

การวิเคราะห์ และออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบ
รถไฟฟ้า



นายก่อเกียรติ อัดทรัพย์

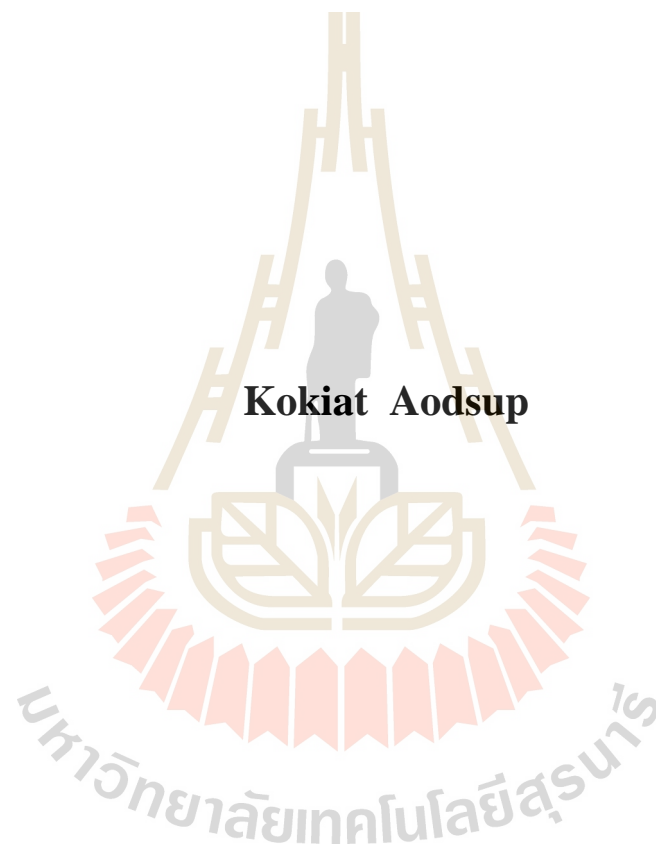
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2559

**ANALYSIS AND DESIGN OF LIGHTNING
PROTECTION SYSTEMS FOR ELECTRIC
RAILWAY SYSTEMS**

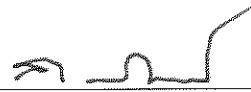


**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2016**

การวิเคราะห์ และออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบรถไฟฟ้า

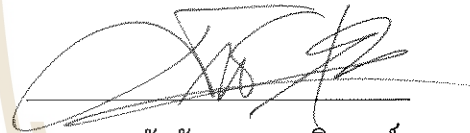
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุุณศึกษิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิภิตติพิชญ์)

ประธานกรรมการ



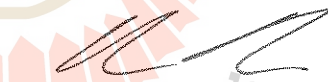
(รศ. ดร.ธนัชชัย กุลสุวรรณิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



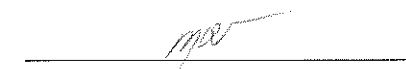
(ผศ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ



(ผศ. ดร.เพด็จ เฟ่าละอ)

กรรมการ



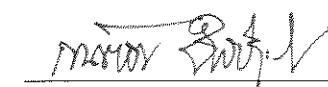
(อ. ดร.กตฤตา สมสัย)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชานิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

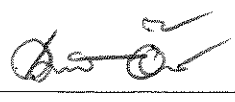

ก่อนเกียรติ อ้อดทรัพย์ : การวิเคราะห์ และออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบ
รถไฟฟ้า (ANALYSIS AND DESIGN OF LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS FOR
ELECTRIC RAILWAY SYSTEMS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัย
กุลวรรณิขพงษ์, 208 หน้า

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับรถไฟฟ้า โดยวิธีการทรงกลมกลิ้ง
จะใช้ในการวิเคราะห์หาตำแหน่งติดตั้งสายดินซึ่งอากาศของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ และ
ระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศจีน วิเคราะห์คลื่นจรด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม เนื่องจากการ
เคลื่อนที่ถึงจุดเชื่อมต่อสายดิน วิเคราะห์การเกิดวาบไฟย้อนกลับจากแรงดันหักเหของคลื่นจร
และแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าโดยตรงที่เสาที่มีค่าความต้านทานดินแตกต่างกัน การวิเคราะห์คลื่นจรในสาย
จ่ายแคทีนารีด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม เพื่อศึกษาคุณลักษณะของคลื่นจรเมื่อเคลื่อนที่ถึง
ตำแหน่งติดตั้งกับดักเสิร์จ จากแรงดันเสิร์จที่เกิดจากการวาบไฟย้อนกลับ และจากการเกิดฟ้าผ่าโดย
ตรงที่สายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี ส่วนสุดท้ายของงานวิจัยได้วิเคราะห์ผลของแรงดันเสิร์จต่อ
สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในหม้อแปลงออโตของระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิ
เมนต์ ผลของออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินซึ่งอากาศจากการประเมินด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งที่การ
ป้องกันระดับ 1 ไม่มีจุดใดของโครงสร้างในระบบสายจ่ายแคทีนารีสัมผัสกับทรงกลมกลิ้ง การ
วิเคราะห์คลื่นจรด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมของสายดินซึ่งอากาศที่จุดเชื่อมต่อสายดิน ผลที่
ได้จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานดินพบว่า ถ้าความต้านทานดินมีค่าสูง แรงดันหักเหของ
คลื่นจรจะมีค่าสูง และแรงดันสะท้อนกลับของคลื่นจรจะมีค่าน้อย สำหรับการวิเคราะห์การวาบไฟ
ย้อนกลับไปยังสายจ่ายแคทีนารี จากแรงดันหักเหของคลื่นจร และการเกิดฟ้าผ่าที่เสา สามารถแสดง
ได้ว่าที่ระดับกระแสฟ้าผ่า และค่าความต้านทานดินเดียวกัน การเกิดวาบไฟย้อนกลับมาจากการเกิด
ฟ้าผ่าโดยตรงที่เสา และมีแรงดันวาบไฟย้อนกลับสูงกว่าแรงดันหักเหของคลื่นจรที่สายดินซึ่งอากาศ
สำหรับผลกระทบของแรงดันเสิร์จจากค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงออโต เมื่อ
เปรียบเทียบกับค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ที่ระดับ
แรงดันใช้งาน และหม้อแปลงออโตที่ติดตั้งกับดักเสิร์จมีระดับต่ำกว่าค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้า
ของฉนวน ไม่มีการเกิดเบรกดาว์น หรือดิสชาร์จภายในหม้อแปลงออโต สำหรับหม้อแปลงที่ไม่มี
การติดตั้งกับดักเสิร์จเมื่อเกิดฟ้าผ่าที่เสามีกระแสผ่ายอด -100 kA เนื่องมาจากค่าความต้านทานดิน
ตั้งแต่ 7Ω ขึ้นไปและเกิดวาบไฟย้อนกลับจะเกิดการดิสชาร์จภายในหม้อแปลงออโต เช่นเดียวกับ
การเกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี ที่ระดับกระแสฟ้าผ่าตั้งแต่ -70 kA จะทำให้เกิดการ
ดิสชาร์จภายในหม้อแปลงออโตด้วยเช่นกัน จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าการติดตั้งสายดินซึ่ง

อากาศจึงช่วยลดการเกิดวบไฟย้อนกลับได้ และที่ค่าความต้านทานดินน้อยทำให้การเกิดวบไฟย้อนกลับลดน้อยลง และการติดตั้งกับดักเสิร์จจึงจำเป็นอย่างมากเพื่อลดความเสียหายจากสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นกับหม้อแปลงออโต และระบบสายจ่ายแคทีนารี จากแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าที่เกิดขึ้น



สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 

KOKIAT AODSUP : ANALYSIS AND DESIGN OF LIGHTNING
PROTECTION SYSTEMS FOR ELECTRIC RAILWAY SYSTEMS.
THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THANATCHAI
KULWORAWANICHPONG, Ph.D., 208 PP.

LIGHTNING PROTECTION/HIGH SPEED TRAIN /SURGE PROPAGATION
FINITE DIFFERENTIAL TIME DOMAIN/FINITE ELEMENT/AUTO
TRANSFORMER

This research presented the design of the lightning protection systems for high-speed railway systems. The rolling sphere method was employed to determine the locations of overhead ground wire installation for the Airport Rail Link (ARL) and Chinese high-speed railway systems. The analyses of a travelling wave by the finite difference time domain method. The analyses of the back flashover from the refracted voltage and surge from lightning striking at the power poles with different resistances of ground were presented. Also, the analysis of the travelling wave in catenary wires by using the finite difference time domain was studied to characterize the surge voltages from back flashover and direct lightning strike at the catenary wires when those travelling voltage waves approached the location of surge arrester installation. The last part of this research took on the analysis of the effects of surge voltage on the electric field in an autotransformer of high-speed railway systems by the finite element method. The result of the design of the overhead ground wire location using the rolling sphere method with protection level 1 showed that none of the catenary structure touched the sphere. For the analysis result of travelling waves

in the overhead ground wire at the grounded point using the finite difference time domain method, the higher ground resistance caused the higher refracted voltage and the lower reflected voltage of the travelling wave. Given the analysis of back flashover occurrence due to the refracted of the travelling wave and direct lightning strike at the power pole when considering the same current and ground resistance for both cases, the back flashover resulted only from the direct lightning strike, i.e. the back flashover voltage was greater than the refracted voltage of the travelling wave. For the effects of the electric field in an autotransformer due to the surge voltage, the electric field strength of the insulated oil in the autotransformer with surge arrester installation could cope with the normal operating voltage, therefore, there was no breakdown or any discharge in the autotransformer. In the case of the direct lightning strike at the power pole with the peak current of -100 kA and considering the autotransformer without surge arrester installation and the ground resistance of over 7 ohm, the back flashover occurred discharge in the autotransformer. Likewise, the direct lightning strike at the catenary wire at the current peak of more than -70 kA also caused discharge in the autotransformer. The results can be summarized that the installation of the overhead ground wire together with the low ground resistance helped prevent the back flashover. Accordingly, the installation of surge arresters was very essential to reduce the adverse effects of electric field due to lightning surge on the autotransformer and catenary system.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature

Advisor's Signature



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลรวรานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการทำงานและแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับความกรุณาใน คำปรึกษา แนะนำ และความรู้ทางด้านวิชาการ

ขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมา โดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริม ทางด้านการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก่อเกียรติ อ้อคทรัพย์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขีดกลางเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	5
2 ปรัชญ์นั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 บทนำ	6
2.2 ปรัชญ์นั้วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.3 สรุป	12
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	13
3.1 บทนำ	13
3.2 รถไฟฟ้าความเร็วสูง	13
3.2.1 การพัฒนาระบบรางในประเทศไทย	14
3.2.2 ระบบรางไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3	โครงสร้างระบบสายจ่ายตัวนำพาอากาศ สำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง.....	23
3.2.4	ระบบจ่ายด้วยการป้อนผ่านหม้อแปลงอัตโนมัติ.....	27
3.3	ฟ้าผ่าและการออกแบบสายดินจึงอากาศ.....	29
3.3.1	กลไกการเกิดฟ้าผ่า.....	31
3.3.2	ประเภทของลำแสงฟ้าผ่า.....	33
3.3.3	อัตราการเกิดฟ้าผ่าลงสู่พื้นโลก.....	34
3.3.4	สายดินจึงอากาศ.....	35
3.3.5	แรงดันวาบไฟย้อนกลับ.....	41
3.4	การวิเคราะห์คลื่นจร.....	42
3.4.1	การวิเคราะห์คลื่นจรที่จุดต่อมีอิมพีแดนซ์หลายค่า.....	46
3.4.2	การวิเคราะห์คลื่นจรในสายดินจึงอากาศกรณีคลื่นจรเคลื่อนที่ถึงเสาส่ง.....	46
3.4.3	การวิเคราะห์คลื่นจรที่จุดเชื่อมต่อกับดักเสิร์จ.....	47
3.4.4	การวิเคราะห์คลื่นจรจากแบบจำลองสายส่ง.....	52
3.5	การวิเคราะห์สนามไฟฟ้า.....	56
3.6	ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	58
3.6.1	ชนิดของสมการ.....	59
3.6.2	เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น.....	61
3.6.3	ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม.....	61
3.6.4	ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....	63
3.7	สรุป.....	66
4	การออกแบบสายดินจึงอากาศ.....	67
4.1	บทนำ.....	67
4.2	โครงสร้างของระบบสายจ่ายพาอากาศรถไฟฟ้าความเร็วสูง.....	67
4.3	การประเมินตำแหน่งการฟ้าผ่าโดยวิธีทรงกลมกลิ้ง.....	70
4.4	การออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินจึงอากาศ.....	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 สรุป.....	79
5 การวิเคราะห์คลื่นจร และการเกิดวาทไฟย้อนกลับ.....	80
5.1 บทนำ.....	80
5.2 การวิเคราะห์คลื่นจร และการเกิดวาทไฟย้อนกลับ.....	80
5.2.1 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับ.....	81
5.2.2 การวิเคราะห์คลื่นจรที่จุดเชื่อมต่อรากสายดิน.....	82
5.2.3 ผลของคลื่นจรจากค่าความต้านทานรากสายดินของระบบบรตไฟฟ้า ARL.....	85
5.2.4 ผลของคลื่นจรจากค่าความต้านทานรากสายดินของระบบบรตไฟฟ้าความเร็วสูง ของประเทศจีน.....	91
5.2.5 ผลของฟ้าผ่าโดยตรงที่เสา.....	98
5.2.6 ผลของคลื่นจรเมื่อเคลื่อนที่ถึงจุดติดตั้งกับดักเสิร์จ.....	107
5.3 สรุป.....	111
6 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของหม้อแปลงออโต.....	112
6.1 บทนำ.....	112
6.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้า.....	112
6.3 การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในหม้อแปลงออโต.....	113
6.3.1 ออกแบบอิลลิเมนต์ของโครงสร้างภายในของหม้อแปลงออโต.....	113
6.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์.....	114
6.3.3 การสร้างสมการอิลลิเมนต์.....	115
6.3.4 การประกอบสมการอิลลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....	120
6.3.5 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และหาค่าผลเฉลย.....	121
6.4 ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโต.....	122
6.4.1 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าที่ระดับแรงดันใช้งาน.....	122
6.4.2 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าเมื่อเกิดแรงดันเสิร์จ.....	124
6.4.3 ผลการจำลองสนามไฟฟ้าที่ติดตั้งกับดักเสิร์จ.....	140

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.5 สรุป.....	143
7 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	144
7.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	144
7.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต.....	146
รายการอ้างอิง.....	147
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. การออกแบบหม้อแปลงอัตโนมัติ.....	152
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	160
ประวัติผู้เขียน.....	208



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
3.1 ระดับแรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟฟ้าของระบบแรงไฟฟ้ากระแสสลับ 25 kV.....	21
3.2 การจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าตามระดับการป้องกัน.....	39
3.3 การแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์โดยการใช้อนุกรมเทย์เลอร์.....	62
4.1 อัตราการเกิดฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน และสายส่ง.....	69
5.1 ค่าพารามิเตอร์ของสายดินเชิงอากาศ และสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี.....	81
5.2 การวิเคราะห์ห้วงฟาย้อนกลับของระบบแรงไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์.....	90
5.3 การวิเคราะห์ห้วงฟาย้อนกลับของระบบแรงไฟฟ้าความเร็วสูงประเทศจีน.....	98
5.4 แรงดันเสิร์จค่ายอดที่ค่าความต้านทานรากสายดิน 0 – 10 (มีหน่วยเป็น kV).....	99
5.5 การวิเคราะห์ห้วงฟาย้อนกลับของระบบแรงไฟฟ้า กระแสค่ายอดฟ้าผ่า -34 kA.....	102
5.6 การวิเคราะห์ห้วงฟาย้อนกลับของระบบแรงไฟฟ้า กระแสค่ายอดฟ้าผ่า -50 kA.....	104
5.7 การวิเคราะห์ห้วงฟาย้อนกลับของระบบแรงไฟฟ้า กระแสค่ายอดฟ้าผ่า -100 kA.....	106
6.1 ค่าสนามไฟฟ้าที่ขดลวดหม้อแปลงที่ระดับแรงดันใช้งาน.....	122
6.2 ค่าสนามไฟฟ้าที่ขดลวดหม้อแปลงที่เกิดจากฟาย้อนกลับ.....	125
6.3 ค่าสนามไฟฟ้าที่ขดลวดหม้อแปลงที่เกิดจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายแคทีนารี.....	132
6.4 ค่าสนามไฟฟ้าที่ขดลวดหม้อแปลงที่เกิดจากการติดตั้งกับดักเสิร์จ.....	141

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 เส้นทางเดินรถไฟฟ้าความเร็วสูงในประเทศจีน	14
3.2 ระบบโครงข่ายทางรางของการรถไฟแห่งประเทศไทย	16
3.3 รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงก์สนามบินสุวรรณภูมิ	17
3.4 เส้นทางรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพฯ และปริมณฑล	17
3.5 เส้นทางการพัฒนาระบบรางของประเทศไทย	20
3.6 การต่อหม้อแปลงกับระบบไฟฟ้ากำลัง 115 kV	22
3.7 การจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟทางคู่	23
3.8 แผนโทกราฟีสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง	24
3.9 โครงสร้างของระบบการจ่ายรางรถไฟฟ้ากระแสสลับ	25
3.10 โครงสร้างของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงก์	26
3.11 โครงสร้างของระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศจีน	26
3.12 รูปแบบการจ่ายไฟมาตรฐานของระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ	27
3.13 หม้อแปลงออโตสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง ขนาด 5 MVA	28
3.14 โครงสร้างภายในหม้อแปลงออโตสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง ขนาด 10 MVA	29
3.15 การแผ่ตัวของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ	31
3.16 การเกิดฟ้าระหว่างเมฆ และพื้นผิวโลก	32
3.17 ประเภทของลำแสงฟ้าผ่า	33
3.18 แผนที่แสดงวันได้ยินเสียงฟ้าร้องต่อปี	35
3.19 แบบจำลองทางเรขาคณิต, ความหมายของมุม และระยะ	36
3.20 สายป้องกัน และสายตัวนำหนึ่งด้าน	37
3.21 การคำนวณหามุมการป้องกันที่สมบูรณ์	38
3.22 ความหมายของมุมป้องกัน	38
3.23 พื้นที่การป้องกัน วิธีมุมป้องกัน และทรงกลมกลิ้ง	40
3.24 การออกแบบตัวนำล่อฟ้าของระบบป้องกันฟ้าผ่าตามวิธีทรงกลมกลิ้ง	40
3.25 บริเวณป้องกันโดยตัวนำล่อฟ้าแนวราบ 2 ชุดขนานกัน	41

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.26 แรงดันวาทไฟย้อนกลับ	42
3.27 วงจรสำหรับวิเคราะห์สมการคลื่นจร	42
3.28 ไดอะแกรมตารางไขว้ของบูลิ	45
3.29 วงจรเทวินินกรณีคลื่นจรเคลื่อนที่ถึงจุดต่อระหว่างสายตัวนำหลายเส้น	46
3.30 วงจรการวิเคราะห์คลื่นจรที่จุดเชื่อมต่อตัวนำลงดิน	47
3.31 กราฟคุณลักษณะ V – I ของอุปกรณ์ป้องกัน SiC และ ZnO	48
3.32 คุณลักษณะ V – I ของอุปกรณ์ป้องกัน ZnO	50
3.33 วงจรการวิเคราะห์คลื่นจรที่จุดเชื่อมต่อกับดักเสิร์จ	50
3.34 โครงสร้างกับดักฟ้าผ่า	51
3.35 แบบจำลองสายส่งในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	52
3.36 แบบจำลองสายดินเชิงอากาศที่จุดเชื่อมต่อกับสายดิน	54
3.37 โพลีชาร์ตสำหรับหาค่าแรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จ	55
3.38 คุณลักษณะของกับดักเสิร์จ	56
3.39 อิเล็กโตรดระนาบ	57
3.40 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นตารางสี่เหลี่ยม	61
3.41 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์	63
3.42 อิลลิเมนต์สามเหลี่ยมประกอบด้วยสามจุดต่อ	64
4.1 โครงสร้างของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ที่ระดับพื้นดิน	67
4.2 โครงสร้างของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ที่รางระดับความสูง 20 m และ 25 m จากพื้นดิน	68
4.3 โครงสร้างของระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศจีนที่ระดับพื้นดิน	68
4.4 โครงสร้างของระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศจีนที่รางระดับความสูง 20 m และ 25 m จากพื้นดิน	69
4.5 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ที่ระดับพื้นดิน	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบรดไฟฟ้าแอร์พอร์ดลิงค์ที่ วางระดับความสูง 20 m	71
4.7 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบรดไฟฟ้าแอร์พอร์ดลิงค์ที่วาง ระดับความสูง 25 m	72
4.8 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบรดไฟฟ้าความเร็ว สูงของประเทศไทยที่ระดับพื้นดิน	73
4.9 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบรดไฟฟ้าความเร็วสูงของ ประเทศไทยที่วางระดับความสูง 20 m	73
4.10 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบรดไฟฟ้าความเร็วสูงของ ประเทศไทยที่วางระดับความสูง 25 m	74
4.11 ตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบรดไฟฟ้าที่วางระดับพื้นดิน	75
4.12 ตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบรดไฟฟ้าที่วางระดับความสูง 20 m และ 25 m จากพื้นดิน	75
4.13 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบรดไฟฟ้าแอร์พอร์ด ลิงค์ที่ระดับพื้นดิน	76
4.14 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบรดไฟฟ้าแอร์พอร์ด ลิงค์ที่วางระดับความสูง 20 m จากพื้นดิน	76
4.15 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบรดไฟฟ้าแอร์พอร์ด ลิงค์ที่วางระดับความสูง 25 m จากพื้นดิน	77
4.16 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบรดไฟฟ้าความเร็วสูง ของประเทศไทยที่ระดับพื้นดิน	77
4.17 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบรดไฟฟ้าความเร็วสูง ของประเทศไทยที่วางระดับความสูง 20 m จากพื้นดิน	78
4.18 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบรดไฟฟ้าความเร็วสูง ของประเทศไทยที่วางระดับความสูง 25 m จากพื้นดิน	78
5.1 แรงดันวาบไฟย้อนกลับ (BFV) ที่ระยะลูกถ้วยจนวนตั้งแต่ 0.1 m ถึง 1 m	82

