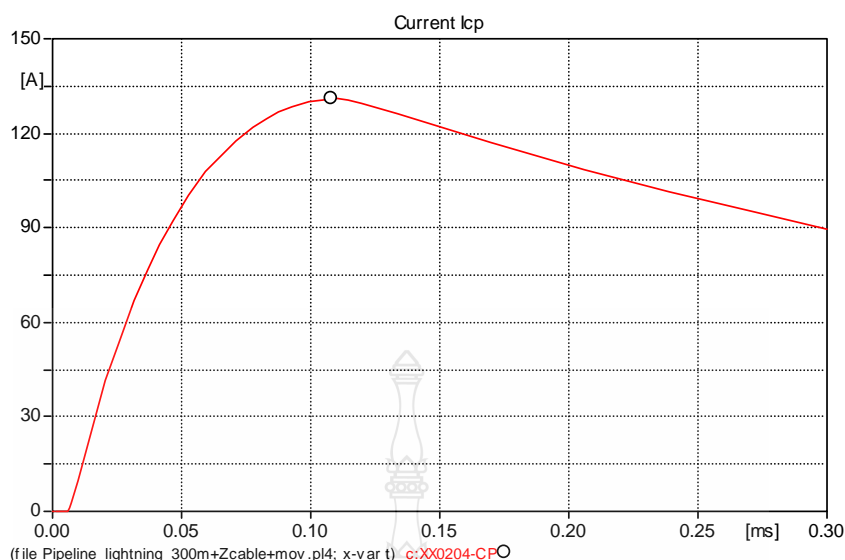
จากผลการจำลองในหัวข้อ 4.1.2 (ก) ช่างค้นพบว่ามีความแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระบบท่อในขณะที่เกิดฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองของแนวทางการป้องกัน



ภาพที่ 4.17 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าค่าแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร



ภาพที่ 4.18 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าค่าแรกปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร



ภาพที่ 4.19 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร

จากภาพที่ 4.17 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ท่อและอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อน พบว่าค่าแรงดันปรากฏนั้นยังมีค่าสูงเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าจริงป้องกันต่อผู้กร่อนจากการจำลองร่วมกับอุปกรณ์ป้องกัน โดยพิจารณาความยาวสายตัวนำลงดินสั้นลง ซึ่งสามารถลดแรงดันปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อนได้โดยมีค่าน้อยกว่า 1,500 โวลต์

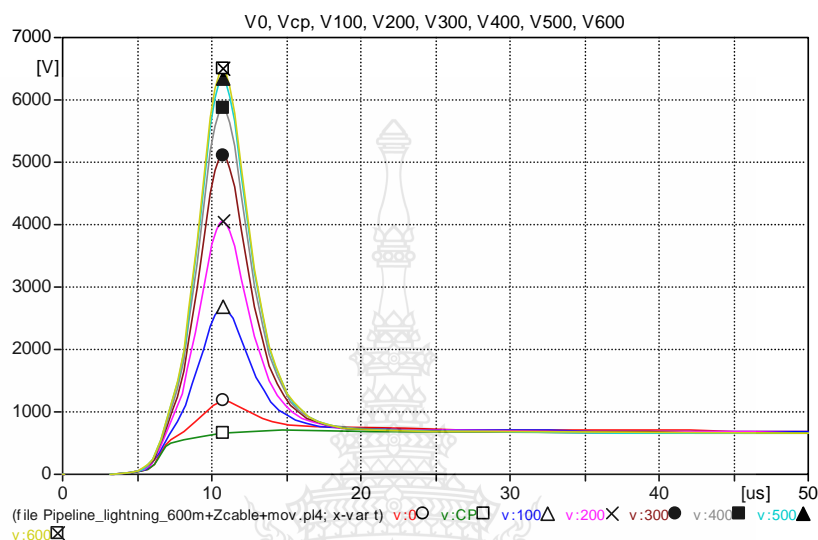
จากภาพที่ 4.18 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อ ส่วนภาพที่ 4.19 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อนหลังจากต่อร่วมอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าหรือป้องกันเสร็จเข้าไปในตำแหน่งอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อน

ตารางที่ 4.7 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร

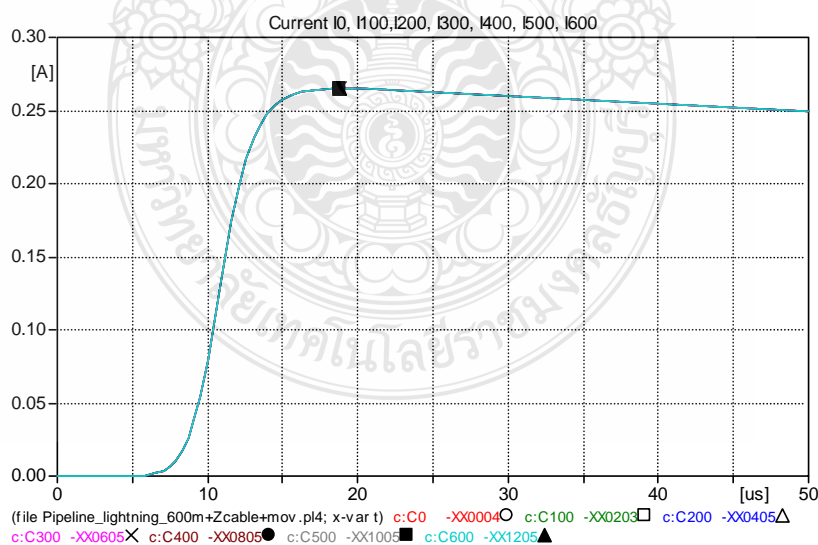
ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	1.179	0.529
CP	0.662	130.98
100	2.520	0.529
200	3.436	0.529
300	3.743	0.529

ข) ความยาวท่อ 600 เมตร

จากผลการจำลองในหัวข้อ 4.1.2 (ข) ที่ผ่านมามีแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระบบท่อเช่นกัน ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองของแนวทางการป้องกันในความยาวท่อที่เพิ่มมากขึ้น



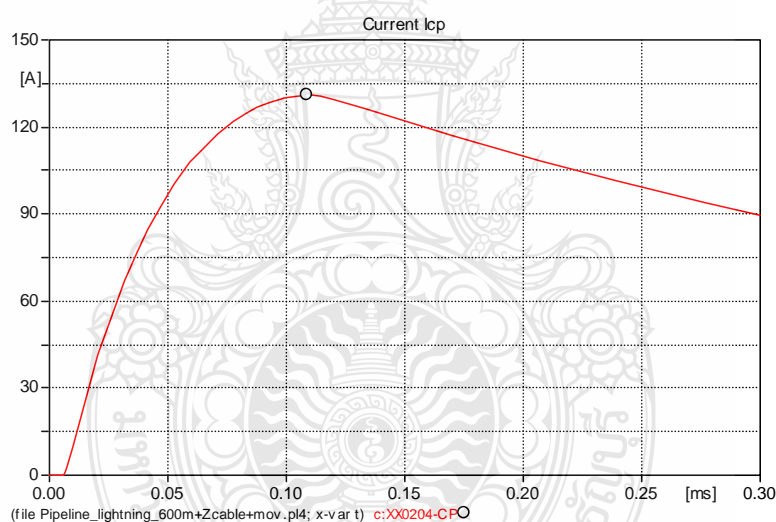
ภาพที่ 4.20 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าค่าแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร



ภาพที่ 4.21 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าค่าแรกปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร

จากภาพที่ 4.20 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อและอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนพบว่า ค่าแรงดันปรากฏที่ท่อนั้นมีค่าสูงกว่ากรณีความยาวท่อ 300 เมตรเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของท่อที่มากขึ้นตามความยาวท่อ จากผลการจำลองดังภาพสามารถลดแรงดันปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนได้โดยมีค่าน้อยกว่า 1,500 โวลต์ โดยที่ค่าของแรงดันหลังจากอุปกรณ์ป้องกันเสร็จควบคุมแรงดันได้แล้วนั้นจะเกิดการแกว่งของแรงดันจำนวนหนึ่งและมีแนวโน้มที่ค่ายอดของแรงดันสูงสุดที่แกว่งจะมีค่าลดลงเมื่อคาบเวลามากขึ้น

จากภาพที่ 4.21 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร กรณีแนวทางการป้องกันด้วยอุปกรณ์ป้องกันเสร็จในตำแหน่งอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน พบว่า ค่ากระแสปรากฏมีค่าเท่ากันทุกตำแหน่งของความยาวท่อ ซึ่งเกิดจากลักษณะการแบ่งไหลของกระแสฟ้าผ่าผ่านจำนวนท่อในลักษณะของวงจรรขนาน โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของจำนวนท่อต่อหน่วยความยาวนั้นมีค่าเท่ากัน



ภาพที่ 4.22 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร

จากภาพที่ 4.22 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนความยาวท่อ 600 เมตร โดยมีอุปกรณ์ป้องกันเสร็จทำหน้าที่ป้องกันฟ้าผ่าในระบบ จากผลการจำลองดังภาพข้างต้น พบว่ายังมีกระแสฟ้าผ่าปรากฏจำนวนหนึ่ง ซึ่งเกิดจากขนาดของกระแสฟ้าผ่าและในขั้นตอนการพิจารณาเลือกความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสฟ้าผ่า (VI Curve) ของอุปกรณ์ป้องกันเสร็จที่จะนำมาป้องกันอุปกรณ์

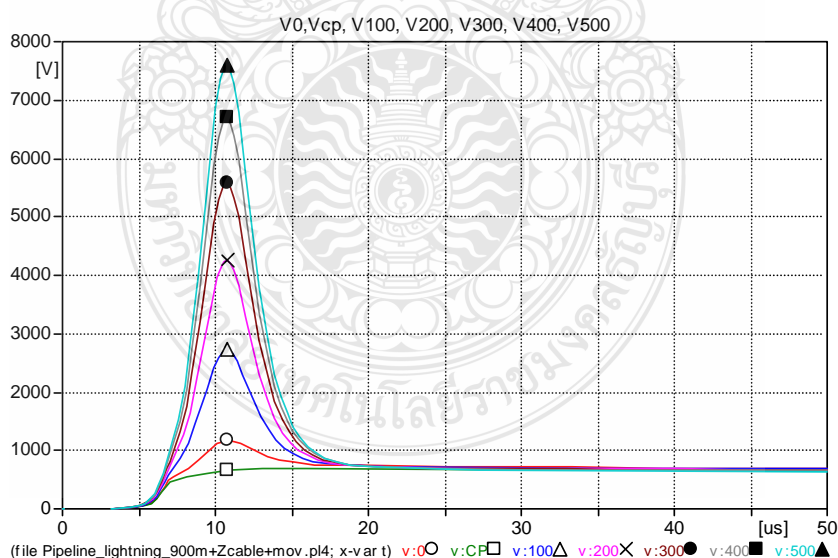


ตารางที่ 4.8 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจาก ความยาวท่อ 600 เมตร

ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	1.178	0.265
CP	0.662	130.98
100	2.672	0.265
200	4.044	0.265
300	5.112	0.265
400	5.875	0.265
500	6.334	0.265
600	6.484	0.265

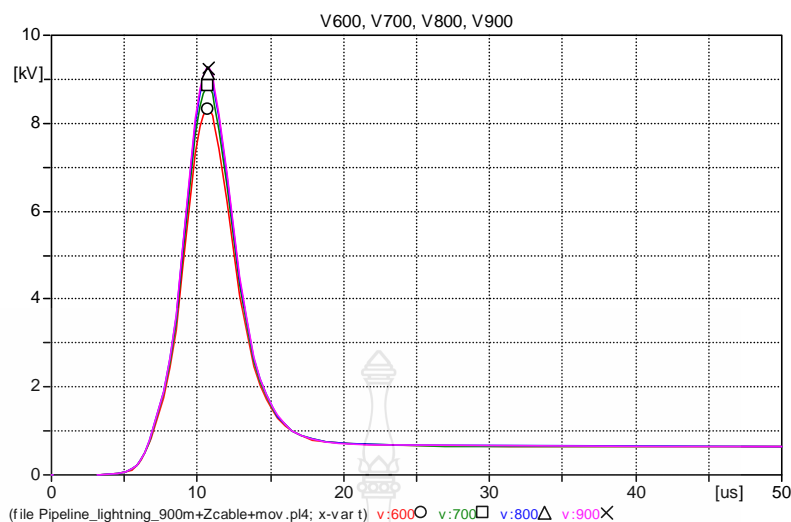
ค) ความยาวท่อ 900 เมตร

จากผลการจำลองในหัวข้อ 4.1.2 (ค) ที่ผ่านมามีพบว่ามีความแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระบบท่อ เริ่มสูงขึ้น ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการจำลองแนวทางการป้องกันของความยาวท่อ 900 เมตร



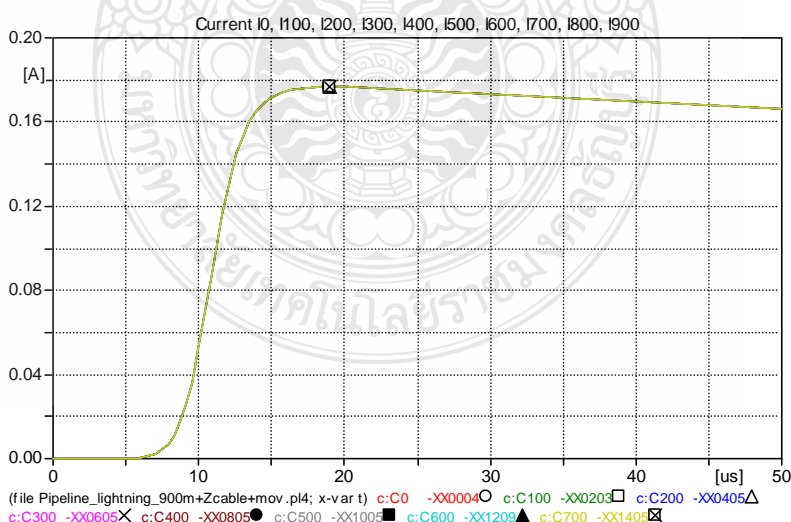
ภาพที่ 4.23 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร





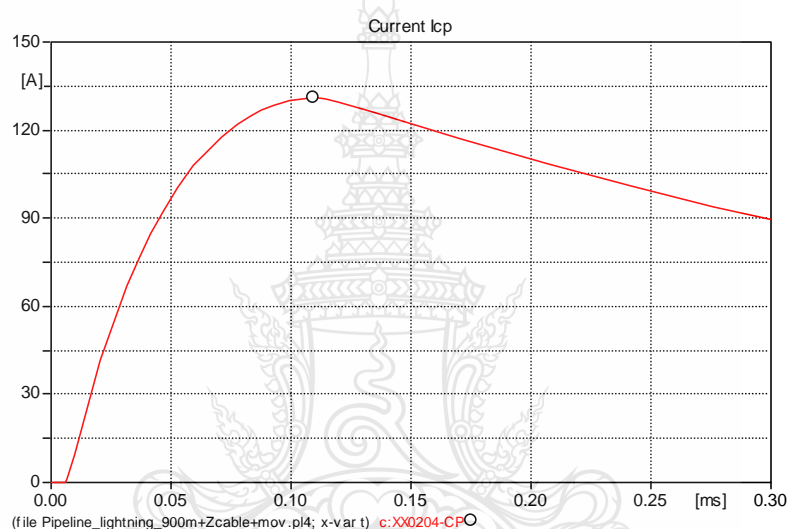
ภาพที่ 4.24 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าดำแรกปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร

จากภาพที่ 4.23 และ 4.24 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อและอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร ซึ่งพบค่าแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อนั้นมีค่าสูงเนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของท่อที่เพิ่มขึ้น หลังจากพิจารณาต่อรวมอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเข้าในตำแหน่งอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อนพบว่าแรงดันปรากฏนั้นมีค่าน้อยกว่า 1,500 โวลต์



ภาพที่ 4.25 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าดำแรกปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร

จากภาพที่ 4.25 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อจากกรณีแนวทางการป้องกัน โดยมีขนาดของกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อนั้นเท่ากับกรณีพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าป้องกันท่อสุกร่อน 4.1.2 (ค) ค่าของกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อนั้นมีแนวโน้มที่ค่าจะลดลงเมื่อความยาวท่อเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากจำนวนสาขาของวงจรสมมูลของจนวนท่อเพิ่มขึ้นตามความยาวท่อโดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ต่อจำนวนสาขานั้นมีค่าคงที่ และจนวนท่อดังกล่าวเป็นลักษณะของวงจรขนานทางไฟฟ้าจึงทำให้เกิดการแบ่งไหลของกระแสฟ้าผ่าในจำนวนที่เท่าๆ กันในแต่ละความยาวท่อต่อหน่วย



ภาพที่ 4.26 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร

จากภาพที่ 4.26 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนหลังจากต่อรวมอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าหรือป้องกันเสิร์จเข้าในระบบ จากผลการจำลองของรูปคลื่นกระแสฟ้าผาดังภาพนั้น พบว่ายังมีกระแสฟ้าผ่าปรากฏคงเหลือจำนวนหนึ่ง ความสามารถของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จในการลดกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนยังกระทำได้น้อย โดยค่ายอดของกระแสผ้านั้นจะลดลงเมื่อคาบเวลามากขึ้น

การพิจารณาเลือกคุณสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเพื่อทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายให้กับอุปกรณ์ที่ถูกป้องกันอย่างเหมาะสมนั้น โดยอาจต้องพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของกัปดักเสิร์จ (VI Curve) ขนาดพิคการทนกระแสฟ้าผ่าสูงสุดและค่าแรงดันต่ำสุดที่อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่ากระทำได้นอกจากนี้แล้วยังต้องพิจารณาเลือกโซนหรือย่านการป้องกันที่ถูกต้อง

ด้วยเช่นกันตามที่ได้กล่าวถึงในบทที่ 2 เมื่อปัจจัยการป้องกันฟ้าผ่าที่เกี่ยวข้องได้ถูกพิจารณาอย่างครบถ้วนแล้ว จะสามารถช่วยลดค่าของแรงดันและกระแสฟ้าผ่าปรากฏได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จากผลการจำลองตามภาพที่ 4.26 จะสังเกตเห็นว่ายังมีค่าของกระแสฟ้าผ่าปรากฏคงเหลือที่อุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อนจำนวนหนึ่ง ทั้งนี้ผลที่เกิดขึ้นได้เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของกับดักเสิร์จ (VI Curve) ที่ได้พิจารณานำมาเป็นอุปกรณ์ป้องกัน รวมถึงขนาดของกระแสฟ้าผ่าที่ไหลลงดินและสัมผัสต่อ

**ตารางที่ 4.9** ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าค่าแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจาก ความยาวท่อ 900 เมตร

ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	1.172	0.176
CP	0.662	130.98
100	2.722	0.176
200	4.248	0.176
300	5.569	0.176
400	6.688	0.176
500	7.604	0.176
600	8.331	0.176
700	8.841	0.176
800	9.148	0.176
900	9.250	0.176

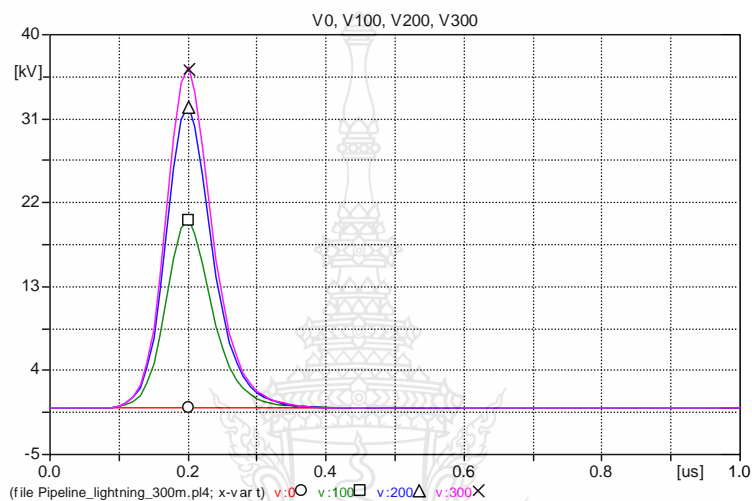
จากตารางที่ 4.9 เป็นการสรุปค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อและอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อน โดยพิจารณาต่อร่วมอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเพื่อป้องกันแรงดันเกินในอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อน บันทึกค่าทุกๆ ระยะห่าง 100 เมตร จากความยาวท่อทั้งหมด 900 เมตร จากช่องของแรงดันสูงสุดจะเห็นถึงการเพิ่มขึ้นของแรงดันฟ้าผ่าปรากฏในแต่ละช่วงความยาวท่อที่เพิ่มขึ้นตามความยาวท่อ ค่าแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันที่ผู้กร่อนนั้นมีค่าน้อยกว่า 1,500 โวลต์ จากช่องกระแสสูงสุดจะเห็นได้ว่าค่าของกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อในระยะต่างๆ นั้นมีค่าเท่ากันตลอดความยาวท่อ และค่ากระแสปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อนยังมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า

## 4.2 กรณีฟ้าผ่าล่าต่อมา

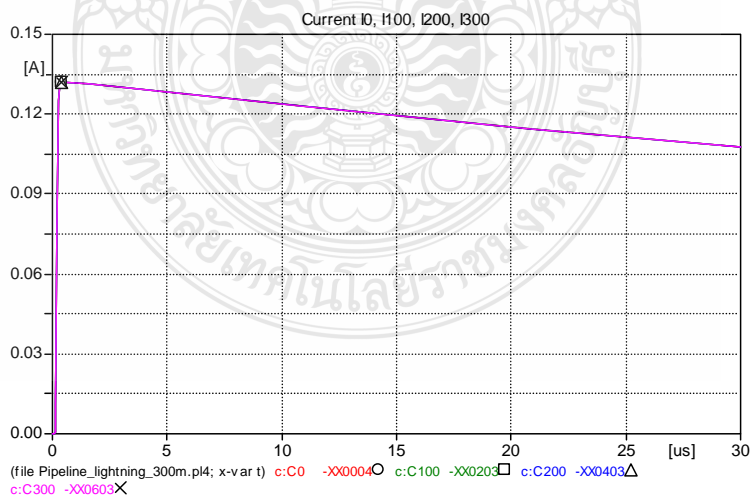
### 4.2.1 กรณีพิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของท่อ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลของการจำลองเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.1 โดยได้พิจารณาเปลี่ยนพารามิเตอร์ของกระแสฟ้าผ่าเป็นกรณีฟ้าผ่าล่าต่อมาดังค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.6

ก) ที่ความยาวท่อ 300 เมตร



ภาพที่ 4.27 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 300 เมตร



ภาพที่ 4.28 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 300 เมตร

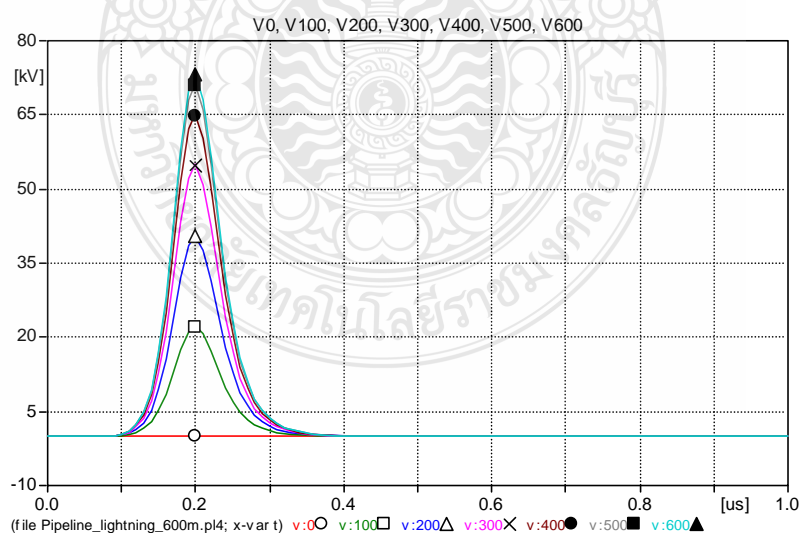
จากภาพที่ 4.27 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ตำแหน่ง 0, 100, 200 และ 300 เมตร ของท่อจากความยาวท่อทั้งหมด 300 เมตร โดยมีขนาดของแรงดันปรากฏสูงสุดถึง 18.288 กิโลโวลต์ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสฟ้าผ่าหน้าคลื่นต่อเวลามีค่าสูงกว่ากรณี 4.1

จากพารามิเตอร์รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมา 0.454/143 ไมโครวินาที สังกัดว่ามีค่าความชันของกระแสหน้าคลื่นสูงกว่าค่าพารามิเตอร์รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล่าแรกที่ 19/485 ไมโครวินาที ซึ่งเมื่อพิจารณาตามสมการที่ 2.1 จึงเป็นผลให้เกิดแรงดันจากค่าความเหนี่ยวนำปรากฏที่ระยะต่าง ๆ ของท่อนั้นสูงกว่ากรณีฟ้าผ่าล่าแรก

**ตารางที่ 4.10** ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 300 เมตร

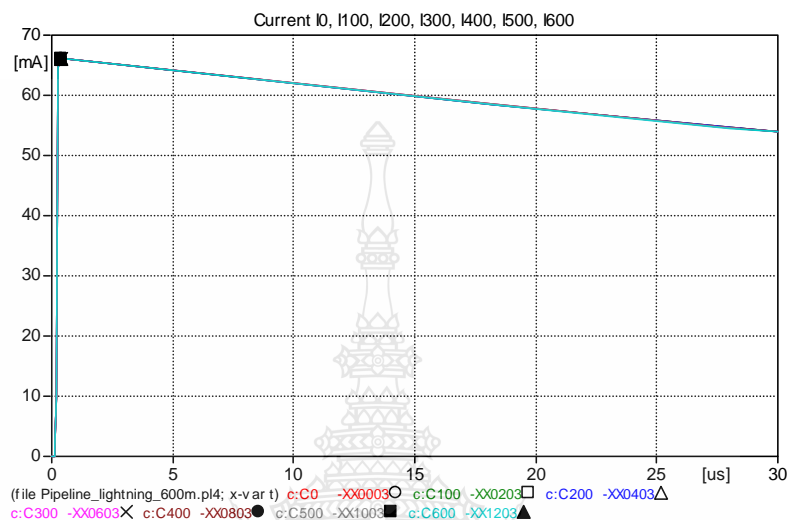
ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	0.0008	0.132
100	20.189	0.132
200	32.466	0.132
300	36.585	0.132

ข) ความยาวท่อ 600 เมตร



**ภาพที่ 4.29** รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร

จากภาพที่ 4.29 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร โดยมีค่ายอดของแรงดันนั้นสูงกว่ากรณีความยาวท่อ 300 เมตร ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของท่อที่เพิ่มขึ้นตามความยาวท่อ



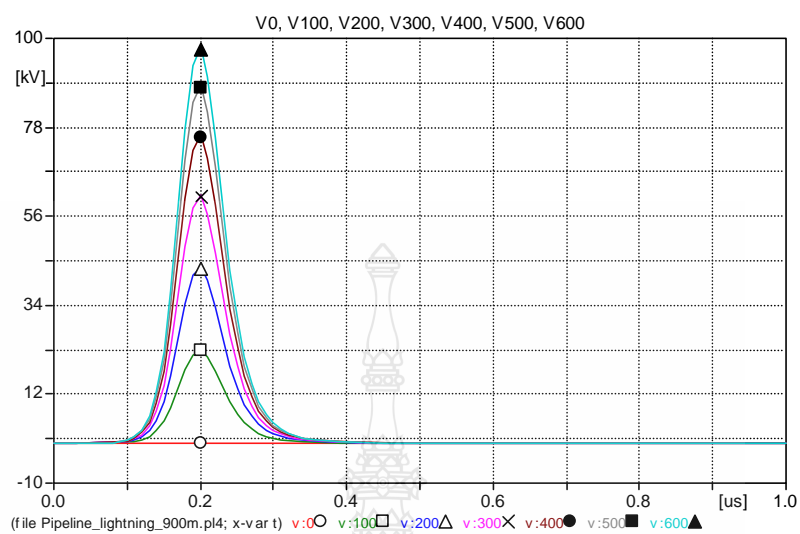
ภาพที่ 4.30 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร

จากภาพที่ 4.30 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อโดยมีค่าของกระแสเท่ากันตลอดความยาวท่อ เป็นผลจากค่าอิมพีแดนซ์ของจนวนท่อต่อหน่วยความยาวนั้นเท่ากัน

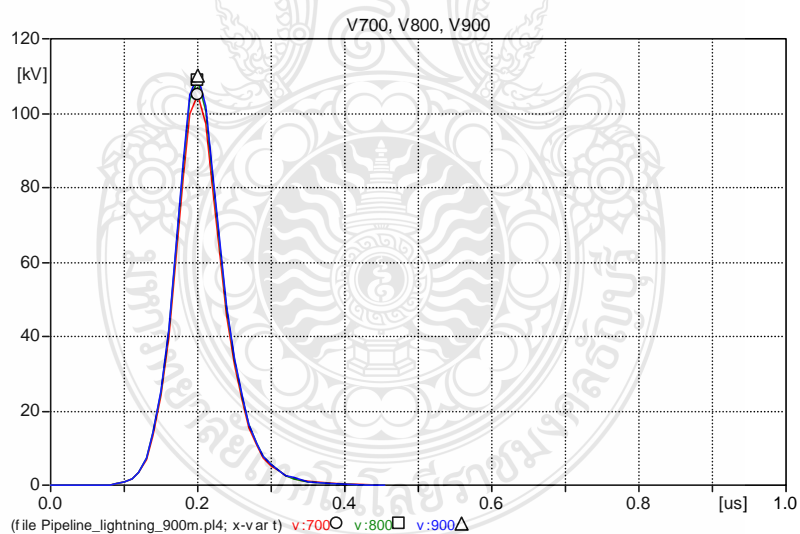
ตารางที่ 4.11 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร

ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	0.0004	0.066
100	22.245	0.066
200	40.650	0.066
300	54.969	0.066
400	65.203	0.066
500	71.351	0.066
600	73.414	0.066

ค) ความยาวท่อ 900 เมตร



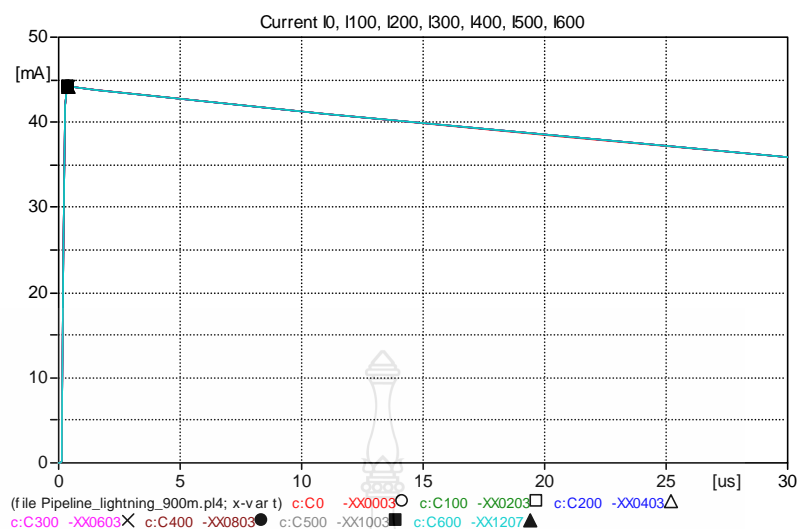
ภาพที่ 4.31 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 900 เมตร (0-600 เมตร)



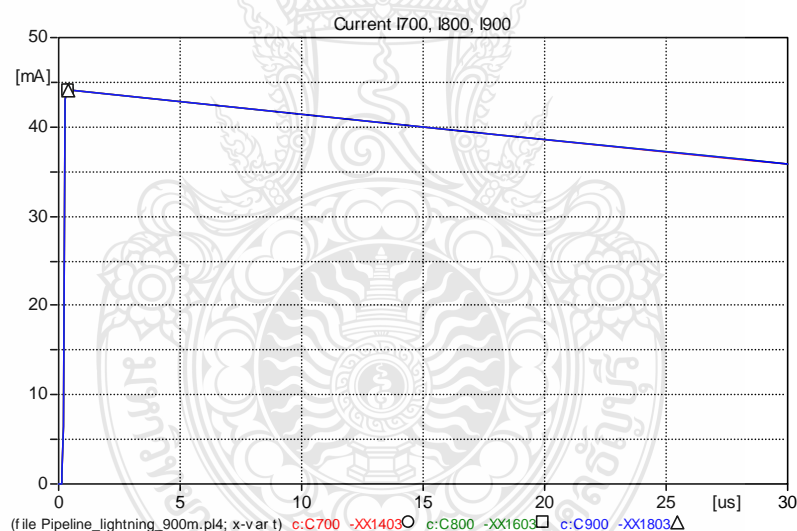
ภาพที่ 4.32 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจากความยาวท่อ 900 เมตร (700-900 เมตร)

จากภาพที่ 4.31 และ 4.32 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อจากความยาวท่อทั้งหมด 900 เมตร โดยแรงดันค่ายอดมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นตามความยาวท่อที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน





ภาพที่ 4.33 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจาก ความยาวท่อ 900 เมตร (0-600 เมตร)



ภาพที่ 4.34 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อจาก ความยาวท่อ 900 เมตร (700-900 เมตร)

จากภาพที่ 4.33 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อจากระยะเริ่มต้นถึงระยะ 600 เมตร จากความยาวท่อทั้งหมด 900 เมตร ส่วนภาพที่ 4.34 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏจากระยะ 700 เมตรถึง 900 เมตร สังเกตว่าค่าของกระแสนั้นมีแนวโน้มที่ค่าจะต่ำลงจากความยาวท่อ 300 และ 600 เมตร ซึ่งเกิดจากการแบ่งไหลของกระแสผ่านอิมพีแดนซ์ของฉนวนที่เป็นวงจรถนนาน

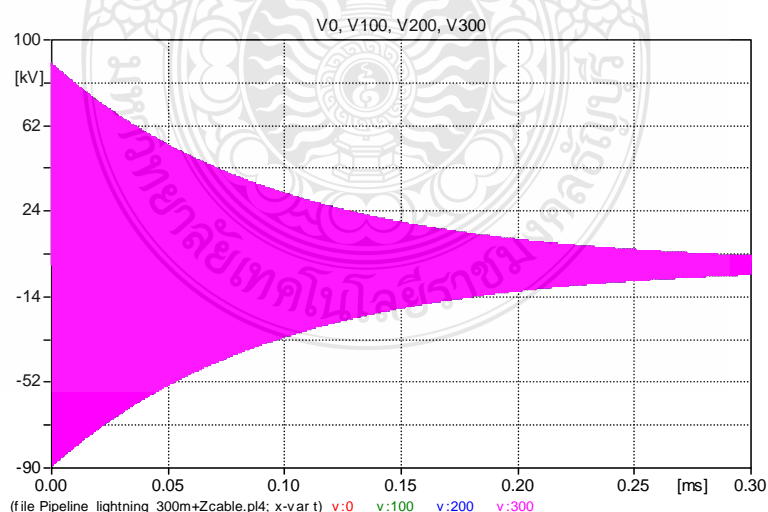


ตารางที่ 4.12 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำดับต่อมาปรากฏที่ต่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อ จากความยาวท่อ 900 เมตร

ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	0.0002	0.044
100	22.932	0.044
200	43.384	0.044
300	61.110	0.044
400	76.112	0.044
500	88.388	0.044
600	97.940	0.044
700	104.77	0.044
800	108.87	0.044
900	110.24	0.044

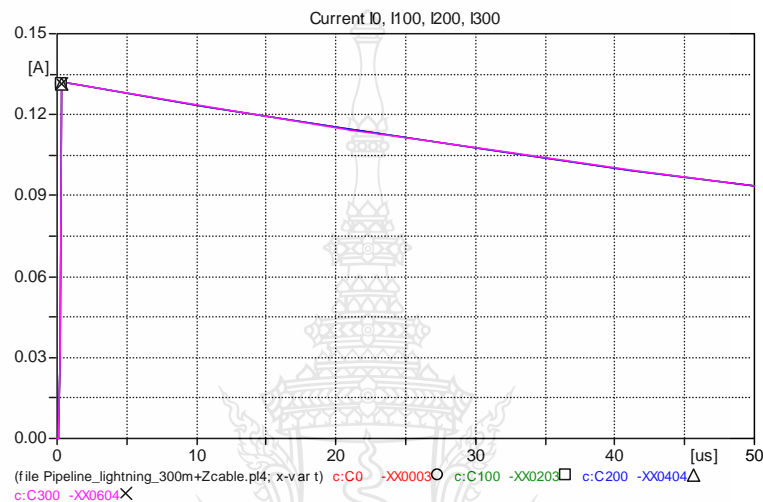
#### 4.2.2 กรณีพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อ ผู้กร่อน

ก) ความยาวท่อ 300 เมตร

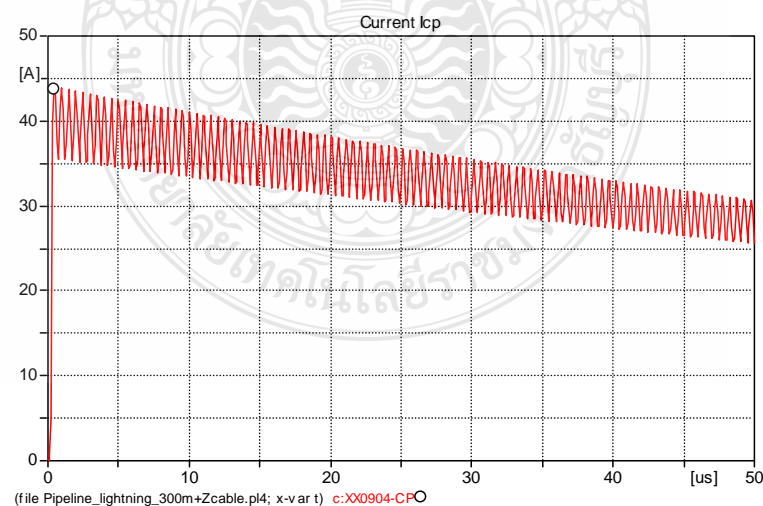


ภาพที่ 4.35 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าลำดับต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อ ร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 300 เมตร

จากภาพที่ 4.35 เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าผ่าปรากฏที่ต่อตำแหน่งเริ่มต้น 100, 200, และ 300 เมตร จากความยาวท่อทั้งหมด 300 เมตร พบการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าผ่าปรากฏโดยมีค่ายอดประมาณ 90.065 กิโลโวลต์ ทั้งด้านบวกและด้านลบและมีแนวโน้มที่ค่ายอดของแรงดันจะลดลงเมื่อคาบเวลามากขึ้น ซึ่งการแกว่งของแรงดันดังกล่าวเกิดจากความชันหน้าคลื่นและค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของสายอาโนด (Anode) ของวงจรป้องกันท่อสุกร่อน



ภาพที่ 4.36 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 300 เมตร



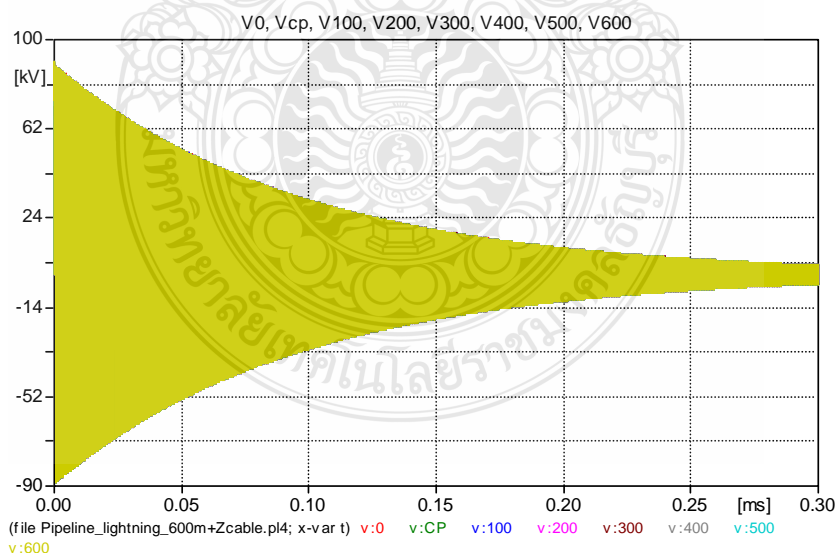
ภาพที่ 4.37 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่าต่อมาปรากฏที่ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 300 เมตร

จากภาพที่ 4.36 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ตำแหน่งเริ่มต้น 100, 200 และ 300 เมตร โดยค่ากระแสนั้นมีขนาดเท่ากันทุกตำแหน่งเนื่องจากลักษณะของฉนวนท่อกับกระแสไหลผ่านนั้นเป็นวงจรรวมกัน ภาพที่ 4.37 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อน พบการแกว่งของรูปคลื่นกระแสด้านบวกจากค่าความชันหน้าคลื่น กระแสคายออกนั้นมีแนวโน้มที่ค่าจะลดลงเมื่อความยาวมากขึ้น โดยที่ค่ากระแสเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่า

ตารางที่ 4.13 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 300 เมตร

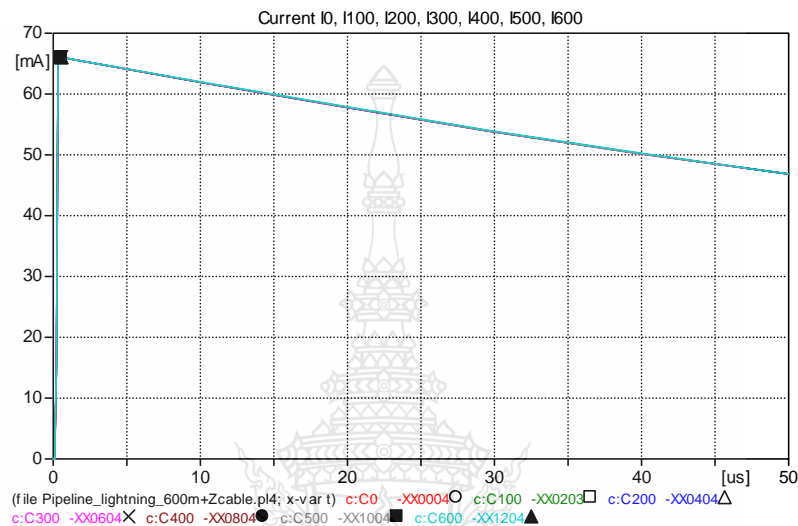
ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	89.461	0.131
CP	88.972	43.748
100	89.777	0.131
200	89.993	0.131
300	90.065	0.131

ข) ความยาวท่อ 600 เมตร

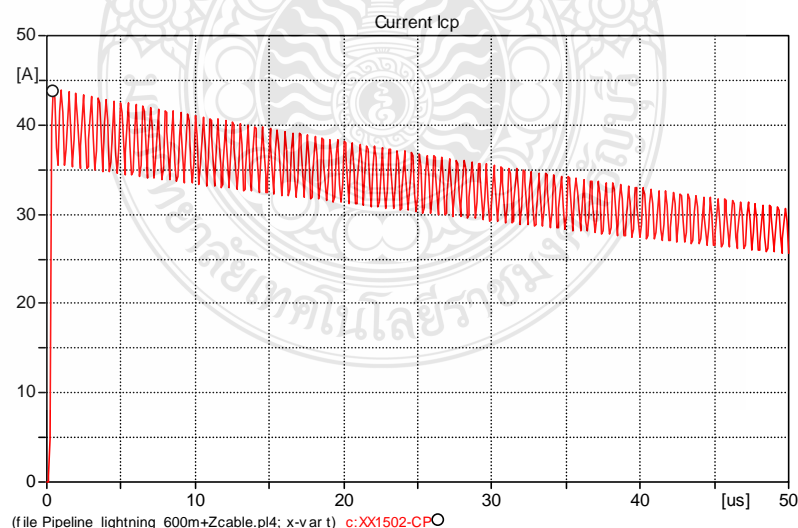


ภาพที่ 4.38 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร

จากภาพที่ 4.38 เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อ โดยมีระยะห่างทางท่อที่บันทึกค่าทุกๆ 100 เมตร จากความยาวท่อทั้งหมด 600 เมตร พบการแกว่งของแรงดันไฟฟ้าปรากฏทั้งด้านบวกและด้านลบโดยมีค่ายอดประมาณ 90.805 กิโลโวลต์ ซึ่งค่ายอดนั้นจะลดลงเมื่อคาบเวลามากขึ้นเช่นกัน



ภาพที่ 4.39 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร



ภาพที่ 4.40 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดต่อมาปรากฏที่ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร

จากภาพที่ 4.39 เป็นรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าปรากฏที่ตำแหน่งเริ่มต้นถึงระยะ 600 เมตร โดยบันทึกค่าของกระแสทุกๆ 100 เมตร ตลอดความยาวท่อ เมื่อพิจารณาจากภาพพบว่าค่ากระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มที่ค่าจะลดลงจากความยาวท่อ 300 เมตร โดยกระแสไฟฟ้าปรากฏมีค่าเท่ากันทุกตำแหน่ง เนื่องจากลักษณะของฉนวนท่อที่กระแสไหลผ่านนั้นเป็นวงจรรงนานซึ่งเป็นไปตามกฎการแบ่งกระแส ความยาวท่อที่มากขึ้นจึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของฉนวนท่อลดลงโดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่วนที่เป็นโลหะจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามความยาวท่อที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

จากภาพที่ 4.40 เป็นรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน พบการแกว่งของรูปคลื่นกระแสด้านบวกเป็นผลจากค่าความชื้นของกระแสหน้าคลื่น กระแสค่ายอดนั้นมีแนวโน้มที่ค่าจะลดลงเมื่อคาบเวลามากขึ้น โดยขนาดของกระแสปรากฏเมื่อหาค่าเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าของโปรแกรม ATP-EMTP

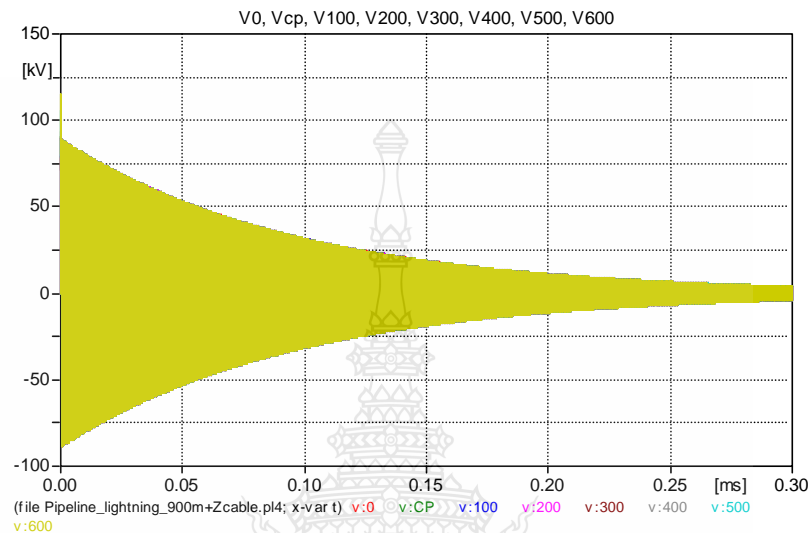
**ตารางที่ 4.14** ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าล้าต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าจริงป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร

ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	89.461	0.066
CP	88.972	43.748
100	89.813	0.066
200	90.136	0.066
300	90.388	0.066
400	90.568	0.066
500	90.676	0.066
600	90.712	0.066

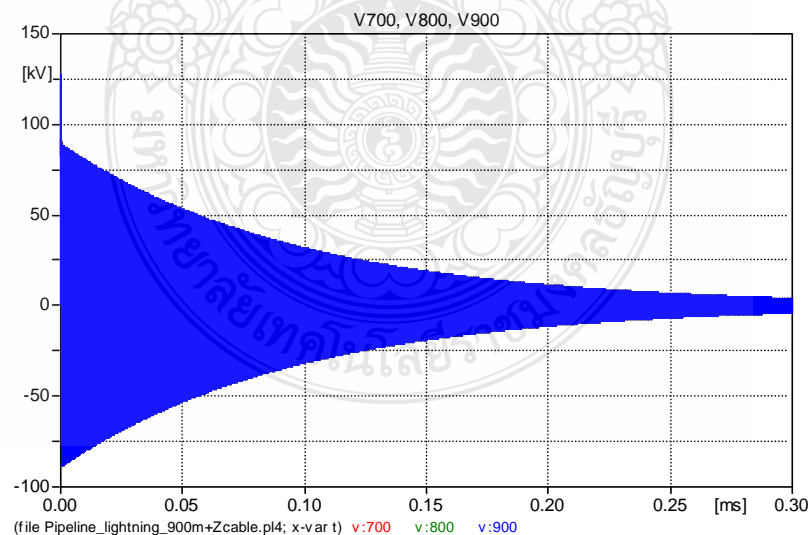
จากตารางที่ 4.14 เป็นการสรุปค่าแรงดันและค่ากระแสไฟฟ้าปรากฏที่ท่อและอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อที่พิจารณา 600 เมตร จากค่าของแรงดันพบว่าค่านี้มีแนวโน้มที่ค่าจะสูงขึ้นตามความยาวท่อและมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับกรณี 4.12 (ข) ซึ่งเป็นผลจากค่าความชื้นของกระแสหน้าคลื่นของรูปคลื่นไฟฟ้าล้าต่อมา ส่วนค่าของกระแสปรากฏที่ท่อนั้นมีค่าคงที่เท่ากันตลอดความยาวท่อ ค่ากระแสนั้นมีค่าน้อยกว่ากรณี 4.12 (ข) เนื่องจากขนาดของกระแสไฟฟ้าล้าต่อมามีค่าน้อยกว่าค่ากระแสไฟฟ้าล้าแรกตามตารางที่ 3.6

ค) ความยาวท่อ 900 เมตร

จากผลการจำลองที่ความยาวท่อ 600 เมตร ที่กล่าวถึงข้างต้นพบว่ามีความแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่สูงและในกรณีที่ความยาวท่อเพิ่มขึ้นนี้จะเริ่มเกิดค่ายอดของแรงดันสูงมากในช่วงเวลาสั้นๆ

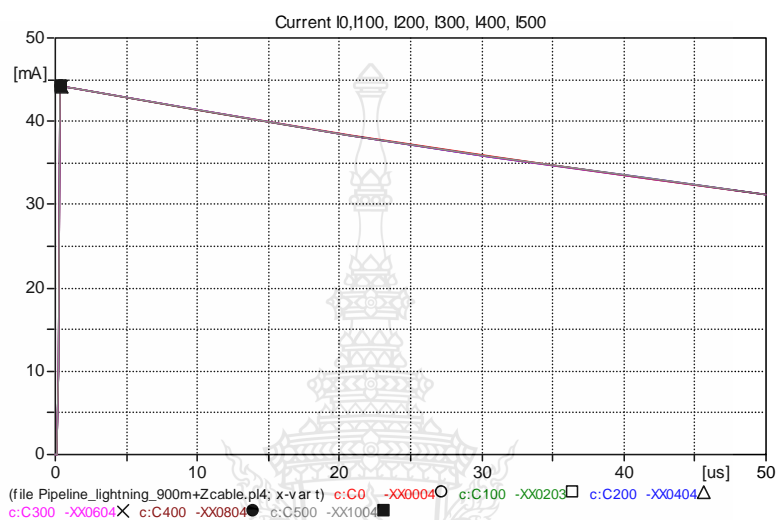


ภาพที่ 4.41 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร

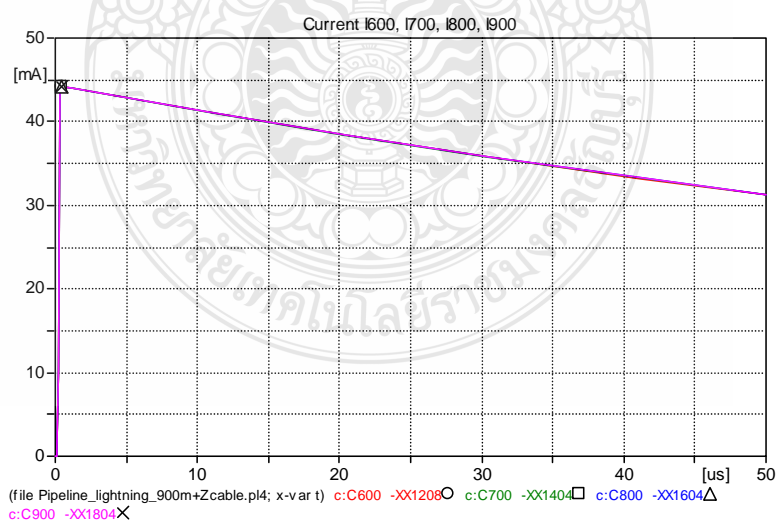


ภาพที่ 4.42 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร

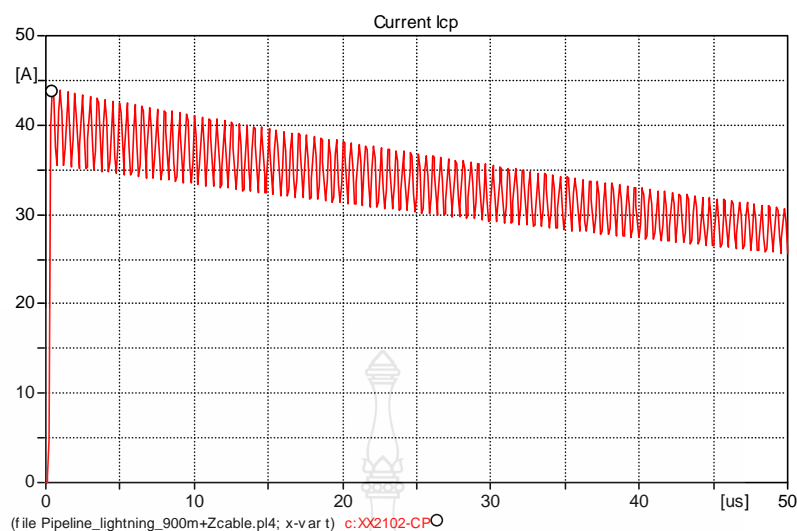
จากภาพ 4.41 และ 4.42 เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อจากความยาวท่อทั้งหมด 900 เมตร และปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนโดยมีอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนเพิ่มเข้ามาในระบบ พบการแกว่งของแรงดันทั้งด้านบวกและด้านลบโดยมีค่ายอดด้านบวกสูงสุดประมาณ 115.15 กิโลโวลต์ และเกิดแรงดันชั่วเวลาสั้นๆ



ภาพที่ 4.43 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร (0-500 เมตร)



ภาพที่ 4.44 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลัดต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร (600-900 เมตร)



ภาพที่ 4.45 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้างจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร

จากภาพที่ 4.43 และ 4.44 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อจากความยาวท่อ 900 เมตร ซึ่งพบว่าค่าของกระแสนั้นมีค่าน้อยกว่าจากกรณีที่ความยาวท่อ 300 และ 600 เมตร

ตารางที่ 4.15 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้างจรป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 900 เมตร

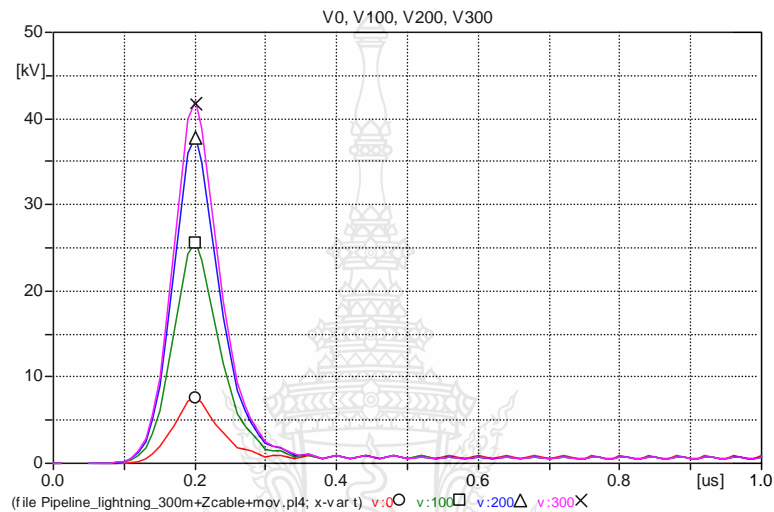
ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	89.461	0.044
CP	88.972	43.748
100	89.825	0.044
200	90.185	0.044
300	90.496	0.044
400	90.760	0.044
500	90.976	0.044
600	91.144	0.044
700	91.264	0.044
800	91.336	0.044
900	91.360	0.044



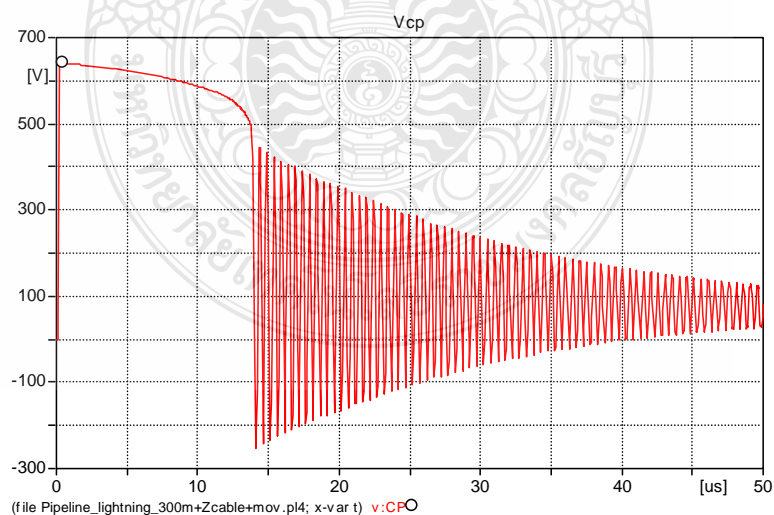
จากภาพที่ 4.45 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อน พบการแกว่งของรูปคลื่นเนื่องจากความล่าช้าของกระแสหน้าคลื่นของรูปคลื่นฟ้าผ่าล่าต่อมา เมื่อหาค่าเฉลี่ยการแกว่งของกระแสจะมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่าของโปรแกรม ATP-EMTP