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.2 แบบจำลองตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ผลของความต้านดินต่อคลื่นจร	83
5.3 การกำหนดจุดต่อรูปร่างของปัญหา	83
5.4 คุณลักษณะของแรงดันสะท้อนกลับและแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -34 kA (ระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์)	85
5.5 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.1 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -34 kA (ระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์)	86
5.6 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.3 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -34 kA (ระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์)	86
5.7 คุณลักษณะของแรงดันสะท้อนกลับและแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -50 kA (ระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์)	87
5.8 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.1 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -50 kA (ระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์)	88
5.9 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.4 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -50 kA (ระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์)	88
5.10 คุณลักษณะของแรงดันสะท้อนกลับและแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -100 kA (ระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์)	89
5.11 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.1 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -100 kA (ระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์)	90
5.12 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.8 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -100 kA (ระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์)	90
5.13 คุณลักษณะของแรงดันสะท้อนกลับและแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -34 kA (ระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงประเทศจีน)	92
5.14 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.1 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -34 kA (ระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงประเทศจีน)	93
5.15 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.2 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -34 kA (ระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงประเทศจีน)	93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16 คุณลักษณะของแรงดันสะท้อนกลับและแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -50 kA (ระบบแรงดันไฟฟ้าความเร็วสูงประเทศจีน).....	94
5.17 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.1 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -50 kA (ระบบแรงดันไฟฟ้าความเร็วสูงประเทศจีน).....	94
5.18 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.2 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -50 kA (ระบบแรงดันไฟฟ้าความเร็วสูงประเทศจีน).....	95
5.19 คุณลักษณะของแรงดันสะท้อนกลับและแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -100 kA (ระบบแรงดันไฟฟ้าความเร็วสูงประเทศจีน).....	96
5.20 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.1 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -100 kA (ระบบแรงดันไฟฟ้าความเร็วสูงประเทศจีน).....	96
5.21 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.4 m จากแรงดันหักเหของคลื่นจรที่กระแสค่ายอด -100 kA (ระบบแรงดันไฟฟ้าความเร็วสูงประเทศจีน).....	97
5.22 แบบจำลองตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ผลของความต้านดินจากการเกิดฟ้าผ่าที่เสา.....	99
5.23 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.3 m ความต้านทานรากสายดิน 6 กระแสค่ายอด -34 kA.....	100
5.24 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.4 m ความต้านทานรากสายดิน 6 กระแสค่ายอด -34 kA.....	101
5.25 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.6 m ความต้านทานรากสายดิน 10 กระแสค่ายอด -34 kA.....	101
5.26 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.3 m ความต้านทานรากสายดิน 4 กระแสค่ายอด -50 kA.....	103
5.27 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.9 m ความต้านทานรากสายดิน 10 กระแสค่ายอด -50 kA.....	103
5.28 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยฉนวน 0.3 m ความต้านทานรากสายดิน 2 กระแสค่ายอด -100 kA.....	105

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.29 การวิเคราะห์การเกิดวาทไฟย้อนกลับที่ระยะลูกถ้วยจนวน 1 m ความต้านทานรากสายดิน 6 กระแสค่ายอด -100 kA.....	105
5.30 แบบจำลองตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ผลของกับดักเสิร์จต่อคลื่นจร.....	107
5.31 คุณลักษณะของแรงดันสะท้อนกลับและแรงดันหักเหของคลื่นจรจากการเกิดวาทไฟย้อนกลับ ที่จุดต่อกับดักเสิร์จ.....	108
5.32 คุณลักษณะของแรงดันสะท้อนกลับ และแรงดันหักเหของคลื่นจรที่จุดต่อกับดักเสิร์จจาก กระแสฟ้าผ่าค่ายอด -34 kA.....	109
5.33 คุณลักษณะของแรงดันสะท้อนกลับ และแรงดันหักเหของคลื่นจรที่จุดต่อกับดักเสิร์จจาก กระแสฟ้าผ่าค่ายอด -50 kA.....	110
5.34 คุณลักษณะของแรงดันสะท้อนกลับ และแรงดันหักเหของคลื่นจรที่จุดต่อกับดักเสิร์จจาก กระแสฟ้าผ่าค่ายอด -100 kA.....	111
6.1 การแบ่งอิลลิเมนต์ของหม้อแปลงออโตสำหรับระบบสายจ่ายเคทีนารี 25 kV แบบ 3 มิติ.....	114
6.2 โครงสร้างภายในของหม้อแปลงออโตสำหรับระบบสายจ่ายเคทีนารี 25 kV แบบ 3 มิติ.....	121
6.3 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่ระดับแรงดันใช้งาน แบบ 3 มิติ.....	123
6.4 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่ระดับแรงดันใช้งาน แบบ Contour.....	123
6.5 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้ากับค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ที่ ระดับแรงดันใช้งาน.....	124
6.6 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาทไฟย้อนกลับ จากค่า ความต้านทาน 5 แบบ 3 มิติ.....	125
6.7 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาทไฟย้อนกลับ จากค่า ความต้านทาน 5 แบบ Contour.....	126
6.8 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาทไฟย้อนกลับ จากค่า ความต้านทาน 6 แบบ 3 มิติ.....	126
6.9 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาทไฟย้อนกลับ จากค่า ความต้านทาน 6 แบบ Contour.....	127

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.10 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาบไฟย้อนกลับ จากค่าความต้านทาน 7 แบบ 3 มิติ.....	127
6.11 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาบไฟย้อนกลับ จากค่าความต้านทาน 7 แบบ Contour.....	128
6.12 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาบไฟย้อนกลับ จากค่าความต้านทาน 8 แบบ 3 มิติ.....	128
6.13 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาบไฟย้อนกลับ จากค่าความต้านทาน 8 แบบ Contour.....	129
6.14 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาบไฟย้อนกลับ จากค่าความต้านทาน 9 แบบ 3 มิติ.....	129
6.15 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาบไฟย้อนกลับ จากค่าความต้านทาน 9 แบบ Contour.....	130
6.16 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาบไฟย้อนกลับ จากค่าความต้านทาน 10 แบบ 3 มิติ.....	130
6.17 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการวาบไฟย้อนกลับ จากค่าความต้านทาน 10 แบบ Contour.....	131
6.18 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้ากับค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่แรงดันเสิร์จเกิดจากการวาบไฟย้อนกลับ.....	131
6.19 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -34 kA แบบ 3 มิติ.....	133
6.20 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -34 kA แบบ Contour.....	133
6.21 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -50 kA แบบ 3 มิติ.....	134
6.22 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -50 kA แบบ Contour.....	134

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.23 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -60 kA แบบ 3 มิติ.....	135
6.24 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -60 kA แบบ Contour.....	135
6.25 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -70 kA แบบ 3 มิติ.....	136
6.26 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -70 kA แบบ Contour.....	136
6.27 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -80 kA แบบ 3 มิติ.....	137
6.28 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -80 kA แบบ Contour.....	137
6.29 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -90 kA แบบ 3 มิติ.....	138
6.30 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -90 kA แบบ Contour.....	138
6.31 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -100 kA แบบ 3 มิติ.....	139
6.32 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี กระแสฟ้าผ่า -100 kA แบบ Contour.....	139
6.33 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้ากับค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลงที่แรงดันเสิร์จจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายแคทีนารี.....	140
6.34 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการติดตั้งกับดักเสิร์จแบบ 3 มิติ.....	141
6.35 การกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตที่แรงดันเสิร์จจากการติดตั้งกับดักเสิร์จแบบ Contour.....	142

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

6.36 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้ากับค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ที่ติดตั้งกับดักเสิร์จ.....	143
---	-----



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบรถไฟความเร็วสูงเป็นส่วนหนึ่งที่ถูกกำหนดอยู่ในยุทธศาสตร์และแผนการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานการคมนาคมขนส่งของไทย พ.ศ.2558-2565 ในการเชื่อมต่อระบบการค้ำระหว่างเมือง และระหว่างประเทศ รัฐบาลได้ทำบันทึกความเข้าใจด้วยความร่วมมือระหว่างรัฐบาลแห่งราชอาณาจักรไทย กับรัฐบาลแห่งสาธารณรัฐประชาชนจีน ภายใต้การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานทางรถไฟของประเทศไทย เส้นทางโครงการความร่วมมือประกอบด้วย เส้นทาง กรุงเทพฯ – แก่งคอย ระยะทาง 118 km, แก่งคอย – มาบตาพุด ระยะทาง 139 km, แก่งคอย – นครราชสีมา ระยะทาง 134 km และนครราชสีมา – หนองคาย ระยะทาง 354 km ในระยะแรกจะเริ่มดำเนินการเส้นทาง กรุงเทพฯ – แก่งคอย และ แก่งคอย – นครราชสีมา รวมระยะทาง 252 km จากความร่วมมือกับสาธารณรัฐประชาชนจีน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งในการศึกษาหาข้อมูลและทำงานวิจัยเพื่อรองรับการพัฒนาระบบคมนาคมของประเทศไทย จากการศึกษาพบว่าในปี พ.ศ. 2554 ได้เกิดอุบัติเหตุกับรถไฟความเร็วสูงที่เมืองเหวินโจว มณฑลเจ้อเจียง สาธารณรัฐประชาชนจีน ทำให้มีผู้เสียชีวิตจำนวน 32 คน และบาดเจ็บประมาณ 190 คน โดยคาดว่าสาเหตุเกิดจากฟ้าผ่าทำให้ระบบไฟฟ้า และระบบส่งสัญญาณเกิดขัดข้องจนทำให้เกิดความเสียหายดังกล่าว (Hu and Li, 2001, Yan et al., 2014) ดังนั้นการออกแบบและก่อสร้างระบบรถไฟความเร็วสูง จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมียุทธศาสตร์ป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบรถไฟความเร็วสูง ซึ่งมีความสำคัญต่อความปลอดภัยของชีวิต และความน่าเชื่อถือของระบบเป็นอย่างมาก

ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ การเกิดฟ้าผ่าแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ การเกิดฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน, การเกิดฟ้าผ่าลงสายตัวนำ และการเกิดฟ้าผ่าลงสายดินชิงอากาศ การเกิดฟ้าผ่าลงสู่พื้นดินจะส่งผลกระทบต่อระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าน้อยมากหรือไม่เกิดผลกระทบ การเกิดฟ้าผ่าลงสายตัวนำเกิดขึ้นได้จากการป้องกันที่ล้มเหลว (Shielding failure : SF) และทำให้เกิดแรงดันเสิร์จบนสายเฟส ถ้าแรงดันมีขนาดสูงกว่าแรงดันที่อัตราป้องกันการ วาบไฟ (Shielding flashover

rate : SFOR) ก็จะทำให้เกิดการวบไฟย้อนกลับไปยังเสาและดินที่มีความต้านทาน ทำให้ลูกถ้วยเสียหายการฉนวน และเกิดการลัดวงจรได้หรือหากแรงดันเสิร์จเคลื่อนที่ไปยังอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่ และไม่มีกำบังอาจทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าได้ เช่น ในระบบสายส่งแกทีนารีที่มีการเชื่อมต่อกับหม้อแปลงออโตหรือเชื่อมต่อกับรถไฟความเร็วสูง เป็นต้น การเกิดฟ้าผ่าลงสายตัวนำโดยตรง จะส่งผลกระทบต่อระบบส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสูง เพื่อเป็นการป้องกันการเกิดฟ้าผ่าโดยตรงจึงมีการติดตั้งสายป้องกันฟ้าผ่าหรือสายดินชิงอากาศ เพื่อเป็นตัวนำให้เกิดฟ้าผ่าลงสายดินชิงอากาศ แทนที่การเกิดฟ้าผ่าลงสายตัวนำ ซึ่งสายดินชิงอากาศจะถูกเชื่อมต่อกับสายดิน ดังนั้นเมื่อเกิดฟ้าผ่าที่สายดินชิงอากาศ แรงดันเสิร์จนี้จะเคลื่อนที่กระจายไปบนสายดินชิงอากาศ เพื่อที่จะถ่ายเทพลังงานฟ้าผ่าลงสู่ดิน ตำแหน่งของสายดินชิงอากาศมีขอบเขตเป็นไปตามหลักการป้องกัน ซึ่งสามารถกำหนดตามระดับการป้องกัน และความสูงของสายดิน ซึ่งมีการนำเสนอวิธีการคำนวณหามุมการป้องกันที่ดี (Perfect shielding angle) หลายวิธีการ การเกิดฟ้าผ่าลงสายดินชิงอากาศ หากมีความรุนแรงหรือมีการออกแบบระบบของสายดินที่เชื่อมต่อกับสายดินชิงอากาศไม่ดี อาจทำให้เกิดการวบไฟย้อนกลับไปยังสายเฟส (Back flashover) ทำให้เกิดแรงดันเสิร์จในสายเฟสได้ ซึ่งการเกิดแรงดันเสิร์จขึ้นในสายตัวนำ และสายดินชิงอากาศนี้จะเคลื่อนที่กระจายไปบนสายตัวนำ หรือสายดินชิงอากาศ แรงดันเสิร์จที่เคลื่อนที่นี้เราเรียกว่า “คลื่นจร (Traveling wave)” หากคลื่นจรเคลื่อนที่ไปถึงลูกถ้วยฉนวนที่จับยึดสายตัวนำอยู่ อาจทำให้เกิดการวบไฟตามผิวลูกถ้วย หรือทะลุผ่านทำให้เกิดการลัดวงจร หรือ หากเคลื่อนที่ไปถึงอุปกรณ์ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า หากไม่มีอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกิน ก็อาจทำให้ฉนวนของหม้อแปลงเกิดการเบรคดาวน์ หรือผิวดพร่องขึ้นได้ หากแรงดันเสิร์จไฟฟ้านั้นมีค่าสูงกว่าค่า BIL (Basic impulse insulation level)

ระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี (Catenary) ของรถไฟความเร็วสูงนั้น จะติดตั้งหม้อแปลงกำลังที่สถานีไฟฟ้า สำหรับส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบ และที่ระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารีจะติดตั้งหม้อแปลงออโต (Autotransformer) ระหว่างสายส่งกำลังไฟฟ้า เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับรถไฟความเร็วสูง ซึ่งหากเกิดฟ้าผ่าลงที่สายตัวนำของระบบโดยตรง หรือเกิดการวบไฟย้อนกลับไปยังสายเฟส ทำให้เกิดแรงดันเสิร์จขึ้น ในสายตัวนำและเคลื่อนที่ไปยังหม้อแปลงออโต หรือหม้อแปลงของระบบ อาจทำให้เกิดความเสียหายต่อหม้อแปลง ในระบบขึ้นได้ ดังนั้นจึงมีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเสิร์จ สำหรับอุปกรณ์ป้องกันแรงดันเสิร์จนี้ เราเรียกว่า “กั๊บดักฟ้าผ่า (Lightning arrester)”

กั๊บดักฟ้าผ่าทำงานโดยการลดขนาดของแรงดันเสิร์จที่มีค่ามากกว่าระดับการป้องกัน โดยทำให้ระดับของแรงดันเสิร์จมีค่าต่ำกว่า หรือเกือบเท่าแรงดันที่ระดับป้องกัน และจะต้องนำกระแสเสิร์จลงสู่ดินอย่างรวดเร็ว กั๊บดักฟ้าผ่าที่นำไปใช้ในระบบส่งจ่ายไฟฟ้าแรงสูง จะป้องกันเสิร์จฟ้าผ่า

เท่านั้น การติดตั้งกับดักฟ้าผ่าเพื่อป้องกันอุปกรณ์ เช่น หม้อแปลง ถ้ำแรงดันเสิร์จมีความชันสูงกับดักฟ้าผ่าจะต้องนำกระแสทันที ถ้ำแรงดันมีความชันไม่มากที่เคลื่อนที่ผ่านไปถึงหม้อแปลงก็จะสะท้อนกลับมายังกับดักฟ้าผ่า กับดักฟ้าผ่าจะทำงานและลดขนาดแรงดันลง โดยที่ขนาดของแรงดันเสิร์จนี้ขึ้นอยู่กับผลรวมของแรงดันตกคร่อมสายต่อกับดักฟ้าผ่าด้วย นอกจากนี้ระยะของสายระหว่างหม้อแปลงและกับดักฟ้าผ่ายังมีผลต่อแรงเสิร์จที่หม้อแปลง

ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบตำแหน่งการติดตั้งสายดินชิงอากาศของระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง การศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นจร โดยใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และการศึกษาผลของแรงดันเสิร์จหรือคลื่นจร ต่อหม้อแปลงออโต และการป้องกันโดยการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศ ของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี สำหรับรถไฟความเร็วสูง ตามมาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าของประเทศไทย
- 1.2.2 เพื่อนำระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมมาวิเคราะห์คลื่นจรของแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าในสายดินชิงอากาศ และสายตัวนำ ของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี สำหรับรถไฟความเร็วสูง
- 1.2.3 เพื่อนำวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในหม้อแปลง ไฟฟ้าออโตเมื่อเกิดแรงดันเสิร์จในสายตัวนำ ของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี สำหรับรถไฟความเร็วสูง

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 ใช้รูปแบบโครงสร้างของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารีสำหรับระบบรถไฟความเร็วสูงที่มีใช้ในประเศจีน และระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ในประเทศไทย มาออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศ
- 1.3.2 วิเคราะห์โอกาสการเกิดฟ้าผ่าของเส้นทางรถไฟความเร็วสูงจากกรุงเทพมหานครไปยังจังหวัดนครราชสีมา
- 1.3.3 ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยมวิเคราะห์คลื่นจรของแรงดันเสิร์จ

- 1.3.4 วิเคราะห์คลื่นจรของแรงดันเสิร์จในสายดินชิงอากาศ เมื่อเคลื่อนที่ถึงจุดต่อตัวนำลงดิน
- 1.3.5 วิเคราะห์คลื่นจรของแรงดันเสิร์จในสายตัวนำ เมื่อเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งติดตั้งกับดักเสิร์จ
- 1.3.6 ออกแบบตำแหน่งโครงสร้างภายในของหม้อแปลงไฟฟ้าออโตสำหรับระบบรถไฟความเร็วสูง
- 1.3.7 ใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มาวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าออโต
- 1.3.8 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าออโตจากค่ายอดของแรงดันไฟฟ้าในสภาวะการทำงานปกติ เกิดแรงดันเสิร์จไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า และติดตั้งกับดักฟ้าผ่า
- 1.3.9 ใช้โปรแกรมเมทแลปวิเคราะห์การแพร่กระจายของแรงดันเสิร์จ และการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าออโต

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.4.1 ออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศ ระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี ของระบบรถไฟความเร็วสูงที่มีใช้ในประเทศจีน และระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ในประเทศไทย
- 1.4.2 วิเคราะห์คุณลักษณะคลื่นจรของแรงดันเสิร์จในสายดินชิงอากาศ และสายตัวนำของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี สำหรับรถไฟความเร็วสูง ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่อง
- 1.4.3 วิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าออโตในสภาวะการทำงานปกติ และเกิดแรงดันเสิร์จในสายตัวนำที่ติดตั้ง และไม่ติดตั้งกับดักฟ้าผ่า ด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ความรู้ด้านการออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศ สำหรับสายจ่ายพาดอากาศ
- 1.5.2 ความรู้ด้านการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่อง และวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์สำหรับวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมไฟฟ้า

- 1.5.3 ทราบถึงคุณลักษณะคลื่นจรของแรงดันเสิร์จในสายดินชิงอากาศ และสายตัวนำเมื่อเคลื่อนที่ถึงจุดต่อตัวนำลงดิน และกับดักฟ้าผ่า
- 1.5.4 ทราบถึงคุณลักษณะ และผลของแรงดันเสิร์จจากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงไฟฟ้าอัตโนมัติ
- 1.5.5 สามารถนำผลการวิจัยไปใช้ออกแบบการป้องกันฟ้าผ่า ของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี สำหรับรถไฟความเร็วสูง

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 7 บท ซึ่งในแต่ละบทได้นำเสนอดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำ ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ ประโยชน์ที่

คาดว่าจะได้รับของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เกี่ยวกับการออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่า ของสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี การออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศ การวิเคราะห์คลื่นจรในสายส่ง และการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า

บทที่ 3 ทฤษฎีเกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ ระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารีสำหรับรถไฟความเร็วสูง ฟ้าผ่าและการออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศ การวิเคราะห์การคลื่นจรในสายส่ง การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้า ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

บทที่ 4 การออกแบบสายดินชิงอากาศ ของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี สำหรับระบบรถไฟความเร็วสูงจากประเทศจีน และรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ในประเทศไทย ด้วยวิธีทรงกลมกลิ้ง

บทที่ 5 การวิเคราะห์คลื่นจรของแรงดันเสิร์จในสายดินชิงอากาศเมื่อเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งติดตั้งตัวนำลงดิน และคลื่นจรของแรงดันเสิร์จในสายตัวนำเมื่อเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งติดตั้งกับดักเสิร์จ การวิเคราะห์ห้วงไฟย้อนกลับที่ถูกลบด้วยฉนวนจากคลื่นจร และฟ้าผ่าโดยตรงที่เสา ที่ค่าความต้านทานดินแตกต่างกัน

บทที่ 6 นำเสนอการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงในสภาวะการทำงานปกติ และเมื่อเกิดแรงดันเสิร์จ

บทที่ 7 กล่าวถึงบทสรุปที่ได้รับจากการทำงานวิจัย และข้อเสนอแนะสำหรับพัฒนาปรับปรุงงานวิจัย

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 สำหรับวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือศึกษาและออกแบบสายดินชิงอากาศ สำหรับสายเคเบิลของรถไฟความเร็วสูง วิธีการวิเคราะห์คลื่นจรในสายดินชิงอากาศ และสายตัวนำ และการวิเคราะห์ผลของแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าต่อหม้อแปลงออโตของระบบสายจ่ายเคเบิลที่นารี ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัย ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เคยมีการใช้งานมาก่อน จากผลการดำเนินงานและ ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสม รายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอันได้แก่ฐานข้อมูลจาก IEEE, IEE และ Science direct เป็นต้น ผลการสำรวจสืบค้นงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทาง สำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง สามารถสรุปทฤษฎี หลักการและวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้ศึกษาและออกแบบสายดินชิงอากาศ วิธีการวิเคราะห์คลื่นจร และการวิเคราะห์ผลของแรงดันเสิร์จฟ้าผ่าต่อหม้อแปลงออโต การตั้งแตอดีตจนถึงปัจจุบันสามารถสรุปโดยย่อเป็นตาราง โดยจัดลำดับการเรียงเรียงจากงานที่มีผู้ได้ดำเนินการก่อนไปสู่งานที่ใหม่กว่าได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1997	An, Q.D. และ Wang, J.Z.	นำเสนอวิธีการวิเคราะห์และแนวทางการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับรถไฟความเร็วสูงของประเทศจีน โดยการรวบรวมข้อมูลสถิติความเสียหายของรถไฟจากการเกิดฟ้าผ่า

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1968	Armstrong, H. R. และ Whitehead, E.R.	ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลการเกิดฟ้าผ่าในสายตัวนำที่ระดับแรงดันสูง และแรงดันสูงพิเศษ และเก็บข้อมูลการเกิดฟ้าผ่า มาวิเคราะห์และออกแบบตำแหน่งมุมป้องกัน ความสูงของสายดินซึ่งอากาศตามสภาพภูมิประเทศ ซึ่งสรุปได้ว่าสภาพภูมิประเทศมีผลต่อการออกแบบมุมป้องกันและตำแหน่งการติดตั้งสายดินซึ่งอากาศ
1969	Brown, G. W. และ Whitehead, E.R.	วิเคราะห์ผลของแบบจำลองการป้องกันฟ้าผ่าในสายส่งเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพมุมป้องกัน และวิเคราะห์ผลกระทบเพิ่มเติม ซึ่งพบว่ามีปัญหาการวาบไฟย้อนกลับเกิดขึ้น จากข้อมูลที่ได้รับ
1985	IEEE Power engineering society	นำเสนอแบบจำลองสำหรับการออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินซึ่งอากาศสำหรับสายจ่ายพาดอากาศ ด้วยวิธีการหาตำแหน่งมุมป้องกัน
1987	Eriksson, A.J.	พัฒนาแบบจำลองเรขาคณิตสำหรับการออกแบบมุมป้องกันที่ดีที่สุด ของตำแหน่งติดตั้งสายดินซึ่งอากาศสำหรับสายจ่ายพาดอากาศ
1996	IEEE Working group	นำเสนอการออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินซึ่งอากาศสำหรับสถานีไฟฟ้าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้ง
2010	Hayashiya, H., Hino, M., Murakami, T., Nishimura, Y., Miwa, M., Yoshino, E. และ Matsumoto, M.	นำเสนอผลของความยาวสายตัวนำต่อลงดิน และค่าความนำของดิน ต่อการวาบไฟย้อนกลับของเสิร์จฟ้าผ่า ไปยังสายพาดอากาศ แคลทีนารี ของระบบแรงดันไฟฟ้าความเร็วสูง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2013	Thanasaksiri, T.	นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพของการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสายส่ง โดยการเพิ่มสายดินจึงอากาศ ในตำแหน่งตามการคำนวณหามุมป้องกันที่ดีที่สุดตามมาตรฐานของ IEEE
2015	Zielenkiewicz, M. และ Maksimowicz, T.	นำเสนอวิธีการวิเคราะห์พื้นที่ป้องกันฟ้าผ่าสำหรับระบบสายจ่ายพาดอากาศของรถไฟความเร็วสูงในประเทศโปแลนด์ ด้วยวิธีทรงกลมกลิ้ง ที่ระดับการป้องกันที่แตกต่างกัน
1931	Bewley, L.V.	นำเสนอวิธีการคำนวณแรงดัน ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ ทำให้เกิดการสะท้อน และหักเหของคลื่นจร โดยมีลักษณะกลับไปกลับมา และการวิเคราะห์ต้องนำผลของความยาวของสายส่งมารวมพิจารณาด้วย ได้แสดงอยู่ในรูปของไดอะแกรมที่เราเรียกว่า “ไดอะแกรมตารางไววูลี”
1982	Menemenlis, C. และ Chun, Z.T.	นำเสนอการวิเคราะห์คลื่นจร ในสายส่งที่ไม่สม่ำเสมอ โดยใช้หลักการ ไดอะแกรมตารางไววูลี
1997	Hasman, T.	นำเสนอแบบจำลองสำหรับการศึกษา หม้อแปลงไฟฟ้า กับ คลื่นจร เมื่อคลื่นจรเคลื่อนที่มาถึงหม้อแปลง จะทำให้เกิดการสะท้อน และการเคลื่อนที่เข้าไปในหม้อแปลง
2001	Nevels, R. และ Miller, J.	นำเสนอการวิเคราะห์คลื่นจร ในสายส่งที่ไม่สม่ำเสมอ จากสมการ การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า หรือ สมการ Telegraph

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2012	Pedota, A., Benesova, Z. และ Koudela, L.	ใช้ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง มาวิเคราะห์หาคุณลักษณะแรงดัน และกระแสของคลื่นจรต่อหม้อแปลงไฟฟ้า จากสมการ Telegraph
1990	Hu, H. และ Mashikian, M.S.	นำเสนอการวิเคราะห์ผลการแพร่กระจายของแรงดันเสิร์จเมื่อติดตั้งกับดักฟ้าผ่าที่หม้อแปลงกำลัง และสายส่ง
1992	IEEE Working group	นำเสนอแบบจำลองกับดักฟ้าผ่าชนิด MOV โดยการทดสอบสารกึ่งตัวนำภายในห้องปฏิบัติการ เพื่อนำแบบจำลองที่ได้มาหาคุณลักษณะของกับดักเสิร์จ
2005	Henriksen, T., Gustavsen, B., Balog, G. และ Baur, U.	นำเสนอการวิเคราะห์ค่ายอดของแรงดันเสิร์จในสายส่งที่ติดตั้งกับดักเสิร์จบริเวณปลายสาย
2012	Asmontas, I., Gudzius, S., Markevicius, L.A. Morkvenas, A. และ Ticka, V.	นำเสนอการวิเคราะห์ระดับแรงดันที่ตำแหน่งต่างๆในระบบรถไฟความเร็วสูง เมื่อเกิดแรงดันเกินชั่วคราว เพื่อกำหนดขนาดของกับดักเสิร์จ
2014	Cervantes, M. และ Ramirez, A.	นำเสนอการหาค่าแรงดันสูงสุดที่เกิดจากเสิร์จฟ้าผ่าในสายไฟฟ้าใต้ดินที่ติดตั้งกับดักเสิร์จที่ปลายสาย
2015	Achouri, F., Achouri, I. และ Khamliche, M.	นำเสนอการปรับปรุงเสถียรภาพการป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายจ่ายพาดอากาศเคทีนารี ด้วยการติดตั้งกับดักเสิร์จ โดยใช้โปรแกรม EMTP

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1980	Chari, M.V.K.	นำเสนอการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กและกระแสไหลวน ใน เครื่องจักรกลไฟฟ้า เช่น เครื่องกำเนิดไฟฟ้า และหม้อแปลงสำหรับการออกแบบ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์
1994	Kladas, A.G., Papadopoulos, M.P. และ Tegopoulos, J.A.	นำเสนอการคำนวณฟลักซ์รั่วไหล และแรง ของสนามแม่เหล็ก ของหม้อแปลงไฟฟ้า ใน รูปภาพ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์
1999	Yamashita, H., Nakamae, E., Namera, A., Cingoski, V และ Kitamra, H.	นำเสนอการออกแบบจนวนของหม้อแปลง ไฟฟ้า จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าจาก แรงดันชั่วคราว ซึ่งนำเสนอโดยใช้ภาพ 2 มิติ โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์
2000	Tang, R., Wang, S., Li, Y., Wang, X. และ Cui, X.	ได้นำเสนอการคำนวณสนามแม่เหล็กที่ เกิดขึ้นในหม้อแปลงไฟฟ้าจากกระแสไหลวน เมื่อเกิดแรงดันชั่วคราว โดยวิเคราะห์จากสมการ กระแสไหลวน ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิ เมนต์ ในการวิเคราะห์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น
2007	Hernández, C. และ Arjona, M.A.	นำเสนอการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าใน ระบบจำหน่ายโดยใช้ซอฟต์แวร์ KBS – FE ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็ก รั่วไหล และการสูญเสียจากกระแสไหลวนใน ขดลวดของหม้อแปลงไฟฟ้า
2008	Liu, Y., Cao, Y., Li, Y., Gao, Y. และ Liu, X.	นำเสนอการออกแบบจนวนของหม้อแปลง ไฟฟ้า ขนาด 35 kV โดยใช้หลักการวิเคราะห์ จากสนามไฟฟ้า การจนวนที่พัฒนานี้ นั้น สามารถทำให้สนามไฟฟ้ามีการกระจายที่ มากกว่าแบบเดิม

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้วิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2010	Kim, J., Han, M. และ Chang, S.A.	นำเสนอการวิเคราะห์ผลของการเกิดฟอลต์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟความเร็วสูง ต่อการเปลี่ยนแปลงของหม้อแปลงอโต
2013	Markovic, M., Stih, Z. และ Cucic, B.	วิเคราะห์การฉนวนของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยใช้ BEM กับ FEM สำหรับการออกแบบฉนวน เพื่อลดระยะระหว่างขดลวด โดยนำคุณสมบัติความคงทนต่อแรงดันเบรกดาว์นของฉนวนมาช่วยในการวิเคราะห์

จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้สรุปผ่านมาสามารถช่วยให้ผู้ที่ดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้ พบว่าคณะผู้วิจัยได้ศึกษาสิ่งใดไปแล้วบ้าง แต่ยังไม่สามารถแยกเป็นหมวดหมู่ตามวิธีการดำเนินการได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้ จึงได้เรียบเรียงและเลือกสรรงานวิจัยหลายๆ ที่สำคัญและมีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัด จากผลงานที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 โดยจะได้กล่าวถึงหลักการและวิธีการดำเนินการวิจัยต่างๆ ที่ใช้สำหรับออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศ การวิเคราะห์การแพร่กระจายของแรงดันเสิร์จ และการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงอโต

เริ่มจากงานวิจัยของ IEEE Working group (1996) ได้นำเสนอการออกแบบตำแหน่งสายดินชิงอากาศด้วยวิธีทรงกลมกลิ้ง และ Zielenkiewicz, M. และ Maksimowicz, T. (2015) ได้นำวิธีทรงกลมกลิ้งมาออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี ซึ่งวิธีทรงกลมกลิ้ง เป็นวิธีการออกแบบตำแหน่งสายดินชิงอากาศตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย

ศึกษาการวิเคราะห์การสะท้อนของแรงดันเสิร์จ และการหักเหของแรงดันเสิร์จจากตารางไขว้บูลิ เมื่อเคลื่อนที่ถึงจุดติดตั้งกับดักเสิร์จ และจุดเชื่อมต่อสายดิน จากงานวิจัยของ Bewley, L.V. (1931) และงานวิจัยของ Pedota, A., Benesova, Z. และ Koudela, L. (2012) นำเสนอ

การวิเคราะห์คลื่นจรของแรงดันเสิร์จในสายส่ง จากสมการ Telegraph ด้วยระเบียบวิธีผลต่าง
สี่เหลี่ยม

งานวิจัยของ Yamashita, H. et al. (1999) ได้นำเสนอการออกแบบจนวนของหม้อแปลง
ไฟฟ้า จากการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าจากแรงดันเกินชั่วขณะ ซึ่งนำเสนอโดยใช้ภาพ 2 มิติ โดยใช้
ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ และ Liu, Y. et al. (2008) ได้นำเสนอการออกแบบจนวนของหม้อ
แปลงไฟฟ้า ขนาด 35 kV การจนวนที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถทำให้สนามไฟฟ้ามีการกระจายที่
มากกว่าแบบเดิม

2.3 สรุป

บทที่ 2 ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะ
ดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE, Science direct, IEE และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการ
วิจัยที่เกี่ยวข้อง ระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะ
นักวิจัย จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังไม่ปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นไป
ในระบบป้องกันฟ้าผ่าของสายส่งแคทีนารีสำหรับรถไฟความเร็วสูง การวิเคราะห์คุณลักษณะการ
เคลื่อนที่ของคลื่นจร และการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของหม้อแปลงออโตสำหรับรถไฟความเร็วสูง
ส่วนใหญ่จะเป็นการคำนวณการออกแบบสายดินเชิงอากาศในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า แสดงการ
วิเคราะห์คลื่นจรด้วยตารางไขว้บูลิ ซึ่งไม่สามารถแสดงให้เห็นคุณลักษณะของคลื่นจร และการ
ผลกระทบจากแรงดันเสิร์จของหม้อแปลงออโต ด้านสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลง

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1. บทนำ

การศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยมีความสำคัญมากในการดำเนินงาน เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจ ในส่วนนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 5 หัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ ระบบสายจ่ายพาดอากาศสำหรับรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูง ฟาร์มและการออกแบบสายดินชิงอากาศ การวิเคราะห์การแพร่กระจายแรงดันเสิร์จ การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยจะกล่าวถึงส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างต่อการดำเนินงานวิจัยนี้ เพื่อความกระชับและชัดเจนของเนื้อหา

3.2. รถไฟฟ้าความเร็วสูง

รถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องจากปี ค.ศ. 1830 รถไฟฟ้าความเร็วสูงมีความเร็วสูงสุดประมาณ 130 – 160 km/hr ในปี ค.ศ. 1981 ความเร็วของรถไฟความเร็วสูง มีความเร็วเพิ่มขึ้นเป็น 350 – 400 km/hr เพื่อให้เป็นมาตรฐานสหภาพยุโรปได้กำหนดรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูง คือรถไฟที่มีความเร็วไม่น้อยกว่า 250 km/hr สำหรับสายที่ก่อสร้างขึ้นใหม่ และสายที่เคยบริการอยู่เดิมต้องมีการปรับปรุงให้มีความเร็วไม่น้อยกว่า 200 km/hr เทคโนโลยีรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงเริ่มต้นพัฒนาในปี ค.ศ. 1964 ในประเทศญี่ปุ่น เรียกว่ารถไฟหัวกระสุน ต่อมาประเทศฝรั่งเศสได้ผลักดันรถไฟความเร็วสูง TGV ให้มีการพัฒนาด้านเทคโนโลยีทำให้รถไฟไฟฟ้าความเร็วสูง TGV ได้ทำสถิติความเร็วสูงสุดไว้ที่ 574.8 km/hr ในปี ค.ศ. 2007 นอกจากนี้รถไฟไฟฟ้าความเร็วสูง ICE ของประเทศเยอรมันได้มีการพัฒนา และทำสถิติสูงสุดที่ความเร็ว 406.9 km/hr ในปี ค.ศ. 1988 สำหรับรถไฟความเร็วสูงที่มีในทวีปยุโรปที่มีให้บริการเช่น สเปน อิตาลี และสวีเดน เป็นต้น ในปัจจุบันรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงได้รับความนิยมน้อยลง นอกเหนือจากภูมิภาคยุโรปแล้ว เกาหลีใต้ สหรัฐอเมริกา และจีน ได้วางแผนพัฒนาขยายเส้นทางระบบรถไฟความเร็วสูงให้ครอบคลุมเส้นทางคมนาคมขนส่งที่เชื่อมต่อระหว่างเมืองหลักที่สำคัญ จากข้อมูลประเทศจีน มีเส้นทาง

รถไฟความเร็วสูงรวมทั้งหมด ประมาณ 16,000 km คิดเป็น 60 % ของเส้นทางรถไฟความเร็วสูงทั่วโลก



รูปที่ 3.1 เส้นทางเดินรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงในประเทศจีน

ที่มา: <http://i.bnet.com/blogs/china-hsr-map-transport-politic-858px.jpeg?tag=content;siu-container>

3.2.1. การพัฒนาระบบรางในประเทศไทย

สายรถไฟสายแรกของประเทศไทยต้องย้อนไปปี ค.ศ. 1893 เชื่อมระหว่างกรุงเทพมหานคร และสมุทรปราการ ระยะทาง 21.3 km ในปี ค.ศ. 1925 ได้เปลี่ยนระบบรถไฟสาย

ปากน้ำมาเป็นรกรางไฟฟ้า และปิดตัวลงในปี ค.ศ. 1957 ในสมัยของพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 5 ได้สถาปนากรมรถไฟหลวงในสังกัดกระทรวงโยธาธิการ ในปี ค.ศ.1890 และโอนกิจการมาเป็นรัฐวิสาหกิจใช้ชื่อเป็นการรถไฟแห่งประเทศไทย ในปี ค.ศ. 1951 โดยก่อนหน้านี้นี้ในปี ค.ศ.1895 ได้เปิดใช้เส้นทางรถไฟระหว่างกรุงเทพมหานครถึงพระนครศรีอยุธยา ระยะทาง 71 km ซึ่งถือได้ว่าเป็นเส้นทางรถไฟสายแรก หรือเป็นจุดเริ่มต้นของเส้นทางรถไฟสายเหนือ เส้นทางรถไฟสายเหนือได้ใช้ทางรถไฟเกจมาตรฐาน ส่วนเส้นทางรถไฟสายใต้เลือกใช้ทางรถไฟชนิดเกจหนึ่งเมตร เพื่อเชื่อมต่อกับทางรถไฟของประเทศไทยในแหลมมาลายู ต่อมาจึงได้เปลี่ยนมาใช้รางชนิดเกจหนึ่งเมตรในปี ค.ศ.1924 จนถึงปัจจุบัน

ในปัจจุบันประเทศไทยมีเส้นทางรถไฟครอบคลุมทุกภูมิภาคทั่วประเทศ เพื่ออำนวยความสะดวกต่อการเดินทางของผู้โดยสาร และการขนถ่ายสินค้า รวมระยะเส้นทางรถไฟทั้งสิ้น 4,346 km ดังแสดงในรูปที่ 3.2

สำหรับรางรถไฟแบบเกจมาตรฐานในประเทศไทยมีระยะทางรวมทั้งสิ้น 80.55 km โดยให้บริการในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลในโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพมหานคร และรถไฟฟ้าแอร์พอร์ทลิ้งค์ ดังรูปที่ 3.3 นอกจากนี้ในปัจจุบันได้มีการก่อสร้างรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนเพิ่มเติมอีก 11 สายประกอบด้วย สายสีแดงอ่อน แดงเข้ม เขียวอ่อน เขียวเข้ม น้ำเงิน เหลือง เหลืองเข้ม ส้ม ม่วง เทา ชมพู ฟ้า (ชนิดชัย, 2560) ดังรูปที่ 3.4



ทำให้โครงการมีความคืบหน้าไว้มาก และได้มีการจัดตั้งรัฐบาลชุดใหม่ในช่วงปลายปี ค.ศ. 2008 ก็ได้สานต่อโครงการรถไฟความเร็วสูงโดยเปิดทางให้ต่างประเทศได้ศึกษาแนวเส้นทางและมีประเทศที่สนใจเข้ามาลงทุน 2 ประเทศ คือ ประเทศจีน และประเทศญี่ปุ่น ซึ่งประเทศญี่ปุ่นสนใจที่จะลงทุนในเส้นทาง กรุงเทพมหานคร-เชียงใหม่ ส่วนประเทศจีนมีความสนใจในเส้นทาง กรุงเทพมหานคร-หนองคาย ในขณะที่ประเทศจีนก็ได้กำลังเจรจากับรัฐบาลลาวเพื่อสร้างทางรถไฟความเร็วสูง เพื่อสามารถเชื่อมต่อเข้ากับเส้นทางกรุงเทพมหานคร-หนองคาย ในอนาคต

ในปี ค.ศ. 2010 ได้มีการลงมติเห็นชอบในการเจรจาสำหรับความร่วมมือทางด้านการพัฒนากิจการรถไฟระหว่างประเทศไทยกับประเทศจีน การเจรจามีความสำคัญอย่างมากในการสร้างความร่วมมือเพื่อพัฒนากิจการรถไฟระหว่างประเทศไทยและประเทศจีน 5 เส้นทาง ได้แก่ เส้นทางกรุงเทพมหานคร-หนองคาย เส้นทางกรุงเทพมหานคร-ระยอง เส้นทางกรุงเทพมหานคร-ปาดังเบซาร์ เส้นทางกรุงเทพมหานคร-เชียงใหม่ และเส้นทางกรุงเทพมหานคร-อุบลราชธานี

ปี ค.ศ. 2011 รัฐบาลไทยได้ลงนามในการเจรจากับรัฐบาลจีนสำหรับโครงการรถไฟความเร็วสูงเส้นทางกรุงเทพมหานคร-เชียงใหม่ ซึ่งรัฐบาลจีนมีความประสงค์ที่จะร่วมทุนกับรัฐบาลไทยในการก่อสร้างรถไฟความเร็วสูงในเส้นทางนี้ ในปี ค.ศ. 2012 คณะรัฐมนตรีได้อนุมัติงบประมาณส่วนหนึ่งให้สร้างรถไฟความเร็วสูงสายกรุงเทพมหานคร-เชียงใหม่ และโครงการก่อสร้างรถไฟความเร็วสูงกรุงเทพมหานคร-หนองคาย ในปี ค.ศ. 2013 รัฐบาลไทยได้ให้อำนาจกระทรวงการคลังออกพระราชบัญญัติกู้เงินจำนวน 2 ล้านล้านบาท เพื่อใช้พัฒนาระบบรถไฟความเร็วสูง โดยมีแนวทางที่รัฐบาลไทยจะเป็นเจ้าของระบบรางและให้สัมปทานการดำเนินงานแก่เอกชน แต่จากนั้นต่อมาในเดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2014 ศาลรัฐธรรมนูญได้ไต่สวนคำร้องพระราชบัญญัติฉบับนี้ในงบประมาณ 2 ล้านล้านบาท ที่ไม่เห็นชอบด้วยกฎหมาย และท้ายที่สุดศาลรัฐธรรมนูญได้ยกเลิกพระราชบัญญัติฉบับนี้ในปี ค.ศ. 2014 ต่อมา

ในปี ค.ศ. 2015 มีการศึกษาและดำเนินการต่าง ๆ จากที่รัฐบาลมุ่งเน้นสร้างเสริมความสัมพันธ์ระหว่างประเทศไทยกับประเทศจีน ทำให้รัฐบาลได้หยิบยกโครงการนี้ขึ้นมาพิจารณาอีกครั้ง โดยเรียกว่า รถไฟทางคู่รางมาตรฐาน โดยมุ่งเน้นในการเชื่อมต่อกับประเทศจีนในสายภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อย่างไรก็ตามโครงการต้องมาสะดุดอีกครั้งเมื่อประเทศจีนได้กำหนดอัตราดอกเบี้ยเงินกู้สูงเกินไปทำให้รัฐบาลไทยต้องหันไปพิจารณาแหล่งทุนจากแหล่งอื่น ๆ เช่น ใจกล้า ที่เสนออัตราดอกเบี้ยถูกกว่ามาลงทุน