### 4.2.3 แนวทางการป้องกันอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อน

#### ก) ความยาวท่อ 300 เมตร

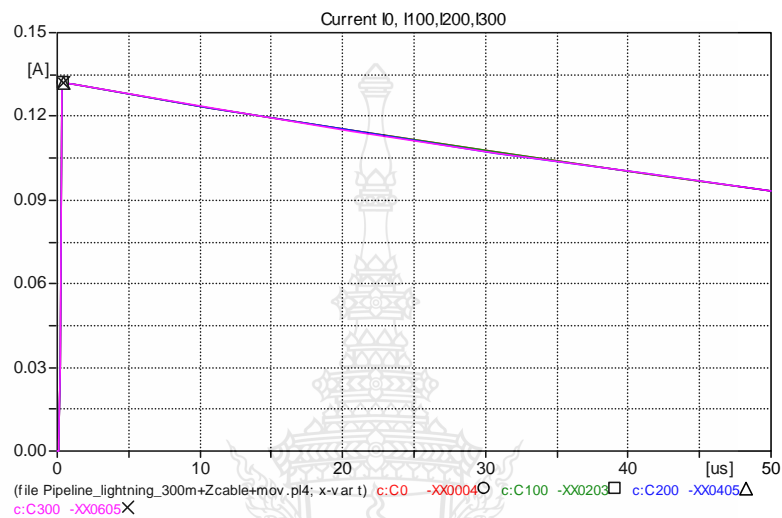


ภาพที่ 4.46 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร

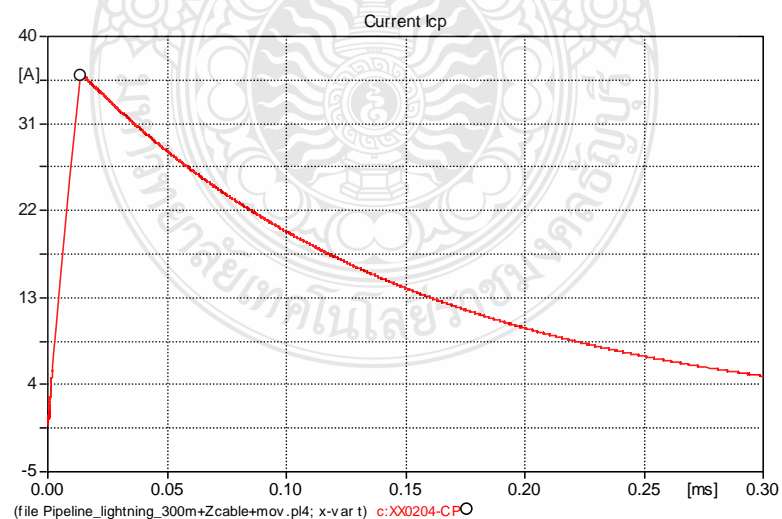


ภาพที่ 4.47 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร

จากภาพ 4.46 เป็นรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ระยะต่างๆ ท่อจากความยาวท่อทั้งหมด 300 เมตร หลังจากพิจารณาต่อร่วมอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าหรือป้องกันลัดวงจรเข้าในตำแหน่งอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน และจากภาพที่ 4.47 พบว่าสามารถลดแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนได้โดยมีค่าน้อยกว่า 1,500 โวลต์



ภาพที่ 4.48 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลัดต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร



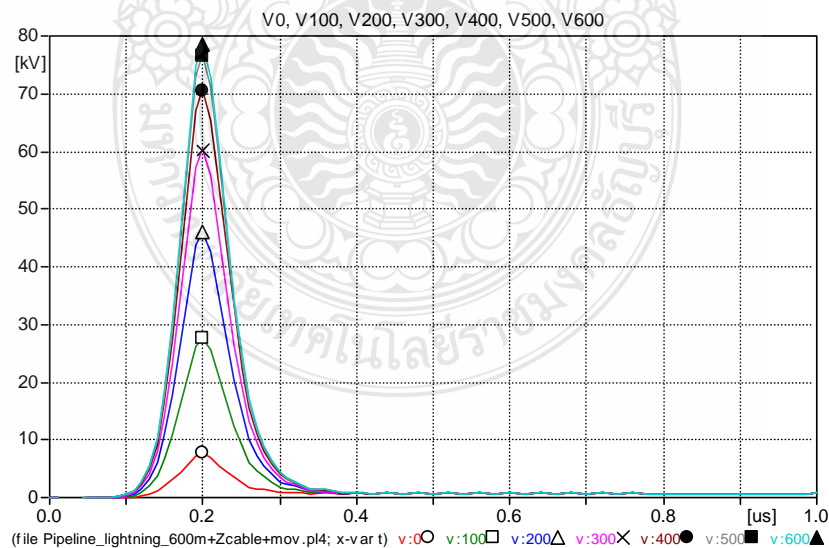
ภาพที่ 4.49 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าลัดต่อมาปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร

จากภาพที่ 4.48 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อจากความยาวท่อ 300 เมตร หลังจากพิจารณาต่อรวมระบบป้องกันด้วยอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าหรือป้องกันเสิร์จในตำแหน่ง อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน ภาพที่ 4.49 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน หลังจากพิจารณาอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ พบว่าสามารถลดกระแสฟ้าผ่าได้จำนวนหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จที่นำมาป้องกันอุปกรณ์

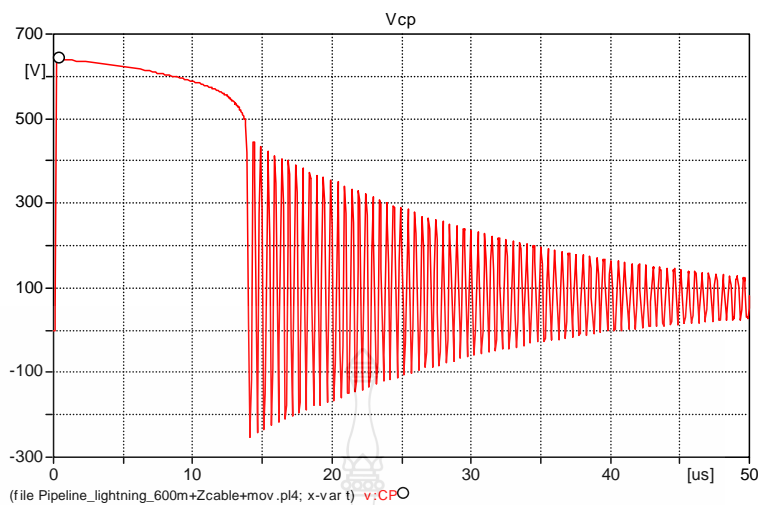
ตารางที่ 4.16 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าค่าต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 300 เมตร

ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	7.707	0.132
CP	0.642	35.968
100	25.685	0.132
200	37.962	0.132
300	42.081	0.132

ข) ความยาวท่อ 600 เมตร

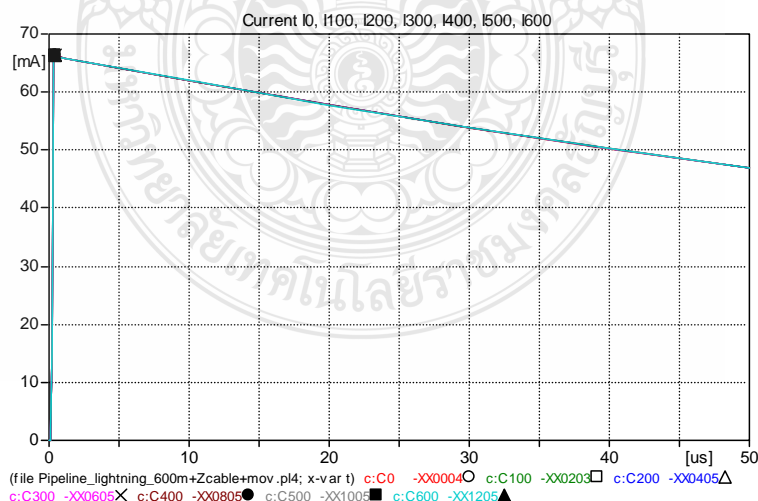


ภาพที่ 4.50 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าค่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร

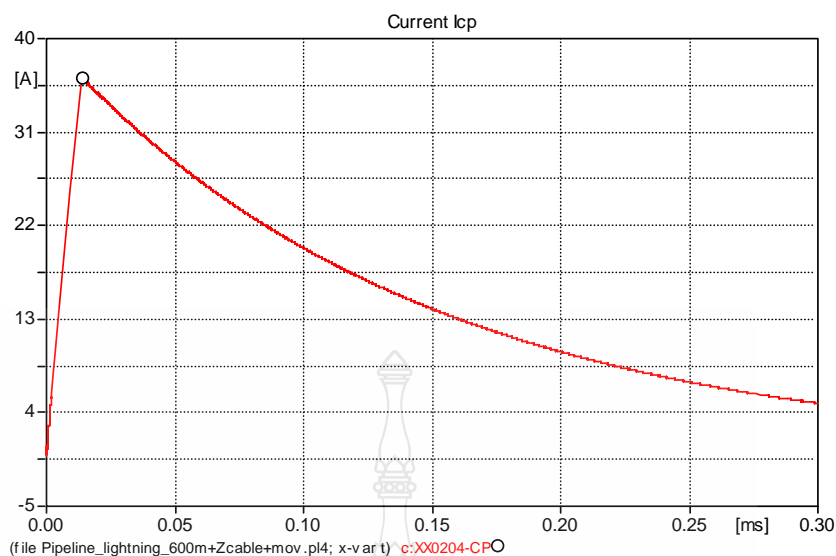


ภาพที่ 4.51 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร

ภาพที่ 4.50 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อจากความยาวท่อ 600 เมตร หลังจากพิจารณาต่อร่วมอุปกรณ์ป้องกันเสร็จในตำแหน่งอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน พบค่าแรงดันยังมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามความยาวท่อ ส่วนภาพที่ 4.51 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนจากความยาวท่อ 600 เมตร หลังจากที่พิจารณาอุปกรณ์ป้องกันเสร็จในตำแหน่งอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนพบค่าแรงดันที่ปรากฏนั้นมีค่าน้อยกว่า 1,500 โวลต์



ภาพที่ 4.52 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร



ภาพที่ 4.53 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร

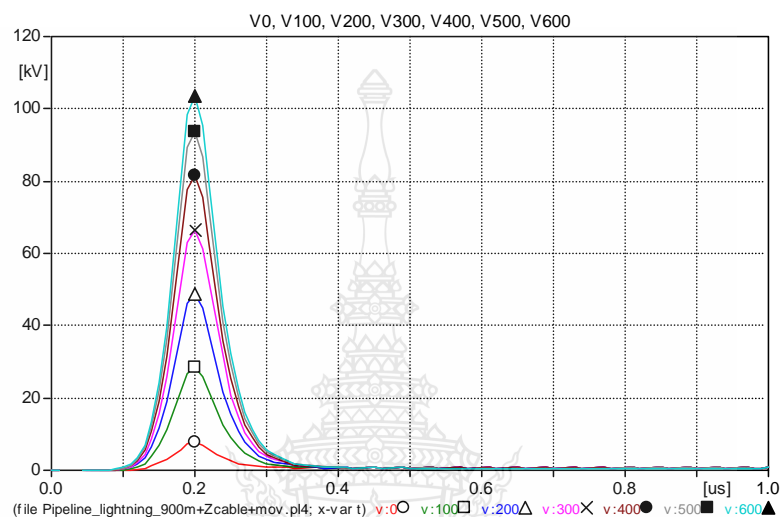
จากภาพที่ 4.52 เป็นรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อในระยะต่างๆ จากความยาวท่อ 600 เมตรพบค่าของกระแสนั้นมีค่าลดลงเมื่อพิจารณาเทียบกับกรณีความยาวท่อ 300 เมตร ซึ่งเป็นผลมาจากวงจรสมมูลของฉนวนท่อที่เป็นลักษณะวงจรขนานเกิดการแบ่งไหลของกระแส

ตารางที่ 4.17 ค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 600 เมตร

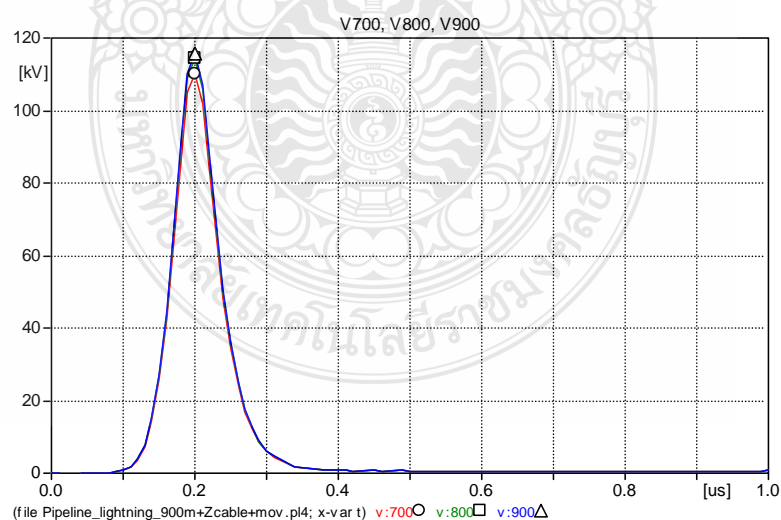
ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	7.685	0.066
CP	0.642	36.111
100	27.719	0.066
200	46.124	0.066
300	60.443	0.066
400	70.677	0.066
500	76.825	0.066
600	78.889	0.066

ภาพ 4.53 เป็นรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันที่กร่อนพบว่าค่าของกระแสนั้นยังมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายไฟฟ้า เนื่องจากกระแสทั้งหมดต้องการไหลลงดินที่สายอาโนดของอุปกรณ์ป้องกันที่กร่อน

ค) ความยาวท่อ 900 เมตร

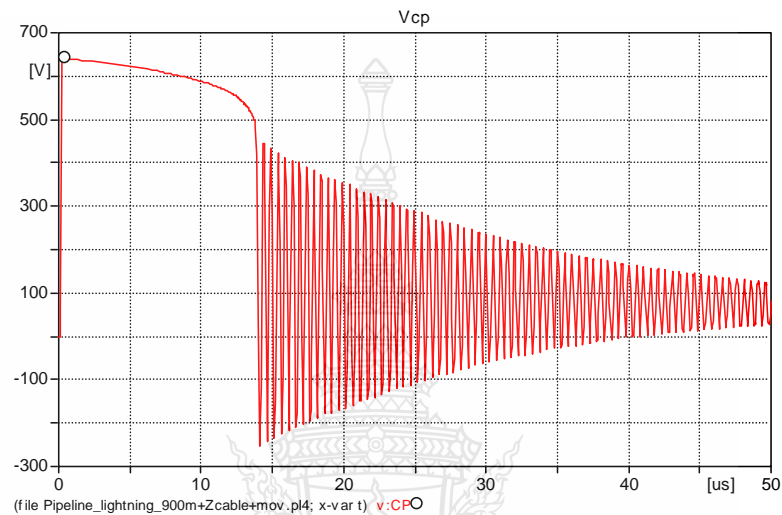


ภาพที่ 4.54 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร (0-600 เมตร)

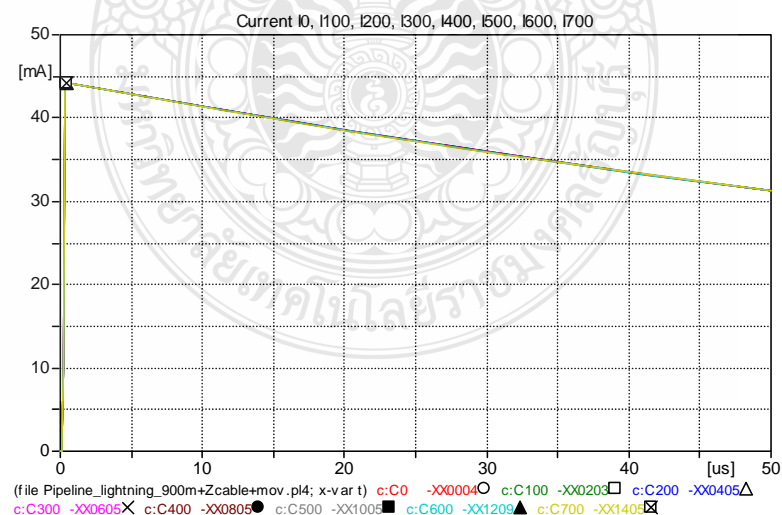


ภาพที่ 4.55 รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าผ่าลำต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร (700-900 เมตร)

จากภาพที่ 4.54 และ 4.55 เป็นรูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อ โดยมี ระยะห่างการบันทึกค่าทุกๆ 100 เมตร จากความยาวท่อทั้งหมด 900 เมตร จากภาพพบว่าแรงดัน ปรากฏนั้นแนวโน้มที่ค่าจะสูงขึ้นเมื่อความยาวท่อมากขึ้นเช่นกัน ส่วนภาพที่ 4.56 เป็นรูปคลื่นแรงดัน ฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน โดยมีแรงดันน้อยกว่า 1,500 โวลต์

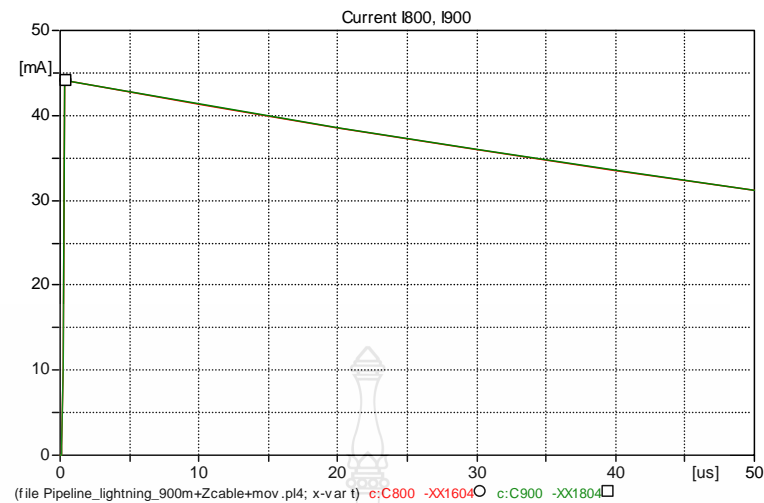


ภาพที่ 4.56 รูปคลื่นแรงดันฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ CP กรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร



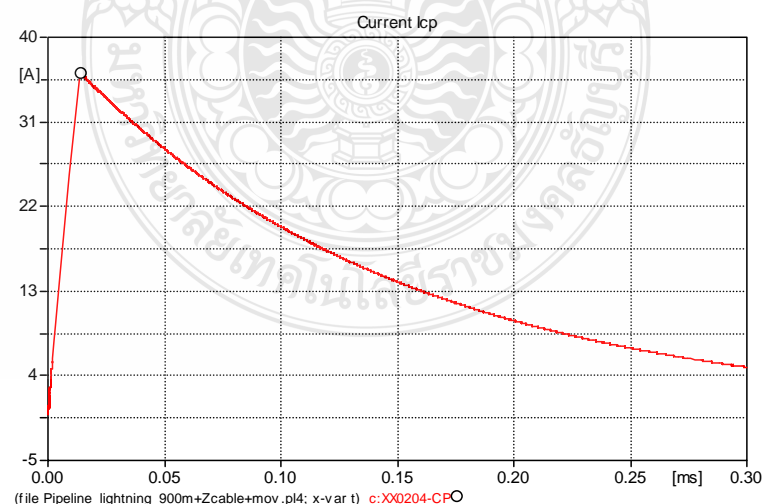
ภาพที่ 4.57 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าล่าต่อมาปรากฏที่ท่อกรณีแนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร (0-700 เมตร)





ภาพที่ 4.58 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลំต่อมาปรากฏที่เทอร์มินเนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร (800-900 เมตร)

จากภาพที่ 4.57 และ 4.58 เป็นรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลំปรากฏที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อโดยมีระยะห่างการบันทึกค่าทุกๆ 100 เมตร จากความยาวท่อทั้งหมด 900 เมตร พบค่าของกระแสนั้นมีค่าเท่ากันในทุกๆ ระยะห่างเนื่องจากในแต่ละช่วงความยาวท่อมียค่าอิมพีแดนซ์ของฉนวนท่อเท่ากัน ส่วนภาพที่ 4.59 เป็นรูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลំปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อน พบค่าของกระแสนั้นมีค่าใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า เนื่องจากกระแสทั้งหมดต้องการไหลลงดินที่สายอาโนด



ภาพที่ 4.59 รูปคลื่นกระแสไฟฟ้าลំต่อมาปรากฏที่ CP กรณีเนวทางการป้องกันจากความยาวท่อ 900 เมตร



**ตารางที่ 4.18** ค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าล้าต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกันจาก ความยาวท่อ 900 เมตร

ระยะความยาวท่อ (เมตร)	แรงดันสูงสุด (กิโลโวลต์)	กระแสสูงสุด (แอมแปร์)
เริ่มต้น (0)	7.677	0.044
CP	0.642	36.111
100	28.399	0.044
200	48.851	0.044
300	66.577	0.044
400	81.578	0.044
500	93.855	0.044
600	103.410	0.044
700	110.230	0.044
800	114.330	0.044
900	115.710	0.044

### 4.3 สรุปผลการวิเคราะห์

จากการพิสูจน์ทางคณิตศาสตร์และจำลองด้วยโปรแกรม ATP-EMTP พบการแพร่กระจายของกระแสไฟฟ้าผ่านอิมพีแดนซ์ของดิน โดยพิจารณาระยะห่างจากจุดแพร่กระจายถึงฉนวนท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินเป็นจำนวน 5 เมตร เกิดการยกขึ้นของแรงดันไฟฟ้าที่พื้นดิน (GPR) เกิดความต่อเนื่องทางไฟฟ้าผ่านฉนวนท่อถึงตัวท่อส่วนที่เป็นโลหะ โดยไม่พิจารณาผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมภายในท่อ ดังข้อสรุปด้วยหลักการทางไฟฟ้าต่อไปนี้

#### 4.3.1 ผลจากค่าความเหนี่ยวนำของท่อ

จากผลการจำลองด้วยพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้าล้าแรก พบว่าความยาวท่อที่มากขึ้นจะมีแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ตำแหน่งต่างๆ ของท่อนั้นมากขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากผลของค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของท่อตามสมการที่ 2.1 ส่วนค่าของกระแสไฟฟ้าล้าที่ปรากฏนั้นมีแนวโน้มที่ค่าจะลดลงเมื่อความยาวท่อเพิ่มขึ้นเนื่องจากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของฉนวนท่อมีย่านสาขาที่มากขึ้นตามความยาวท่อซึ่งเป็นลักษณะของวงจรขนาน โดยที่ค่าอิมพีแดนซ์ของฉนวนท่อในแต่ละช่วงความยาวท่อนั้นมีค่าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าล้าที่ปรากฏจึงมีค่าลดลงซึ่งเป็นไปตามกฎการแบ่งกระแส โดยค่าแรงดันและกระแสปรากฏที่ท่อได้สรุปดังตารางที่ 4.19

**ตารางที่ 4.19** สรุปค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าล้าแรกปรากฏที่ท่อกรณีพิจารณาเฉพาะอิมพีแดนซ์ของท่อ

ระยะทางท่อ ที่บันทึกค่า (เมตร)	แรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ท่อ (กิโลโวลต์)			กระแสไฟฟ้าปรากฏที่ท่อ (แอมแปร์)		
	ความยาวท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดิน					
	300 (เมตร)	600 (เมตร)	900 (เมตร)	300 (เมตร)	600 (เมตร)	900 (เมตร)
เริ่มต้น (0)	0.060	0.031	0.020	0.529	0.265	0.176
100	1.508	1.661	1.712	0.529	0.265	0.176
200	2.425	3.036	3.239	0.529	0.265	0.176
300	2.733	4.160	4.563	0.529	0.265	0.176
400	-	4.870	5.683	-	0.265	0.176
500	-	5.330	6.660	-	0.265	0.176
600	-	5.484	7.313	-	0.265	0.176
700	-	-	7.823	-	-	0.176
800	-	-	8.129	-	-	0.176
900	-	-	8.232	-	-	0.176

#### 4.3.2 ผลจากค่าความเหนี่ยวนำของสายไฟฟ้าวางจรป้องกันท่อผู้กร่อน

จากค่าแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ท่อจากกรณีพิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของท่อตามตารางที่ 4.19 และเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวางจรป้องกันท่อผู้กร่อนที่มีความยาว 150 เมตรนั้นย่อมทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าสูงขึ้น ซึ่งย่อมเป็นไปตามกฎของโอห์มกล่าวคือเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของระบบมีค่าสูงขึ้นในขณะที่แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ย่อมเกิดแรงดันตกคร่อมในระบบสูงขึ้นด้วยเช่นกัน

จากตารางที่ 4.20 จะพบว่าค่าของแรงดันไฟฟ้าปรากฏในตำแหน่งอุปกรณ์ป้องกันท่อผู้กร่อนนั้นมีค่าสูงและสูงพอที่จะสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ป้องกันท่อผู้กร่อนได้เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน BS 60950 ถึงแม้ว่าจะมีอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จหรือกับดักไฟฟ้าต่ออยู่ในระบบเบื้องต้นแล้วก็ตาม ส่วนค่าของแรงดันไฟฟ้าปรากฏในระยะต่างๆ ของท่อนั้นจะถูกยกกระดืบแรงดันขึ้นด้วยเช่นกัน จากค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวางจรป้องกันท่อผู้กร่อนที่ต่ออนุกรมเพิ่มเข้ามาในระบบทำให้อิมพีแดนซ์โดยรวมมีค่าสูงขึ้น สำหรับค่าของกระแสไฟฟ้าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อผู้กร่อนนั้นจะมี

ค่าใกล้เคียงกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเนื่องจากกระแสไฟฟ้าในระบบต่อทั้งหมดต้องการไหลลงดิน โดยผ่านสายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อน

**ตารางที่ 4.20** สรุปค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าค่าแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีพิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อผู้กร่อน

ระยะทางท่อ ที่บันทึกค่า (เมตร)	แรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ท่อ (กิโลโวลต์)			กระแสไฟฟ้าปรากฏที่ท่อ (แอมแปร์)		
	ความยาวท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน					
	300 (เมตร)	600 (เมตร)	900 (เมตร)	300 (เมตร)	600 (เมตร)	900 (เมตร)
เริ่มต้น (0)	8.248	8.247	8.246	0.529	0.245	0.176
CP	7.731	7.731	7.731	159.14	159.14	159.14
100	9.591	9.742	9.792	0.529	0.245	0.176
200	10.509	11.115	11.319	0.529	0.245	0.176
300	10.817	12.183	12.641	0.529	0.245	0.176
400	-	12.947	13.760	-	0.245	0.176
500	-	13.405	14.676	-	0.245	0.176
600	-	13.559	15.396	-	0.245	0.176
700	-	-	15.906	-	-	0.176
800	-	-	16.213	-	-	0.176
900	-	-	16.316	-	-	0.176

#### 4.3.3 กรณีการป้องกันอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อน

จากค่าแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อนในทุกๆ กรณีที่เกี่ยวข้องและกล่าวถึงข้างต้น พบว่าแรงดันไฟฟ้าปรากฏมีค่าสูงเพียงพอที่จะสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ป้องกันต่อผู้กร่อนได้ตามที่มาของปัญหาในงานวิจัยฉบับนี้ ถึงแม้ว่าจะมีอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าต่ออยู่ในระบบแล้วก็ตาม และจากผลการจำลองพบว่าอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้านั้นไม่สามารถช่วยลดแรงดันหรือป้องกันไฟฟ้าได้ ซึ่งเกิดจากค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของสายตัวนำลงดินโดยผ่านสายอาโนดที่มีความยาวถึง 150 เมตร

สำหรับแนวทางการป้องกันนั้นได้พิจารณาต่อร่วมอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จขนาด 20 kA ซึ่งมีความสูงที่กระแสฟ้าผ่าส่วนที่สัมผัสท่อและพิจารณาระยะเวลาความยาวสายตัวนำลงดินให้มีความยาวน้อยที่สุดที่สามารถกระทำได้จากผลการจำลองดังตารางที่ 4.21 พบว่าสามารถควบคุมแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนได้โดยมีค่าน้อยกว่า 1,500 โวลต์ และยังสามารถลดแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อได้ด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 4.21 สรุปค่าแรงดันและกระแสฟ้าผ่าลำแรกปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกัน

ระยะทางท่อ ที่บันทึกค่า (เมตร)	แรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อ (กิโลโวลต์)			กระแสฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อ (แอมแปร์)		
	ความยาวท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน					
	300 (เมตร)	600 (เมตร)	900 (เมตร)	300 (เมตร)	600 (เมตร)	900 (เมตร)
เริ่มต้น (0)	1.179	1.178	1.172	0.529	0.265	0.176
CP	0.662	0.662	0.662	130.98	130.98	130.98
100	2.526	2.672	2.722	0.529	0.265	0.176
200	3.436	4.044	4.248	0.529	0.265	0.176
300	3.743	5.112	5.569	0.529	0.265	0.176
400	-	5.875	6.688	-	0.265	0.176
500	-	6.334	7.604	-	0.265	0.176
600	-	6.488	8.331	-	0.265	0.176
700	-	-	8.841	-	-	0.176
800	-	-	9.148	-	-	0.176
900	-	-	9.250	-	-	0.176

#### 4.3.4 ผลของฟ้าผ่าลำต่อมา

เมื่อพิจารณาผลการจำลองของกระแสฟ้าผ่าลำต่อมา พบว่าค่าของแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อนั้นมีค่าสูงกว่าผลการจำลองของฟ้าผ่าลำแรก เนื่องจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสหน้าคลื่นต่อเวลามีค่าความชันมากกว่ากรณีฟ้าผ่าลำแรก สำหรับค่าแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อสุกร่อนนั้นอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จสามารถควบคุมแรงดันได้โดยมีค่าน้อยกว่า 1,500 โวลต์ ดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 สรุปค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าล้าต่อมาปรากฏที่ท่อและ CP กรณีแนวทางการป้องกัน

ระยะทางท่อ ที่บันทึกค่า (เมตร)	แรงดันไฟฟ้าปรากฏที่ท่อ (กิโลโวลต์)			กระแสไฟฟ้าปรากฏที่ท่อ (แอมแปร์)		
	ความยาวท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน					
	300 (เมตร)	600 (เมตร)	900 (เมตร)	300 (เมตร)	600 (เมตร)	900 (เมตร)
เริ่มต้น (0)	7.707	7.685	7.677	0.132	0.066	0.044
CP	0.642	0.642	0.644	36.111	36.111	36.111
100	25.685	27.719	28.399	0.132	0.066	0.044
200	37.962	46.124	48.851	0.132	0.066	0.044
300	42.081	60.443	66.577	0.132	0.066	0.044
400	-	70.677	81.579	-	0.066	0.044
500	-	76.825	93.855	-	0.066	0.044
600	-	78.889	103.410	-	0.066	0.044
700	-	-	110.230	-	-	0.044
800	-	-	114.330	-	-	0.044
900	-	-	115.710	-	-	0.044