สำหรับประเทศไทยโครงการรถไฟความเร็วสูงจะมีการขยายโอกาสจากกรุงเทพมหานครไปยังจังหวัดต่าง ๆ โดยแบ่งออกเป็น 4 เส้นทาง ดังนี้

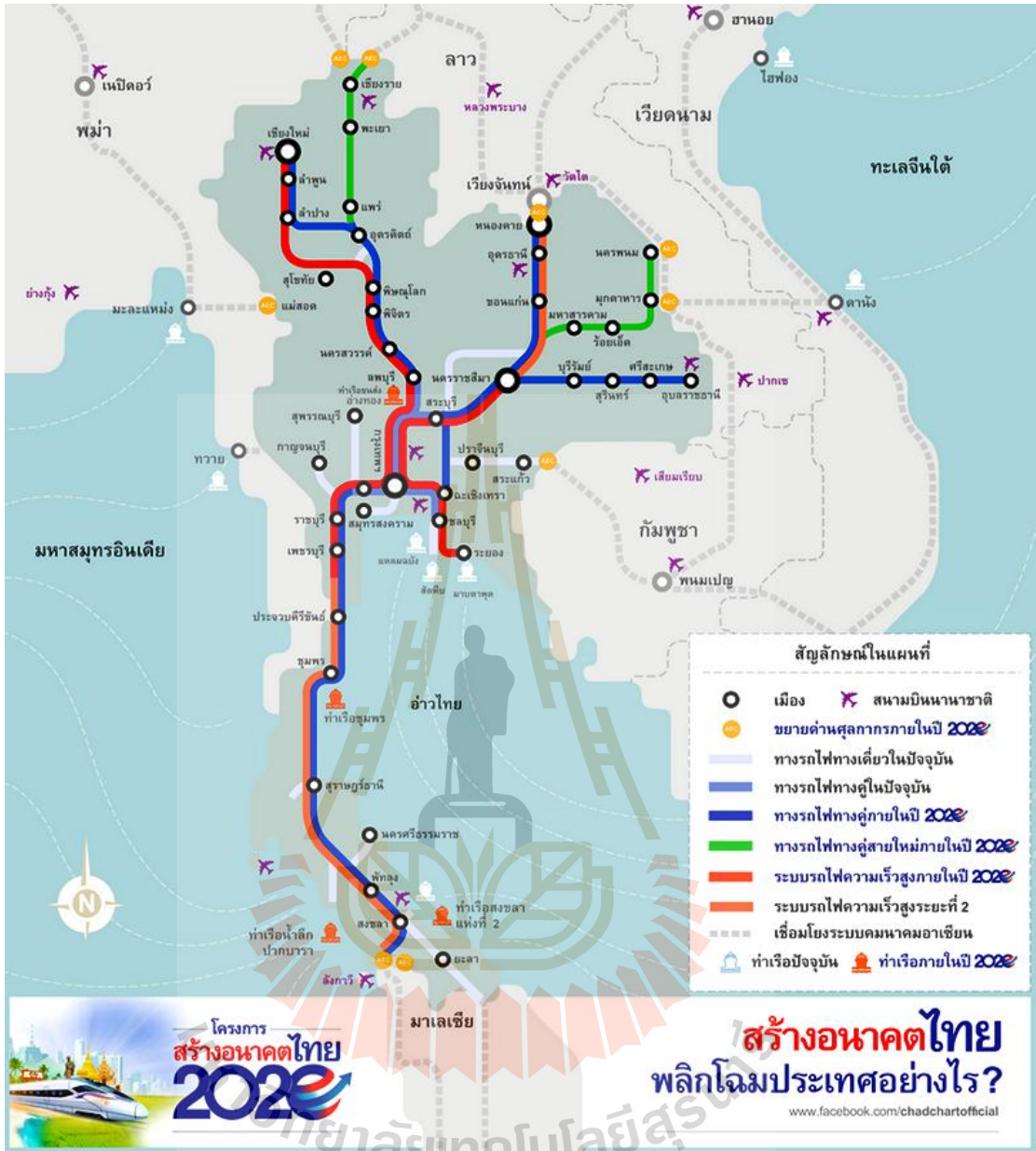
(1). ภาคเหนือ: เส้นทางกรุงเทพมหานคร-พิษณุโลก-เชียงใหม่ มีระยะทาง 745 km รวมงบประมาณในการก่อสร้าง 387,821 ล้านบาท

(2). ภาคตะวันออก: เส้นทางกรุงเทพมหานคร-พัทยา-ระยอง มีระยะทาง 221 km รวมงบประมาณในการก่อสร้าง 100,631 ล้านบาท

(3). ภาคตะวันตก: เส้นทางกรุงเทพมหานคร-หัวหิน-ปาดังเบซาร์ มีระยะทาง 982 km รวมงบประมาณในการก่อสร้าง 123,798 ล้านบาท

(4). สายตะวันออกเฉียงเหนือ: เส้นทางกรุงเทพมหานคร-นครราชสีมา-หนองคาย มีระยะทาง 615 km รวมงบประมาณในการก่อสร้าง 240,855 ล้านบาท

โครงการรถไฟทางคู่ขนาดทางมาตรฐานเพื่อรองรับระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงในอนาคต ช่วงจังหวัดนครราชสีมาถึงจังหวัดหนองคาย ภายใต้โครงการศึกษาและออกแบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงสายกรุงเทพมหานคร-หนองคาย ระยะที่ 2 ช่วงจังหวัดนครราชสีมาถึงจังหวัดหนองคาย เป็นการดำเนินงานที่สอดคล้องกับแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ โดยมีนโยบายจากคณะรัฐมนตรีปัจจุบันเร่งผลักดันให้สามารถก่อสร้างรถไฟทางคู่ขนาดทางมาตรฐานเพื่อเชื่อมโยงกับประเทศเพื่อนบ้านในการส่งเสริมทางเศรษฐกิจ ทางการค้า การลงทุนในภูมิภาคอาเซียน และการขยายความร่วมมือทางเศรษฐกิจกับประเทศเพื่อนบ้าน โดยโครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางหนองคาย-นครราชสีมา-มาบตาพุด ระยะทาง 737 km จากแผนการพัฒนาระบบรางทำให้ประเทศไทยจะมีระบบรางประกอบไปด้วย รถไฟรางเดี่ยว รถไฟรางคู่ และระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง แผนที่เส้นทางรถไฟของประเทศไทยตามแผนการพัฒนาระบบรางแสดงดังรูปที่ 3.5



การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูงจะใช้สายจ่ายตัวนำพาดอากาศ (Overhead feeding conductor) โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากสถานีไฟฟ้ามาสู่ขบวนรถผ่านระบบสายตัวนำพาดอากาศ เพื่อจ่ายให้กับระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า และจะไหลย้อนกลับไปยังสถานีผ่านราง หรือไหลย้อนกลับผ่านตัวนำอื่น เนื่องจากรางมีคุณสมบัติความไม่เป็นเชิงเส้นสูงเพราะทำจากวัสดุผสมเหล็กกล้าแมงกานีส มาตรฐานการจ่ายไฟให้ระบบรางรถไฟกระแสสลับใช้แรงดัน 25 kV แรงดันพิกัดมาตรฐาน มีข้อกำหนดในหัวข้อแรงดันจ่ายไฟของระบบขับเคลื่อนในมาตรฐานนานาชาติที่สำคัญ คือ

1. EN50163 – “Railway applications. Supply Voltages of Traction Systems”
2. IEC60850 – “Railway application. Supply Voltages of Traction Systems”

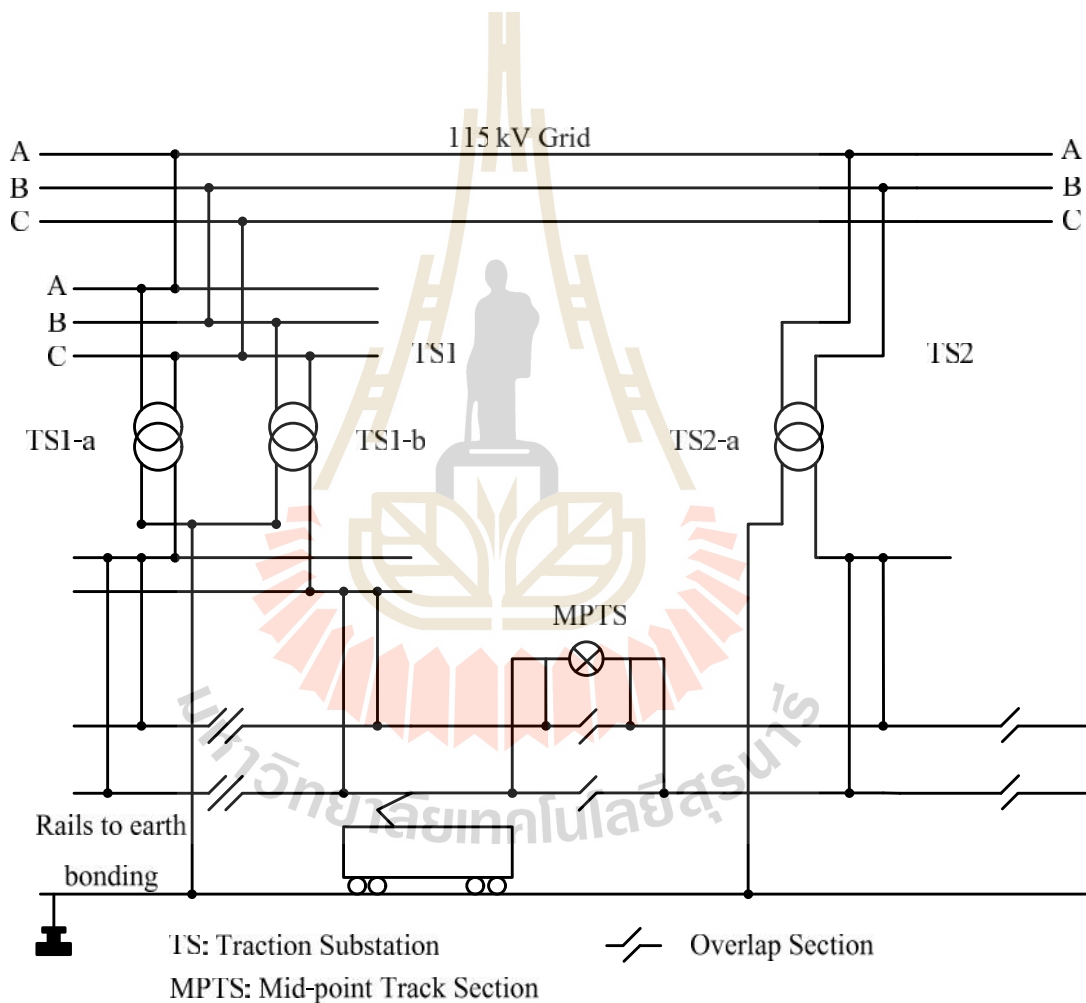
ระดับแรงดันทำงานตามมาตรฐานดังที่ได้กล่าวไว้ของระบบ 25 kV แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงค่าแรงดันระดับสูงสุด และต่ำสุดที่ยอมรับได้สำหรับการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูง

ตารางที่ 3.1 ระดับแรงดันมาตรฐานการจ่ายไฟฟ้าของระบบรถไฟกระแสสลับ 25 kV (ชนิดชั้, 2560)

Electrification system	Lowest non-permanent voltage	Lowest permanent voltage	Nominal voltage	Highest permanent voltage	Highest non-permanent voltage
25,000 V 50 Hz	17,500 V	19,000 V	25,000 V	27,500 V	29,000 V

ส่วนสำคัญของการจ่ายไฟให้ระบบรถไฟไฟฟ้า โดยประเทศไทยจะมีระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV ถูกปรับลดลงเพื่อป้อนเข้ากับระบบจ่ายไฟของรถไฟไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าที่นิยมใช้ในปัจจุบัน คือระบบ 25 kV, 50 Hz ดังแสดงในรูปที่ 3.6 กระแสไฟฟ้าถูกปรับลดแรงดันแล้วถูกจ่ายไฟผ่านสายตัวนำพาดอากาศ อุปกรณ์ที่รับกระแสไฟฟ้าบนตัวรถไฟเรียกว่า แพนโทกราฟ ติดตั้งอยู่บนหลังการรถถูกยกขึ้นไปสัมผัสกับสายส่งเพื่อรับกระแสไฟฟ้ามาใช้บนรถ กระแสไฟฟ้าจะไหลครบวงจรโดยรางหรือตัวนำไหลย้อนกลับ

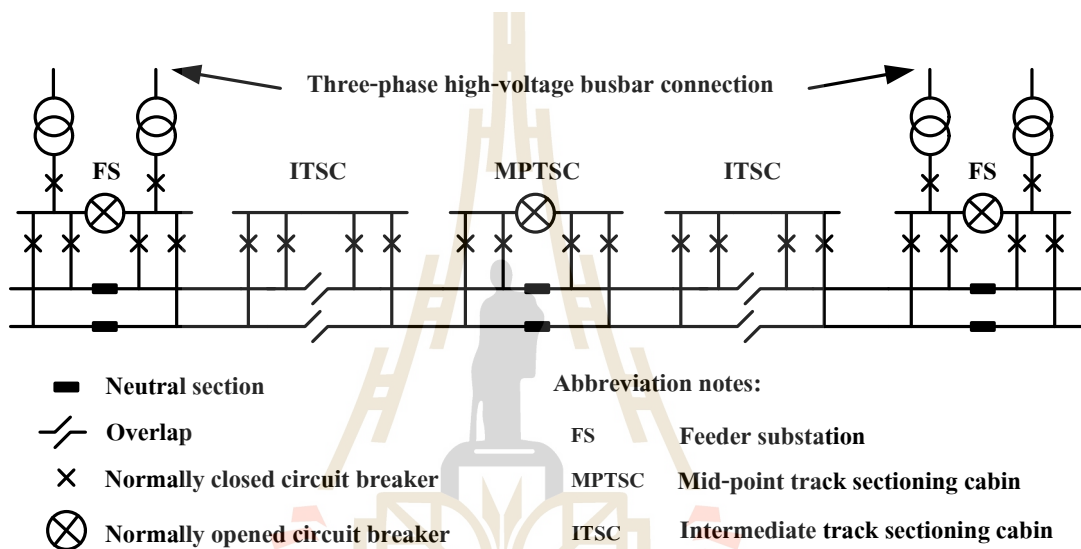
โดยปกติแล้วในการจ่ายกระแสไฟฟ้าของสถานีไฟฟ้า TS1 ติดตั้งหม้อแปลงจำนวน 2 ลูก ได้แก่ TS1-a และ TS1-b สถานีจ่ายไฟถัดไป คือ TS2 ติดตั้งหม้อแปลงจำนวน 2 ลูก เช่นกัน คือ TS2-a และ TS2-b แต่ในรูปแสดงเพียงลูกเดียว หม้อแปลงทั้ง 3 ลูกนี้ มีหน้าที่จ่ายไฟให้กับรางรถไฟไฟฟ้าถั้วรถไฟเคลื่อนที่จากด้านขวาไปทางด้านซ้ายในรูป การจ่ายกระแสจากหม้อแปลงเข้าไปที่ระบบรางจ่ายไฟจะถูกดึงจาก TS2-a, TS1-b และ TS1-a ตามลำดับ เพื่อให้การดึงกระแสจากตัวนำของระบบ 3 เฟสที่ระดับแรงดันไฟฟ้า 115 kV มีความสมดุล การเชื่อมต่อหม้อแปลงกำลังทั้ง 3 ลูก จะเป็นการเชื่อมต่อจากเฟส A-B, B-C และ C-A ตามลำดับ (ชนิดชั้ว, 2557)



รูปที่ 3.6 การต่อหม้อแปลงกับระบบไฟฟ้ากำลัง 115 kV

การจ่ายไฟให้กับเส้นทางรถไฟสายหลักในประเทศไทยใช้หม้อแปลง 115/25 kV รูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรางของรถไฟความเร็วสูง ซึ่ง

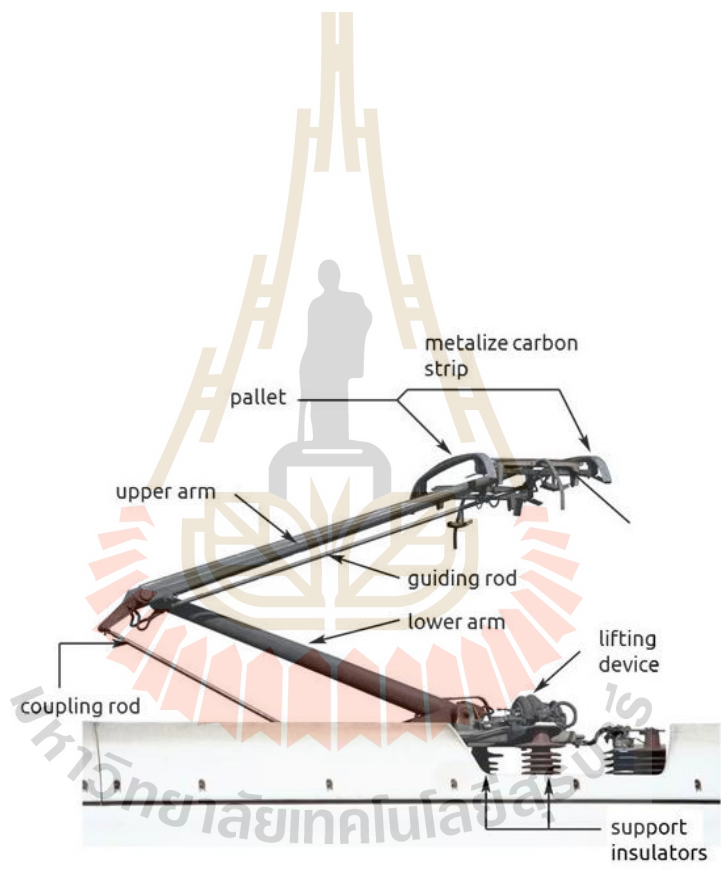
สามารถใช้ได้ทั้งระบบจ่ายไฟโดยตรง (direct feeding system) ระบบการจ่ายผ่านหม้อแปลงบูสเตอร์ (booster transformer feeding systems: BT) หรือระบบการจ่ายไฟผ่านหม้อแปลงออโต (autotransformer feeding systems: AT) ซึ่งระบบจ่ายผ่านหม้อแปลงออโต เป็นระบบที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน ถึงแม้จะมีราคาค่อนข้างสูงก็ตามหากเทียบกับระบบอื่น แต่มีข้อดีคือการแทรกสอดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ และควบคุมค่าแรงดันได้ดี โดยรายละเอียดของหม้อแปลงออโตจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

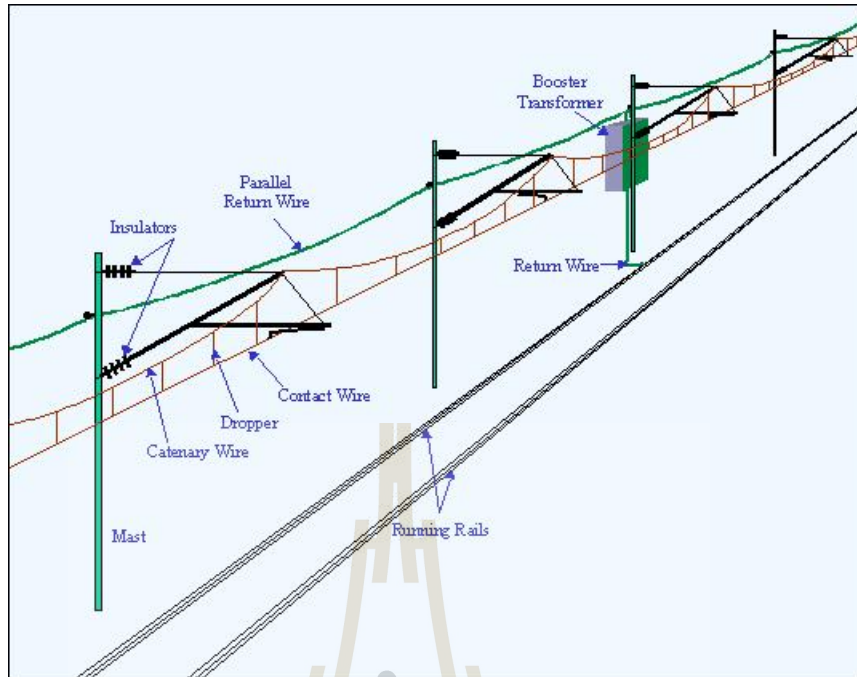


รูปที่ 3.7 การจ่ายกำลังไฟฟ้าสำหรับรถไฟทางคู่

3.2.3. โครงสร้างระบบสายจ่ายตัวนำพาดอากาศ สำหรับรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูง

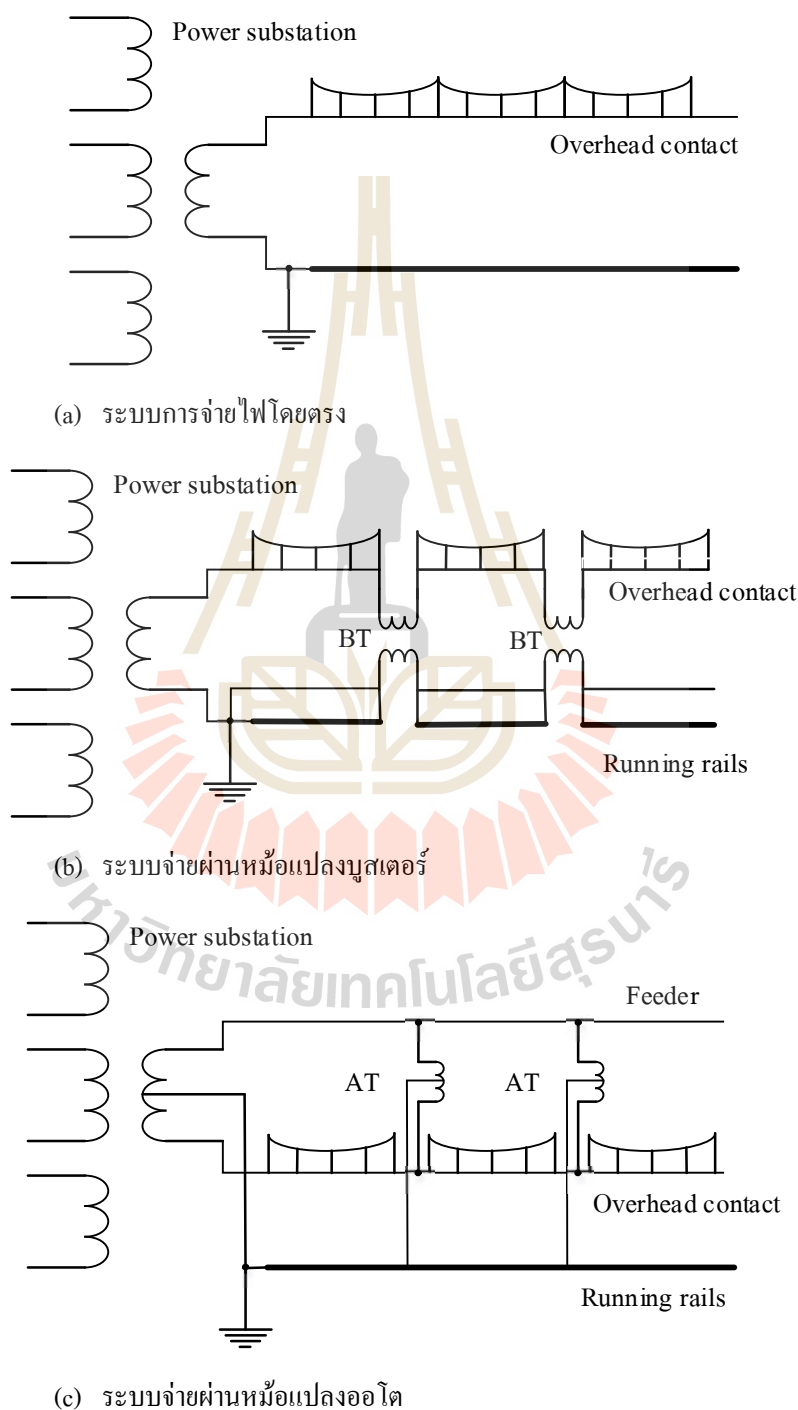
สำหรับระบบสายจ่ายตัวนำพาดอากาศ แพนโทกราฟถือว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญมาก เพราะเป็นจุดที่รถไฟไฟฟ้ากับระบบจ่ายไฟมาสัมผัสกัน ปกติการยกแพนโทกราฟขึ้นลงถูกควบคุมด้วยลมอัดที่แรงดันสูง การเคลื่อนเข้าสัมผัสและการแยกออกจากสายส่งต้องรวดเร็วมากเพื่อป้องกันการเกิดประกายไฟที่ทำให้สายส่งและแปรงถ่านสึกหลอเร็วขึ้น เนื่องจากระบบรถไฟไฟฟ้าแบบกระแสสลับทำงานที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง สถานีจ่ายกระแสไฟฟ้ามีพิสัยการจ่ายไฟได้ระยะทางไกล จึงสามารถติดตั้งจุดจ่ายกระแสไฟฟ้าไว้ห่างกันได้ โดยปกติแล้วจุดจ่ายกระแสไฟฟ้าหนึ่งสถานีย่อจะสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ระยะทางประมาณ 50-100 km ขึ้นอยู่กับระบบการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เลือกใช้และความหนาแน่นของขบวนรถในเส้นทางเดินรถไฟ





3.2.4. ระบบจ่ายด้วยการป้อนผ่านหม้อแปลงออโต

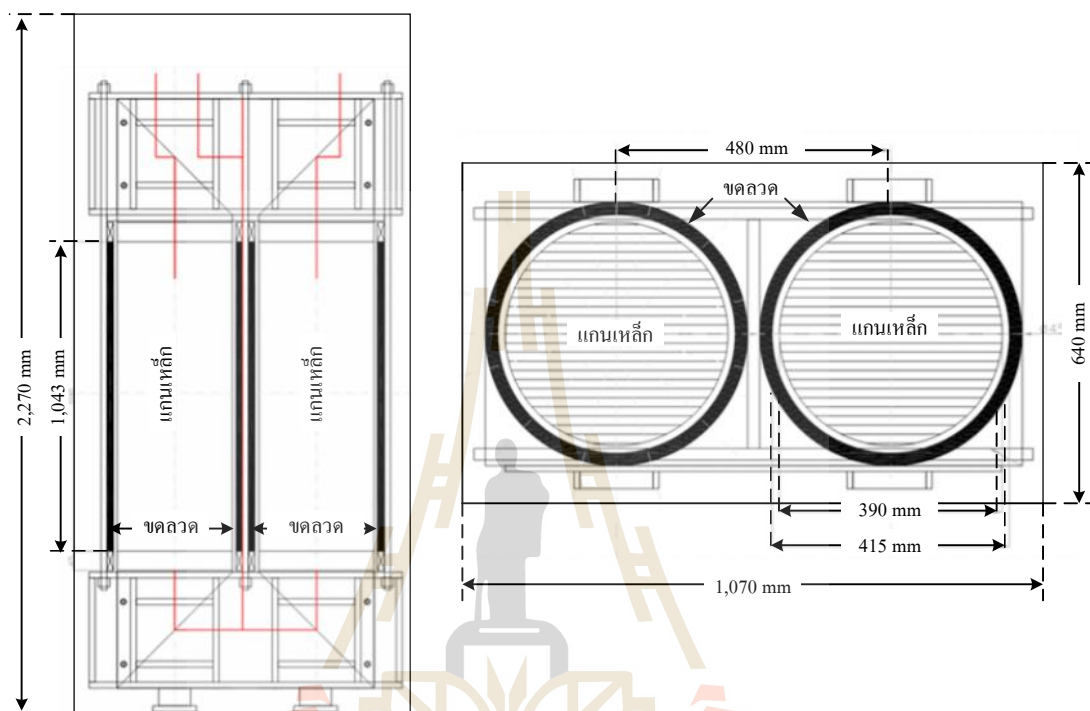
ระบบการจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับระบบรางไฟฟ้าสำหรับรถไฟความเร็วสูงซึ่งที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น มี 3 ระบบ คือ ระบบการจ่ายไฟโดยตรง ระบบการจ่ายผ่านหม้อแปลงนุสเตอร์ และระบบการจ่ายผ่านหม้อแปลงออโต ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 รูปแบบการจ่ายไฟมาตรฐานของระบบรถไฟฟ้ากระแสสลับ (ชนัดชัย, 2560)



การออกแบบการจํานวนรอบการพันขดลวด ขนาดของขดลวด และแกนเหล็กของหม้อแปลงออโตขนาด 10 MVA แสดงในภาคผนวก ก รูปแบบ โครงสร้างภายในของหม้อแปลงออโตที่ได้จากการออกแบบ แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 โครงสร้างภายในหม้อแปลงออโตสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูง ขนาด 10 MVA

3.3. ไฟฟ้าและการออกแบบสายดินชิงอากาศ

ไฟฟ้าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ส่งผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า การเกิดไฟฟ้าได้มีการพิจารณามากกว่าหลายทศวรรษ ซึ่งเป็นเรื่องที่ไม่ยากสำหรับการจินตนาการของผู้คนในอดีต หรือมนุษย์ถ้ำ ซึ่งได้แสดงให้เห็นถึงความกลัวของพวกเขา พวกเขาไม่รู้วิธีป้องกันตัวเอง หรือทรัพย์สินจากไฟฟ้า พวกเขามองเห็นสิ่งที่น่ากลัวจากแสงไฟ และความร้อนจากไฟฟ้า ซึ่งพวกเขาเข้าใจว่าการเกิดไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นจากพระเจ้า ในเทพนิยายกรีก ได้กล่าวว่าเทพพระเจ้าซอร์ได้ขว้างสายฟ้าลงมา

ในทวีปยุโรป และประเทศอังกฤษ ได้เชื่อมต่อดวงแหวนกับระฆัง โบสถ์ในช่วงที่เกิดไฟฟ้า พวกเขาที่ไม่มีความรู้เชื่อว่าจะช่วยขจัด และแยกแยะสิ่งชั่วร้ายออกได้ อย่างไรก็ตามกลุ่มบุคคลที่มีความรู้ให้เหตุผลว่า เป็นการสร้างความสั่นสะเทือนในอากาศเพื่อไม่ให้เกิดความต่อเนื่องของเส้นทางการเกิดไฟฟ้า แต่ในที่สุดการกระทำนี้ได้ถูกสั่งห้ามเนื่องจากทำให้อัตราการความเสียหาย

เพิ่มมากขึ้น ในปี ค.ศ. 1784 มีหนังสือที่ตีพิมพ์ขึ้นในเมืองมิวนิก เรื่อง “A Proof that the ringing of bells during thunderstorms may be more dangerous than useful” แสดงให้เห็นว่าในระยะเวลา 33 ปี ปลายยอดแหลมของโบสถ์ถูกฟ้าผ่า 386 ครั้ง ขณะที่วังแหวนและระฆังเกิดความเสียหาย 103 ครั้ง

ในปี ค.ศ. 1388 ถึง ค.ศ. 1762 ความเสียหายต่อทรัพย์สินได้ถูกบันทึกข้อมูลไว้ โดยหอระฆังเซนต์มาร์ค ในเมืองเวนิส ที่มีความสูงประมาณ 100 m เกิดความเสียหาย 6 ครั้ง และพังทลาย 3 ครั้ง

หลังจากดินปืนและปืนใหญ่ถูกนำมาใช้ในศตวรรษที่ 18 จึงจำเป็นที่จะต้องมียุทธภัณฑ์ที่เก็บดินปืนขนาดใหญ่ ในชั้นใต้ดินของโบสถ์ก็เคยถูกใช้ การเชื่อมต่อของยอดโบสถ์กับชั้นใต้ดินที่เต็มไปด้วยดินปืน ซึ่งส่งผลให้เกิดอันตรายร้ายแรง ในปี ค.ศ. 1769 ดินปืนขนาด 100 ton ระเบิดขึ้นที่โบสถ์ในประเทศฝรั่งเศส ทำให้มีผู้เสียชีวิต 3000 คน ปี ค.ศ. 1865 พลเมือง 4000 คน เสียชีวิตเมื่อดินปืนที่อยู่ในห้องใต้ดินของโบสถ์เซนต์จอร์จบนเกาะโรเคส ถูกจุดชนวนด้วยฟ้าผ่า เช่นเดียวกันฟ้าผ่าเป็นสาเหตุให้เกิดการระเบิดที่คลังสรรพาวุธของทหาร

เรือในทะเลได้รับผลจากฟ้าผ่าเช่นเดียวกัน จากการสำรวจของเรือในประเทศอังกฤษแสดงให้เห็นว่าใน 16 ปี (ค.ศ. 1799 – ค.ศ. 1815) เกิดความเสียหาย 150 ครั้ง นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 1798 เรือรบลำหนึ่งได้รับความเสียหายจากฟ้าผ่า

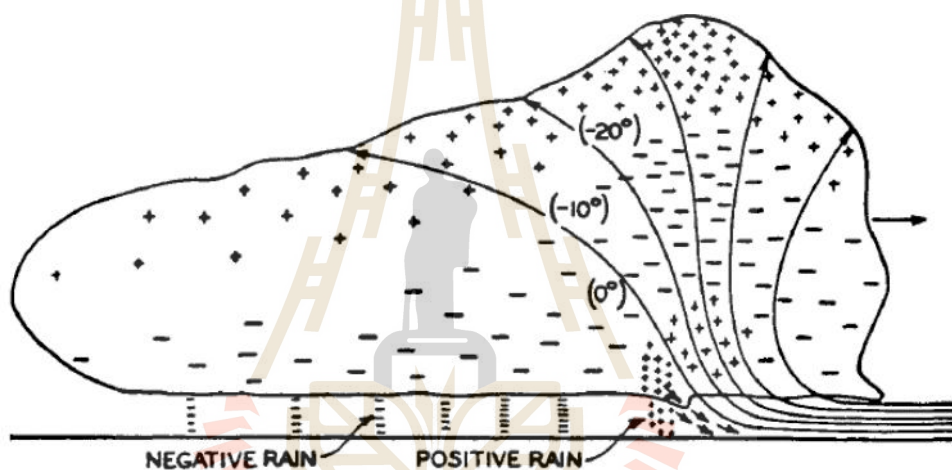
จากวิวัฒนาการของมนุษย์ และการศึกษา ทำให้มีผู้คนพยายามสร้างทฤษฎี และคำอธิบายถึงการเกิดฟ้าผ่า และอุปกรณ์สำหรับป้องกันจากฟ้าผ่า ในปี ค.ศ. 1746 เบนจามิน แฟรงคลิน เริ่มต้นทดสอบ และ ศึกษาเกี่ยวกับฟ้าผ่าและไฟฟ้า โดยใช้โกลเด้นเดน เขาสังเกตการสปาร์กในโกลเด้นเดน ได้แก่ สี, กลิ่น และลักษณะรูปร่าง ค.ศ. 1750 เขาเขียนถึงเพื่อนของเขา ปีเตอร์ คอลลินสัน ในลอนดอน โดยนำเสนอการทดลองกับนิกเกิล คอลลินสันทำหน้าที่เป็นตัวแทนของแฟรงคลินส่งเอกสารสำหรับตีพิมพ์ในวารสารของ Philosophical transactions of the royal society การทดลองกับนิกเกิลประกอบด้วยการวางแท่งเหล็ก 6 – 9 m ข้างกับนิกเกิล ด้านล่างของก้านเป็นแพลตฟอร์มซึ่งเป็นตัวนำจะหุ้มฉนวนจากพื้นดิน ช่วงเกิดพายุให้นักวิจัยยืนอยู่บนแพลตฟอร์มให้สัมผัสแท่งเหล็ก และมีอีกข้างยื่นออกมาตรวจสอบว่ามีสปาร์กออกมาที่นิ้วของเขาหรือไม่

ในเดือนมิถุนายน ปี ค.ศ. 1792 แฟรงคลินได้ค้นพบวิธีทดสอบที่ดีกว่า เนื่องจากแท่งเหล็กต้องมีความยาวมากกว่าซึ่งมีคุณสมบัติอยู่กับสายป่านขึ้นในอากาศขณะที่เกิดพายุฝน เขาพบว่าเมื่อเอามือไปใกล้กุญแจก็ปรากฏประกายไฟฟ้ายังมีมือของเขาจากการทดลองนี้ทำให้เขาค้นพบว่าปรากฏการณ์ ฟ้าแลบ ฟ้าร้อง และฟ้าผ่า เกิดจากประจุไฟฟ้าในอากาศ หลังจากนั้นมาแฟรงคลินก็สามารถประดิษฐ์สายล่อฟ้าได้เป็นคนแรกโดยเอาโลหะต่อไว้กับยอดหอคอยที่สูง ๆ แล้วต่อสายลวดลงมายังดิน ซึ่งเป็นการป้องกันฟ้าผ่าได้กล่าวคือไฟฟ้า จากอากาศจะไหลเข้าสู่โลหะที่ต่ออยู่กับ

ยอดหอคอยแล้วไหลลงมาตามสายลวดที่ต่อเอาไว้ลงสู่ดินหมดโดยไม่เป็นอันตราย ต่อคนหรืออาคารบ้านเรือน

3.3.1. กลไกการเกิดฟ้าผ่า

การศึกษากลไกการเกิดฟ้าผ่า สิ่งสำคัญที่ต้องการทราบคือจังหวะสุดท้ายของการเกิดฟ้าผ่า ให้ความสนใจเกี่ยวกับรูปแบบของพายุ และกลไกเริ่มต้นของการเกิดฟ้าผ่าไปสู่พื้นดิน แต่รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ในขั้นตอนสุดท้ายของการฟ้าผ่าเป็นสิ่งที่จะสามารถนำไปพัฒนาและวิเคราะห์ผลต่างๆ ได้ ด้วยเหตุนี้จะกล่าวเพียงสั้นๆ เกี่ยวกับขั้นตอนการนำ (Stepped leader) ของการเกิดฟ้าผ่า

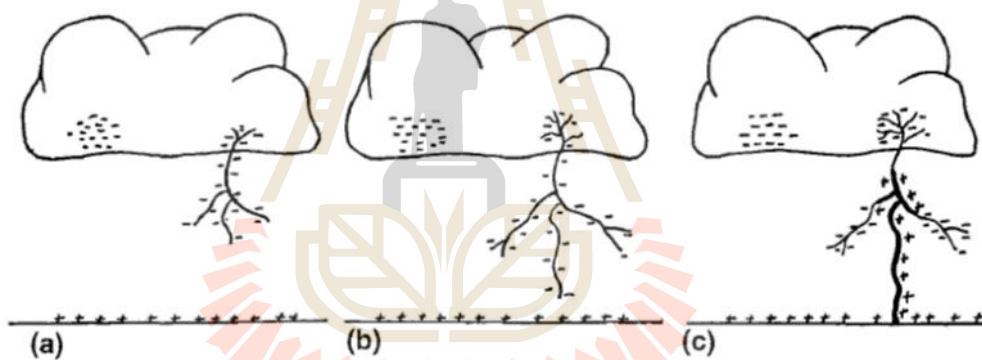


รูปที่ 3.15 การแผ่ตัวของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ (Hileman, 1999)

ในกลุ่มเมฆมีประจุไฟฟ้าแอมแปงอยู่บริเวณที่อยู่ต่ำมีละอองน้ำมีสถานะเป็นประจุลบ และบริเวณที่อยู่สูงมีละอองเกลือ น้ำแข็งมีสถานะเป็นประจุบวก ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ในช่วงที่เกิดพายุอากาศเกิดการแปรปรวน จึงเกิดการถ่ายเทของประจุเพื่อลดความเครียดของสนามไฟฟ้า จึงเกิดฟ้าแลบ และฟ้าผ่าลงสู่พื้นโลก ฟ้าผ่าจะเกิดขึ้นในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าสูง

ฟ้าผ่าเริ่มเกิดขึ้นได้จากจากแตกตัวของประจุในอากาศ โดยทั่วไปขนาดของสนามไฟฟ้าที่ 10-30 kV/cm สามารถทำให้อากาศเกิดการแตกตัวให้ประจุไฟฟ้าเกิดการถ่ายได้ ลักษณะการเกิดเป็นไปเช่นตัวอย่าง ในรูปที่ 3.16 ลมพายุก่อให้เกิดความเครียดของสนามไฟฟ้าที่พื้นผิวโลก และบริเวณใต้กลุ่มเมฆ กลไกการเริ่มเกิดฟ้าผ่าเริ่มจากการเกิดขึ้นนำฟ้าผ่า (Stepped

leader) ซึ่งเป็นตัวนำยาวประมาณ 50 m และรอบๆ ชั้นนำจะมีการแตกตัวของประจุเป็นลักษณะของโคโรนาในเขตรัศมีของชั้นนำประมาณ 30 m ชั้นนำจะชักนำให้เกิดการแตกตัวของประจุในชั้นถัดๆ ไป โดยทอดยาวแบบซิกแซกไปสู่จุดที่มีความเครียดของสนามไฟฟ้าสูงที่พื้นผิวโลก การเกิดชั้นนำแต่ละชั้นใช้เวลาน้อยกว่าไมโครวินาที โดยมีอัตราเร็วในการเกิดชั้นนำในแต่ละชั้นประมาณ 150 m/ μ s การเกิดโคโรนา และชั้นนำนี้ทำให้เกิดแสงจ้าที่มองเห็นได้ด้วยตา การเกิดชั้นนำใกล้ผู้พื้นดิน และที่ระยะห่างที่เรียกว่าระยะเฉย (Striking distance, r_s) ก็จะทำให้เกิดการเสียดภาพยับปล้นของอากาศและทำให้อากาศกลายเป็น ตัวนำในลักษณะของพลาสมาและทำให้มีการไหลของประจุตรงข้ามคือประจุบวกกลับขึ้นไปสู่ก้อนเมฆ จึงเกิดเสียงฟ้าร้อง การไหลของประจุขึ้นไปยังเมฆนี้เรียกว่า ฟ้าผ่าย้อนกลับ (Return stroke) แนวช่องที่มีการไหลของประจุในอากาศนี้ ยังคงเป็นตัวนำไฟฟ้าที่อาจมีการไหลของประจุเกิดขึ้นได้อีก เพื่อถ่ายเทประจุจากเมฆและพื้นดิน จึงเรียกว่า Dart leader



รูปที่ 3.16 การเกิดฟ้าระหว่างเมฆแลพื้นผิวโลก (Hileman, 1999)

ขนาดกระแสฟ้าผ่า (I_0) และระยะ r_s มีความสัมพันธ์กัน โดยมีสมการโดย ประมาณค่าหลายสมการดังนี้

$$\text{Whitehead} \quad r_s = 2I_0 + 30(1 - e^{(-I_0/6.25)}) \quad (3.1)$$

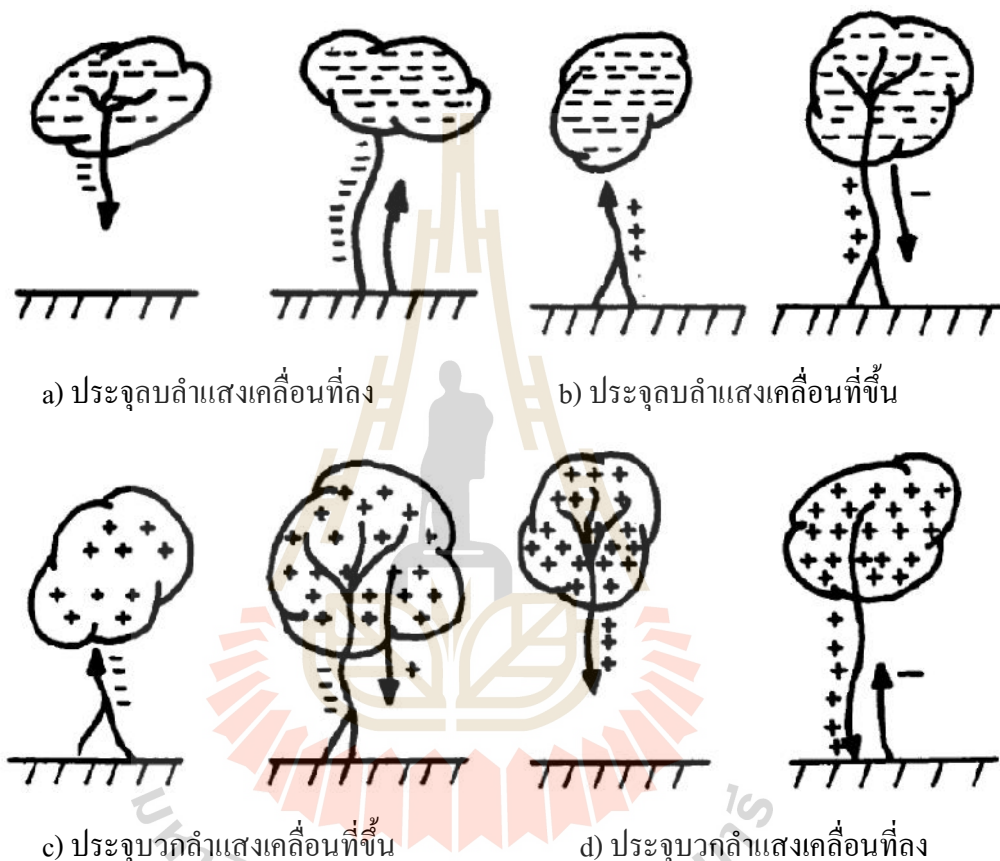
$$\text{Love R.R.} \quad r_s = 10I_0^{0.65} \quad (3.2)$$

$$\text{Armstrong and Whitehead} \quad r_s = 10I_0^{0.8} \quad (3.3)$$

ขนาดกระแสฟ้าผ่า (I_0) มีหน่วยเป็น kA และระยะ r_s มีหน่วยเป็น m

3.3.2. ประเภทของลำแสงฟ้าผ่า

ในหัวข้อที่ผ่านมาได้นำเสนอประเภทของลำแสงฟ้าผ่าประจุลบเคลื่อนที่ลงของจากสมมติฐานของ C.F Wagner โดยสมมติฐานนี้จะเกิดขึ้นมากในพื้นที่เปิด และสิ่งก่อสร้างที่มีความสูงไม่เกิน 100 m อย่างไรก็ตามก็ตามลำแสงฟ้าผ่าอีก 3 ประเภทได้อธิบายไว้โดย Berger ประเภทของลำแสงฟ้าผ่าสามารถจำแนกได้ 4 ประเภทดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ประเภทของลำแสงฟ้าผ่า (A. R. Hileman, 1999: 204)