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยการเปลี่ยนคุณสมบัติของดิน ฉนวนท่อ และท่อให้เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้า จำลองด้วยโปรแกรมสถานะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า ATP-EMTP พบว่าเมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าขึ้นระบบท่อส่งปีโตรเลียมที่ถูกฝังอยู่ใต้ดินย่อมมีโอกาสได้รับผลของฟ้าผ่าด้วย จากความต่อเนื่องทางไฟฟ้าในรูปของกระแสฟ้าผ่าที่ไหลลงดินแพร่กระจายถึงฉนวนท่อ และท่อส่วนที่เป็นโลหะ ด้วยคุณสมบัติของโลหะซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีสามารถส่งถ่ายกระแสไฟฟ้า และเปลี่ยนรูปเป็นแรงดันไฟฟ้าเมื่อผ่านอิมพีแดนซ์ของระบบท่อ ซึ่งเป็นไปตามกฎของโอห์ม

ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของท่อโลหะจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความยาวท่อมากขึ้น เมื่อนำค่าความเหนี่ยวนำของท่อมาคำนวณทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 2.1 และจำลองด้วยโปรแกรมสถานะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า (ATP-EMTP) พบว่ามีแรงดันปรากฏที่ท่อ ค่าของแรงดันนั้นจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของท่อนั้นมีค่ามากขึ้น

จากการศึกษาถึงขนาดแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ท่อนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของท่อแล้วยังขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสฟ้าผ่าที่สัมผัสท่อ ค่าอิมพีแดนซ์ของฉนวนท่อ ระยะห่างระหว่างจุดที่ฟ้าผ่าถึงแนวท่อที่ถูกฝังอยู่ใต้ดิน ระยะห่างที่มากค่ากระแสฟ้าผ่าจะถูกลดทอนลง ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วจะไม่สามารถคาดการณ์หรือประมาณได้ว่าฟ้าผ่าจะผ่าห่างจากท่อเป็นระยะทางเท่าใด จากผลการจำลองที่ได้พบว่าเมื่อฟ้าผ่าโดยมีระยะห่างจากท่อ 5 เมตร จะมีแรงดันปรากฏที่ระบบท่อ ค่าของแรงดันปรากฏจะสูงขึ้นเป็นหลายๆ กิโลโวลต์ตามความยาวท่อที่เพิ่มขึ้น จากคุณสมบัติของค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของท่อที่เป็นโลหะ

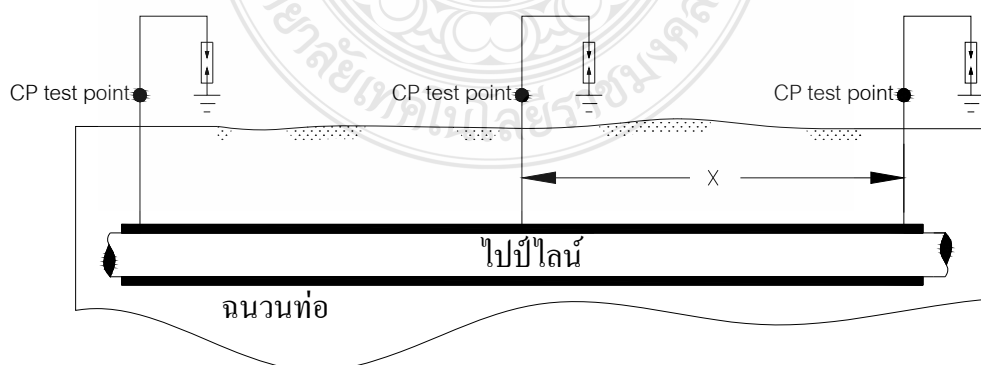
เมื่อทำการวิเคราะห์พฤติกรรมการเกิดแรงดันชั่วคราวหรือแรงดันปรากฏที่ระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินทั้งก่อนและหลังพิจารณาอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกก่อนหน้านี้ พบแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระบบท่อตามที่กล่าวถึงข้างต้น แรงดันปรากฏที่สูงจะสามารถสร้างความเสียหายกับอุปกรณ์ป้องกันท่อสุกก่อน (Cathodic Protection) ซึ่งเป็นส่วนที่สัมผัสท่อโดยตรง เป็นทางผ่านของกระแสและแรงดันฟ้าผ่าของท่อเพื่อไหลลงดินเมื่อเกิดฟ้าผ่าขึ้น แรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่สูงมากพอจะสร้างความเสียหายกับฉนวนท่อ (Fusion Bonded Epoxy) หรืออาจรุนแรงถึงสร้างความเสียหายแก่ตัวท่อส่วนที่เป็นโลหะ ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการในด้านการบำรุงรักษาระบบท่อใต้ดิน การป้องกันฟ้าผ่าด้วยอุปกรณ์ป้องกันเสร็จจากผลการจำลองที่ได้จากโปรแกรม ATP-EMTP สามารถควบคุมแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ท่อ

ผู้กร่อนได้โดยมีค่าน้อยกว่า 1,500 โวลต์ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐาน BS 60950 และยังสามารถช่วยลดแรงดันปรากฏที่ท่อได้ด้วยเช่นกัน

## 5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัย

การควบคุมแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อผู้กร่อน โดยการติดอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่านั้นสามารถควบคุมแรงดันฟ้าผ่าได้และเมื่อพิจารณาผลการจำลองพบว่ากระแสฟ้าผ่าปรากฏนั้นยังสามารถควบคุมได้มากขึ้นขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าที่นำมาป้องกัน จากข้อจำกัดของโปรแกรม ATP-EMTP ไม่มีอุปกรณ์ควบคุมกระแสฟ้าผ่าโดยตรงจึงไม่สามารถจำลองและแสดงผลการควบคุมกระแสได้ ในทางปฏิบัติแล้วผู้วิจัยขอเสนอแนะโดยการเลือกอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าชนิดช่องอากาศ (Spark Gap) ซึ่งมีความสามารถลดกระแสฟ้าผ่าได้ดี ประสานร่วมกับชนิดควบคุมแรงดันจะควบคุมสภาวะชั่วคราวที่ท่อได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามจึงควรมีการวิจัยในส่วนนี้ต่อไป

นอกจากนี้ การวางท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินหรืออุตสาหกรรมที่มีลักษณะใกล้เคียงกันเช่นท่อส่งก๊าซธรรมชาติ ในทางปฏิบัติแล้วจะมีความยาวท่อเป็นหลายร้อยกิโลเมตร เมื่อเกิดปรากฏการณ์ฟ้าผ่าขึ้นในระยะเวลาที่สามารถเกิดความต่อเนื่องทางไฟฟ้ามายังท่อใต้ดินได้ แน่นนอนย่อมเกิดแรงดันฟ้าผ่าปรากฏที่ระบบท่อและมีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงมากๆ จากค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของท่อที่แปรผันกับความยาวท่อ การควบคุมแรงดันที่ระบบท่อเป็นสิ่งสำคัญมาก สามารถกระทำได้โดยติดอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าตลอดช่วงความยาวท่อโดยมีระยะห่างระหว่างจุดนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวนท่อและค่าแรงดันต่ำสุดที่อุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าจะสามารถควบคุมได้ โดยสามารถประยุกต์ต่ออุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าในทุกๆ ตำแหน่งของ CP Test Point ในไปป์ไลน์



ภาพที่ 5.1 แนวทางการติดอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบไปป์ไลน์ใต้ดิน

เนื่องจากอุตสาหกรรมการขนส่งปิโตรเลียมทางท่อหรือส่งก๊าซธรรมชาติทางท่อ ต้องยึดหลักความปลอดภัยเป็นลำดับต้น ดังนั้นการพิจารณาเลือกและติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าเพื่อควบคุมสถานะชั่วคราวทางไฟฟ้าในพื้นที่สูงเสี่ยงนอกจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าแล้วต้องคำนึงถึงพื้นที่อันตรายจากไอระเหยของน้ำมันหรือก๊าซ โดยอุปกรณ์ป้องกันเสร็จหรือป้องกันฟ้าผ่าจะต้องมีคุณสมบัติป้องกันการระเบิดหรืออยู่ในโครงสร้างที่สามารถป้องกันการระเบิดได้ตามมาตรฐาน



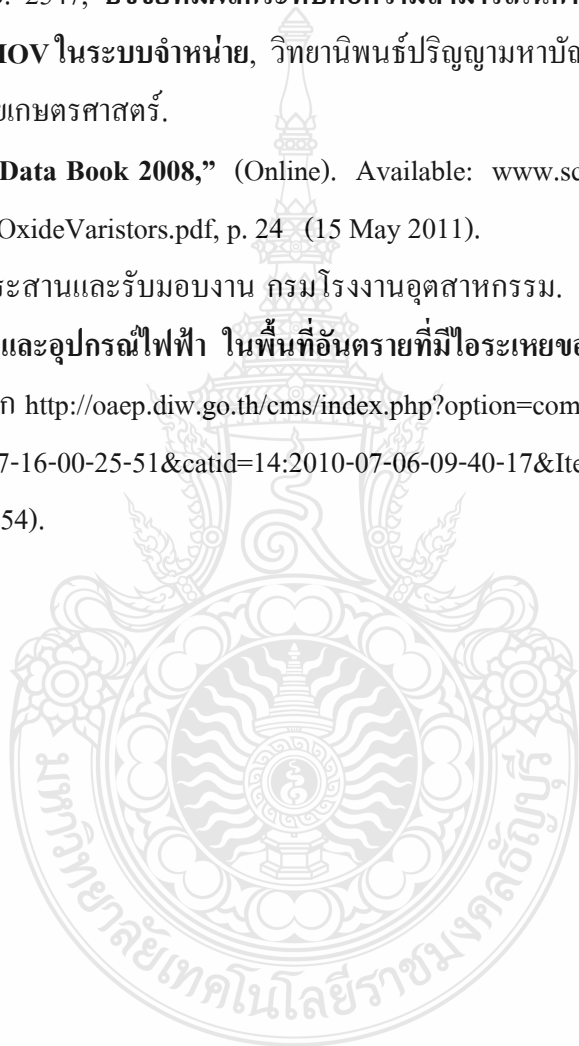


## รายการอ้างอิง

- [1] นาดยา คล้ายเรื่อง, ผลของสนามไฟฟ้าจากการเกิดฟ้าผ่าลงดินต่อสายเคเบิลใต้ดิน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2548.
- [2] ทิศวรรณ สิ้นจันทร์, การปรับปรุงระบบลงดินเพื่อลดผลจากแรงดันเกินฟ้าผ่าโดยวิธีการประสานศักย์, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2552.
- [3] Nor Emyliatr, Binti Husin, **Simulation Study on lightning Effects to 132 kV Underground Cable**, Bachelor of Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2011.
- [4] Hitoshi Kijima, Kenji Takato and Kazuo Murakawa. "Lightning Protection for Gas-Pipelines installed under the Ground," **International Journal of Systems Applications, Engineering & Development**, Issue 1, Volume 5, 2011, pp.117-126.
- [5] Konstantinos Kopsidas, Ian Cotto. "Induced Voltages on Long Aerial and Buried Pipelines Due to Transmission Line Transients," **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol 23, No. 3, July 2008, pp.1535-1543.
- [6] D. Caulker, H. Ahmad, and M. S Mohamed Ali. "Effect of Lightning Induced Voltages on Gas Pipelines using ATP-EMTP Program," **IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08)**, 2<sup>nd</sup>, December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia, 2008. pp.393-398.
- [7] Pan Zhuo Hong, Zhang Lu, Tan Bo and Wen Xi Shan, **Performance of pipeline-tower combined grounding system under direct lightning strike**, Scholl of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan, China, 2009.
- [8] ฝ่ายซ่อมบำรุง, " **Order No. 11028267**," บริษัท ท่อส่งปิโตรเลียมไทย จำกัด, 2010.
- [9] สำรวย ตั้งษ์สะอาด, **วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง**. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528. pp. 1-17.

- [10] พวงร้อย, **ตำนาน ประวัติศาสตร์ความเข้าใจ ฟิสิกส์ของฟ้าผ่า**, (ออนไลน์), เข้าถึงได้จาก <http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/53/ Lighting /Light4.gif> (สืบค้นเมื่อ 15 พฤษภาคม 2554).
- [11] IEC Std. IEC 1312-1. **Protection against lightning electromagnetic impulse-Part 1: General principles**, 1995-02, pp.47-50.
- [12] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.). **มาตรฐานการป้องกันแม่เหล็กไฟฟ้าจากฟ้าผ่า**. พิมพ์ครั้งที่ 2. มาตรฐาน ว.ส.ท. , 2005-50. กรุงเทพฯ : บริษัทโกลบอลกราฟิก จำกัด, 2551.
- [13] บริษัท เพาเวอร์เมติก จำกัด. **อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ**, (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก [http://www.powermatic.co.th/product\\_obo\\_knowledge.php](http://www.powermatic.co.th/product_obo_knowledge.php), (สืบค้นเมื่อ 12 มีนาคม 2554).
- [14] นาดยา คล้ายเรือง, วิชชุดา ไสโพธิ์ และ พิศาล เคนสูงเนิน. “การปรับปรุงสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย 22 kV,” **การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48**, กรุงเทพฯ, 2553, pp. 421-428.
- [15] ชานศ นันทวิสัย. 2005, **การต่อลงดินของระบบป้องกันเสิร์จในระบบไฟฟ้าและระบบสื่อสาร** วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2007.
- [16] Gamry Instruments. Inc. 2011, **EIS of Organic Coatings and Paints**, (Online). Available: <http://www.gamry.com/application-notes/corrosion-coatings/ EIS of Organic Coatings and Paints.pdf>, (18 Mar 2012).
- [17] A.W. PEABODY. “**Peabdy’s Control of Pipeline Corrosion**,” NACE International the Corrosion Society. 2001. 2<sup>nd</sup> ed. ISBN 1-57590-092-0. Texas.
- [18] Online Conversion.com, **Area Conversion**, (Online). Available: [www.onlineconversion.com /area.htm](http://www.onlineconversion.com /area.htm), (11 Feb 2011).
- [19] บริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) และ บริษัท มาบตาพุด โอเลฟินส์ จำกัด ภายในนิคมอุตสาหกรรมอาร์ ไอ แอล. **โครงการก่อสร้างก๊าซธรรมชาติไปยังบริษัท พีพีที ยูที ลิตี้ จำกัด บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), บทที่ 2 รายละเอียดโครงการ**.
- [20] ประพิศพรรณ เดชะวานิชชัย, นางสาวพิรพร พิมพ์ และพวงจันทร์ เหล่าศิริชน. **การป้องกันการผุกร่อนของเหล็กโดยการเคลือบผิวด้วยสังกะสีโดยวิธีต่างๆ**, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- [21] Pipeline Engineering & Construction Team, งานวางท่อส่งก๊าซธรรมชาติในเขตนิคมอุตสาหกรรม 304 โครงการท่อส่งก๊าซธรรมชาติเส้นที่ 4, บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน), 24 พฤษภาคม 2554.
- [22] IEC Std. IEC 62305-1, Ed. 1. **Protection against lightning - Part 1: General principles**, 2002, pp.25-26.
- [23] ธัญญา พิณพาทย์. 2547, **ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซับพลังงานของกั๊บดักเล็ร้จแบบ MOV ในระบบจำหน่าย**, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาวิทยาศัยเกษตรศาสตร.
- [24] Epcos. 2008, **“Data Book 2008,”** (Online). Available: [www.schmid-multitech.sk/images/SIOVMetalOxideVaristors.pdf](http://www.schmid-multitech.sk/images/SIOVMetalOxideVaristors.pdf), p. 24 (15 May 2011).
- [25] คณะกรรมการประสานและรับมอบงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2548, **คู่มือการตรวจสอบติดตั้งระบบและอุปกรณ์ไฟฟ้า ในพื้นที่อันตรายที่มีไอระเหยของสารไวไฟ**, (ออนไลน์). เข้าถึงได้จาก [http://oaep.diw.go.th/cms/index.php?option=com\\_content&view=article&id=79:2010-07-16-00-25-51&catid=14:2010-07-06-09-40-17&Itemid=21](http://oaep.diw.go.th/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=79:2010-07-16-00-25-51&catid=14:2010-07-06-09-40-17&Itemid=21), (สืบค้นเมื่อ 04 มิถุนายน 2554).

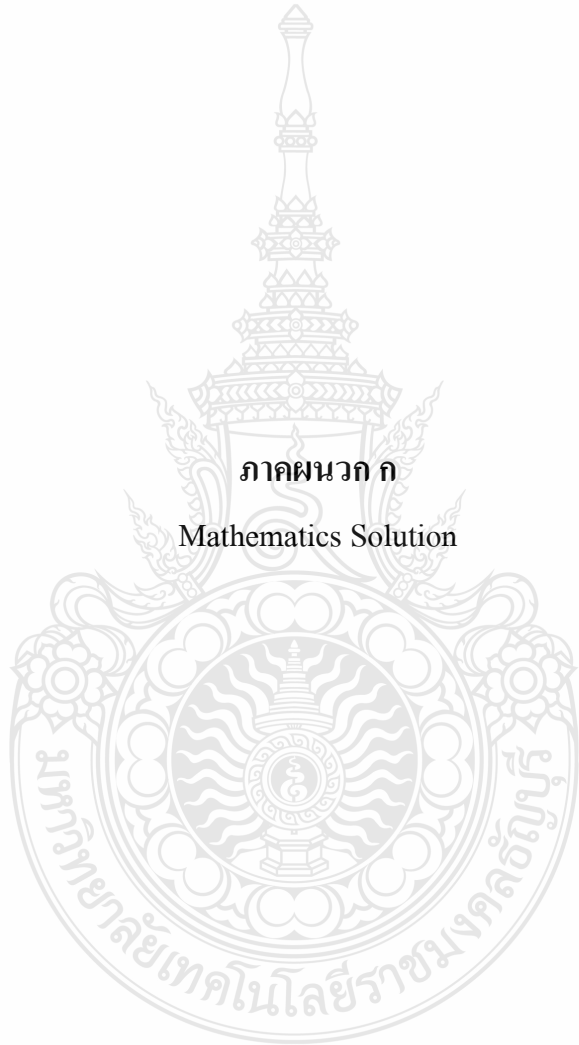


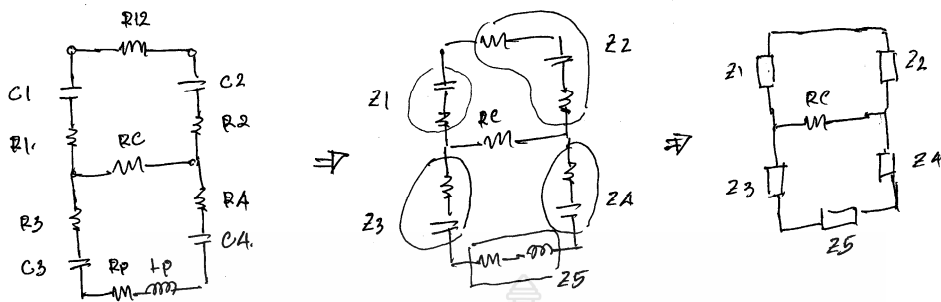
ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

Mathematics Solution





$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{sC_1} = \frac{R_1 \cdot sC_1 + 1}{sC_1}$$

$$Z_2 = (R_{12} + R_2) + \frac{1}{sC_2} \quad ; \quad \boxed{R_{12} = R_{12} + R_2}$$

$$= \frac{R_{12} \cdot sC_2 + 1}{sC_2}$$

$$Z_3 = R_3 + \frac{1}{sC_3} = \frac{R_3 \cdot sC_3 + 1}{sC_3}$$

$$Z_4 = R_4 + \frac{1}{sC_4} = \frac{R_4 \cdot sC_4 + 1}{sC_4}$$

$$Z_5 = R_5 + L_5$$

$$\Rightarrow Z_{TI} = Z_3 + Z_4 + Z_5$$

$$= \left( R_3 + \frac{1}{sC_3} \right) + \left( R_4 + \frac{1}{sC_4} \right) + (R_5 + L_5)$$

$$= (R_3 + R_4 + R_5) + \left( \frac{1}{sC_3} + \frac{1}{sC_4} \right) + L_5 \quad ; \quad \boxed{R_3 + R_4 + R_5 = R_{T1}}$$

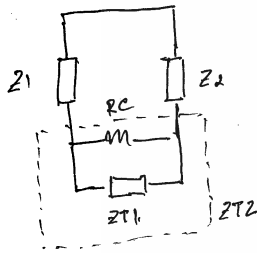
$$= R_{T1} + \left( \frac{sC_4 + sC_3}{s^2 \cdot C_3 \cdot C_4} \right) + L_5$$

$$= R_{T1} + \frac{(C_3 + C_4)s}{C_3 \cdot C_4 \cdot s^2} + L_5$$

(2)

$$= \frac{RT_1 \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2 + (C_3 + C_A) \cdot s + I_s \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2}{C_3 \cdot C_A \cdot s^2}$$

$$Z_{T1} = \frac{L \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^3 + RT_1 \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2 + (C_3 + C_A) \cdot s}{C_3 \cdot C_A \cdot s^2}$$



$$Z_{T2} = Z_{T1} \parallel RC$$

$$= \left[ \frac{L \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^3 + RT_1 \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2 + (C_3 + C_A) \cdot s}{C_3 \cdot C_A \cdot s^2} \right] \cdot RC$$

$$\left[ \frac{L \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^3 + RT_1 \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2 + (C_3 + C_A) \cdot s}{C_3 \cdot C_A \cdot s^2} \right] + RC$$

← 199 0.5.96

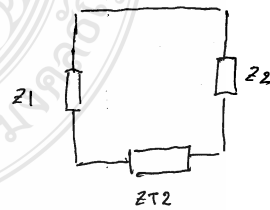
$$\frac{[L \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^3 + RT_1 \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2 + (C_3 + C_A) \cdot s] + RC \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2}{C_3 \cdot C_A \cdot s^2}$$

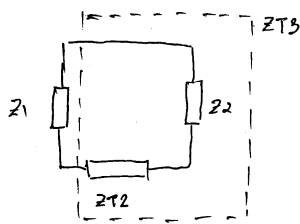
$$= \frac{L \cdot C_3 \cdot C_A \cdot RC \cdot s^3 + RT_1 \cdot C_3 \cdot C_A \cdot RC \cdot s^2 + (C_3 + C_A) \cdot RC \cdot s}{C_3 \cdot C_A \cdot s^2} + \frac{RC \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2}{C_3 \cdot C_A \cdot s^2}$$

$$Z_{T2} = \frac{L \cdot C_3 \cdot C_A \cdot RC \cdot s^3 + RT_1 \cdot RC \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2 + (C_3 + C_A) \cdot RC \cdot s}{L \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^3 + (RT_1 + RC) \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2 + (C_3 + C_A) \cdot s}$$

กำหนด R, L, C = 1. หรือ e.

$$Z_{T2} = \frac{1e^{-18} \cdot s^3 + 3e^{-12} \cdot s^2 + 2e^{-6} \cdot s}{1e^{-18} \cdot s^3 + 4e^{-12} \cdot s^2 + 2e^{-6} \cdot s}$$





$$Z_2 = RT_2 + \frac{1}{sC_2} = \frac{RT_2 \cdot sC_2 + 1}{sC_2} \quad (3)$$

$$Z_{T2} = \frac{L \cdot C_3 \cdot C_A \cdot R_C \cdot s^3 + RT_1 \cdot R_C \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2 + (C_3 + C_A) \cdot R_C \cdot s}{L \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^3 + (RT_1 + R_C) \cdot C_3 \cdot C_A \cdot s^2 + (C_3 + C_A) \cdot s}$$

From  $Z_{T2}$  numerator

$$A_1 = L \cdot C_3 \cdot C_A \cdot R_C = 1e^{-18}$$

$$A_2 = RT_1 \cdot R_C \cdot C_3 \cdot C_A = 3e^{-12}$$

$$A_3 = (C_3 + C_A) R_C = 2e^{-6}$$

$$a_1 = L \cdot C_3 \cdot C_A = 1e^{-18}$$

$$a_2 = (RT_1 + R_C) C_3 \cdot C_A = Ae^{-12}$$

$$a_3 = (C_3 + C_A) = 2e^{-6}$$

$$\therefore Z_{T2} = \frac{A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s}{a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s} \Rightarrow$$

$$\frac{1e^{-18} \cdot s^3 + 3e^{-12} \cdot s^2 + 2e^{-6} \cdot s}{1e^{-18} \cdot s^3 + Ae^{-12} \cdot s^2 + 2e^{-6} \cdot s}$$

$$\Rightarrow Z_{T3} = Z_{T2} + Z_2$$

$$= \frac{A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s}{a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s} + \frac{RT_2 \cdot sC_2 + 1}{sC_2}$$

$$= \frac{(A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s) \cdot sC_2 + (RT_2 \cdot sC_2) \cdot (a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s) + (a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s)}{(a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s) \cdot sC_2}$$

$$= \frac{A_1 \cdot C_2 \cdot s^4 + A_2 \cdot C_2 \cdot s^3 + A_3 \cdot C_2 \cdot s^2 + RT_2 \cdot C_2 \cdot a_1 \cdot s^4 + RT_2 \cdot C_2 \cdot a_2 \cdot s^3 + RT_2 \cdot C_2 \cdot a_3 \cdot s^2 + a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s}{a_1 \cdot C_2 \cdot s^4 + a_2 \cdot C_2 \cdot s^3 + a_3 \cdot C_2 \cdot s^2}$$

$$= \frac{(A_1 \cdot C_2 + RT_2 \cdot C_2 \cdot a_1) \cdot s^4 + (A_2 \cdot C_2 + RT_2 \cdot C_2 \cdot a_2 + a_1) \cdot s^3 + (A_3 \cdot C_2 + RT_2 \cdot C_2 \cdot a_3 + a_2) \cdot s^2 + a_3 \cdot s}{a_1 \cdot C_2 \cdot s^4 + a_2 \cdot C_2 \cdot s^3 + a_3 \cdot C_2 \cdot s^2}$$

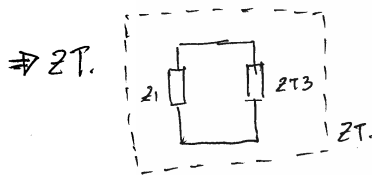
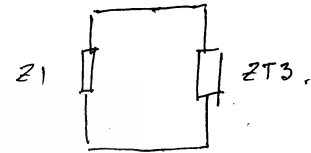
$$= \frac{(1e^{-18} \cdot 1e^{-6} + (2) \cdot 1e^{-6} \cdot 1e^{-18}) s^4 + (3e^{-12} \cdot 1e^{-6} + (2) \cdot 1e^{-6} \cdot Ae^{-12} + 1e^{-18}) s^3 + (2e^{-6} \cdot 1e^{-6} + (2) \cdot 1e^{-6} \cdot 2e^{-6} + Ae^{-12}) s^2 + 2e^{-6} \cdot s}{(1e^{-18} \cdot 1e^{-6}) s^4 + (Ae^{-12} \cdot 1e^{-6}) s^3 + (2e^{-6} \cdot 1e^{-6}) s^2}$$

$$(1e^{-18} \cdot 1e^{-6}) s^4 + (Ae^{-12} \cdot 1e^{-6}) s^3 + (2e^{-6} \cdot 1e^{-6}) s^2$$



$$Z_{T3} = \frac{(1e^{-24} + 2e^{-24}) \cdot s^4 + (3e^{-18} + 8e^{-18} + 1e^{-18}) \cdot s^3 + (2e^{-12} + 4e^{-12} + 4e^{-12}) \cdot s^2 + 2e^{-6} \cdot s}{1e^{-24} \cdot s^4 + 4e^{-18} \cdot s^3 + 2e^{-12} \cdot s^2} \quad (4)$$

$$Z_{T3} = \frac{3e^{-24} \cdot s^4 + 12e^{-18} \cdot s^3 + 10e^{-12} \cdot s^2 + 2e^{-6} \cdot s}{1e^{-24} \cdot s^4 + 4e^{-18} \cdot s^3 + 2e^{-12} \cdot s^2}$$



$$Z_1 = R_1 \parallel \frac{1}{sC_1} = \frac{R_1 \cdot sC_1 + 1}{sC_1}$$

$$Z_{T3} = \frac{(A_1 \cdot C_2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_1) \cdot s^4 + (A_2 \cdot C_2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_2 + a_1) \cdot s^3 + (A_3 \cdot C_2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_3 + a_2) \cdot s^2 + a_3 \cdot s}{a_1 \cdot C_2 \cdot s^4 + a_2 \cdot C_2 \cdot s^3 + a_3 \cdot C_2 \cdot s^2}$$

From  $Z_{T3}$  numerator,

$$\begin{aligned} B_1 &= (A_1 \cdot C_2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_1) \\ &= (1e^{-18} \cdot 1e^{-6} + (2) \cdot 1e^{-6} \cdot 1e^{-18}) \\ &= (1e^{-24} + 2e^{-24}) \\ &= 3e^{-24} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_2 &= (A_2 \cdot C_2 + R_{T12} \cdot C_2 \cdot a_2 + a_1) \\ &= (3e^{-12} \cdot 1e^{-6} + (2) \cdot 1e^{-6} \cdot 4e^{-12} + 1e^{-18}) \\ &= (3e^{-18} + 8e^{-18} + 1e^{-18}) \\ &= 12e^{-18} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= a_1 \cdot C_2 \\ &= 1e^{-18} \cdot 1e^{-6} \\ &= 1e^{-24} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_2 &= a_2 \cdot C_2 \\ &= 4e^{-12} \cdot 1e^{-6} \\ &= 4e^{-18} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_3 &= a_3 \cdot C_2 \\ &= 2e^{-6} \cdot 1e^{-6} \\ &= 2e^{-12} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_3 &= (A_3 \cdot C_2 + R_1 I_2 \cdot C_2 \cdot a_3 + a_2) \\
 &= (2e^{-6} \cdot 1e^{-6} + (2) \cdot 1e^{-6} \cdot 2e^{-6} + 4e^{-12}) \\
 &= (2e^{-12} + 4e^{-12} + 4e^{-12}) \\
 &= 10e^{-12}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_4 &= a_3 \\
 &= 2e^{-6}
 \end{aligned}$$

$$\therefore ZT_3 = \frac{B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2} \Rightarrow$$

$$\frac{3e^{-12} \cdot s^4 + 12e^{-18} \cdot s^3 + 10e^{-12} \cdot s^2 + 2e^{-6} \cdot s}{1e^{-12} \cdot s^4 + 4e^{-18} \cdot s^3 + 2e^{-12} \cdot s^2}$$

$$\therefore ZT = ZT_3 // Z_1$$

$$\begin{aligned}
 &\frac{B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2} \cdot \frac{R_1 \cdot sC_1 + 1}{sC_1} \\
 = &\frac{B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2} + \frac{R_1 \cdot sC_1 + 1}{sC_1}
 \end{aligned}$$

$$\frac{(B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s) \cdot sC_1 + (R_1 \cdot sC_1 + 1) \cdot (b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2)}{(b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2) \cdot sC_1}$$

$$= \left[ \frac{B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2} \cdot \frac{R_1 \cdot sC_1 + 1}{sC_1} \right] \cdot \frac{(b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2) \cdot sC_1}{(B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s) \cdot sC_1 + (R_1 \cdot sC_1 + 1) \cdot (b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2)}$$

$$= \frac{B_1 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot s^5 + B_2 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot s^4 + B_3 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot s^3 + B_4 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot s^2 + B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{B_1 \cdot C_1 \cdot s^5 + B_2 \cdot C_1 \cdot s^4 + B_3 \cdot C_1 \cdot s^3 + B_4 \cdot C_1 \cdot s^2 + R_1 \cdot C_1 \cdot b_1 \cdot s^5 + R_1 \cdot C_1 \cdot b_2 \cdot s^4 + R_1 \cdot C_1 \cdot b_3 \cdot s^3 + b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2}$$

$$\frac{B_1 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot s^5 + B_2 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot s^4 + B_3 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot s^3 + B_4 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot s^2 + B_1 \cdot s^4 + B_2 \cdot s^3 + B_3 \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{B_1 \cdot C_1 \cdot s^5 + B_2 \cdot C_1 \cdot s^4 + B_3 \cdot C_1 \cdot s^3 + B_4 \cdot C_1 \cdot s^2 + R_1 \cdot C_1 \cdot b_1 \cdot s^5 + R_1 \cdot C_1 \cdot b_2 \cdot s^4 + R_1 \cdot C_1 \cdot b_3 \cdot s^3 + b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2}$$

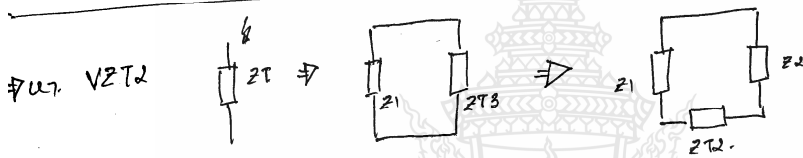
$$Z_T = \frac{B_1 \cdot R_1 \cdot C_1 \cdot s^5 + (B_2 \cdot R_1 \cdot C_1 + B_1) \cdot s^4 + (B_3 \cdot R_1 \cdot C_1 + B_2) \cdot s^3 + (B_4 \cdot R_1 \cdot C_1 + B_3) \cdot s^2 + B_4 \cdot s}{(B_1 \cdot C_1 + R_1 \cdot C_1 \cdot b_1) \cdot s^5 + (B_2 \cdot C_1 + R_1 \cdot C_1 \cdot b_2 + b_1) \cdot s^4 + (B_3 \cdot C_1 + R_1 \cdot C_1 \cdot b_3 + b_2) \cdot s^3 + (B_4 \cdot C_1 + b_3) \cdot s^2 + B_4 \cdot s} \quad (6)$$

$$= \frac{(3 \cdot 10^{-24} \cdot (1) \cdot 10^{-6}) \cdot s^5 + (12 \cdot 10^{-18} \cdot (1) \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 10^{-24}) \cdot s^4 + (10 \cdot 10^{-12} \cdot (1) \cdot 10^{-6} + 12 \cdot 10^{-18}) \cdot s^3 + (2 \cdot 10^{-6} \cdot (1) \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 10^{-12}) \cdot s^2 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot s}{(3 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{-6} + (1) \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-24}) \cdot s^5 + (12 \cdot 10^{-18} \cdot 10^{-6} + (1) \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-18} + 10^{-24}) \cdot s^4 + (10 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-6} + (1) \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-12} + 12 \cdot 10^{-18}) \cdot s^3 + (2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-6} + 10 \cdot 10^{-12}) \cdot s^2 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot s}$$

$$= \frac{3 \cdot 10^{-30} \cdot s^5 + (12 \cdot 10^{-24} + 3 \cdot 10^{-24}) \cdot s^4 + (10 \cdot 10^{-18} + 12 \cdot 10^{-18}) \cdot s^3 + (2 \cdot 10^{-12} + 10 \cdot 10^{-12}) \cdot s^2 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot s}{(3 \cdot 10^{-30} + 10^{-30}) \cdot s^5 + (12 \cdot 10^{-24} + 10^{-24} + 10^{-24}) \cdot s^4 + (10 \cdot 10^{-18} + 12 \cdot 10^{-18} + 12 \cdot 10^{-18}) \cdot s^3 + (2 \cdot 10^{-12} + 10 \cdot 10^{-12}) \cdot s^2 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot s}$$

$$Z_T = \frac{3 \cdot 10^{-30} \cdot s^5 + 15 \cdot 10^{-24} \cdot s^4 + 22 \cdot 10^{-18} \cdot s^3 + 12 \cdot 10^{-12} \cdot s^2 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot s}{10 \cdot 10^{-30} \cdot s^5 + 17 \cdot 10^{-24} \cdot s^4 + 16 \cdot 10^{-18} \cdot s^3 + 12 \cdot 10^{-12} \cdot s^2}$$

Sum of admittance ATP.



$V_s = I(s) \cdot Z_T$  ;  $I(s) = i(t)$  (normal)

$\therefore V_{ZT2} = V_s \cdot \frac{Z_{T2}}{Z_{T3}}$

$$Z_{T2} = \frac{A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s}{a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s} \quad ; \quad Z_{T3} = \frac{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2 + b_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2}$$

$$= V_s \cdot \left[ \frac{A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s}{a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s} \cdot \frac{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2 + b_4 \cdot s}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2} \right]$$

$$= V_s \cdot \left[ \frac{A_1 \cdot s^3 + A_2 \cdot s^2 + A_3 \cdot s}{a_1 \cdot s^3 + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s} \cdot \frac{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2}{b_1 \cdot s^4 + b_2 \cdot s^3 + b_3 \cdot s^2 + b_4 \cdot s} \right]$$

$$V_{z12} = V_s \cdot (A_1 \cdot b_1 \cdot s^7 + A_1 \cdot b_2 \cdot s^6 + A_1 \cdot b_3 \cdot s^5) + (A_2 \cdot b_1 \cdot s^6 + A_2 \cdot b_2 \cdot s^5 + A_2 \cdot b_3 \cdot s^4) + (A_3 \cdot b_1 \cdot s^5 + A_3 \cdot b_2 \cdot s^4 + A_3 \cdot b_3 \cdot s^3) \quad (7)$$

$$\frac{(A_1 \cdot b_1 \cdot s^7 + A_1 \cdot b_2 \cdot s^6 + A_1 \cdot b_3 \cdot s^5 + A_1 \cdot b_4 \cdot s^4) + (A_2 \cdot b_1 \cdot s^6 + A_2 \cdot b_2 \cdot s^5 + A_2 \cdot b_3 \cdot s^4 + A_2 \cdot b_4 \cdot s^3) + (A_3 \cdot b_1 \cdot s^5 + A_3 \cdot b_2 \cdot s^4 + A_3 \cdot b_3 \cdot s^3) + A_3 \cdot b_4 \cdot s^2}{}$$

$$= V_s \cdot A_1 \cdot b_1 \cdot s^7 + (A_1 \cdot b_1 + A_2 \cdot b_1) \cdot s^6 + (A_1 \cdot b_3 + A_2 \cdot b_2 + A_3 \cdot b_1) \cdot s^5 + (A_2 \cdot b_3 + A_3 \cdot b_2) \cdot s^4 + A_3 \cdot b_3 \cdot s^3$$

$$\frac{A_1 \cdot b_1 \cdot s^7 + (A_1 \cdot b_2 + A_2 \cdot b_1) \cdot s^6 + (A_1 \cdot b_3 + A_2 \cdot b_2 + A_3 \cdot b_1) \cdot s^5 + (A_1 \cdot b_4 + A_2 \cdot b_3 + A_3 \cdot b_2) \cdot s^4 + (A_2 \cdot b_4 + A_3 \cdot b_3) \cdot s^3 + A_3 \cdot b_4 \cdot s^2}{}$$

$$= V_s \cdot \left[ \begin{aligned} &(1e^{-18} \cdot 1e^{-24}) \cdot s^7 + (1e^{-18} \cdot 1e^{-24} + 3e^{-12} \cdot 1e^{-24}) \cdot s^6 + (1e^{-18} \cdot 2e^{-12} + 3e^{-12} \cdot 4e^{-18} + 2e^{-6} \cdot 1e^{-24}) \cdot s^5 + (3e^{-12} \cdot 2e^{-12} + 2e^{-6} \cdot 4e^{-18}) \cdot s^4 + 2e^{-6} \cdot 4e^{-18} \cdot s^3 \\ &(1e^{-18} \cdot 4e^{-24}) \cdot s^7 + (1e^{-18} \cdot 12e^{-18} + 4e^{-12} \cdot 3e^{-24}) \cdot s^6 + (1e^{-18} \cdot 10e^{-12} + 4e^{-12} \cdot 12e^{-18} + 2e^{-6} \cdot 3e^{-24}) \cdot s^5 \\ &+ (1e^{-18} \cdot 2e^{-6} + 4e^{-12} \cdot 10e^{-12} + 2e^{-6} \cdot 16e^{-18}) \cdot s^4 + (4e^{-12} \cdot 2e^{-6} + 2e^{-6} \cdot 10e^{-12}) \cdot s^3 + (2e^{-6} \cdot 2e^{-6}) \cdot s^2 \end{aligned} \right]$$

$$= V_s \cdot 1e^{-A2} \cdot s^7 + (1e^{-A2} + 3e^{-36}) \cdot s^6 + (2e^{-30} + 12e^{-30} + 2e^{-30}) \cdot s^5 + (6e^{-24} + 8e^{-24}) \cdot s^4 + 4e^{-18} \cdot s^3$$

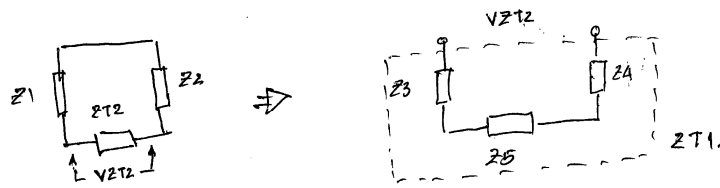
$$3e^{-A2} \cdot s^7 + (12e^{-36} + 12e^{-36}) \cdot s^6 + (10e^{-30} + 48e^{-30} + 6e^{-30}) \cdot s^5 + (2e^{-24} + 40e^{-24} + 4e^{-24}) \cdot s^4$$

$$+ (8e^{-18} + 20e^{-18}) \cdot s^3 + 4e^{-12} \cdot s^2$$

$$V_{z12} = V_s \cdot 1e^{-A2} \cdot s^7 + 3.000001e^{-36} \cdot s^6 + 16e^{-30} \cdot s^5 + 14e^{-24} \cdot s^4 + 4e^{-18} \cdot s^3$$

$$3e^{-A2} \cdot s^7 + 24e^{-36} \cdot s^6 + 64e^{-30} \cdot s^5 + 66e^{-24} \cdot s^4 + 28e^{-18} \cdot s^3 + 4e^{-12} \cdot s^2$$

หาค่า  $V_{Z5}$



$$V_{Z5} = V_{ZT2} \cdot \frac{Z_5}{Z_{T1}}$$

$$= V_{ZT2} \cdot \frac{R_p + Ls}{\frac{Lc_3 \cdot c_4 \cdot s^3 + RT1 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot s^2 + (c_3 + c_4)s}{c_3 \cdot c_4 \cdot s^2}}$$

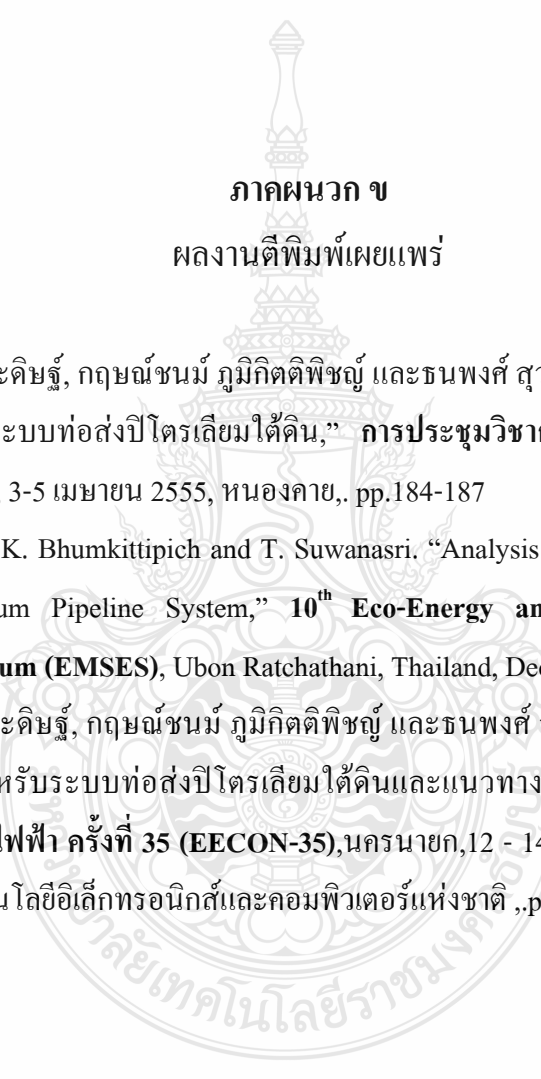
$$= V_{ZT2} \cdot \frac{R_p + Ls}{L \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot s^3 + RT1 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot s^2 + (c_3 + c_4)s} \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot s^2$$

$$V_{Z5} = V_{ZT2} \cdot \frac{R_p \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot s^2 + L \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot s^3}{L \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot s^3 + RT1 \cdot c_3 \cdot c_4 \cdot s^2 + (c_3 + c_4)s}$$

11ms หรือ RLC = 1ms/pc

$$\therefore V_{Z5} = V_{ZT2} \cdot \frac{1e^{-18} \cdot s^3 + 1e^{-12} \cdot s^2}{1e^{-18} \cdot s^3 + 30e^{-12} \cdot s^2 + 2e^{-6} \cdot s}$$

→ matlab simulation / Transfer Functions.



ภาคผนวก ข  
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

1. บุญเลิศ โตประดิษฐ์, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ และชนพงศ์ สุวรรณศรี. “ศึกษาปรากฏการณ์หลังจากฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน,” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า, EENET 2012, ครั้งที่ 4, 3-5 เมษายน 2555, หนองคาย, pp.184-187
2. B. Topradith, K. Bhumkittipich and T. Suwanasri. “Analysis of Lightning Phenomena for Underground Petroleum Pipeline System,” **10<sup>th</sup> Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium (EMSES)**, Ubon Ratchathani, Thailand, December 5-8. 2012, Pp 98-101
3. บุญเลิศ โตประดิษฐ์, กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์ และชนพงศ์ สุวรรณศรี. “การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกัน,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON-35), นครนายก, 12 - 14 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยกรุงเทพและศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ,pp.251-254

# **Electrical Engineering Network 2012**

## **of Rajamangala University of Technology (EENET 2012)**



### **CONFERENCE TOPICS**

#### **GROUP 1 (PE)**

Power Electronics, Electric Machines, Motor Control and Drive, Measurement, Control and Robotics.

#### **GROUP 2 (PW)**

Power System, Transmission and Distribution, High Voltage and Electrical Energy, Generating Systems.

#### **GROUP 3 (RE)**

Renewable Energy, Energy Saving Technologies, Industry Specific Energy Conversion and Conditioning Technologies, Materials for Energy and Environment.

#### **GROUP 4 (TE)**

Telecommunication, Electronics, Information and Communication Technologies, Antennas, Microwave Theory and Techniques.

#### **GROUP 5 (CP)**

Computer Technologies and Network, Computer Graphics, Machine Learning and Human-Computer Interaction.

#### **GROUP 6 (GN)**

Education in Electrical Engineering, Simulation Software and Design tools, Related Topics in Electrical Engineering.



**GRAND PARADISE HOTEL**  
Nong Khai, THAILAND  
*April 3-5, 2012*

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

รายชื่อผู้พิจารณาบทความการประชุมเครือข่ายวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4

รศ. ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน

รศ. ดร.วิจิตร กิณเรศ

รศ. ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์

รศ. ดร.เวทิน ปิยะรัตน์

รศ. ดร.เดชา พวงดาวเรือง

รศ. ดร.วิบูลย์ ชื่นแขก

รศ. ดร.เสถียร ธัญญศรีรัตน์

ผศ. ดร.เนบบุญ หุนเจริญ

ผศ. ดร.อภิรักษ์ อูร์โสภณ

ผศ. ดร.วรวัฒน์ เสี่ยงวิบูล

ผศ. ดร.อาทิตย์ ไสตรโยม

ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ

ผศ. ดร.ทองพล อารีรักษ์

ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ

ดร.นิวัฒน์ อังควิชิตพันธ์

รศ.ดร.โกศล โอฬารไพโรจน์

ดร.อุเทน คำนำน

นายณรงค์ นันทกุล

ผศ.กฤษดา ช่างขัน

นายเอกทัศน์ พฤษวรรณ

ดร.จัตตุฤทธิ์ ทองปรอน

ผศ.ชาญชัย เดชธรรมรงค์

ดร.จักรกฤษณ์ เคลือบวัง

นายสมนึก เครือสอน

นายทัศนะ ถมทอง

นายณรงค์ฤทธิ์ พิมพ์คำวงศ์

ผศ.อภิศักดิ์ ชันแก้วหล้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาภาคพายัพ เชียงใหม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ผศ.สุรสิทธิ์ แสนทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายเอกลักษณ์ สุนนพันธ์ุ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายปรีชา มหาไม้	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
นายก่อเกียรติ อี๊ดทรัพย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่ตาก
รศ.ดร.ชวัญ เกิดชื่น	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ดร.พินิจ ศรีธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.ประเสริฐ เพื่อนหมื่นไวย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.พันธ์พงศ์ อภิชาตกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.สุทธินันท์ ดั้น โทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.ศิริชัย ลาภาสระน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.กฤตวิทย์ บัวใหญ่	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ผศ.วุฒิชัย สง่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายกิตติวุฒิ จินนะบุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายรุ่งเพชร ก่องนอก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายเอกจิต คุ้มวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นางอุษา คงเมือง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายชิตีสรวิศ วิชิโต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
ดร.วรรณรีย์ วงศ์ไทรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ.นครราชสีมา
นายบุญช่วย เจริญผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายวุฒิววัฒน์ คงรัตน์ประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายชูศักดิ์ชู กมลขันธ์นิธ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายวินัย เมธาวิต	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายชาญฤทธิ์ ธาราสันติสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ.กรุงเทพฯ
นายประหยัด กองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายภัทรพงศ์ อัญชันภาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายสมพล โคศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายทัตพันธ์ สุวรรณพัค	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก จ.ฉะเชิงเทรา
นายจตุรงค์ จตุรเชิดชัยสกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายพูนศรี วรรณการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ดร.ณัฐพงศ์ พันธนะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.รัฐ โชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายนิติพันธ์ คุณประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายชนารัตน์ ดันมณีประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายศุภวุฒิ เนตรโพธิ์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายทง ลานธารทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายสมเกียรติ ทองแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.พิชญ์ ดาราพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายมนัส บุญเที่ยรทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายพนา คูสิตากร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.กิจจา ลักษณะอำนาจการ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.โกศล นิธิโสภาก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.จรินทร์ จุลวานิช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายนิลमित นิลาศ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายเกรียง ไกร เหลืองอำพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายวณพันธ์ วิษุฒิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
นายฉัฐวัชรินทร์ ทองรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.ศรีศักดิ์ น้อยไรรูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร จ.กรุงเทพฯ
ผศ.ดร.ประมุข อุณหเลขกะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
นางสาวพัชรนันท์ ศรีธนาอุทัยกร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.สราวุธ ทองกุลภัทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.วารุณี ศรีสงคราม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ดร.อุทราณา ก้นทะพะเยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.เฉลิมพล เรืองพัฒนาวิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ผศ.กระจ่าง พิทักษ์วงศ์วิทยา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
ดร.ศรีสุตา ไชยทองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
รศ.นภัทร วัฒนเทพินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จ.นนทบุรี
รศ.สมพันธ์ อำพวัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ดร.ชวงส์ วัฒนศักดิ์ภูบาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ผศ.วิสุทธิ์ พงศ์พฤกษ์ชาติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา
ดร.สุริยา แก้วอาษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.นิธิโรจน์ พรสุวรรณเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
ดร.มมรธา ทัทศร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
ดร.นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
ผศ.วิรัช ครอบกิจศิริ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายเอกวิทย์ หายักวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายวีระ ชันยาภิรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายรัก สกุลพงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายนครินทร์ ศรีปัญญา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายกฤตยา สมสัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายจงเจริญ คุ้มบุญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายกฤษฎา บุญมีวิเศษ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายจิระพงษ์ ศรีวิชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายวีระชัย จรบูรมย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายปฏิวัติ บุญมา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายเฉลียว เกตุแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
ผศ.ดร.ปรีชา สาคะรังค์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
ดร.ภักดีวัฒน์ จันทร์ตรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
นายไพบูลย์ เกียรติสุขคนธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
รศ.พันธ์ พิริยะวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสกลนคร
ผศ.ประวิช เปรียบเหมือน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.ศักดิ์ระวี ระวังกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ประยงค์ เสาร์แก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.จักรวัฒน์ บุตรบุญชู	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.สุระ ดันดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ดร.ณรงค์ สีหาจ้อง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น
ผศ.ดร.สมชัย หิรัญวโรดม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.วันชัย ททรัพย์สิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.วิชัย ผดุงศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ศิริชัย แดงएम	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ณัฐวุฒิ ไสยะเกษตรินทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

ดร.ฉัตรชัย	ศุภพิทักษ์สกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.บุญยัง	ปลั่งกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุรินทร์	แหงมงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กฤษณ์ชนม์	ภูมิภคิตพิชญ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ณัฐภัทร	พันธ์คง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพินิจ	จิตจริง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายสมชาย	เขียนสูงเนิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพร้อมศักดิ์	กิริติกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายนิติพงษ์	ปานกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายธีระพล	เหมื่อนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายฉัฐพล	หาอุปละ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.จินตนา	นาคะสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.ปราชญ์	ดาบบัง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.อำนาจ	เรืองอำนาจ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ไพฑูรย์	รักเหลือ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายวิโรจน์	พิราจนนชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายพงษ์ศักดิ์	อำภา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายบุญยัง	นบนอบ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายอภิรดา	นามแสง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.สุทินัน	พรอนุรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.วินัย	วิชัยพาณิชย์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.กิตติวัฒน์	นัมเกิดผล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ศส.อิฐอรรณู	ปิติมล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
นายฉัตรพิงศ์	อุทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

PE34	การสร้างทดสอบวงจรเมตริกซ์คอนเวอร์เตอร์เฟสเดียวกับพาสซีฟโหลด	139
PE35	แบบจำลองรถเก็บขยะปุ๋ยเรือใบควบคุมด้วยสัญญาณวิทยุ	143
PE36	ระบบการผลิตไฟฟ้ากระแสสลับขับเคลื่อนด้วยลูกหมุนระบายความร้อนบนหลังคา	147
PW01	การรวมโหลดในระบบจำหน่ายไฟฟ้าปทุมธานี	152
PW02	Measurement Scheme Selection for Power System State Estimation by Improved Stochastic Tabu Search	156
PW03	การออกแบบสร้างชุดทดลองแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง	160
PW04	โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับคำนวณแรงดันตกในระบบไฟฟ้า	164
PW05	การศึกษาแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากระบบไฟฟ้าใกล้เคียงในขณะที่ปฏิบัติงานแบบดับไฟ	168
PW06	คุณลักษณะและสมรรถนะของลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าในระบบจำหน่าย 22 kV การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค	172
PW07	ผลกระทบของแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัวที่เชื่อมต่อในระบบจำหน่ายไฟฟ้า	176
PW08	Application of Particle Swarm Optimization Intelligence to Solving Economic Load Dispatch with Considering the Daily Load Patterns and Generator Constraints	180
PW09	ศึกษาปรากฏการณ์หลังจากฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน	184
PW10	การชดเชยแรงดันตกชั่วคราวด้วยอุปกรณ์ชดเชยแรงดันตกชั่วคราวแบบอนุกรม	188
PW11	การหาตำแหน่งและขนาดของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในระบบจำหน่ายเพื่อลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย	192
PW12	การออกแบบระบบจำหน่ายสายอากาศ 22 kV ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม	169
PW13	การประเมินความเชื่อถือได้ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าที่มีแหล่งผลิตไฟฟ้าแบบกระจายตัว	200
PW14	การจัดเรียงสายบ่อนอย่างเหมาะสมสำหรับค่าดัชนีโหลดสมดุลในระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุ	204
PW15	การประยุกต์ใช้อุปกรณ์ FACTS สำหรับการลดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย	208

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 4 วันที่ 3-5 เมษายน 2555

## ศึกษาปรากฏการณ์หลังจากฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน Study of Phenomena after a Lightning Strike for the Underground Petroleum Pipelines Systems

บุญเลิศ โศประดิษฐ์<sup>1,2</sup> กฤษณ์ชนม์ ภูมิภักดีพิชญ์<sup>2</sup> และธนพงศ์ สุวรรณศรี<sup>3</sup>

<sup>1</sup>บริษัท ท่อส่งปิโตรเลียมไทย จำกัด ฝ่ายซ่อมบำรุง แผนกวิศวกรรมไฟฟ้า

<sup>2</sup>ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>3</sup>บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

### บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการศึกษาปรากฏการณ์หลังจากฟ้าผ่า สำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน โดยพิจารณาจากความต่อเนื่องทางไฟฟ้าหลังจากฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน เพื่อทราบถึงผลของสภาวะชั่วคราวที่ปรากฏในระบบท่อ ด้วยโปรแกรมจำลองสภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า (ATP-EMTP) ทำการจำลองรูปคลื่นฟ้าผ่ามาตรฐาน 10/350 ไมโครวินาที ที่มีการเชื่อมโยงในหลายมิติ โดยการเปลี่ยนคุณลักษณะของท่อโลหะ ฉนวน ท่อ สายตัวนำไฟฟ้าวางจรดป้องกันต่อคู่กร่อนและดิน ให้เป็นคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์ จากผลการจำลองด้วยวิธีดังกล่าวพบว่าเกิดแรงดันชั่วคราวปรากฏที่ท่อสูงขึ้นเมื่อความยาวท่อมากขึ้น และกระแสชั่วคราวลดลงเมื่อความยาวท่อมากขึ้น หากพิจารณาทางด้านความปลอดภัยแล้วสามารถนำผลการจำลองที่ได้มาเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าที่เหมาะสม ซึ่งจะสามารถช่วยลดความเสี่ยงของระบบการขนส่งน้ำมันทางท่อ รวมทั้งลดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของภาคอุตสาหกรรมการขนส่งน้ำมันทางท่อจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

**คำสำคัญ:** ท่อส่งปิโตรเลียม, ฟ้าผ่า, อินทิเกรตซ์, สภาวะชั่วคราว, แรงดันเหนี่ยวนำ

### Abstract

This article presents a study of phenomena after a lightning strike to the underground petroleum pipelines by considering an electrical continuity after a lightning strike to the earth. The objective is to determine the result of transient state occurring on the pipeline by using simulation software program (ATP-EMTP) to simulate standard waveform 10/350  $\mu$ s which will be linked to several aspects. This study will transform physical characteristics into electrical characteristics such as pipe metal, pipe insulator, conductors for corrosion protection circuit and earth as parameters in the analysis. The result of this simulation found that the transient voltage will increase if the pipe

length is longer but the transient current will reduce if the pipe length is longer. Considering safety point of view, this simulation result can be used to design a proper lightning protection system which will reduce risk in pipeline transportation system including reduction in life casualty and assets damage in the petroleum transportation industry from lightning strike.