ประเภทที่ 1 ประจุลบลำแสงเคลื่อนที่ลงเกิดขึ้นมากกับสิ่งปลูกสร้างที่มีความสูงไม่เกิน 100 m และบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง มีจำนวน 85 – 95% ของลำแสงฟ้าผ่าที่เกิดขึ้นกับสิ่งปลูกสร้างนี้ ค่ามัธยฐานของกระแสประมาณ 33 kA

ประเภทที่ 2 ประจุลบลำแสงเคลื่อนที่ขึ้น เกิดขึ้นมากสำหรับอาคารสูง เช่น ตึก Empire State ที่ รัฐนิวยอร์ก ประเทศสหรัฐอเมริกา (23 ครั้งต่อปี) Berger ได้ทำการทดสอบโดยใช้

เสาสูง 70 – 80 m ติดตั้งบนยอดเขา San Salvatore ในประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ซึ่งมีความสูง 650 m ซึ่งเกิดลัมแสงฟ้าผ่าจำนวน 1196 ครั้ง ใน 11 ปี 75 % เป็นประจุลบลัมแสงเคลื่อนที่ขึ้น และ 11% เป็นประจุลบลัมแสงเคลื่อนที่ลง โดยค่ากระแสฟ้าผ่าประเภทประจุลบลัมแสงเคลื่อนที่ขึ้นประมาณ 25 kA

ประเภทที่ 3 และ 4 ประจุบวกลัมแสงเคลื่อนที่ขึ้น และประจุบวกลัมแสงเคลื่อนที่ลง Berger ไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นประเภทใด โดยเกิดขึ้น 14% จากการทดสอบ โดยมีค่ากระแสฟ้าผ่าประมาณ 1.2 – 2.2 เท่าของกระแสฟ้าผ่าประเภทประจุลบลัมแสงเคลื่อนที่ลง

3.3.3. อัตราการเกิดฟ้าผ่าลงสู่พื้นโลก

อัตราการเกิดฟ้าผ่าลงสู่พื้นโลกในแต่ละพื้นที่ที่มีความแตกต่างกันออกไปตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ โดยอัตราการเกิดฟ้าผ่าจะหนาแน่นในบริเวณที่มีความชื้นสูง ซึ่งเกิดขึ้นต่างๆ ของเมฆได้ง่ายกว่าบริเวณอื่นๆ นางปฏิบัติจะใช้วันที่ได้ยินเสียงฟ้าร้อง (Thunderday : TD) เป็นข้อมูลสถิติเบื้องต้นในการหาค่าเพื่อวิเคราะห์ค่าอื่นๆ ที่นำไปใช้ออกแบบและป้องกันระบบต่างๆ รูปที่ 3.18 เป็นแผนที่แสดงเขตที่ได้ยินเสียงฟ้าร้อง ซึ่งเรียกว่า Isokeraunic map ของประเทศไทย วันที่ได้ยิน ได้ยินเสียงฟ้าร้องย่อมมีฟ้าผ่าเกิดขึ้น 1 ครั้งขึ้นไป

อัตราการเกิดฟ้าผ่าลงสู่ดินต่อ year/km^2 (N_g) สามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์กับค่า TD ได้จาก White head ดังนี้

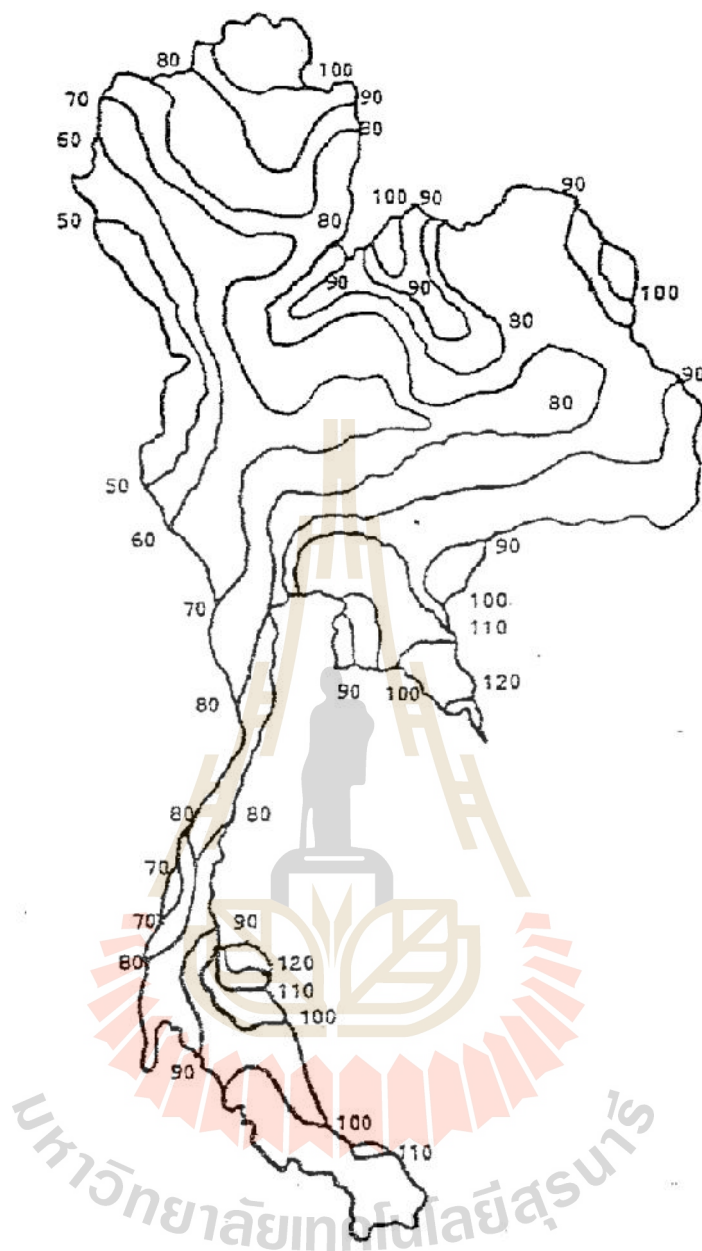
$$N_g = 0.04TD^{1.35} \quad (3.4)$$

ค่า N_g เป็นค่าโดยประมาณมีความละเอียดอย่างจำกัดในระบบสายส่งจึงนิยมใช้สมการหาความสัมพันธ์ของ TD กับจำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่สายส่งโดยตรง (N_l) มีหน่วยเป็นครั้งต่อระยะสาย 100 km/year จาก AIEE ที่เสาสูงโดยเฉลี่ย 30 m จะได้

$$N_l = \frac{62}{30} TD \quad \text{ครั้ง}/100 \text{ km} \cdot \text{year} \quad (3.5)$$

จาก Burgsdorf , h เป็นความสูงของเสาในช่วง 25 – 30 m

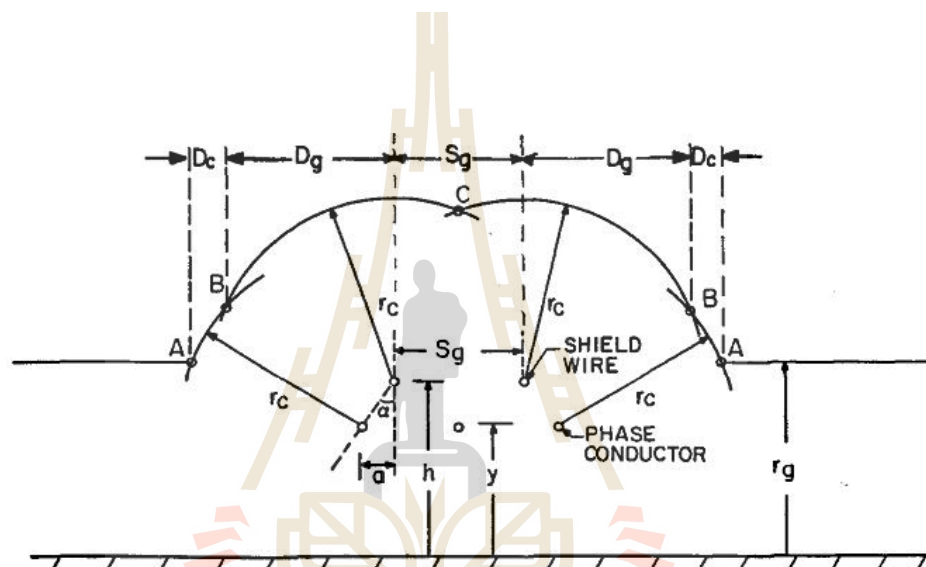
$$N_l = \frac{2.7}{30} h \cdot TD \quad \text{ครั้ง}/100 \text{ km} \cdot \text{year} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.18 แผนที่แสดงวันได้ยินเสียงฟ้าร้องต่อปี (TD) (สุรพล, 2535)

3.3.4. สายดินชิงอากาศ (Overhead ground wire: OHWG)

การป้องกันฟ้าผ่าของระบบสายส่งกำลังไฟฟ้า จากการถูกฟ้าผ่าโดยตรง กระทำได้โดยใช้ระบบสายดินชิงอากาศ ประกอบด้วย สายดินชิงอากาศ และการต่อสายดิน การป้องกันที่ล้มเหลวอาจทำให้เกิดฟ้าผ่าลงสายตัวนำ หรือสายเฟสโดยตรง ดังนั้นจึงมีการนำเสนอวิธีการ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$s = \sin^{-1} \frac{c}{2r_c} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{a^2 + (h-y)^2}}{2r_c} = \sin^{-1} \frac{(h-y)\sqrt{1 + \tan^2 \gamma}}{2r_c}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{r_g - y}{r_c}$$

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{a}{h-y}$$

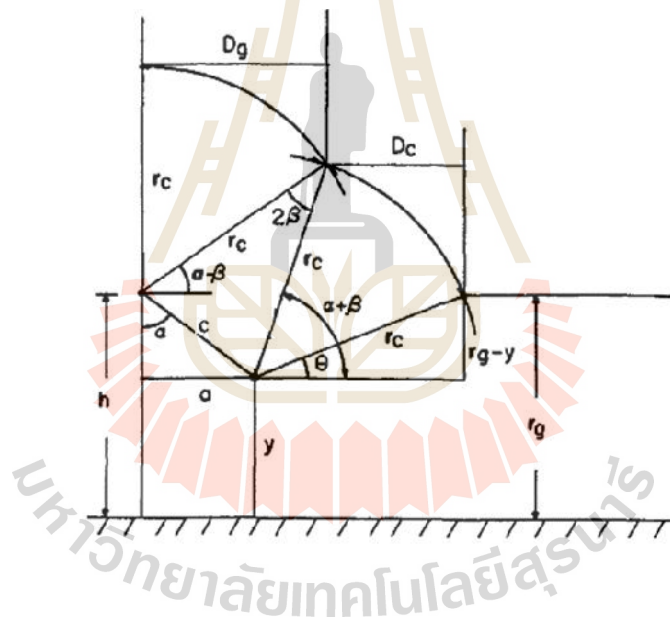
$$\text{เมื่อ } a = \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2}$$

ระยะ D_c และ D_g คือ

$$D_c = r_c [\cos \alpha - \cos(\alpha + \beta)] \quad (3.10)$$

$$D_g = r_c \cos(\alpha - \beta) \quad (3.11)$$

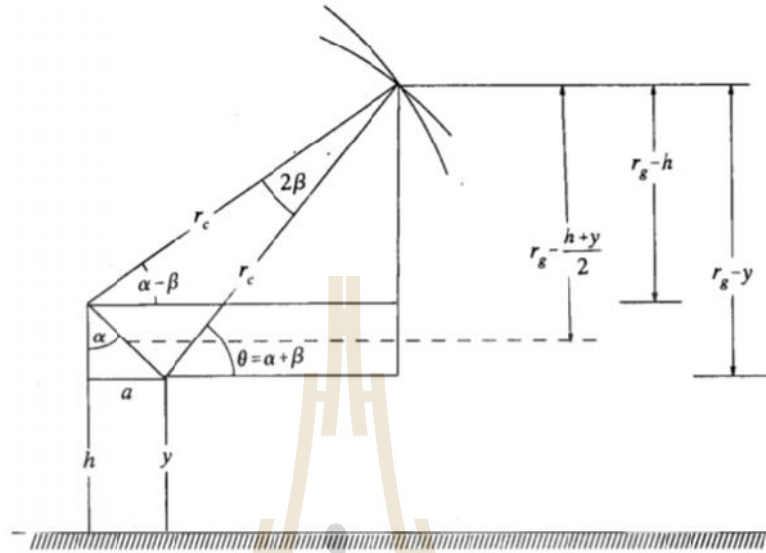
ถ้า r_g น้อยกว่าหรือเท่ากับ y ให้ เท่ากับ 0



รูปที่ 3.20 สายป้องกัน และสายตัวนำหนึ่งด้าน (Hileman, 1999)

มุมการป้องกันที่สมบูรณ์ (Perfect shielding angle) คือ มุมที่ทำให้อัตราการวางไฟที่เกิดจากป้องกันล้มเหลว (Shielding failure flashover rate: SFFOR) มีค่าเป็นศูนย์ จากสมการที่ 3.12 ถ้า D_c เท่ากับศูนย์ จะทำให้ค่า SFFOR เป็นศูนย์

$$SFFOR = 2N_g L \int_{I_c}^{I_m} D_c f(I) dI \tag{3.12}$$



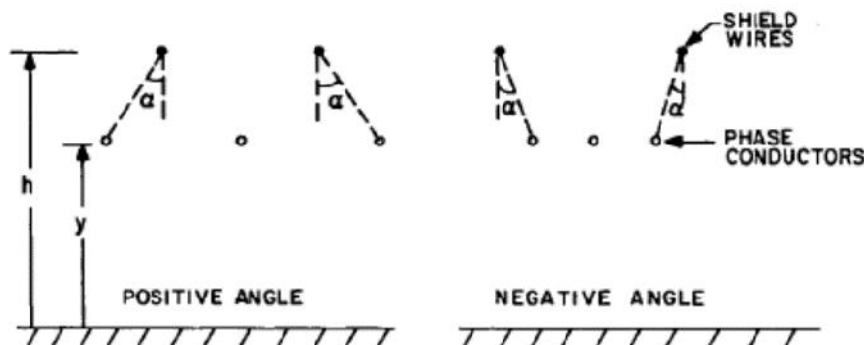
รูปที่ 3.21 การคำนวณหามุมการป้องกันที่สมบูรณ์ (Hileman, 1999)

จากรูปที่ 3.21 มุมการป้องกันที่สมบูรณ์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.13

$$r_p = \frac{r_g - (h + y)/2}{r_c} = \frac{r_g}{r_c} - \frac{1}{r_c} \left(\frac{h + y}{2} \right) \tag{3.13}$$

มุมที่คำนวณได้จะมีทั้งบวกและลบ ซึ่งความหมายของมุมบวกและลบแสดงในรูป

ที่ 3.22




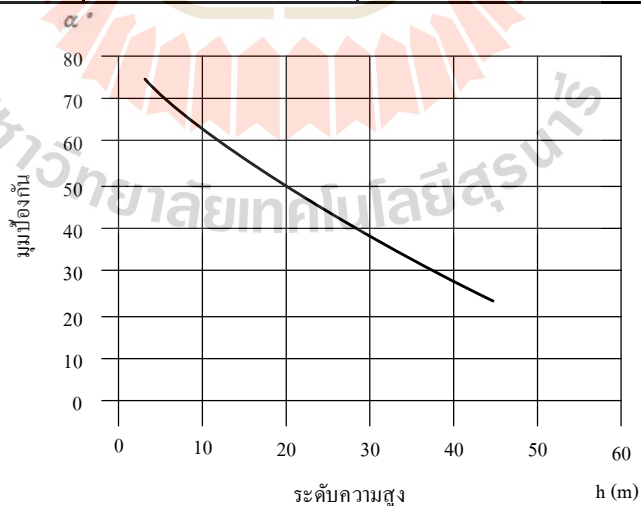
รูปที่ 3.22 ความหมายของมุมป้องกัน (Hileman, 1999)

- วิธีทรงกลมกลิ้ง

วิธีทรงกลมกลิ้งใช้เพื่อระบุบริเวณป้องกัน หรือโครงสร้าง ที่ไม่เหมาะสมที่จะใช้ มุมป้องกัน รัศมีที่ใช้ในทรงกลมกลิ้งสามารถเลือกตามระดับการป้องกันที่แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าตามระดับการป้องกัน (คณะกรรมการวิชาการสาขา วิศวกรรมไฟฟ้า, 2550)

ระดับ การป้องกัน	กระแส สูงสุด kA	วิธีป้องกัน		
		วิธีมุมป้องกัน	วิธีทรงกลมกลิ้ง รัศมี R (m)	วิธีตาข่าย ขนาด (m)
1	2.9		20	5
2	5.4		30	10
3	10.1		45	15
4	15.7		60	20

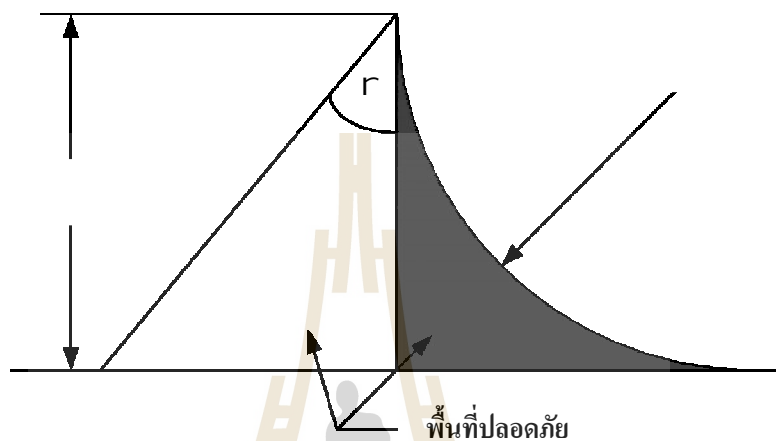


หมายเหตุ

1) ค่าในกราฟที่แทนด้วย ไม่สามารถใช้วิธีมุมป้องกันได้ กรณีนี้ให้ใช้วิธีทรงกลมกลิ้งหรือวิธีตาข่าย

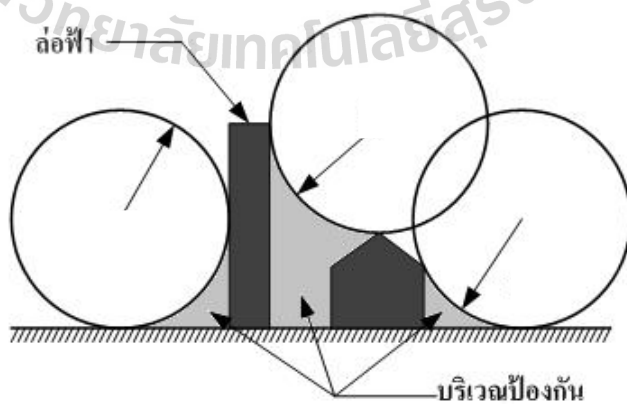
2) h คือความสูงของตัวนำล่อฟ้าเหนือพื้นที่ที่ต้องการป้องกัน

การจัดวางตำแหน่งตัวนำล่อฟ้าตามข้อกำหนดในตารางที่ 3.2 ในการออกแบบระบบตัวนำล่อฟ้า สามารถใช้ร่วมกันได้ รูปที่ 3.23 แสดงพื้นที่การป้องกันโดยวิธี มุมป้องกัน และทรงกลมกลิ้ง



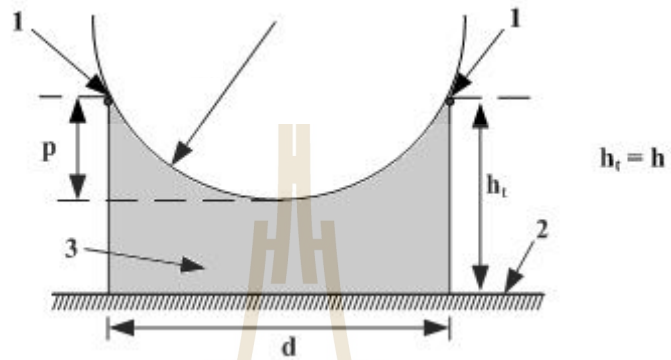
รูปที่ 3.23 พื้นที่การป้องกัน วิธีมุมป้องกัน และทรงกลมกลิ้ง