**Keywords:** Pipeline, Lightning, Impedance, Transient, Induced voltage

### 1. บทนำ

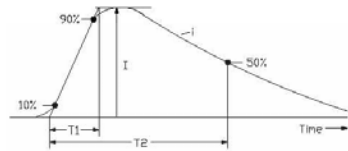
การขนส่งน้ำมันทางท่อ เป็นการขนส่งที่ได้รับความนิยมสูงและรวดเร็ว มีความปลอดภัยสูง ค่าพลังงานในการขนส่งต่อหน่วยต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการขนส่งด้วยวิธีอื่น โดยปกติแล้วการขนส่งน้ำมันทางท่อ ท่อจะถูกฝังอยู่ใต้ดินที่มีความลึกประมาณ 1.5 เมตรจากผิวดินขนานกันเส้นทางรถไฟ ถนนหลวง และแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น จากข้อมูลพบว่าอุปกรณ์ป้องกันต่อคู่กร่อนที่เชื่อมต่อกับท่อได้รับความเสียหายจากฟ้าผ่าและกรณีเกิดความคิดพร้อมในระบบสายส่งแรงสูง [1] ทั้งสองกรณีได้ส่งผลกระทบต่อ

สำหรับบทความที่นำเสนอนี้ ได้สำรวจเอกสารจากหลายงานวิจัยที่กล่าวถึง การป้องกันความเสียหายของฉนวนท่อส่งก๊าซธรรมชาติที่อยู่ใกล้สิ่งปลูกสร้างสูง [2] ซึ่งได้รับผลกระทบจากฟ้าผ่าและการศึกษาการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้ามายังท่อส่งน้ำมันในลักษณะการวางท่อขนานกัน [3] รวมถึงการศึกษาความเป็นไปได้ของการชำรุดของสายเคเบิลใต้ดินจากฟ้าผ่า [4] จากบทความดังกล่าวข้างต้นยังมีได้กล่าวถึงค่าอินทิเกรตซ์ของท่อส่งปิโตรเลียมร่วมกับค่าอินทิเกรตซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อคู่กร่อน

ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการศึกษาปรากฏการณ์หลังจากฟ้าผ่าต่อระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน ด้วยโปรแกรมจำลองสภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาเฉพาะค่าอินทิเกรตซ์ของท่อส่งปิโตรเลียมและค่าอินทิเกรตซ์ของท่อส่งปิโตรเลียมร่วมกับค่าอินทิเกรตซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันต่อคู่กร่อนที่ความยาวท่อ 100, 200 และ 300 เมตร

2. การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

2.1 กระแสฟ้าผ่า



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า

จากรูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า ประกอบด้วยช่วงเวลาน้ำคลื่นและช่วงเวลางคลื่น ช่วงเวลาน้ำคลื่น (Front time, T1) หมายถึงเวลาในช่วงที่กระแสเพิ่มจาก 10% ถึง 90% ของค่ายอด ซึ่งจุดเริ่มต้นของกระแสคือจุดตัดระหว่างแกนนอนกับเส้นตรงที่ลากผ่านจุด 10% และ 90% ของค่ายอดที่ด้านหน้าคลื่น และช่วงเวลางคลื่น (Tail time, T2) หมายถึง เวลาตั้งแต่จุดเริ่มต้นของรูปคลื่น จนถึงค่าที่กระแสลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของค่ายอด โดยที่ *I* คือกระแสค่ายอด [5]

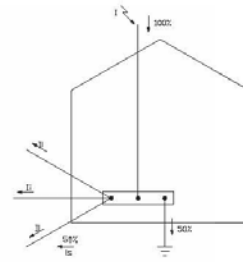
กระแสหน้าคลื่นคือ อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแส เรียกว่า ความชัน *di/dt* เป็นกิโลแอมแปร์ต่อไมโครวินาที (kA/μs) ซึ่งมีผลสำคัญที่ทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำในสายตัวนำ ท่อตัวนำ ท่อส่งปีโคโรเลียมได้ดิน ความเหนี่ยวนำและความต่อเนื่องทางไฟฟ้า เป็นสิ่งสำคัญและเป็นองค์ประกอบหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ศึกษาปรากฏการณ์หลังฟ้าผ่าต่อระบบต่อส่งปีโคโรเลียมได้ดิน ดังสมการที่ 2.1

$$\Delta U = iR + L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

เมื่อ		
$\Delta U$	-	แรงดันเหนี่ยวนำ
$i(t)$	-	กระแสฟ้าผ่า
$R$	-	ค่าความต้านทานของท่อส่งปีโคโรเลียมชนิดโลหะต่อความยาว <i>l</i> เมตร
$L$	-	ค่าความเหนี่ยวนำของท่อส่งปีโคโรเลียมชนิดโลหะต่อความยาว <i>l</i> เมตร
$t$	-	เวลา

จากมาตรฐาน IEC 1312 - 1 ตามรูปที่ 2.2 ได้กำหนดกระแสฟ้าผ่าสูงสุดมีค่าถึง 200 kA ที่รูปคลื่น 10 / 350 μs ซึ่งอธิบายให้เห็นว่าเมื่อมีฟ้าผ่าต้องสิ่งปลูกสร้าง กระแสฟ้าผ่า 50 เปอร์เซ็นต์จะกระจายลงดินส่วนที่เหลือจะแพร่กระจายเข้าสู่ระบบต่าง ๆ ในอาคารที่สามารถเหนี่ยวนำได้เช่นระบบไฟฟ้า สายโทรศัพท์หรือระบบสื่อสาร โดยมีขนาดกระแส

ฟ้าผ่าประเทศไทยจากสถิติ [6] ที่ 20 kA ซึ่งกระแสส่วนที่กระจายลงดินนี้เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่จะแพร่กระจายแรงดันและกระแสชั่วคราวของปรากฏการณ์ฟ้าผ่าไปยังระบบต่อส่งปีโคโรเลียมที่ฝังอยู่ใต้ดิน



รูปที่ 2.2 การกระจายของกระแสฟ้าผ่า

2.2 ฟังก์ชันรูปคลื่นของกระแสในการวิเคราะห์

กระแสฟ้าผ่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์ศึกษาปรากฏการณ์หลังจากฟ้าผ่าต่อระบบต่อส่งปีโคโรเลียมได้ดิน ซึ่งประกอบด้วย ค่ายอด (Peak value), เวลา, ความชันสูงสุดของหน้าคลื่น กระแสจุดฟ้าผ่า ซึ่งสามารถใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ของ Heidler ช่วยในการวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าได้ [7] ตามสมการที่ 2.2

$$i = \frac{I_0}{h} \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (2.2)$$

เมื่อ		
$i$	-	กระแสฟ้าผ่า
$I$	-	กระแสค่ายอด
$h$	-	สัมประสิทธิ์การแก้ไขกระแสค่ายอด
$t$	-	เวลา
$\tau_1$	-	ค่าคงที่ทางเวลาทางหน้าคลื่น
$\tau_2$	-	ค่าคงที่ทางเวลาทางหางคลื่น
$n$	-	ค่าตัวประกอบความชันของกระแส

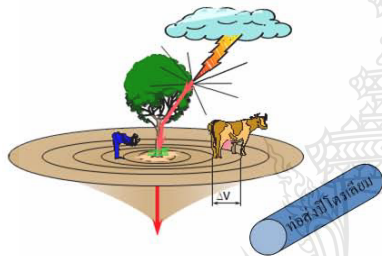
2.3 แรงดันช่วงก้าว

เมื่อกระแสฟ้าผ่าสิ้นสุดที่พื้นดิน ณ จุดสิ้นสุดจะเป็นจุดที่มีความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่งผลให้มีกระแสและแรงดันฟ้าผ่าแพร่กระจายไหลตามผิวดินเป็นบริเวณ โดยรอบ ซึ่งมีระยะห่างของวงรอบประมาณเท่ากับช่วงก้าวของคน ค่าความต่างศักย์ระหว่างช่วงก้าวนี้เรียกว่าแรงดันช่วงก้าว (Step Voltage) หากระบบต่อส่งปีโคโรเลียม และสายไฟวงจรป้องกันต่อผู้ก่อมลพิษ อยู่ในแนวการแพร่กระจายของกระแสฟ้าผ่าและแรงดันช่วงก้าว โดยคำนวณค่าความต้านทานดิน เชื่อมต่อยังถนน

ท่อ และท่อส่วนที่เป็นโลหะ ระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินนั้นย่อมได้รับผลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันช่วงก้ำกึ่งด้วยเช่นกัน ค่าของแรงดันในแต่ละช่วงก้ำกึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ 2.3 ตามรูปที่ 2.3

$$V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \frac{S}{d(d+S)} \right] \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- $V$  = แรงดันช่วงก้ำกึ่ง
- $\rho$  = คือความต้านทานจำเพาะของดิน
- $I$  = กระแสไฟฟ้า
- $S$  = ระยะช่วงก้ำกึ่ง
- $d$  = ระยะห่างจากจุดไฟฟ้า

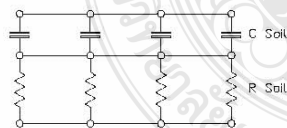


รูปที่ 2.3 แนวท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินในแนวรัศมีแรงดันช่วงก้ำกึ่ง [1, 8]

3. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน, ฉนวนท่อ, และท่อส่งปิโตรเลียม

3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน

ดินเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่สิ่งพิจารณา ซึ่งหลายงานวิจัยได้กล่าวถึง [4] เนื่องจากมีส่วนสัมผัสโดยตรงและโดยอ้อม มีความต่อเนื่องทางไฟฟ้า เมื่อพิจารณาดินทางคุณสมบัติทางไฟฟ้าแล้วจะประกอบด้วยค่าความต้านทาน (R) และค่าเก็บประจุ (C) ดังวงจรสมมูล ตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรสมมูลของดิน [4]

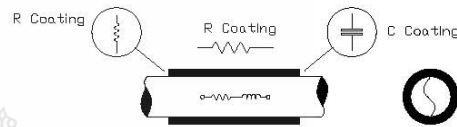
3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน

การเคลือบผิวท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินด้านนอกเพื่อป้องกันท่อสัมผัสกับดินโดยตรง ซึ่งจะสามารถป้องกันท่อสุกร่อนได้ระดับหนึ่ง การเคลือบผิวท่อแบบ Fusion Bonded Epoxy (FBE) จะมีคุณสมบัติในการ

ต้านทานการกัดกร่อนของกรด-ด่าง และตัวทำละลายอื่นๆ ได้ดี แต่ยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือค่าความต้านทานสูงมาก เมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้าจะประกอบด้วยค่าความต้านทาน (R) และค่าเก็บประจุ (C) [9]

3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน

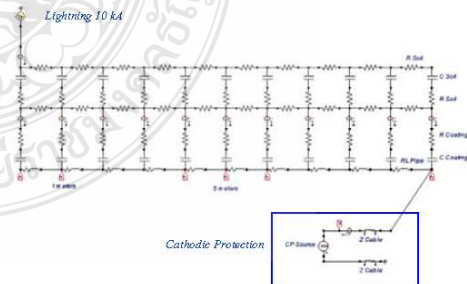
ท่อส่งปิโตรเลียมเป็นวัสดุที่ผลิตจากโลหะเมื่อพิจารณาคุณลักษณะทางไฟฟ้า จะประกอบด้วยค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาว (R) และค่าความเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาว (L) เช่นเดียวกัน โดยค่าความต้านทานของท่อ 17.322  $\mu\Omega/m$  [10] ค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ย 1.079  $\mu H/m$  ซึ่งค่าดังกล่าวได้มาจากการวัดค่าภาคสนาม



รูปที่ 3.2 องค์ประกอบทางไฟฟ้าของระบบท่อส่งปิโตรเลียม

4. แบบจำลองระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินและผลการทดลอง

จากหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องข้างต้น สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติทางกลของท่อส่งปิโตรเลียม ฉนวนท่อ ดิน เป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้า กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง นำส่วนประกอบย่อยต่างๆ มาเขียนให้อยู่ในรูปแบบจำลองโดยใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (ATP-EMTP) วิเคราะห์สภาวะชั่วคราวจากฟ้าผ่าต่อระบบท่อส่งปิโตรเลียมโดยแบ่งการจำลองเป็นสองส่วน 1) พิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของท่อ 2) พิจารณาอิมพีแดนซ์ของท่อพร้อมกับอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าที่จะป้องกันท่อสุกร่อน ทั้งสองส่วนได้ทดสอบจำลองที่ความยาวท่อ 100, 200 และ 300 เมตร โดยบันทึกค่าแรงดันและกระแสชั่วคราวทุกๆ 10 เมตรของความยาวท่อ ตามรูปที่ 3.1

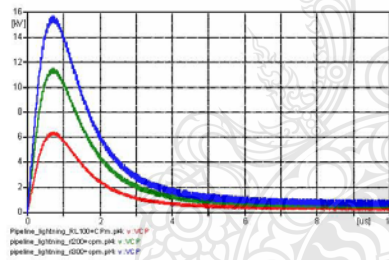


รูปที่ 3.1 แบบจำลองศึกษาปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินโดยพิจารณาสายไฟฟ้าที่จะป้องกันท่อสุกร่อน

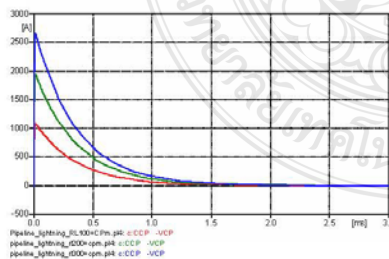


ตารางที่ 3.1 ค่าแรงดันและกระแสชั่วคราวปรากฏที่ท่อ จากการจำลอง ด้วยกระแสฟ้าขนาด 10 kA

ระยะทาง ท่อที่บันทึก	แรงดันปรากฏที่ท่อ (กิโลโวลต์)			กระแสปรากฏที่ท่อ (แอมแปร์)		
	ความยาวท่อ					
	100m	200m	300m	100m	200m	300m
ค่า (เมตร)						
เริ่มต้น (0)	0.09	0.09	0.09	10.74	9.69	8.83
10	3.03	5.67	7.85	10.74	9.69	8.83
20	8.59	16.58	23.16	10.74	9.69	8.83
30	13.61	26.90	37.93	10.74	9.69	8.83
40	17.77	36.64	52.16	10.74	9.69	8.83
50	21.39	45.78	65.85	10.74	9.69	8.83
60	24.34	54.34	79.00	10.74	9.69	8.83
70	26.65	62.30	91.63	10.74	9.69	8.83
80	28.32	69.68	103.72	10.74	9.69	8.83
90	29.33	76.47	115.27	10.74	9.69	8.83
100	29.68	82.67	126.29	10.74	9.69	8.83



รูปที่ 3.1 แรงดันปรากฏชั่วคราวที่อุปกรณ์ป้องกันต่อคู่กร่อน จากความยาวท่อ 100, 200, 300 เมตร



รูปที่ 3.2 กระแสปรากฏชั่วคราวที่อุปกรณ์ป้องกันต่อคู่กร่อน จากความยาวท่อ 100, 200, 300 เมตร

5. สรุป

จากผลการจำลองที่กระแสฟ้าขนาด 10 kA จะสังเกตเห็นว่าค่าแรงดันชั่วคราวปรากฏที่ระยะต่างๆของท่อสูงขึ้นเมื่อความยาวท่อนมากขึ้น จากผลการเหนี่ยวนำตามสมการที่ 2.1 และพบว่าค่ากระแสชั่วคราวปรากฏนั้นมีแนวโน้มที่ค่าจะลดลงเมื่อความยาวท่อเพิ่มขึ้น ตามตารางที่ 3.1

เมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าจริงป้องกันต่อคู่กร่อน พบว่าแรงดันและกระแสชั่วคราวปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันต่อคู่กร่อนนั้นมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เพียงพอที่จะสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ป้องกันต่อคู่กร่อนได้ ตามรูปที่ 3.1-3.2 ซึ่งสามารถควบคุมแรงดันและกระแสชั่วคราวได้ตามมาตรฐาน IEC 62305-1

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงานภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ และขอบคุณบริษัท นาคาเอ็นจิเนียริง จำกัด ที่ได้สนับสนุนมาตรฐาน IEC 1312-1 เพื่อใช้ศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท ท่อส่งปิโตรเลียมไทย จำกัด
- [2] Lightning Protection for Gas-Pipelines installed under the Ground Hitoshi Kijima, Kenji Takato, Kazuo Murakwa Electrical Department Polytechnic University 4-1-1 Sagamihara Kanagawa 229-1196 Japan hkijima@uitec.ac.jp
- [3] Induced Voltages on Long Aerial and Buried Pipelines Due to Transmission Line Transients Konstantinos Kopsidas, Student Member, IEEE, and Ian Cotton, Member, IEEE
- [4] Simulation Study on Lightning Effects to 132 kV Underground Cable, Nor Emyfiah binti husin, 2011
- [5] การปรับปรุงระบบลงดินเพื่อลดผลจากแรงดันเกินที่ผ่าโดยวิธีการประสานศักย์, วิศวกรรม สัมพันธ์
- [6] การปรับปรุงสมรรถนะระบบป้องกันที่ผ่าในระบบจำหน่าย 22 kV นาคยา คล้ายเรื่อง, วิชชุดา ไส้โพธิ์ และพิศาล เต๋นสูงเนิน
- [7] ผลของสนามไฟฟ้าจากการเกิดที่ผ่าลงดินต่อสายเคเบิลใต้ดิน, พ.ศ. 2548, นาคยา คล้ายเรื่อง
- [8] เอกสารประกอบการบรรยาย, Surge Protection, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, ชานศ นันทวิสัย
- [9] The Study of Detection Technology and Instrument of Buried Pipeline-Coating Defaults\* Jin Shijun, Li Jim, Chen Shili, Xiao Kun, Song Shizhe State Key Laboratory for Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin, China
- [10] Peabody's Control of Corrosion Second Edition A.W. Peabody Edited by Ronald L. Bianchetti

# 10<sup>th</sup> Eco-Energy and Materials Science and Engineering Symposium

Energy Technology, Environmental and Social Impact, Nanotechnology and Material Technology, Energy Economic and Management, Nuclear Technology, New Technology and Other topics related to energy field.

**On December 5-8, 2012**  
**Sunee grand hotel,**  
**Ubon-ratchathani**

KEYNOTE SPEAKER

INVITED SPEAKER : IN

ENERGY TECHNOLOGY : ET

ENVIRONMENTAL AND SOCIAL IMPACT : ES

NANOTECHNOLOGY AND MATERIAL TECHNOLOGY : NM

ENERGY ECONOMIC AND MANAGEMENT : EM

NEW ENERGY TECHNOLOGY : NT

**Organized by**



**Co-organized by**



[Go to First Page](#)

## 10<sup>th</sup> EMSES 2012

Dr.Arthit Sode-Yome	EGAT, Thailand
Dr. Sei-ichi AIBA	Japan
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Dr. Yuttana KAMSUWAN	RMUTT, Thailand
Dr. Jakkree SRINONCHAT	RMUTT, Thailand
Dr. Chatchai SOPPAPITAKSAKUL	RMUTT, Thailand
Dr. Pinit SRITHORN	RMUTI, Thailand
Dr. Uthen KAMNAN	RMUTL, Thailand
Dr. Cattariya SUWANNASRI	KMUTNB, Thailand
<b>ASEAN Committee:</b>	
Prof. Dr. YoyokWahyuSubroto	UGM,Indonesia
Prof. Dr. WegaTRISUNAYANTI	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Tumiran	UGM, Indonesia
Prof. Dr. Jun LI	NYU, Singapore
Prof. Dr. INTHAN	ITB, Indonesia
Prof. Dr. Khamphone NANTHAVONG	NOL, Laos
Prof. Dr. Kampui SOUTHISOMBHAT	NOL, Laos
Prof. Dr. Yew Wei LEONG	NYU, Singapore
Prof. Dr. Nguyen Minh TAN	HU, Vietnam
<b>General Secretary:</b>	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
Dr. Sumonman NIAMLANG	RMUTT, Thailand
<b>Technical Program Chair:</b>	
Asst.Prof.Dr.Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand
<b>Area: Energy Technology(ET)</b>	
Dr. Wirachai ROYNARIN	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr.Boonrit PRASARTKAEW	RMUTT, Thailand
Dr. Sathapron THONGWIK	RMUTT, Thailand
Dr. Nathabhat PHANKONG	RMUTT, Thailand
<b>Area: Environmental and Social Impact(ES)</b>	
Dr. Nithiwat CHOOSAKUL	RMUTT, Thailand
<b>Area: Nanotechnology and Materials Science(NM)</b>	
Dr. Sorapong PAVASUPREE	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Kitipong KIMAPONG	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Sirichai TORSAKUL	RMUTT, Thailand
Asst. Prof. Dr. Warunee ARIYAWIRIYANANT	RMUTT, Thailand
<b>Area: Energy Economic and Management(EM)</b>	
Assoc.Prof.Dr. Natha KUPTHASTHIEN	RMUTT, Thailand
Dr. Surin NGAEMNGAM	RMUTT, Thailand
Dr. Pimnapat IEMSOMBOON	RMUTT, Thailand
<b>Area: New Energy Technology(NT)</b>	
Dr. Boonyang PLANGKLANG	RMUTT, Thailand
<b>Area: Nuclear Technology(NU)</b>	
Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH	RMUTT, Thailand



[Go to First Page](#)

## 10<sup>th</sup> EMSES 2012

### Exhibition Chair:

Dr. Amnoi REUNGWAREE RMUTT, Thailand

Dr. Winai CHANPENG RMUTT, Thailand

### Local Arrangement Chair

Dr. Sorapong PAVASUPREE RMUTT, Thailand

Dr. Natee SRISAWAT RMUTT, Thailand

### Registration and Finance Chair

Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand

Dr. Supaporn THOMSORN RMUTT, Thailand

Weeraporn PIVSA-ART RMUTT, Thailand

### Publicity Chair

Asst.Prof.Dr. Krischonme BHUMKITTIPICH RMUTT, Thailand

Dr. Sumonman NIAMLANG RMUTT, Thailand

Dr. Montip LASURIYONTA RMUTT, Thailand

Somchai BIANSONGNERN RMUTT, Thailand

### Publication Chair:

Prof. Dr. Preecha P.YUPAPIN KMITL, Thailand

Assoc.Prof.Dr.Takashi SAGAWA Kyoto Uni., Japan

Dr. Boonyang PLANGKLANG RMUTT, Thailand

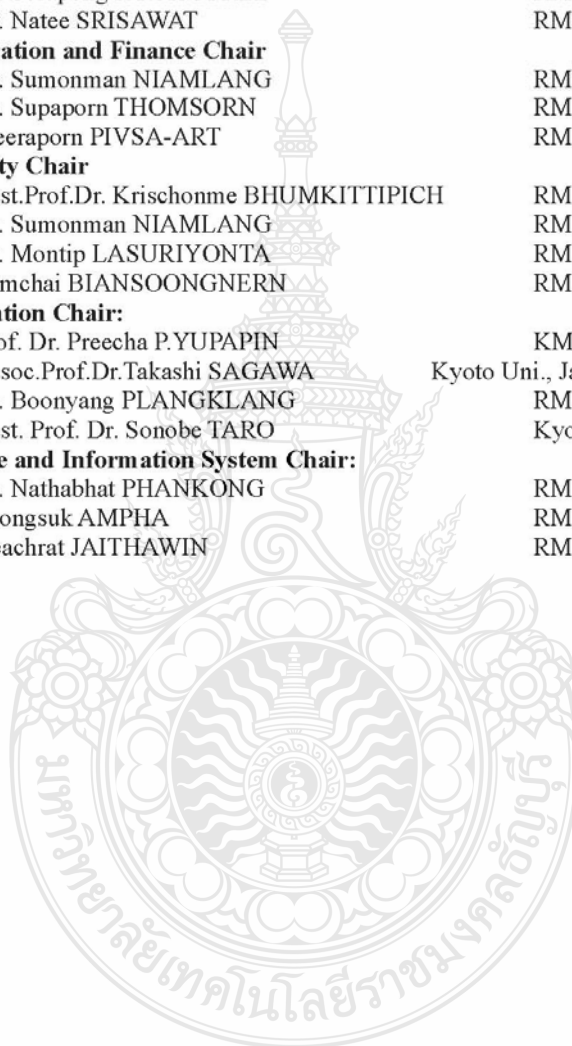
Asst. Prof. Dr. Sonobe TARO Kyoto Uni., Japan

### Website and Information System Chair:

Dr. Nathabhat PHANKONG RMUTT, Thailand

Phongsuk AMPHA RMUTT, Thailand

Deachrat JAITHAWIN RMUTT, Thailand



---

**CONTENT**
**ENERGY TECHNOLOGY**

<b>ET01</b>	Application of Three-level Diode-clamped Converter on 10 kW Distribution Voltage Restorer <i>W. Chankhamrian, K. Bhumkittipich and N. Mithulananthan</i>	82
<b>ET02</b>	A Design of Single Phase Induction Generator for Waterfall Hydro Turbine <i>Sirichai Dang-eam</i>	87
<b>ET04</b>	Key Cutting Algorithm Application to Measurement Placement for Power System State Estimation <i>Y. Kongjeen, P. Inrawong, K. Buayai and T. Kerdchuen</i>	92
<b>ET05</b>	Hydrolysis of Rice Husk and Sugarcane Bagasse by Reflux Method <i>K. Kumproa and A. Nuntiya</i>	95
<b>ET06</b>	Analysis of Lightning Phenomena for Underground Petroleum Pipeline System <i>B. Topradith, K. Bhumkittipich and T. Suwanasri</i>	98
<b>ET07</b>	<i>N, N</i> -Dimethylpyrrolidinium Fluorohydrogenate Ionic Liquid - Polymer Composite Membranes for a Non-Humidified Fuel Cell <i>P. Kiatkittikul, R. Taniki, K. Matsumoto, T. Nohira and R. Hagiwara</i>	102
<b>ET09</b>	Screening of bulk heterojunction polymer: fullerene based organic solar cells through simple mist spray coating <i>Jae-hyeong Le<sup>1</sup>, Takashi Sagawa and Susumu Yoshikawa</i>	106
<b>ET10</b>	Renewable Energy Based Active Cooling System <i>Boonrit Prasartkaew</i>	109
<b>ET11</b>	Improvement of Zinc-Air fuel cell performance by gelled KOH <i>A. Puapattanakul, S. Therdthianwong, A. Therdthianwong and N. Wongyao</i>	114
<b>ET12</b>	Real-time Simulation of a Photovoltaic Cell/Module under the Single Diode Model <i>D. Impreeda and W. Subsingha</i>	118

---

## Analysis of Lightning Phenomena for Underground Petroleum Pipeline System

B. Topradith<sup>1,2</sup>, K. Bhumkittipich<sup>2</sup> and T. Suwanasri<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Thai Petroleum Pipeline Co., LTD.,

<sup>2</sup>Power System and Energy Research Center, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110

<sup>3</sup>The Sirindhorn International Thai-German Graduate School of Engineering (TGGS) in North Bangkok, Thailand  
E-mail: <sup>1</sup>boonlerd@thapline.co.th, <sup>2</sup>krischonme.b@en.rmutt.ac.th, <sup>3</sup>thanapongs@kmutnb.ac.th

**Abstract**— This article presents the lightning phenomena analysis for underground petroleum pipeline system and protection guideline by considering an electrical continuity after a lightning strike to the earth. The result of transient state occur on the pipeline by using mathematical program (ATP-EMTP) to simulate standard waveform 10/350 micro second which will be linked to several dimensions. This study will transform physical characteristics into electrical characteristics such as pipe metal, pipe insulator, conductors in corrosion protection circuit and earth as parameters in the analysis. The result of this simulation found that the transient voltage will rise higher if length is longer and higher than safety allowance of pipe corrosion protection equipment. To limit this over voltage, this study used proper lightning protection equipment characteristics. From the result of simulation and the proper characteristics of lightning protection equipment, the transient voltage was limited follow BS 60950 standard. The result showed that the correct lightning protection equipment will help to reduce damage to asset of petroleum transportation industry from lightning strike.

**Keywords**— Pipeline, Lightning, Impedance, Transient, Induced voltage.

### 1. INTRODUCTION

Pipeline Petroleum transportation is the fastest, convenience and safety. Its energy per unit cost is lowest when compare to other transportations. Normally underground petroleum pipeline will be laid at approximately 1.5 meter depth from soil surface and parallel to railway or high voltage transmission line. From the record found corrosion protection devices which connect to pipeline always damage from lightning. [1]

The previous studies on the effect of lightning to pipeline and how to protect pipeline coating, was on natural gas pipeline which laid nearby high structure and used finite element method [2] and CDEGS [3] program not only to study in electrical induction through pipeline which laid above soil and underground but also the possibility of underground cable damage from lightning at 132 kV. [4] Those studies did not consider about the combined of pipeline impedance and corrosion protection device cable impedance.

This article presents lightning phenomenon analysis for underground petroleum pipeline and its protection methodology by using program which used to simulate transient state in power system by considering both petroleum pipeline impedance and corrosion protection device cable impedance.

### 2. Lightning phenomenon analysis

From standard IEC 61312 - 1, the maximum lightning current is 200 kA with 10 / 350 micro second waveform. As shown in figure 1, when lightning struck to construction, 50% of lightning power will be dissipated to earth, the left will be dissipated to other systems in the building that can be interfered such as power system, telephone cable or communication system. From statistical number of lightning magnitude in Thailand at 20 kA [5], the dissipation to earth current will be dissipated to underground petroleum pipeline

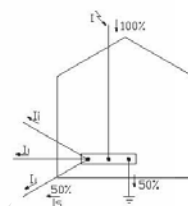


Fig.1 Distribution of lightning current

### 2.1 Lightning waveform function

Lightning current is the most important factor in lightning phenomenon analysis for underground petroleum pipeline. Current function is a time domain function which can use Heidler's mathematic function to analyze its waveform [6] as following equation (1) – (4) which comply to IEC-61312-1

$$i(t) = I_0 \cdot x(t) \cdot y(t) \quad (1)$$

$x(t)$  is Power function,  $y(t)$  is Exponential Function

$$x(t) = \frac{K_e^n}{(1 + K_e^n)} ; K_e = t / \tau_1 \quad (2)$$

$$y(t) = \exp(-t / \tau_2) \quad (3)$$

$$i(t) = \frac{I_0}{h} \cdot \frac{(t / \tau_1)^n}{1 + (t / \tau_1)^n} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (4)$$

$i(t)$  is lightning current,  $I_0$  is peak current,  $h$  is coefficient to correct peak current,  $t$  is time,  $\tau_1$  is front time constant,  $\tau_2$  is tail time constant,  $n$  is slope factor

### 2.2 Lightning waveform

From IEC 61312-1 standard as shown in figure 2, the lightning waveform which T1 is front wave time constant and T2 is tail wave time constant. T2 is considered at 50% peak current. The ratio of current to time is called steepness. ( $di/dt$ ), its unit is  $kA/\mu s$

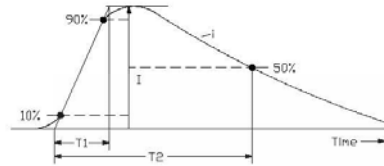


Fig.2 Lightning current waveform

**2.3 Pipeline system impedance**

This analysis does not concern about lightning frequency so pipeline impedance per unit is calculated by using Laplace Transform by Resistance =  $R$ , Inductance =  $sL$ , Capacitance =  $1/sC$

**2.4 Step voltage**

As shown in figure 3, after lightning current reach the ground this position will contain maximum intensity of electrical field. This will cause lightning current and potential dissipate along soil surface in circular. The distance between each circular is approximately the same length as human step. We call this electrical circular as step voltage. In case petroleum pipeline and corrosion protection device cable are in the way of lightning current dissipation and step voltage, by through soil resistance through pipeline insulation and to pipeline metal, petroleum pipeline will get an effect by lightning current and step voltage too. The calculation of lightning current and potential are shown in equation (5)-(6)

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{s}{d(d+s)} \right) \tag{5}$$

$$I_s = \Delta V / R \tag{6}$$

$\Delta V$  is step voltage,  $\rho$  is specific soil resistance,  $I$  is lightning current,  $s$  is step distance,  $d$  is distance away from lightning first reach ground,  $R$  is soil resistance per meter,  $I_s$  is step current



Fig. 3 Underground pipeline in the radius of step voltage

The distance away from lightning point to pipeline through step voltage for 5 meters, its current and potential will decrease. The lightning current at pipeline surface

can be calculated as in equation (6) this current will be used as a parameter for lightning current sourcing in program ATP-EMTP.

**2.5 Induced voltage from pipeline induction**

When lightning current reach the ground, the electrical continuity which includes soil, pipeline insulation, pipeline metal and electrical cable will cause induced voltage along pipeline which is shown as in equation (7)

$$V_{Pipe} = L_{Pipe} \cdot \frac{di}{dt} \tag{7}$$

$V_{Pipe}$  is induced voltage at pipeline,  $L_{Pipe}$  is induction coefficient per 1 meter length,  $di/dt$  is the rate of change of lightning appeared at pipe per time which can be calculated from equation (8) which is derived from equation (4)

$$\frac{di}{dt} = \frac{I_0}{h} \cdot \left\{ \left( \frac{t/\tau_1}{1+(t/\tau_1)^{10}} \right)^{10} \cdot \exp(-t/\tau_2) \cdot (-1/\tau_2) + \exp(-t/\tau_2) \cdot \left[ \frac{10 \cdot (t/\tau_1)^9}{1+(t/\tau_1)^{10}} - \frac{10 \cdot (t/\tau_1)^{20}}{[1+(t/\tau_1)^{10}]^2} \right] \right\} \tag{8}$$

**3. Electrical characteristic of soil, pipeline insulation and pipeline**

**3.1 Electrical characteristic of soil**

Many researches have stated about electrical characteristic of soil because it has both direct and indirect contact to pipeline system on its electrical continuity. From figure 4, when consider electrical characteristic of soil there are compose with resistance ( $R$ ) 1000 Ohm/m and capacitance ( $C$ ) 221.35 pF/m as shown its equivalence circuit

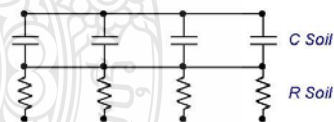


Fig. 4 Soil equivalent circuit

**3.2 Electrical characteristic of pipeline insulation**

External coating by using Fusion Bonded Epoxy (FBE) to protect directly contact between pipelines and soil, this will help to protect corrosion by its characteristic that withstand corrosion via acid or base and other corrode solutions and also has a very high resistance. When considering its characteristic it compose with resistance and capacitance by its resistance ( $R$ )  $3.3^{17} \Omega/m$  as follow ASTM-D257 and its average capacitance ( $C$ )  $10.42 \text{ pF/cm}^2$  from field measurement.

**3.3 Electrical characteristic of underground pipeline**

Petroleum pipeline material comes from metal so when we consider its electrical characteristic it will compose with resistance per length ( $R$ ) and its induction per length ( $L$ ) as well. Normally its resistance is around

56.941 941  $\mu\Omega/m$  [8] and its average induction is around 0.495  $\mu H/m$ . Those values come from field measurement on 14" diameter pipeline.

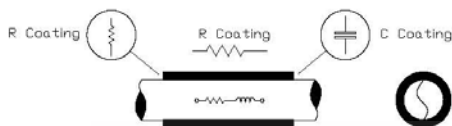


Fig.5 Electrical element of pipeline

3.4 Surge protection

Metal oxide surge protection normally has a very high resistance and inverse to potential. Its current and potential characteristic are as in table 1 and its approximately calculation value as equation (9)

Table 1. V/I characteristic of arrester

V	275	300	450	520	600	680	780	950	1.5k
I	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$

$$I = kV^\alpha \tag{9}$$

$I$  is current pass through surge protection device,  $k$  is constant value depend on type of surge device,  $V$  is potential over surge device,  $\alpha$  is power number which can be derived from equation (10)

$$a = \frac{\log I_2 - \log I_1}{\log V_2 - \log V_1} \tag{10}$$

4. Underground pipeline model and Simulation results

Lightning current parameters which difference from [9] can be considered from first stroke where  $\tau_1$  equals to 19 micro second,  $\tau_2$  equals to 485 micro second,  $n$  equals to 10 as follow IEC 61312-1. Its simulation can be considered in 3 categories, 1) consider only pipeline impedance 2) consider impedance from both pipeline and corrosion protection cable and 3) protection for category 2. All categories simulate on pipe length at 500 and 1,000 meters by record instantaneous state at every 100 meters.

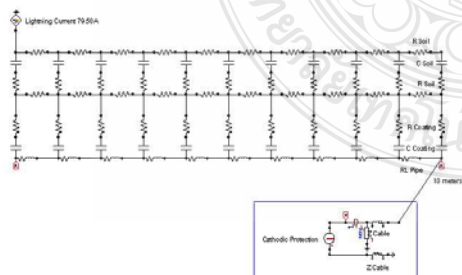


Fig.6 Pipeline equivalent model

Table 2. Transient state on pipeline

Distances of record (Meters)	Appeared voltages (Kilovolts)		Appeared currents (Ampere)	
	Length of pipeline			
	500 m	1000 m	500 m	1000 m
initial (0)	4.124	4.124	0.158	0.079
100	4.857	4.902	0.158	0.079
200	5.497	5.681	0.158	0.079
300	5.956	6.369	0.158	0.079
400	6.231	6.964	0.158	0.079
500	6.323	7.468	0.158	0.079
600	-	7.881	-	0.079
700	-	8.202	-	0.079
800	-	8.431	-	0.079
900	-	8.569	-	0.079
1,000	-	8.615	-	0.079

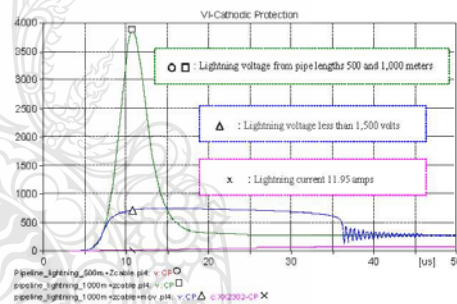


Fig.7 Lightning current and voltage to appears at cathodic protection

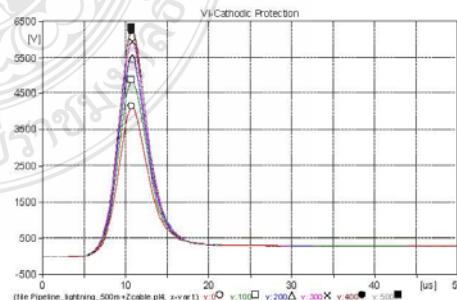
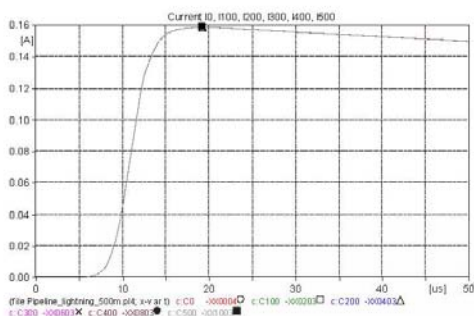
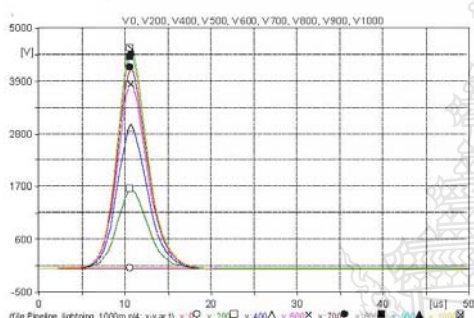


Fig.8 Lightning current and voltage to appears pipeline from pipe length 500 meters

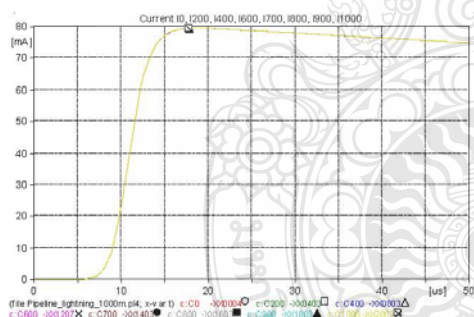




**Fig.9 Lightning current to appears pipeline from pipe length 500 meters**



**Fig.9 Lightning voltage to appears pipeline from pipe length 1,000 meters**



**Fig.10 Lightning current to appears pipeline from pipe length 1,000 meters**

**5. Conclusion**

The analysis of lightning phenomenon for the underground petroleum pipeline and its protection which has been proposed and the result of its simulation which was included in this paper, has shown that the lightning instantaneous potential at the distance along pipeline will higher when pipeline length is increase due to its inductance directly vary to its length as shown in equation (7) and also found that the instantaneous current tend to be decrease as its length increasing as shown in table 2. When considering impedance from pipeline and corrosion protection circuit cable, this analysis found both instantaneous potential and current are higher than safety

value of the devices which enough to cause damage to corrosion protection devices. The result of protection simulation has shown that it can limit instantaneous potential to less than 1,500 volts as follow BS60950 as in figure 7 so this can be applied to use to control potential appear over pipeline.

**REFERENCES**

- [1] Thai Petroleum Pipeline Co., LTD., Department of Electrical Engineering, 2/8 Moo 11 Lumlukka Rd., Ladsawai, Lumlukka, Pathumthani 12150, Order No. 11028267
- [2] Hitoshi Kijima, Kenji Takato, Kazuo Murakwa, "Lightning Protection for Gas-Pipelines installed under the Ground", International Journal of systems Applications, Engineering & Development, Issue 1, Volume 5, 2011
- [3] Konstantinos Kopsidas, Ian Cotton, "Induced Voltages on Long Aerial and Buried Pipelines Due to Transmission Line Transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 3, July 2008
- [4] Nor Emyliah binti husin, "Simulation Study on Lightning Effects to 132 kV Underground Cable", Universitite Knotogmi Ataysa, 2011
- [5] Nattaya Klairuang, Witchuda Sopho, and Pisarn Densungnern, Lightning Performance Improvement of 22 kV Distribution Line, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus
- [6] Nattaya Klairuang, Effect of Electric Fields Generated by Direct Lightning Strikes on Ground to Underground Cables, 2005, ISBN 974-9842-48-0
- [7] Jin Shijiu, Li Jim, Chen Shili, Xiao Kun, Song Shizhe, "The Study of Detection Technology and Instrument of Buried Pipeline-Coating Defaults", Proceedings of the 4<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation June 10-14, 2002
- [8] A.W. Peabody, "Control of Pipeline Corrosion", Second Edition 2001 by NACE International, pp. 30
- [9] Boonlerd Topradith, Krischonme Bhumkittipich and Thanapong Suwanasri, In 4<sup>th</sup> Electrical Engineering Network 2012, Nong Khai, Thailand, April 3-5, pp.184-187



The 35<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-35)





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Ajalawit Chantaveerod	Walailak University
Akaraphunt Vongkumhae	Naresuan University
Akkarat Boonpoonga	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Alex Pongpech	Dhurakij Pundit University
Amnart Suksri	Khon Kaen University
Amnoi Ruengwaree	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Amom Jiraseree-Amomkun	Mahanakorn University of Technology
Anuchit Charean	Kasem Bundit University
Anupap Meesomboon	Khon Kaen University
Anuwat Jangwanitlerit	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Anuwat Prasertsit	Prince of Songkla University
Aphibal Pruksanubal	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Apichai Bhatranand	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Apichan Kanjanavapastit	Udon Thani Rajabhat University
Apinunt Thanachayanont	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Apirada Namsang	Civil Aviation Training Center Thailand
Apirat Siritaratiwat	Khon Kaen University
Apiwat Lek-Uthai	Chulalongkorn University
Arkhom Mounghaodaeng	Srinakharinwirot University
Arkorn Kaewrawang	Khon Kaen University
Amuphap Dowrueng	National Electronics and Computer Technology Center
Arporn Teeramongkonrasmee	Chulalongkorn University
Arthit Sode-Yome	Siam University
Atcha Kopwiththaya	National Electronics and Computer Technology Center
Athikorn Sareephattananon	Eastern Asia University
Atthapol Ngaopitakkul	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bancha Burapattanasiri	Kasem Bundit University
Benjamas Panomruttanarug	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Bongkam Homnan	Dhurakij Pundit University
Bongkoj Sookananta	Ubon Ratchathani University
Boonchai Techaumnat	Chulalongkorn University
Boonchuay Supmonchai	Chulalongkorn University
Boonlert Suechoey	South-East Asia University
Boonruk Chipipop	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Boonsri Kaewkham-Ai	Chiang Mai University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

#### Reviewer

Boonyang Plangklang  
Boonying Knobnob  
Budhapon Sawetsakulanond  
Bundit Thipakorn  
Bunlung Neammanee  
Cattareeya Suwanasri  
Chai Chompoo-Inwai  
Chainarin Ekkaravardome  
Chainarong Klimanee  
Chainarong Wisassakwichai  
Chairat Pinthong  
Chaiwut Chat-Uthai  
Chaiyachet Saivichit  
Chaiyan Jettanasen  
Chaiyapom Khemapatapan  
Chaiyapom Lothongkam  
Chaiyo Thammarat  
Chaiyo Thammarat  
Chalee Vorakulpipat  
Chanchai Thajijam  
Chanchai Dechthummarong  
Chanin Wissawinthanon  
Channarong Banmongkol  
Chanwit Boonchuay  
Charin Junlawanit  
Charnchai Pluempitiwiriyaewj  
Charturong Tantibundhit  
Chatchai Jantaraprim  
Chatchai Suppitaksakul  
Chatchai U-Thaiwasin  
Chatchawarn Hansakunbuntheung  
Chawasak Rakpenthai  
Cherdkul Sopavanit  
Chiranut Sa-Ngiamsak  
Chirasak Sinsukudomchai

#### Organization

Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Srinakharinwirot University  
Rajamangala University of Technology Krungthep  
Naresuan University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chulalongkorn University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Dhurakij Pundit University  
Mahanakorn University of Technology  
South-East Asia University  
South-East Asia University  
National Electronics and Computer Technology Center  
Srinakharinwirot University  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Chulalongkorn University  
Chulalongkorn University  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon  
Chulalongkorn University  
Thammasat University  
Prince of Songkla University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
South-East Asia University  
National Electronics and Computer Technology Center  
University of Phayao  
Chulalongkorn University  
Khon Kaen University  
South-East Asia University





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

#### Reviewer

Chirdpong Deelertpaiboon  
Choochart Haruechaiyasak  
Chow Chompooinwai  
Chukiet Sodsri  
Chumnam Punyasai  
Chutipon Uyaisom  
Chuttchaval Jeraputra  
Deacha Puangdownreong  
Decha Wilairat  
Denchai Worasawate  
Diew Koolpiruck  
Dr.-Eng. Pakom Ubolkosold  
Duang-Arthit Srimoon  
Ekachai Leelarasmee  
Ekachai Phaisangittisagul  
Ekapon Siwapornsathain  
Issarachai Ngamroo  
Jakkree Srinonchat  
Jantana Panyavarapom  
Jasada Kudtongngam  
Jeerasuda Koseeyapom  
Jirasak Chanwutitum  
Jitkomut Songsiri  
Jonglak Pahasa  
Jukkrit Tagapanij  
Jumpol Polvichai  
Kamon Jirasereeamomkul  
Kampol Woradit  
Kanadit Chetpattananondh  
Kanchana Silawarawet  
Kanitpong Pengwon  
Karel Sterckx  
Kasem Utaikaifa  
Keattisak Sripimanwat  
Keerati Chayakulkheeree

#### Organization

King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
National Electronics and Computer Technology Center  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Silpakom University  
National Electronics and Computer Technology Center  
Eastern Asia University  
Mahidol University  
South-East Asia University  
Mahidol University  
Kasetsart University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Bangkok University  
Rangsit University  
Chulalongkorn University  
Kasetsart University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Burapha University  
National Electronics and Computer Technology Center  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Chulalongkorn University  
University of Phayao  
Mahanakom University of Technology  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Srinakharinwirot University  
Prince of Songkla University  
Siam University  
Chiang Mai University  
Bangkok University  
University of the Thai Chamber of Commerce  
National Electronics and Computer Technology Center  
Sripatum University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

#### Reviewer

Khanittha Kaewdang  
Kiattisin Kanjanawanishkul  
Kitja Luckamnuyporn  
Kittiphong Meesawat  
Kittipong Tonmitr  
Kittisak Tripipatpomchai  
Kittiwann Nimkerdphol  
Kobchai Dejhan  
Kobsak Sriprapha  
Komsan Hongesombut  
Komson Daroj  
Komson Petcharaks  
Kongpan Areerak  
Korpom Panyim  
Kosin Chamnongthai  
Kosol Nithisopa  
Kosol Oranpiroj  
Krischonme Bhumkittipich  
Krisda Yingkayun  
Krissada Asavaskulkiet  
Krit Angkeaw  
Kritchai Witheephanich  
Kulyos Audomvongseree  
Kunnthphong Srisathit  
Kusumal Chalernmyanont  
Laor Boongasame  
La-Or Kovavisaruch  
Lunchakorn Wuttisittikulij  
Mana Sriyudthsak  
Manop Aorpirmai  
Marut Buranarach  
Mitchai Chonghcheawchamnan  
Monai Krairiks  
Mongkol Konghirun  
Mongkol Pusayatanont

#### Organization

Ubon Ratchathani University  
Mahasarakham University  
Rajamagala University of Technology Phra Nakorn  
Khon Kaen University  
Khon Kaen University  
Rangsit University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
National Electronics and Computer Technology Center  
Kasetsart University  
Ubon Ratchathani University  
Chulalongkorn University  
Suranaree University of Technology  
Mahidol University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Mahidol University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Srinakharinwirot University  
Chulalongkorn University  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin  
Prince of Songkla University  
Bangkok University  
National Electronics and Computer Technology Center  
Chulalongkorn University  
Chulalongkorn University  
Mahanakorn University of Technology  
National Electronics and Computer Technology Center  
Prince of Songkla University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Ubonratchatani University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

#### Reviewer

Monthon Nawong  
Montree Siripruchyanun  
Montri Kamjanadecha  
Montri Somdunyanok  
Naebboon Hoonchareon  
Nalin Sidahao  
Napat Sra-lum  
Nararat Ruangchajjatupon  
Narong Buabthong  
Narong Yoothanom  
Narongdech Keeratipranon  
Natasha Dejdumrong  
Natchpong Hatti  
Nathabhat Phankong  
Nathem Koetsam-Ang  
Nattachote Rugthaicharoencheep  
Nattapong Phanthuna  
Nattapong Swangmuang  
Nattavut Chayavanich  
Nattawoot Suwannata  
Natth Junkrob  
Nattha Jindapetch  
Natthaphob Nimpitiwan  
Natthawuth Somakettarin  
Nimit Boonpirom  
Nipapon Siripon  
Niphat Jantharamin  
Nipont Tangthong  
Nisachon Tangsangiumvisai  
Nit Petcharaks  
Nitipong Panklang  
Nopadol Uchaipichat  
Noppom Patcharaprakiti  
Nuntiya Chaiyabut  
Nutthaphong Tanthanuch

#### Organization

Dhurakij Pundit University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Prince of Songkla University  
Siam University  
Chulalongkorn University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Khon Kaen University  
Thammasat University  
Sripatum University  
Dhurakij Pundit University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
National Electronics and Computer Technology Center  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Kasem Bundit University  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon  
Rajamangala University of Technology Phra Nakhon  
Chiang Mai University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Mahasarakham University  
South-East Asia University  
Prince of Songkla University  
Bangkok University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Sripatum University  
Chiang Mai University  
Naresuan University  
Rajamangala University of Technology Krungthep  
Chulalongkorn University  
Dhurakij Pundit University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Thammasat University  
Rajamangala University of Technology Lanna  
Bangkok University  
Thammasat University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

#### Reviewer

Opas Chutatape  
Paiboon Kiatsookkanatom  
Paisam Sonthikom  
Paitoon Rakluea  
Pakorn Kaewtrakulpong  
Pakpum Somboon  
Panavy Pookaiyaudom  
Panus Nattharith  
Panuthat Boonpramuk  
Parachai Juanuwattanakul  
Pamjit Damrongkulkamjorn  
Patamapom Sripadungtham  
Pathomthat Chiradeja  
Pawee Chaiya boon  
Peerapol Yuvapossitanon  
Peerawut Yutthagowith  
Peerayot Sanposh  
Pennapa Pairodamonchai  
Petch Nantivatana  
Phai boon Booppha  
Phairote Wounchoum  
Phaisan Ngamjanyaporn  
Phakkawat Jantree  
Phichet Moungnoul  
Phongsak Phakamach  
Phumin Kirawanich  
Pichai Aree  
Pinit Thepsatorn  
Pipat Prommee  
Pished Bunnun  
Pisit Liutanakul  
Pisit Vanichchanunt  
Pisit Wisutmetheekom  
Pisut Raphisak  
Piya Warabuntaweasuk

#### Organization

Rangsit University  
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Bangkok University  
Mahanakorn University of Technology  
Naresuan University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Sripatum University  
Kasetsart University  
Kasetsart University  
Srinakharinwirot University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Udon Thani Rajabhat University  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Sripatum University  
Udon Thani Rajabhat University  
Prince of Songkla University  
Rangsit University  
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
North Eastern University  
Mahidol University  
Thammasat University  
Srinakharinwirot University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
National Electronics and Computer Technology Center  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
Mahanakorn University of Technology  
Kasetsart University  
Bangkok University





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Pongsatom Sedtheetom	Mahidol University
Pongsawat Kotchapoom	Eastern Asia University
Poonlap Lamsrichan	Kasetsart University
Pomchai Phukpattaranont	Prince of Songkla University
Pomrapeepat Bhasaputra	Thammasat University
Prajuab Pawarangkoon	Mahanakorn University of Technology
Pramin Artrit	Khon Kaen University
Pramote Anunvrapong	Rajamangala University of Technology Krungthep
Pramuk Unahalekhaka	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Prapapan Khlubwannarat	South-East Asia University
Prasit Nakonrat	Ubon Ratchathani University
Prasit Teekaput	Chulalongkorn University
Prasopchok Hothongkham	Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Prayoot Akkaraekthalin	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Preecha Kocharoen	Sripatum University
Preecha Sakarung	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi
Rachu Punalard	Mahanakorn University of Technology
Rangspan Marukatat	Mahidol University
Rardchawadee Silapunt	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Rawid Banchuin	Siam University
Rungsimant Sitdhikom	Mahanakorn University of Technology
Sakchai Thipchaksurat	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Sakda Somkun	National Institute of Metrology
Sakorn Po-Ngam	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Salitip Sinthusonthisat	Mahanakorn University of Technology
Samphan Phrompichai	Mahanakorn University of Technology
Samroeng Hintamai	Sripatum University
Sanchai Dechanupaprittha	Kasetsart University
Sanchai Rattananon	University of the Thai Chamber of Commerce
Sangsuree Vasupongayya	Prince of Songkla University
Santitham Prom-On	University College London
Sanun Srisuk	Mahanakorn University of Technology
Sanya Khunkhao	Sripatum University
Sanya Mitaim	Thammasat University
Saowapak Thongvigitmanee	National Electronics and Computer Technology Center



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

### Reviewer

Sarawan Wongsa  
Sarawuth Chaimool  
Sarun Sumriddetchkajorn  
Sataporn Pornpromlikit  
Sawat Bunnjaweht  
Seangraewee Buakaew  
Sermsak Uatrongjit  
Singthong Pattanasethanon  
Sirichai Dangeam  
Siripong Chaysin  
Siroj Sirisukprasert  
Sirivit Taechajedcadarungsri  
Siriwich Tadsuan  
Siriya Skolthanasarat  
Sisuda CHAITHONGSUK  
Sitthidet Vachirasiririkul  
Somboon Nuchprayoon  
Somboon Sooksatra  
Somchai Biansoongnem  
Somchai Hiranvarodom  
Somchai RATANATHAMMAPHAN  
Somchat Jiriwibhakorn  
Sommart Sangn-Gern  
Somnida Bhatranand  
Somphop Rodampom  
Somporn Seewattanapon  
Somying Thainimit  
Somyot Kaitwanidvilai  
Songklod Sriprang  
Songkran Kantawong  
Songphol Kanjanachuchai  
Songrit Maneewongvatana  
Sopon Phumeechanya  
Sorawat Chivapreecha  
Sorot Auypom

### Organization

King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's University of Technology North Bangkok  
National Electronics and Computer Technology Center  
Khon Kaen University  
Mahanakorn University of Technology  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chiang Mai University  
Mahasarakham University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Srinakharinwirot University  
Kasetsart University  
Khon Kaen University  
South-East Asia University  
National Electronics and Computer Technology Center  
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi  
University of Phayao  
Chiang Mai University  
Rangsit University  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Rajamangala University of Technology Thanyaburi  
Chulalongkorn University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Mahanakorn University of Technology  
Mahidol University  
Srinakharinwirot University  
Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi  
Kasetsart University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Rajamangala University of Technology Rattanakosin  
Bangkok University  
Chulalongkorn University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Silpakorn University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Provincial Electricity Authority



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

#### Reviewer

Srisak Noyraiphoom  
Suchada Sitjongsatapom  
Suchart Yammen  
Suchin Trirongjitmoah  
Sudchai Boonto  
Sumate Naetiladdanon  
Suneat Pranonsatit  
Supachai Paiboon  
Supachai Vorapojpisut  
Supachate Innet  
Suparek Manitpomsut  
Supatana Auethavekiat  
Supattana Nirukkanaporn  
Supavadee Aramvith  
Supawan Ponpitakchai  
Supot Sookpotharom  
Surachai Chaitusaney  
Surachet Kanprachar  
Surachoke Thanapitak  
Surapan Airphaiboon  
Surapong Suwankawin  
Suratsavadee Korkua  
Suree Pumrin  
Suthathip Maneewongvatana  
Suthee Rukkaphan  
Suwat Pattaramalai  
Suwit Kiravittaya  
Tanasak Phanprasit  
Tanet Wonghong  
Tanin Duangjan  
Tasaneey Chayanich  
Taweesus Apiwattanapong  
Teeravisit Laohapensaeng  
Thamvarit Singhavilai  
Thanadol Pitranan

#### Organization

Rajamagala University of Technology Phra Nakorn  
Mahanakorn University of Technology  
Naresuan University  
Ubon Ratchathani University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Kasetsart University  
Mahidol University  
Thammasat University  
University of the Thai Chamber of Commerce  
University of the Thai Chamber of Commerce  
Chulalongkorn University  
Rangsit University  
Chulalongkorn University  
Naresuan University  
Bangkok University  
Chulalongkorn University  
Naresuan University  
Mahidol University  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
Chulalongkorn University  
Walailak University  
Chulalongkorn University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Kasem Bundit University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
Naresuan University  
Bangkok University  
Bangkok University  
Srinakharinwirot University  
King Mongkut's University of Technology Thonburi  
National Electronics and Computer Technology Center  
Mae Fah Luang University  
Mahidol University  
Mahidol University



รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Thanakom Namhomchan	Eastern Asia University
Thanapat Promwattanapakdee	Sripatum University
Thanapong Suwanasri	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thanathip Sum-Im	Srinakharinwirot University
Thaschagon Onboonuea	Eastern Asia University
Thavatchai Tayjasanant	Chulalongkorn University
Theerapol Muankhaw	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Theerayod Wiangtong	Mahanakom University of Technology
Theerayut Janjaem	Kasem Bundit University
Theerayuth Chatchanayuenyong	Maharakham University
Thidarat Tawsook	Bangkok University
Thipwan Fangsuwannarak	Suranaree University of Technology
Thumrongrat Amornraksa	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Toempong Phetchakul	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Trin Saengsuwan	Kasetsart University
Tuchsanai Ploysuwan	Siam University
Ukrit Mankong	Chiang Mai University
Usana Tuntoolavest	Kasetsart University
Ut Goenchanart	Rangsit University
Uthen Kamnam	Rajamangala University of Technology Lanna
Varathana Arjrih	Srinakharinwirot University
Vech Vivek	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Veerachai Malyavej	Mahanakom University of Technology
Viboon Chunkag	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Vichai Sae-Li	Eastern Asia University
Vichakorn Hengsrirawat	Sripatum University
Vijit Kinnares	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Virasit Imtawil	Khon Kaen University
Vladimir Buntilov	Mahidol University
Vuttipon Tarateeraseth	Srinakharinwirot University
Vyapote Supabowomsathian	Siam University
Waleed Mohammad	Bangkok University
Walisa Romsaiyud	Siam University
Wanchai Chankaipol	Sripatum University
Wanchai Chimchavee	University of the Thai Chamber of Commerce