การใช้วิธีทรงกลมกลิ้งบนและรอบสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ทรงกลมรัศมี R จะกลิ้งคืบบนและรอบๆ สิ่งปลูกสร้างจนสัมผัสถึงพื้นดิน หรือสัมผัสกับโครงสร้างที่อยู่เหนือพื้นดิน ถ้าทรงกลมสัมผัสกับผิวของโครงสร้างใด บริเวณนั้นมีโอกาสที่จะถูกฟ้าผ่า จึงจำเป็นที่จะต้องมีการป้องกันในบริเวณนั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การออกแบบตัวนำล่อฟ้าของระบบป้องกันฟ้าผ่าตามวิธีทรงกลมกลิ้ง

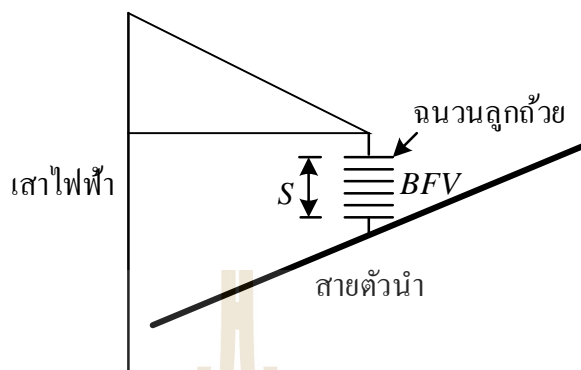
$$p = R - \left[R^2 - (d/2)^2 \right]^{1/2}$$



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$BFV = K_1 + \left(\frac{K_2}{t^{0.75}} \right)$$

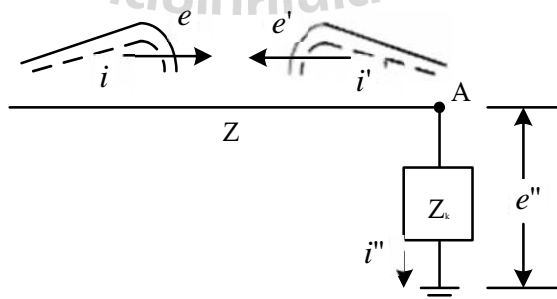
เมื่อ $K_1 = 400xS$ และ $K_2 = 700xS$



รูปที่ 3.26 แรงดันวาทไฟย้อนกลับ

3.4. การวิเคราะห์คลื่นจร

คลื่นจรหรือการแพร่กระจายของแรงดันเกินชั่วขณะ มีสาเหตุมาจากการเกิดฟ้าผ่าที่สายตัวนำ, การวาทไฟย้อนกลับจากสายดินจึงอากาศ หรือการตัดต่อวงจรเซอร์กิตเบรกเกอร์ของระบบ ทำให้เกิดแรงเกินชั่วขณะในสายส่งและเคลื่อนที่ไปตามสายตัวนำ คลื่นจรในรูปของกระแส และแรงดันจะแพร่กระจายออกจากจุด หรือตำแหน่งที่เกิดการรบกวน เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างอุปกรณ์ หรือสายส่ง ที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ จะทำให้คลื่นบางส่วนหักเหผ่านรอยต่อเคลื่อนที่ต่อไป และส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับ ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 วงจรสำหรับวิเคราะห์สมการคลื่นจร

พิจารณาจากรูปที่ 3.27 ค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของตัวนำ Z และ อิมพีแดนซ์ Z_k ซึ่งอาจเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่เป็นสายตัวนำที่ต่างกัน หรืออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยค่าเสรีจิมพีแดนซ์ของตัวนำ สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 3.16

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.16)$$

สำหรับสายจ่ายพาดอากาศ ค่าตัวเหนี่ยวนำ (L) และค่าตัวเก็บประจุ (C) จากสมการที่ 3.17 และสมการที่ 3.18

$$L = 0.2 \ln \frac{2h}{r} \quad (\mu\text{H/m}) \quad (3.17)$$

$$C = \frac{10^{-3}}{18 \ln \frac{2h}{r}} \quad (\mu\text{F/m}) \quad (3.18)$$

เมื่อ h คือ ค่าความสูงระหว่างตัวนำกับพื้นดิน
 r คือ รัศมีของสายตัวนำ

กำหนดให้แรงดัน และกระแสเสรีจิมพีแดนซ์ที่จุดเริ่มต้น คือ e และ i เมื่อคลื่นจรเคลื่อนที่ถึงจุด A ที่เปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์ ทำให้เกิดแรงดัน และกระแสสะท้อนกลับ คือ e' และ i' กับแรงดัน และกระแสหักเหผ่านรอยต่อ คือ e'' และ i'' ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน กระแส และเสรีจิมพีแดนซ์ที่จุดต่างๆ แสดงในสมการที่ 3.19, สมการที่ 3.20 และ สมการที่ 3.21

$$e = iZ \quad (3.19)$$

$$e' = i'Z \quad (3.20)$$

$$e'' = i''Z_k \quad (3.21)$$

ที่จุดเชื่อมต่อระหว่างอิมพีแดนซ์ A สามารถเขียนสมการแรงดัน และกระแสได้ ดังนี้

$$e'' = e + e' \quad (3.22)$$

$$i'' = i - i' \quad (3.23)$$

ดังนั้นเมื่อต้องการหาค่าแรงดันหักเหผ่านรอยต่อ e'' จากแรงดันเสรีจิมพีแดนซ์ที่จุดเริ่มต้น e สามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 e &= e + e' = e + i'Z = e + (i - i'')Z \\
 &= 2e - i''Z = 2e - \frac{Z}{Z_k} e''
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

ดังนั้น

$$e'' = \frac{2Z_k}{Z + Z_k} e \tag{3.25}$$

เช่นเดียวกัน

$$i'' = \frac{e''}{Z_k} = \frac{2e}{Z + Z_k} = \frac{2Z}{Z + Z_k} i \tag{3.26}$$

$$e' = e'' - e = \frac{Z_k - Z}{Z + Z_k} e \tag{3.27}$$

$$i' = \frac{e'}{Z} = \frac{Z_k - Z}{Z + Z_k} i \tag{3.28}$$

กำหนดให้ $Z_k = 0$ หรือลัดวงจรที่จุดต่อ A จะได้

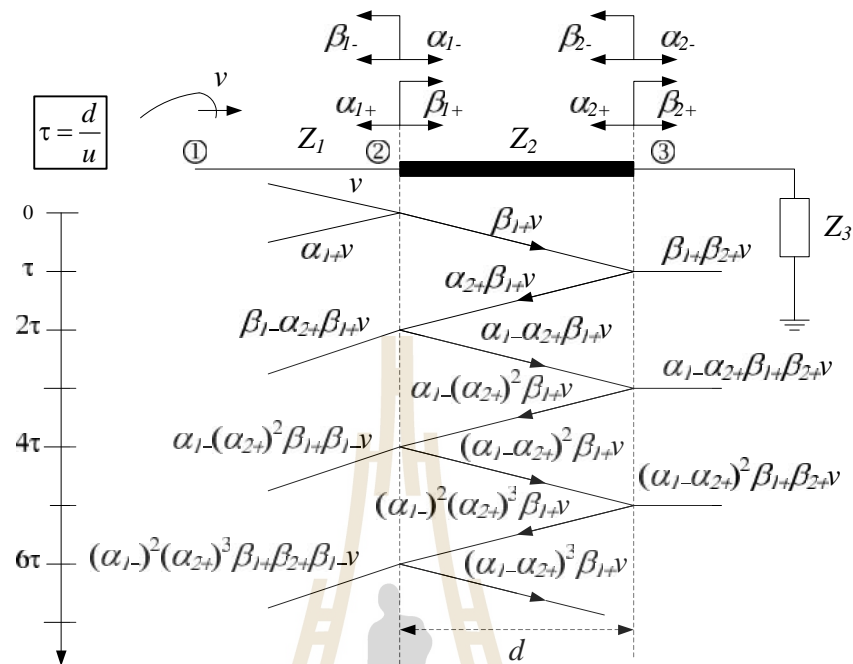
$$\begin{aligned}
 e'' &= 0 & i'' &= 2i \\
 e' &= -e & i' &= -i
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

ในกรณีที่จุดต่อ A เปิดวงจร หรือ $Z_k = \infty$ จะได้

$$\begin{aligned}
 e'' &= 2e & i'' &= 0 \\
 e' &= e & i' &= i
 \end{aligned} \tag{3.30}$$

การพิจารณาคลื่นจรเพื่อศึกษาผลของแรงดันเกินในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจะพิจารณาผลของการรบกวนในรูปของแรงดันเท่านั้น

ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ามีสายส่งเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายมีจุดเชื่อมต่อมากมายทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าอิมพีแดนซ์หลายจุด การสะท้อน และหักเหของคลื่นจรจะมีลักษณะกลับไปกลับมา หากพิจารณาสัมประสิทธิ์การหักเหของคลื่นจรผ่านรอยต่อ เขียนแทนด้วย “S” และสัมประสิทธิ์การสะท้อนของคลื่นจร เขียนแทนด้วย “r” การวิเคราะห์ต้องนำผลของความยาวของสายส่งและความเร็วของคลื่นจรมาร่วมพิจารณาด้วย ดังรูปที่ 3.28 แสดง ไดอะแกรมตารางไขว้ที่พิจารณาโดยบุลิจึงเรียกว่า “ไดอะแกรมตารางไขว้บุลิจึง”



รูปที่ 3.28 โคอะแกรมตารางไขว้ของบุลี (ชนัดชัย, 2551)

จากโคอะแกรมตารางไขว้ของบุลี ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และหักเหในทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นจรได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 S_{1+} &= \left(\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) & r_{1+} &= \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) \\
 S_{1-} &= \left(\frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \right) & r_{1-} &= \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) \\
 S_{2+} &= \left(\frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) & r_{2+} &= \left(\frac{Z_3 - Z_2}{Z_2 + Z_3} \right) \\
 S_{2-} &= \left(\frac{2Z_2}{Z_2 + Z_3} \right) & r_{2-} &= \left(\frac{Z_2 - Z_3}{Z_2 + Z_3} \right)
 \end{aligned}$$

และ τ เป็นระยะเวลาการเคลื่อนที่ของคลื่นจร, d คือระยะความยาวของสายส่ง และ u คือความเร็วของคลื่นจร ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ดังสมการที่ 3.31

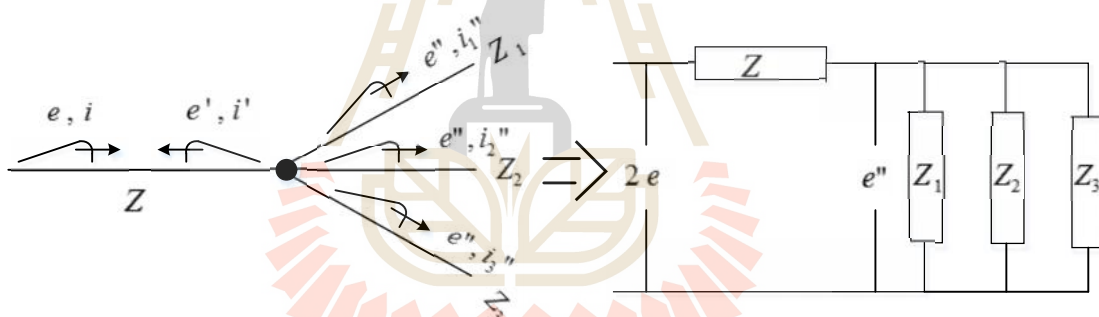
$$u = \sqrt{LC} \tag{3.31}$$

3.4.1 การวิเคราะห์คลื่นจรที่จุดต่อมีอิมพีแดนซ์หลายค่า

สำหรับกรณีจุดต่อหรือสถานีไฟฟ้าที่มีค่าอิมพีแดนซ์หลายค่าดังรูปที่ 3.29 จากรูปสมมุติให้ที่จุดต่อมีสายส่งหรืออิมพีแดนซ์แตกต่างกัน 4 ค่า กำหนดให้แรงดันเสิร์จเกิดขึ้นที่อิมพีแดนซ์ Z และเคลื่อนที่ไปตามสายตัวนำในลักษณะเป็นคลื่นจร ถึงจุดที่เชื่อมต่อกับอิมพีแดนซ์ Z_1, Z_2 และ Z_3 คลื่นจรที่หักเห หรือค่าแรงดันเสิร์จที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ Z_1, Z_2 และ Z_3 จะมีค่าเท่ากันคือ

$$e'' = \frac{2Z_i}{Z + Z_i} e \tag{3.32}$$

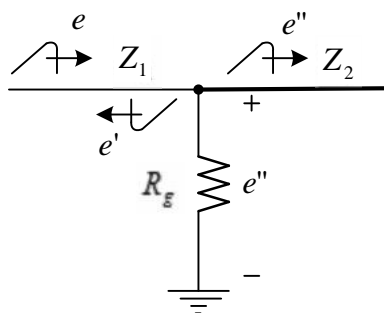
เมื่อ $Z_i = \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$



รูปที่ 3.29 วงจรเทวินินกรณีคลื่นจรเคลื่อนที่ถึงจุดต่อระหว่างสายตัวนำหลายเส้น

3.4.2 การวิเคราะห์คลื่นจรในสายดินซึ่งอากาศกรณีคลื่นจรเคลื่อนที่ถึงเสาส่ง

เมื่อเกิดคลื่นจรในสายดินซึ่งอากาศ จากการเกิดฟ้าผ่า คลื่นจรจะเคลื่อนที่ไปตามสายดินซึ่งอากาศถึงตำแหน่งของเสา ที่มีจุดต่อสายตัวนำลงดิน ถ้าไม่คิดค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำที่เชื่อมต่อกับรากสายดิน การสะท้อนกลับ และการหักเหของคลื่นจรจะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 วงจรการวิเคราะห์คลิ่นจรที่จุดเชื่อมต่อตัวนำลงดิน

เมื่อกำหนดให้ Z_1 คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำที่จุดเริ่มต้นของแรงดันเสิร์จ Z_2 คือค่าอิมพีแดนซ์ของสายตัวนำที่จุดเชื่อมต่อ และ R_g คือค่าความต้านทานดิน ค่าแรงดันหักเห และแรงดันสะท้อนกลับ ของคลิ่นจร สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.33 และ 3.34

$$e'' = \frac{2Z_2 R_g}{Z_2 R_g + Z_1 R_g + Z_1 Z_2} e \quad (3.33)$$

$$e' = \frac{Z_2 R_g - Z_1 R_g - Z_1 Z_2}{Z_2 R_g + Z_1 R_g + Z_1 Z_2} e \quad (3.34)$$

3.4.3 การวิเคราะห์คลิ่นจรที่จุดเชื่อมต่อกับดักเสิร์จ

กรณีที่เกิดฟ้าผ่าลงสายตัวนำ หรือ ฟ้าผ่าลงสายดินซึ่งอากาศแล้วทำให้เกิดความฟุ้งย้อนกลับมายังสายตัวนำ ทำให้เกิดคลิ่นจรเคลื่อนที่ไปตามสายตัวนำ ไปยังอุปกรณ์ของระบบไฟฟ้า ทำให้เกิดความเสียหาย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหาย อุปกรณ์ป้องกันแรงดันเกินในระบบไฟฟ้ากำลังนี้เรียกว่า “กับดีกเสิร์จ”

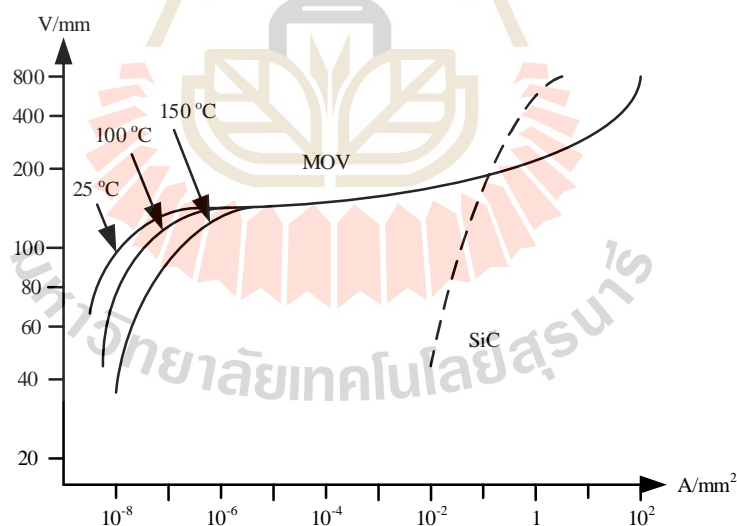
กับดีกเสิร์จ คืออุปกรณ์ป้องกันการรบกวนอย่างฉับพลัน หรือกระแส - แรงดันเกินฉับพลัน ให้กับอุปกรณ์ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า โดยตัดการรบกวน หรือลดขนาดการรบกวน เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ หรือระบบไฟฟ้า อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จแบ่งออกเป็นประเภทหลักๆ ได้ 2 ประเภท คือ ชนิดตัดการรบกวน (Expulsion type) และ ปรับลดขนาดการรบกวน (Valve type) โดยอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จชนิดตัดการรบกวนอาจมีใช้งานอยู่บ้าง แต่จะไม่มีมีการใช้งาน

ในระยะยาว สำหรับชนิดตัดการรบกวนปรับลดขนาดการรบกวน จะอาศัยคุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเป็นความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ Silicon carbide (SiC) และ Metal oxide (MO)

อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ SiC จะประกอบด้วย สปาร์กแกป (Spark gap) ต่ออนุกรมกับสารกึ่งตัวนำ SiC โดยในสภาวะปกติสปาร์กแกปจะมีค่าอิมพีแดนซ์สูง เมื่อเกิดเสิร์จเข้ามาในระบบสปาร์กแกปจะทำหน้าที่เป็นสวิทช์เชื่อมต่อกับสารกึ่งตัวนำ SiC ซึ่งค่าความต้านทานของ SiC จะขึ้นอยู่กับค่าของกระแสที่ไหลผ่านสปาร์กแกปตามคุณลักษณะ V - I

อุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ MO เป็นอุปกรณ์ที่มีความทันสมัยในระบบไฟฟ้าแรงสูง มีคุณลักษณะ V - I ที่ไม่เป็นเชิงเส้นสูง ทำจากสารกึ่งตัวนำ Zinc oxide (ZnO) โดยอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จชนิดนี้จะไม่มีการเชื่อมต่อกับสปาร์กแกป

กราฟคุณลักษณะ V - I ของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จแบบปรับลดขนาดการรบกวน ทั้งสองชนิดแสดงดังรูปที่ 3.31 ซึ่งจะเห็นค่าความแตกต่างของกระแสรั่วไหลของทั้งสองชนิด



รูปที่ 3.31 กราฟคุณลักษณะ V - I ของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ SiC และ ZnO

การใช้สปาร์กแกปในกับดักเสิร์จเพื่อช่วยตัดกระแสรั่ว ที่เกิดจากแรงดันปกติของระบบและผ่านความต้านทานของ SiC เป็นวิธีที่ได้ผลดี แต่การใช้สปาร์กแกปมีข้อเสียหลายประการที่สำคัญ ได้แก่

- สปาร์กแกปจะทำให้เกิดแรงดันประกายข้าม (Sparkover voltage) ซึ่งไม่เป็นผลดีต่อการป้องกันแรงดันเสิร์จ เนื่องจากจะทำให้ค่ายอดแหลม

- สปาร์กแกปอาจทำงานผิดพลาดและมีแรงดันไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากมลภาวะทางผิวนอกของกัปกักเสิร์จ

- สปาร์กแกปต้องมีระบบ grading ที่ทำให้การผลิตมีความซับซ้อนขึ้นหากเปรียบเทียบกับการใช้แท่ง ZnO เพียงอย่างเดียว

คุณสมบัติของ ZnO มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานให้กับอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ โดยสามารถสรุปออกเป็นข้อๆ ได้ 4 ข้อ ดังนี้

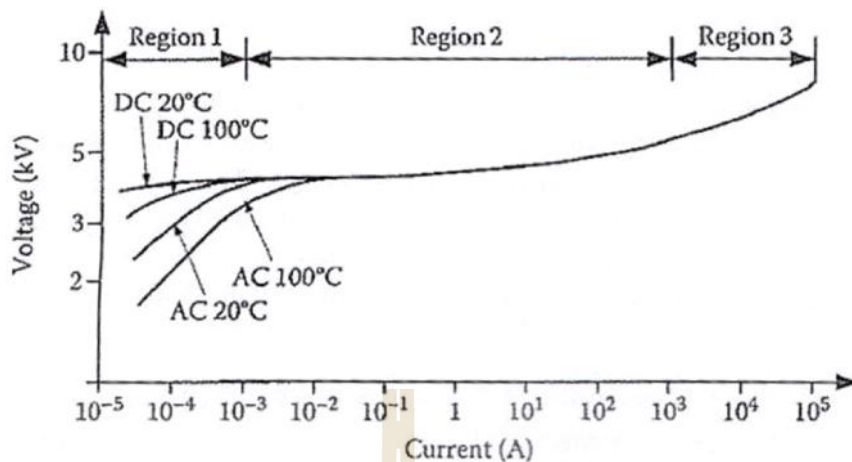
- ทำให้การกำหนดแรงดันเกินที่ต้องการป้องกันให้มีความเที่ยงตรงยิ่งขึ้นเนื่องจากสามารถรักษาระดับแรงดันได้ค่อนข้างคงที่ ในขณะที่นำกระแสที่เกิดจากแรงดันเกิน

- ในขณะที่นำกระแส สามารถช่วยไม่ให้เกิดแรงดันกระชาก เนื่องจากไม่มีการเกิดประกายข้าม ทำให้แรงดันเกินในช่วงหน้าคลื่นค่อนข้างเรียบ

- การตัดกระแสตามให้เป็นศูนย์ ใช้เวลาน้อยกว่า SiC มาก จึงช่วยลดการรบกวนระบบของสภาวะชั่วคราว

- ความต้านทานของ ZnO มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิแบบลบซึ่งมีผลของอุณหภูมิมีน้อยมาก ดังรูปที่ 3.31 ในขณะที่นำกระแสสูง จึงทำให้กัปกักเสิร์จสามารถนำกระแสลงสู่ดิน และถ่ายเทพลังงานของเสิร์จลงสู่ดินได้มากกว่าแบบ SiC

คุณลักษณะ V – I ของอุปกรณ์ป้องกันเสิร์จ ZnO สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 3.32