รายชื่อผู้พิจารณาบทความ  
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 35

Reviewer	Organization
Wanchai Pijitrojana	Thammasat University
Wanchai Subsingha	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Wanchak Lenwari	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Wanchalerm Pora	Chulalongkorn University
Wannarat Suntiamorntut	Prince of Songkla University
Warit Wichakool	Prince of Songkla University
Watis Leelapatra	Khon Kaen University
Weerapun Rungseewijitprapa	Chulalongkorn University
Wekin Piyarat	Srinakharinwirot University
Werachet Khan-Ngem	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Werapon Chiracharit	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Wichit Krueasuk	Sripatum University
Widhyakorn Asdomwised	Chulalongkorn University
Wijittra Petchakit	Walailak University
Wilaipom Lee	King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Winyu Sawaengsinkasikit	Kasem Bundit University
Wipavan Narksarp	Siam University
Wisam Patchoo	Bangkok University
Wiwat Tippachon	Rajamangala University of Technology Lanna
Wongwit Senavongse	Srinakharinwirot University
Worakam Wongsachua	Ubon Ratchathani University
Wuthipom Loetwassana	Mahanakorn University of Technology
Wuttipong Kumwilaisak	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Wuttiwat Kongrattanaprasert	Rajamangala University of Technology Krungthep
Yongyut Chonbodeechalermroong	Naresuan University
Yongyuth Naras	Siam University
Yongyuth Pempoontanalarp	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Youthana Kulvinit	Chulalongkorn University
Yutana Chongjarearn	Dhurakij Pundit University
Yutana Jewajinda	National Electronics and Computer Technology Center
Yuttana Kumsuwan	Chiang Mai University
Yuttapong Jiraksopakun	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Yutthana Kanthaphayao	Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

## สารบัญ

PW061	<p>การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกัน</p> <p>บุญเลิศ โดประดิษฐ์<sup>1,2</sup> กฤษณ์ชนม์ ภูมิภคพิชญ์ และธนพงศ์ สุวรรณศรี<sup>3</sup></p> <p><sup>1</sup>บริษัท ท่อส่งปีโตรเลียมไทย จำกัด</p> <p><sup>2</sup>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</p> <p><sup>3</sup>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ</p>	251
PW062	<p>โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับประเมินความเสี่ยงอันตรายจากการถูกฟ้าผ่าและออกแบบการติดตั้งตัวนำล่อฟ้าในระบบไฟโตโวลตาอิก</p> <p>ทรงพล อัฐรัตน์, สมชัย หิรัญวาโรดม และบุญยัง ปลั่งกลาง</p> <p>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</p>	255
PW063	<p>A Study of Induced Overvoltage of MEA'69 kV Transmission Line due to Lightning Strokes to Pole and Mid Span</p> <p>ณัฐพงศ์ สุวรรณโชติ<sup>1</sup> อรุณ ชลิ่งสุทธิ<sup>2</sup></p> <p>ณัฐ โชติ รัก ไทยเจริญชีพ<sup>1</sup> และอรุณ พยอมหอม<sup>2</sup></p> <p><sup>1</sup>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร</p> <p><sup>2</sup>การไฟฟ้านครหลวง</p>	259
PW064	<p>Application of Genetic Algorithms in Voltage Sag State Estimation due to Single Line to Ground Faults of 24 bus Reliability Power System</p> <p>Chamni Jaipradiditham<sup>1</sup> and Chatchai U-thaiwasin<sup>2</sup></p> <p><sup>1</sup>Kasem Bundit University</p> <p><sup>2</sup>South-East Asia University</p>	263
PW065	<p>การประยุกต์ใช้ระบบเก็บสะสมพลังงานแบบแบตเตอรี่ในระบบจำหน่ายเพื่อชะลอการลงทุนในระยะสั้น</p> <p>ชนิกนันท์ วัฒนะสุด และกมลสันต์ หงษ์สมบัติ</p> <p>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์</p>	267
PW066	<p>การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีประมวลผลภาพร่วมกับเครื่องวัดคุณภาพกำลังไฟฟ้าประเมินผลความถูกต้องเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้าแบบอิเล็กทรอนิกส์</p> <p>อดิศักดิ์ เจริญรุ่งโรจน์<sup>1</sup> นิตร์ชัย สุขพิทักษ์สกุล<sup>1</sup> และณัฐวุฒิ โสมเกษตรินทร์<sup>2,3</sup></p> <p><sup>1</sup>การไฟฟ้าส่วนภูมิภาคเมืองพัทยา</p> <p><sup>2,3</sup>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี</p>	271

# การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกัน The Lightning Phenomena Analysis for Underground Petroleum Pipeline System And Protection Guideline

บุญเลิศ โดประดิษฐ์<sup>1,2</sup> กฤษณ์ชนม์ ภูมิศักดิ์พิชญ์<sup>2</sup> และชนพงษ์ สุวรรณศรี<sup>3</sup>

บริษัท ท่อส่งปิโตรเลียมไทย จำกัด ฝ่ายซ่อมบำรุง แผนกวิศวกรรมไฟฟ้า

<sup>1</sup>ศูนย์วิจัยระบบไฟฟ้ากำลังและพลังงาน ภาควิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>2</sup>บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสิรินธร ไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

Email: <sup>1</sup>boonlerd@thapline.co.th, <sup>2</sup>krischonms.b@en.rmutt.ac.th, <sup>3</sup>thasapongs@kmutrb.ac.th

## บทคัดย่อ

บทความนี้นั้นเสนอการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกัน โดยพิจารณาจากความถี่ของทางฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน เพื่อทราบถึงผลของสภาวะชั่วคราวที่ปรากฏในระบบท่อ ด้วยโปรแกรมจำลองสภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า (ATP-EMTP) ทำการจำลองรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่ามาตรฐาน 10/350 ไมโครวินาที โดยการเปลี่ยนคุณลักษณะของดิน จนวนทอ ท่อโลหะ และสายตัวนำไฟฟ้าวงจรป้องกันที่สุกก่อน ให้เป็นคุณลักษณะทางไฟฟ้าเพื่อเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์ จากผลการจำลองด้วยวิธีดังกล่าวพบว่าเกิดแรงดันชั่วคราวปรากฏที่ท่อนั้นสูงขึ้นเมื่อความยาวท่อนมากขึ้น และสูงขึ้นกว่าค่าความปลอดภัยของอุปกรณ์ป้องกันที่สุกก่อน สำหรับแนวทางการควบคุมแรงดันเกินนั้น ได้พิจารณาคุณสมบัติของอุปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่าที่เหมาะสม จากผลการจำลองด้วยวิธีข้างต้นร่วมกับแนวทางการป้องกันพบว่าสามารถควบคุมแรงดันชั่วคราวได้ตามมาตรฐาน BS 60950 ซึ่งจะสามารถช่วยลดความเสี่ยงต่อทรัพย์สินของภาคอุตสาหกรรมการขนส่งน้ำมันทางท่อจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าได้

คำสำคัญ: ท่อส่งปิโตรเลียม, ฟ้าผ่า, อิมพีแดนซ์, สภาวะชั่วคราว, แรงดันเกินชั่วคราว

## Abstract

This article presents the lightning phenomena analysis for underground petroleum pipeline system and protection guideline by considering an electrical continuity after a lightning strike to the earth. to determine the result of transient state occur on the pipeline by using mathematical program (ATP-EMTP) to simulate standard waveform 10/350 micro second which will be linked to several dimensions. This study will transform physical characteristics into electrical characteristics such as pipe metal, pipe insulator, conductors in corrosion protection circuit and earth as parameters in the analysis. The

result of this simulation found that the transient voltage will rise higher if length is longer and higher than safety allowance of pipe corrosion protection equipment. To limit this over voltage, this study used proper lightning protection equipment characteristics. From the result of simulation and the proper characteristics of lightning protection equipment, the transient voltage was limited follow BS 60950 standard. The result showed that the correct lightning protection equipment will help to reduce damage to asset of petroleum transportation industry from lightning strike.

Keywords: Pipeline, Lightning, Impedance, Transient, Induced voltage

## 1. คำนำ

การขนส่งน้ำมันทางท่อ เป็นการขนส่งที่ได้รับความนิยมและสะดวกรวดเร็ว มีความปลอดภัยสูง ค่าพลังงานในการขนส่งต่อหน่วยต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการขนส่งด้วยวิธีอื่น โดยปกติแล้วการขนส่งน้ำมันทางท่อจะถูกฝังอยู่ใต้ดินที่มีความลึกประมาณ 1.5 เมตรจากผิวดินขนานกับเส้นทางรถไฟและแนวสายส่งไฟฟ้าแรงสูงเป็นต้น จากข้อมูลพบว่าอุปกรณ์ป้องกันที่สุกก่อนที่เชื่อมต่อกับท่อได้รับความเสียหายจากฟ้าผ่า [1]

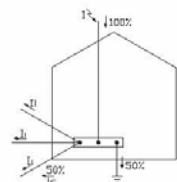
การศึกษาผลกระทบของระบบท่อนั้น มีนักวิจัยได้ศึกษาการป้องกันความเสียหายของท่อนที่ส่งก๊าซธรรมชาติที่อยู่ใกล้ถึงปลอกสร้างสูงซึ่งได้รับผลกระทบจากฟ้าผ่า โดยใช้วิธี Finite Element [2] และการศึกษาการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของท่อส่งน้ำมันในลักษณะการวางท่อนขนานเหนือผิวดินและใต้ดินด้วยโปรแกรม CDEGS [3] รวมถึงการศึกษาความเป็นไปได้ของการชำรุดของสายเคเบิลจากฟ้าผ่า ในระดับแรงดัน 132 kV โดยลักษณะการวางสายใต้ดิน [4] จากบทความดังกล่าวข้างต้นยังมีได้กล่าวถึงค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งปิโตรเลียมร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวงจรป้องกันที่สุกก่อน

ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกัน ด้วยโปรแกรมจำลองสภาวะชั่วคราวในระบบไฟฟ้า โดยพิจารณาเฉพาะค่า

อิมพีแดนซ์ของท่อส่งปีโคเรียม และค่าอิมพีแดนซ์ของท่อส่งปีโคเรียม ร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าจริงป้องกันต่อคู่กร่อนรวมถึงแนวทางการป้องกัน

**2. การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า**

จากมาตรฐาน IEC 61312-1 กระแสฟ้าผ่าสูงสุดมีค่า 200 kA ที่รูปคลื่น 10/350 μs ตามรูปที่ 1 ซึ่งอธิบายให้เห็นว่าเมื่อมีฟ้าผ่าคือสิ่งปลูกสร้าง กระแสประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์จะกระจายลงดินส่วนที่เหลือจะแพร่กระจายเข้าสู่ระบบต่าง ๆ ในอาคารที่สามารถเหนี่ยวนำได้เช่นระบบไฟฟ้า สายโทรศัพท์หรือระบบสื่อสาร จากสถิติขนาดกระแสฟ้าผ่าประเทศไทยที่ 20 kA [5] ซึ่งกระแสส่วนที่กระจายลงดินนี้เป็นส่วนที่จะแพร่กระจายไปยังระบบท่อส่งปีโคเรียมที่ตั้งอยู่ใต้ดิน



รูปที่ 1 การกระจายของกระแสฟ้าผ่า

**2.1 ฟังก์ชันรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า**

กระแสฟ้าผ่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโคเรียมใต้ดิน ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (time domain) สามารถใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ของ Heidler ช่วยในการวิเคราะห์รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าได้ [6] ดังสมการที่ (1)-(4) ตามมาตรฐาน IEC-61312-1

$$i_{(t)} = I_0 \cdot x_{(t)} \cdot y_{(t)} \tag{1}$$

โดยที่  $x_{(t)}$  คือฟังก์ชันกำลัง,  $y_{(t)}$  คือฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล

$$x_{(t)} = \frac{K_c^n}{(1 + K_c^n)} ; K_c = t / \tau_1 \tag{2}$$

$$y_{(t)} = \exp(-t / \tau_2) \tag{3}$$

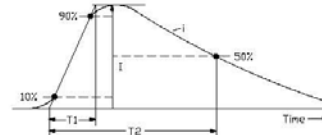
$$i_{(t)} = \frac{I_0}{h} \frac{(t / \tau_1)^n}{1 + (t / \tau_2)^n} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \tag{4}$$

โดยที่  $i_{(t)}$  คือกระแสฟ้าผ่า,  $I_0$  คือกระแสค่ายอด,  $h$  คือสัมประสิทธิ์การแก้ไขกระแสค่ายอด,  $t$  คือเวลา,  $\tau_1$  คือค่าคงที่ทางเวลาหน้าคลื่น,  $\tau_2$  คือค่าคงที่ทางเวลาหางคลื่น,  $n$  คือค่าตัวประกอบความชันของกระแสฟ้าผ่า

**2.2 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า**

จากมาตรฐาน IEC 61312-1 ตามรูปที่ 2 แสดงลักษณะของรูปคลื่นกระแสฟ้าผ่าโดยมี T1 เป็นเวลาหน้าคลื่นและ T2 เป็นเวลาหางคลื่น ซึ่งค่าของ T2 จะพิจารณาที่จุดตัด 50 เปอร์เซ็นต์ของกระแสค่ายอด

อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสฟ้าผ่าต่อเวลาเรียกว่าความชัน ( $di/dt$ ) มีหน่วยเป็น kA/μs



รูปที่ 2 รูปคลื่นกระแสฟ้าผ่า 10/350 ไมโครวินาที

**2.3 อิมพีแดนซ์ของระบบท่อ**

เนื่องจากงานวิเคราะห์ฉบับนี้ มีได้กล่าวถึงความถี่ของฟ้าผ่า ดังนั้นการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของระบบท่อต่อความยาวหนึ่งหน่วยสามารถคำนวณได้โดยใช้คุณสมบัติของลาปลาซทรานส์ฟอร์มโดยค่าอิมพีแดนซ์ Resistance – R, Inductance – sL, Capacitance – 1/sC

**2.4 แรงดันช่วงก้าว**

ตามรูปที่ 3 เมื่อกระแสฟ้าผ่าสิ้นสุดที่พื้นดิน ณ จุดสิ้นสุดจะเป็นจุดที่มีความเข้มของสนามไฟฟ้าสูงสุด ส่งผลให้มีกระแสและแรงดันฟ้าผ่าแพร่กระจายไหลตามผิวดินเป็นบริเวณโดยรอบ มีระยะห่างของวงรอบประมาณเท่ากับช่วงก้าวของคน ค่าความต่างศักย์ระหว่างช่วงก้าวนี้เรียกว่าแรงดันช่วงก้าว (Step Voltage) หากระบบท่อส่งปีโคเรียมและสายไฟวงจรป้องกันต่อคู่กร่อน อยู่ในแนวการแพร่กระจายของกระแสฟ้าผ่าและแรงดันช่วงก้าว โดยผ่านค่าความต้านทานดิน เชื่อมต่อยังจนวนท่อ และท่อส่วนที่เป็นโลหะ ระบบท่อส่งปีโคเรียมใต้ดินนั้นย่อมได้รับผลของกระแสฟ้าผ่าและแรงดันช่วงก้าวด้วยเช่นกัน ซึ่งสามารถประมาณค่าของแรงดันและค่าของกระแสในแต่ละช่วงก้าวได้จากสมการที่ (5)-(6)

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{s}{d(d+s)} \right) \tag{5}$$

$$I_s = \Delta V / R \tag{6}$$

โดยที่  $\Delta V$  คือแรงดันช่วงก้าว,  $\rho$  คือความต้านทานจำเพาะของดิน,  $I$  คือกระแสฟ้าผ่า,  $s$  คือระยะช่วงก้าว,  $d$  คือระยะห่างจากฟ้าผ่า,  $R$  คือค่าความต้านทานดินต่อเมตร,  $I_s$  คือกระแสช่วงก้าว ระยะห่างจากจุดฟ้าผ่าถึงแนวท่อ ผ่านวงรอบช่วงก้าว 5 เมตร ค่าแรงดันและกระแสนั้นย่อมลดลง ค่ากระแสฟ้าผ่าส่วนที่สำคัญคือตัวที่สามารถประมาณค่าได้จากสมการที่ (6) ซึ่งค่ากระแสฟ้าผ่าที่ได้จะเป็นพารามิเตอร์สำหรับแหล่งจ่ายกระแสฟ้าผ่าให้กับโปรแกรม ATP-EMTP



รูปที่ 3 แนวท่อส่งปีโคเรียมใต้ดินในแนวรัศมีแรงดันช่วงก้าว



**2.5 แรงดันเหนี่ยวนำจากค่าความเหนี่ยวนำของท่อ**

เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลลงสู่ดินเกิดความต่อเนื่องทางไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าไหลผ่านดิน จนวนท่อ ท่อโลหะและสายไฟฟ้าส่งผลให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นที่ท่อจากค่าความเหนี่ยวนำของท่อสังกะสีที่ (7)

$$V_{Pipe} = L_{Pipe} \cdot \frac{di}{dt} \tag{7}$$

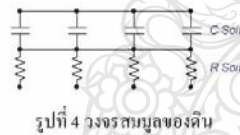
โดยที่  $V_{Pipe}$  คือแรงดันเหนี่ยวนำที่ท่อส่งปิโตรเลียม,  $L_{Pipe}$  คือค่าความเหนี่ยวนำของท่อต่อความยาว 1 เมตร,  $di/dt$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าปรากฏที่ท่อต่อเวลา โดยหาค่าได้จากสมการที่ (8) ซึ่งเป็นผลจากการดิฟเฟอเรนเชียลเทียบเวลาของสมการ (4)

$$\frac{di}{dt} = \frac{I_0}{h} \cdot \left\{ \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1+(t/\tau_1)^{10}} \right\} \cdot \exp(-t/\tau_2) \cdot (-1/\tau_2) + \exp(-t/\tau_2) \cdot \left\{ \frac{10 \cdot (t^9/\tau_1^{10})}{1+(t/\tau_1)^{10}} - \frac{10 \cdot (t^{19}/\tau_1^{20})}{[1+(t/\tau_1)^{10}]^2} \right\} \tag{8}$$

**3. คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน, ฉนวนท่อ, และท่อส่งปิโตรเลียม**

**3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน**

หลายงานวิจัยได้กล่าวถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของดิน เนื่องจากมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงและ โดยอ้อมกับระบบท่อ มีความต่อเนื่องทางไฟฟ้า เมื่อพิจารณาดินทางคุณสมบัติทางไฟฟ้าแล้วจะประกอบด้วยค่าความต้านทาน (R) 1000 โอห์มเมตรและค่าเก็บประจุ (C) 221.35 pF/m [4] ดังวงจรสมมูล ตามรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรสมมูลของดิน

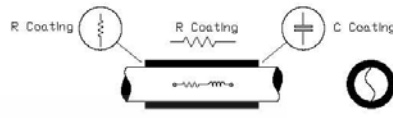
**3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฉนวนท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน**

การเคลือบผิวที่ด้านนอกแบบ Fusion Bonded Epoxy (FBE) เพื่อป้องกันท่อสัมผัสกับดินโดยตรง ซึ่งจะสามารถป้องกันท่อคูกร่อนได้ มีคุณสมบัติในการต้านทานการกัดกร่อนของกรด-ด่าง และตัวทำละลายอื่นๆ ได้ดี และยังมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ค่าความต้านทานสูงมาก เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะประกอบด้วยค่าความต้านทานและค่าเก็บประจุ [7] โดยที่ค่าความต้านทาน (R)  $3.3 \times 10^{17} \Omega/m$  ตามมาตรฐาน ASTM-D257 และค่าเก็บประจุเฉลี่ย (C)  $10.42 \text{ pF/cm}^2$  จากการวัดภาคสนาม

**3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดิน**

ท่อส่งปิโตรเลียมเป็นวัสดุที่ผลิตจาก โลหะเมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะประกอบด้วยค่าความต้านทานต่อหน่วยความยาว

(R) และค่าความเหนี่ยวนำต่อหน่วยความยาว (L) เช่นเดียวกัน โดยค่าความต้านทานของท่อ  $56.941 \mu\Omega/m$  [8] ค่าความเหนี่ยวนำเฉลี่ย  $0.495 \mu H/m$  ซึ่งค่าดังกล่าวได้มาจากการใช้เครื่องมือวัดค่าภาคสนามด้วยเส้นผ่าศูนย์กลางท่อขนาด 14 นิ้ว



รูปที่ 5 องค์ประกอบทางไฟฟ้าของท่อส่งปิโตรเลียม

**3.4 กับดักเสียงรบกวน**

กับดักเสียงรบกวนแบบเบรคออกไอซ์ด์ ปกติแล้วจะมีความต้านทานสูงมากและแปรผกผันกับแรงดันไฟฟ้า มีความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสให้เป็นเชิงเส้นดังตารางที่ 1 และสามารถประมาณค่าได้ตามสมการที่ (9)

ตารางที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและกระแสของกับดักเสียงรบกวน

V	275	300	450	520	600	680	780	950	1.5k
I	$10^5$	$10^4$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	$10^0$	$10^1$	$10^2$	$10^3$

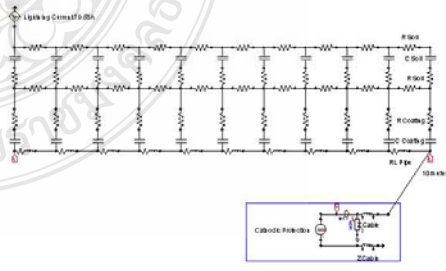
$$I = kV^\alpha \tag{9}$$

โดยที่  $I$  คือกระแสที่ไหลผ่านกับดักเสียงรบกวน,  $k$  คือค่าคงที่ขึ้นอยู่กับชนิดของกับดักเสียงรบกวน,  $V$  คือแรงดันที่ตกคร่อม,  $\alpha$  คือตัวเลขชี้กำลัง โดยสามารถหาค่าได้จากสมการที่ (10)

$$\alpha = (\log I_2 - \log I_1) / (\log V_2 - \log V_1) \tag{10}$$

**4. แบบจำลองระบบท่อส่งปิโตรเลียมใต้ดินและผลการทดลอง**

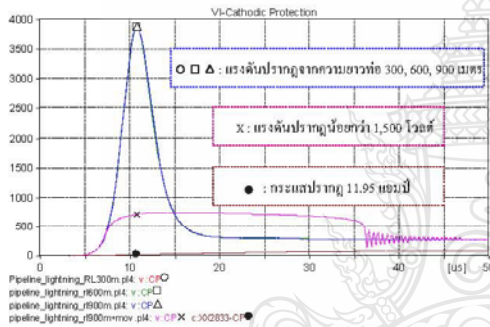
พารามิเตอร์ที่คำนวณได้จาก [9] โดยใช้  $\tau_1$  เท่ากับ 19  $\mu s$ ,  $\tau_2$  เท่ากับ 485  $\mu s$ ,  $h$  เท่ากับ 10 ตามมาตรฐาน IEC 61312-1 การจำลองแบ่งออกเป็นสามกรณี 1) พิจารณาเฉพาะค่าอิมพีแดนซ์ของท่อ 2) พิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับอิมพีแดนซ์ของสายไฟฟ้าวางเรียงกันที่คูกร่อน 3) การป้องกันกรณีที่สอง ซึ่งทั้งสามกรณีจำลองที่ความยาวท่อ 300, 600 และ 900 เมตร โดยบันทึกค่าสภาวะชั่วคราวทุกๆ 100 เมตร



รูปที่ 6 แบบจำลองการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่ผ่านระบบท่อปิโตรเลียม

ตารางที่ 2 ค่าแรงดันและกระแสชั่วคราวปรากฏที่ท่อ

ระยะทาง ท่อที่บันทึก	แรงดันปรากฏที่ท่อ (กิโลโวลต์)			กระแสปรากฏที่ท่อ (แอมแปร์)		
	300m	600m	900m	300m	600m	900m
เริ่มต้น (0)	0.030	0.015	0.010	0.264	0.132	0.088
100	0.753	0.830	0.856	0.264	0.132	0.088
200	1.212	1.518	1.620	0.264	0.132	0.088
300	1.366	2.052	2.282	0.264	0.132	0.088
400	-	2.435	2.842	-	0.132	0.088
500	-	2.664	3.301	-	0.132	0.088
600	-	2.741	3.657	-	0.132	0.088
700	-	-	3.912	-	-	0.088
800	-	-	4.065	-	-	0.088
900	-	-	4.117	-	-	0.088



รูปที่ 7 แรงดันและกระแสชั่วคราวปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อคู่ร่อน

5. สรุป

การวิเคราะห์ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดินและแนวทางการป้องกันที่ได้นำเสนอรวมถึงผลการจำลองในบทความนี้จะสังเกตเห็นว่าค่าแรงดันชั่วคราวปรากฏที่ระยะต่างๆ ของท่อนั้นสูงขึ้นเมื่อความยาวท่อมากขึ้น เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำของท่อที่แปรผันตรงกับความยาวท่อตามสมการที่ (7) และพบว่าค่ากระแสชั่วคราวปรากฏที่ท่อนั้นมีแนวโน้มที่ค่าจะลดลงเมื่อความยาวท่อเพิ่มขึ้น ตามตารางที่ 2 และเมื่อพิจารณาค่าอิมพีแดนซ์ของท่อร่วมกับค่าอิมพีแดนซ์สายไฟฟ้าแรงสูงป้องกันท่อคู่ร่อน พบว่าแรงดันและกระแสชั่วคราวปรากฏที่อุปกรณ์ป้องกันท่อคู่ร่อนนั้นมีค่าสูงเกินค่าความปลอดภัยของอุปกรณ์เพียงพอที่จะสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์ป้องกันท่อคู่ร่อนได้ และจากผลการจำลองแนวทางการป้องกันสามารถควบคุมแรงดันครู่ได้โดยมีค่าต่ำกว่า 1,500 โวลต์ตามมาตรฐาน BS 60950 ดังรูปที่ 7 ซึ่งสามารถนำแนวทางนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อควบคุมแรงดันปรากฏที่ท่อได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ท่อส่งปีโตรเลียมไทย จำกัด ที่ได้สนับสนุนข้อมูล เพื่อใช้ศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท ท่อส่งปีโตรเลียมไทย จำกัด ฝ่ายซ่อมบำรุง 2/8 ม.11 ต.ลาดสวาย อ.ลำลูกกา จ. ปทุมธานี 12150, Order No. 11028267
- [2] Hitoshi Kijima, Kenji Takato, Kazuo Murakwa, "Lightning Protection for Gas-Pipelines installed under the Ground", International Journal of systems Applications, Engineering & Development, Issue 1, Volume 5, 2011
- [3] Konstantinos Kopsidas, Ian Cotton, "Induced Voltages on Long Aerial and Buried Pipelines Due to Transmission Line Transients", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 3, July 2008
- [4] Nor Emyliah binti husin, "Simulation Study on Lightning Effects to 132 kV Underground Cable", Universitai Knotogmi Ataysa, 2011
- [5] นาดยา คล้ายเรือง, วิชชุภา ไชยสิทธิ์ และพิศาด เฒ่าสูงเนิน, "การปรับปรุงสมรรถนะระบบป้องกันฟ้าผ่าในระบบจำหน่าย 22 kV", สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
- [6] นาดยา คล้ายเรือง, "ผลของสนามไฟฟ้าจากการเกิดฟ้าผ่าลงดินต่อสายเคเบิลใต้ดิน", ปรวิญญูวิศวกรรมศาสตรคุณวุฒิบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า), พ.ศ. 2548
- [7] Jin Shijun, Li Jim, Chen Shili, Xiao Kun, Song Shizhe, "The Study of Detection Technology and Instrument of Buried Pipeline-Coating Defaults", Proceedings of the 4\* World Congress on Intelligent Control and Automation June 10-14, 2002
- [8] A.W. Peabody, "Control of Pipeline Corrosion", Second Edition 2001 by NACE International, pp. 30
- [9] บุญเลิศ ไทประดิษฐ์, ถุณณวัฒน์ ภูมิภักดีพิชญ์ และธนพงศ์ สุวรรณศรี "ศึกษาปรากฏการณ์ฟ้าผ่าจากฟ้าผ่าสำหรับระบบท่อส่งปีโตรเลียมใต้ดิน", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 4, EENET 2012., pp.184-187



บุญเลิศ ไทประดิษฐ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ปัจจุบันเป็นวิศวกรไฟฟ้า บริษัท ท่อส่งปีโตรเลียมไทย จำกัด มีความสนใจเรื่องฟ้าผ่าและพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นน้ำทะเล

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายบุญเลิศ โตประดิษฐ์
วัน เดือน ปีเกิด	30 ตุลาคม 2514
ที่อยู่	18/1 ตำบลบ่อแร่ อำเภอโศกทอง จังหวัดอ่างทอง 14120
การศึกษา	
พ.ศ. 2548	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ. 2535-2537	ตำแหน่งไฟร์แมนไฟฟ้า บริษัท คิตามูระ จำกัด โครงการก่อสร้างคลังน้ำมันเอสโซ่ช่องนนทรีและลำลูกกา
พ.ศ. 2537-2537	ตำแหน่งไฟร์แมนไฟฟ้า บริษัท อิตาเลียนไทย ดีเวลอปเม้นต์ จำกัด (มหาชน) โครงการก่อสร้างคลังน้ำมันบริษัท ท่อส่งปิโตรเลียมไทย จำกัด ลำลูกกา
พ.ศ. 2537-2549	ตำแหน่งช่างเทคนิค แผนกไฟฟ้า
พ.ศ. 2549-ปัจจุบัน	วิศวกรไฟฟ้า ระดับ 7 แผนกวิศวกรรมไฟฟ้าและเครื่องมือวัด บริษัท ท่อส่งปิโตรเลียมไทย จำกัด