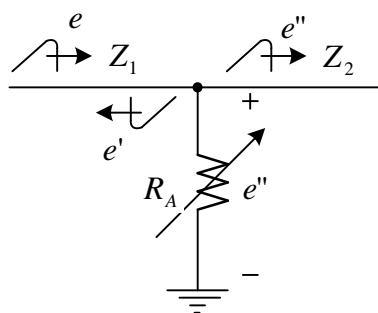
รูปที่ 3.32 คุณลักษณะ $V - I$ ของอุปกรณ์ป้องกันแรงดัน ZnO (Martinez, 2010)

ช่วงที่ 1 ที่กระแส I น้อยกว่า 1 mA และเป็นช่วงเริ่มสะสมประจุ

ช่วงที่ 2 ที่กระแส I มีค่าระหว่าง 1 mA ถึง 1000 หรือ 2000 A เป็นช่วงเริ่มความต้านทานกระแสที่มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น

ช่วงที่ 3 ที่กระแส I มีค่าระหว่าง 1 kA ถึง 100 kA เป็นช่วงที่มีกระแส I สูงมากมีคุณลักษณะความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับ V หรือ มีค่าความต้านทานบริสุทธิ์

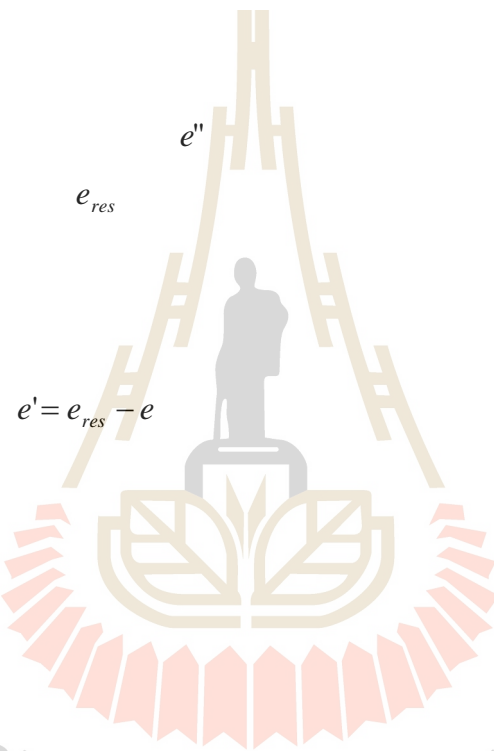
จะเห็นได้ว่ากับดักเสิร์จมีค่าความต้านทานแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าแรงดันและกระแสเสิร์จ ที่เคลื่อนที่ไปตามสายตัวนำ ดังนั้นการวิเคราะห์คลื่นจรที่จุดติดตั้งกับดักเสิร์จจึงมีลักษณะเช่นเดียวกับ การวิเคราะห์คลื่นจรที่จุดเชื่อมต่อกับสายดิน ดังรูปที่ 3.33

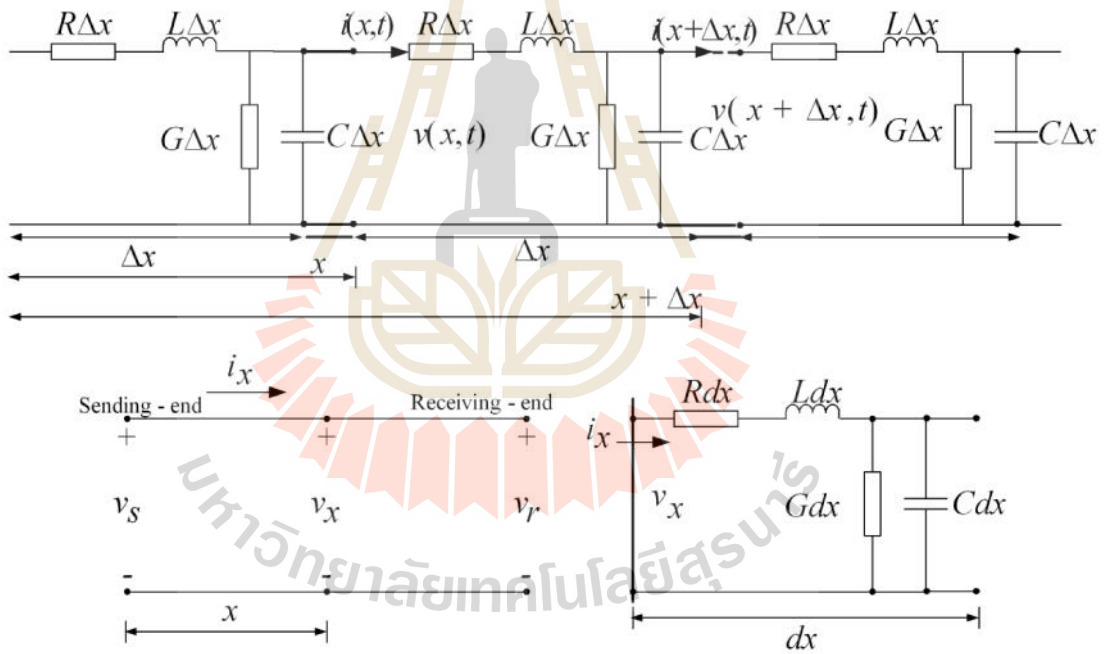


รูปที่ 3.33 วงจรการวิเคราะห์คลื่นจรที่จุดเชื่อมต่อกับดักเสิร์จ

$$e'' = \frac{2Z_2 R_A}{Z_2 R_A + Z_1 R_A + Z_1 Z_2} e$$

$$e' = \frac{Z_2 R_A - Z_1 R_A - Z_1 Z_2}{Z_2 R_A + Z_1 R_A + Z_1 Z_2} e$$





$$\frac{\partial}{\partial x} v(x, t) = -Ri(x, t) - L \frac{\partial}{\partial t} v(x, t)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} i(x, t) = -Gv(x, t) - C \frac{\partial}{\partial t} i(x, t) \quad (3.39)$$

เมื่อกำหนดให้ $i(x, t)$ คือกระแสเสิร์จ, $v(x, t)$ คือแรงดันเสิร์จ และ R, L, G, C คือค่าพารามิเตอร์ของสายส่ง จากสมการที่ 3.38 และ 3.39 เมื่อไม่คิดการสูญเสียในสายส่ง โดย R, G มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

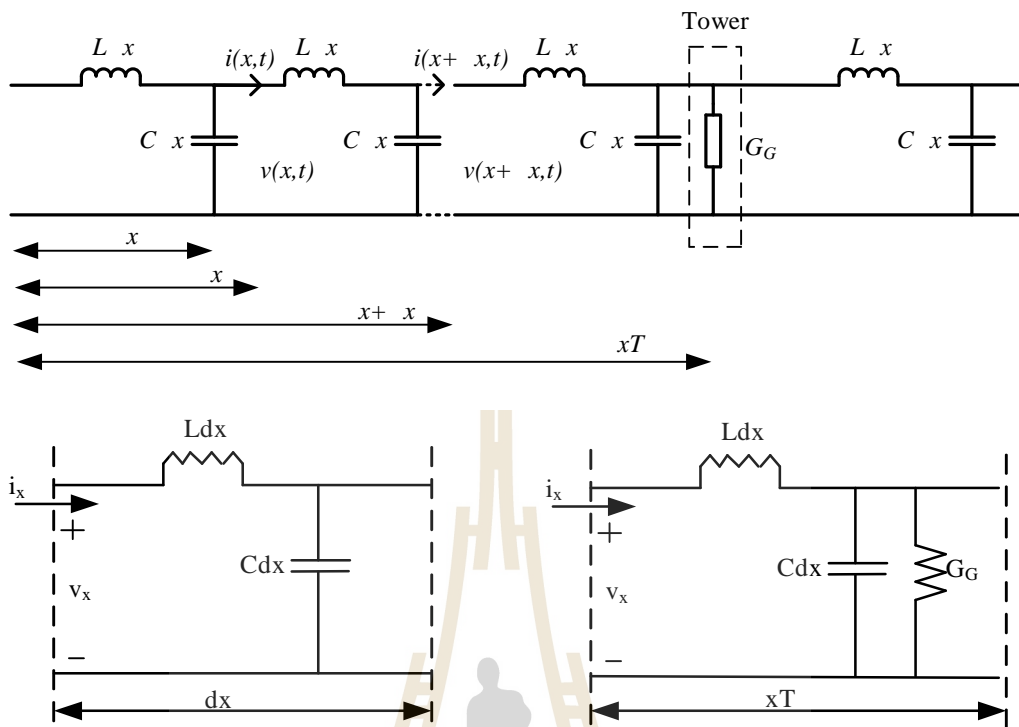
$$\frac{\partial}{\partial x} v(x, t) = -L \frac{\partial}{\partial t} i(x, t) \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} i(x, t) = -C \frac{\partial}{\partial t} v(x, t) \quad (3.41)$$

จากสมการที่ 3.40 และ 3.41 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง หรือสมการไฮเพอร์โบลิกได้ดังสมการที่ 3.42 เรียกสมการนี้ว่า “สมการคลื่นจร”

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2}{\partial x^2} v(x, t) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} v(x, t) \quad (3.42)$$

การวิเคราะห์คลื่นจรที่เกิดขึ้นในสายดินจึงอากาศ ใช้หลักการวิเคราะห์จากสมการคลื่นจรเช่นเดียวกัน ในกรณีที่คลื่นจรเคลื่อนที่ถึงจุดเชื่อมต่อสายตัวนำลงดิน สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเปลี่ยนแปลงไปเฉพาะจุดที่มีการเชื่อมต่อ ดังรูปที่ 3.35



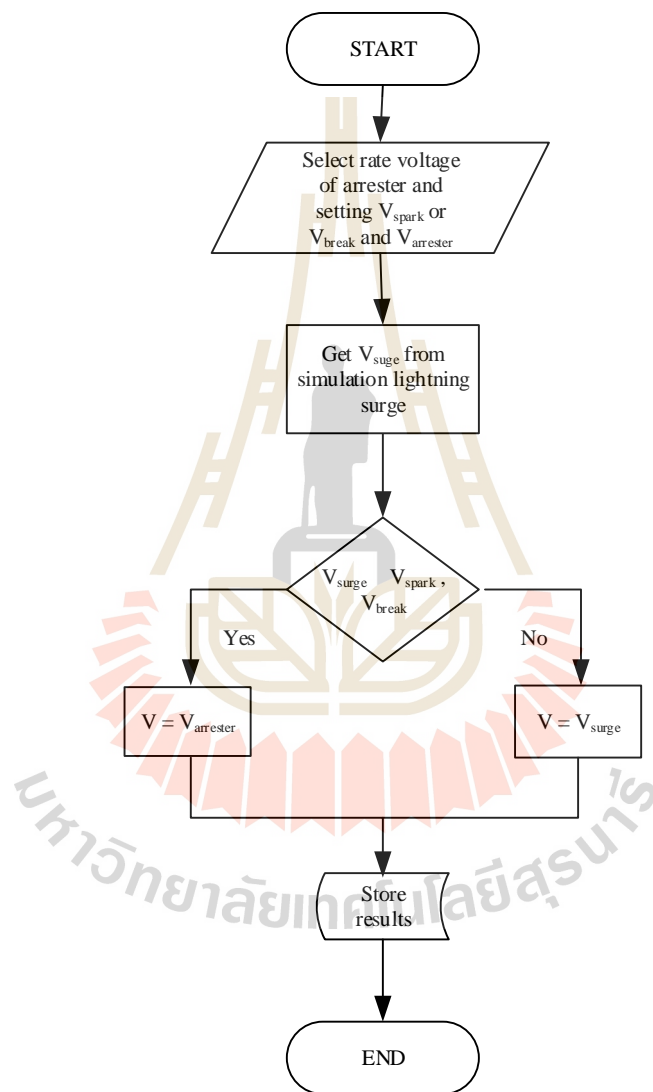
รูปที่ 3.36 แบบจำลองสายดินซึ่งอากาศที่จุดเชื่อมต่อรากสายดิน (ก่อเกียรติ และ รัชชชัย, 2560)

จากรูปที่ 3.36 ใช้กฎกระแส และแรงดันของเคอร์ชอฟฟ์ มาวิเคราะห์ที่ตำแหน่งของจุดเชื่อมต่อรากสายดิน สมการแรงดันเช่นเดียวกับสมการที่ 3.40 ส่วนสมการกระแสจะได้

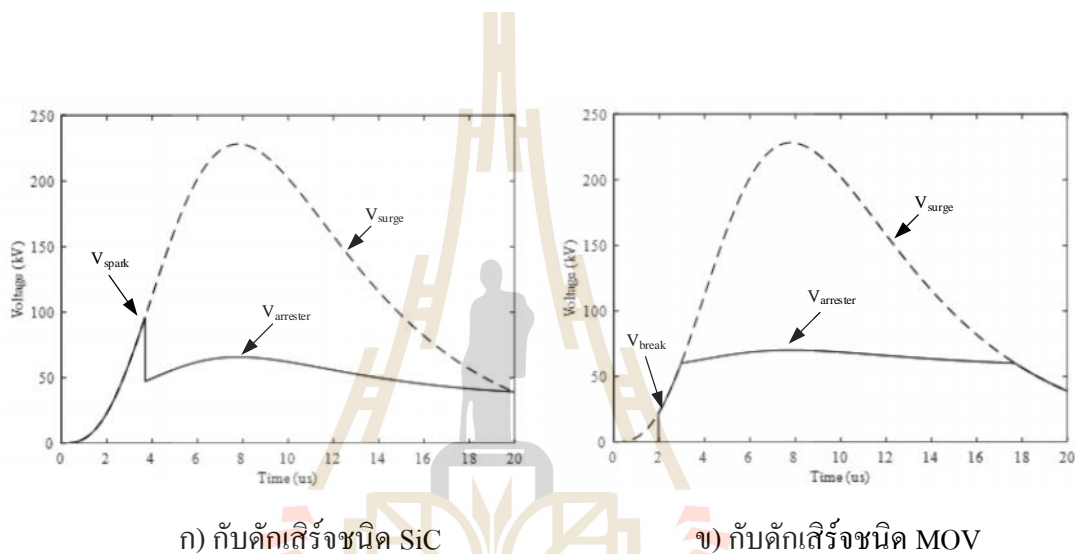
$$\frac{\partial}{\partial x} i(x,t) = -G_G v(x,t) - C \frac{\partial}{\partial t} v(x,t) \tag{3.43}$$

จากสมการที่ 3.36 และ 3.40 เขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองในตำแหน่งจุดเชื่อมต่อรากสายดินดังสมการที่ 3.43

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} v(x,t) = LG \frac{\partial}{\partial t} v(x,t) + LC \frac{\partial^2}{\partial t^2} v(x,t) \tag{3.43}$$



ขั้นตอนแรก เลือกชนิด และระดับแรงดันใช้งานของก๊ับดักเสิร์จ กำหนดขนาดแรงดันสปาร์คข้าม (V_{spark}) สำหรับก๊ับดักเสิร์จชนิด SiC และขนาดแรงดันเริ่มนำกระแส (V_{break}) สำหรับก๊ับดักเสิร์จชนิด MOV และกำหนดค่าแรงดันตกคร่อมสูงสุดของก๊ับดักเสิร์จ ($V_{arrester}$) ขณะนำกระแส รับค่าแรงดันเสิร์จ เปรียบเทียบระดับแรงดันเสิร์จ กับ แรงดันสปาร์คข้าม หรือ แรงดันเริ่มนำกระแส หากแรงดันเสิร์จมีค่าน้อยกว่า แรงดันตกคร่อมก๊ับดักเสิร์จจะมีค่าเท่ากับแรงดันเสิร์จ แต่ถ้ามีค่าสูงกว่า แรงดันตกคร่อมก๊ับดักเสิร์จจะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมก๊ับดักเสิร์จตามคุณลักษณะของก๊ับดักเสิร์จ ดังรูปที่ 3.38



รูปที่ 3.38 คุณลักษณะของก๊ับดักเสิร์จ

3.5. การวิเคราะห์สนามไฟฟ้า

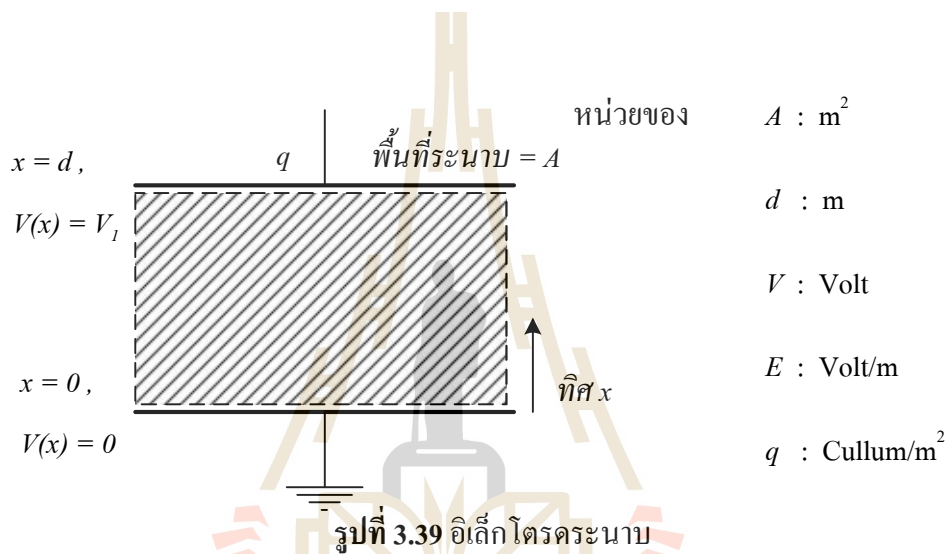
สนามไฟฟ้าเป็นสิ่งสำคัญในการบ่งชี้ความเครียดทางไฟฟ้าของฉนวน ความเข้มและการกระจายของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของอิเล็กโตรด ชนิดของฉนวนและค่าเปอร์มิตทิวิตีของฉนวน (Permittivity : ϵ) การออกแบบฉนวนของระบบไฟฟ้าแรงสูง จำเป็นต้องทราบลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าในฉนวน และค่าความคงทนของสนามไฟฟ้า วิธีคำนวณหาสนามไฟฟ้าโดยทั่วไป เริ่มจากการแก้สมการของ Poisson หรือของ Laplace แล้วแต่กรณี ลักษณะทั่วไปของสมการ คือ

$$\text{div}(-\epsilon \text{ grad } V) = \text{div } D = \dots \quad (3.45)$$

เมื่อ D คือ ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าเป็นปริมาณเวกเตอร์, ... คือความหนาแน่นของประจุ และ V คือ แรงดันของจุดนั้นเทียบกับจุดอ้างอิง

การวิเคราะห์หาสนามไฟฟ้า เริ่มจากเกรเดียนของศักย์ไฟฟ้า (∇V) หมายถึงค่าการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าสูงสุดต่อหน่วยความยาวในทิศทางที่เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าสูงสุด และความสัมพันธ์กับเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (E) ดังนี้

$$E = -\text{grad } V = -\nabla V \quad (3.46)$$



เมื่อนำค่าเกรเดียนไปแทนในสมการที่ 3.45 และจัดให้อยู่ในระบบ xyz จะได้สมการของ Poisson ($\dots \neq 0$) หรือของ Laplace ($\dots = 0$)

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{-\dots}{\epsilon} \quad (3.47)$$

จากรูปที่ 3.39 ถ้าให้ฉนวนไม่มีประจุค้างอยู่ภายใน และมีสนามไฟฟ้าอยู่ในแนวแกน x กล่าวคือไม่คิดผลของสนามไฟฟ้าบริเวณของอิเล็กโตรด ค่าสนามไฟฟ้า E ในแนวแกน x หาได้จากสมการที่ 3.47 ดังนี้

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = 0 \quad (3.48)$$

กำหนดให้ k_1 และ k_2 เป็นค่าคงที่ จากสมการที่ 3.48 จะได้

$$\frac{\partial V}{\partial x} = k_1 \quad (3.49)$$

$$V = k_1 x + k_2 \quad (3.50)$$

เงื่อนไขจากรูปที่ 3.39 $x = 0, V = 0$ และ $x = d, V = V_1$

ดังนั้น $k_2 = 0$ และ $k_1 = V_1/d$

นำไปแทนค่าในสมการที่ 3.48 จะได้

$$V = \frac{V_1}{d} \cdot x \quad (3.51)$$

$$\text{และ } E = -\nabla V = -\frac{V_1}{d} \quad (3.52)$$

E มีค่าเป็นลบ เพราะมีทิศสวนทางกับทิศของแนวแกน x จึงมีทิศชี้ไปจากด้านที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำกว่า และมีขนาดเท่ากับ V_1/d

3.6. ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง และระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่มักจะประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ต่าง ๆ ที่สอดคล้องกัน สมการเชิงอนุพันธ์เหล่านี้โดยปกติอยู่รูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้อยู่ในรูปแบบที่แตกต่างกัน และจำเป็นต้องแก้ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ต่างกัน การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ปกติแล้วจะทำโดย

(1) การใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง (Advanced mathematics) เพื่อหาผลเฉลยแม่นยำ (Exact solution)

(2) การใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลเฉลยโดยประมาณ (Approximate solution)

ประโยชน์จากการใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงจะก่อให้เกิดผลเฉลยแม่นยำที่ถูกต้องเที่ยงตรงตามตำแหน่งใดๆ ที่ต้องการ แต่โดยปกติสำหรับปัญหาทั่วไปแล้ว ผลเฉลยแม่นยำนั้นไม่สามารถหาได้ โดยเฉพาะกับปัญหาในทางปฏิบัติซึ่งเงื่อนไขขอบเขตและลักษณะรูปร่างของปัญหานั้นมีความซับซ้อน ความซับซ้อนของปัญหาดังกล่าวประกอบกับประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันทำให้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขได้รับความนิยมและใช้กันอย่างกว้างขวาง ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสามารถแก้ปัญหามีเงื่อนไขขอบเขตและรูปร่างลักษณะซับซ้อนได้เป็นอย่างดี แต่ในขณะเดียวกันจะให้ผลเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งบางตำแหน่งเท่านั้น ซึ่งหากต้องการทราบค่าที่ตำแหน่งอื่นๆ ก็จำเป็นต้องใช้หลักของการประมาณค่า นอกจากนี้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขยังก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่มีความผิดพลาด ซึ่งความผิดพลาดนั้นจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระเบียบวิธีการที่เลือกใช้ ประกอบกับความรู้และประสบการณ์ของผู้ใช้นั้นด้วย ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย อาจแบ่งได้เป็น 2 ระเบียบวิธีใหญ่ ๆ คือ ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite difference method) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ในบทนี้จะอธิบายระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่อง ซึ่งง่ายแก่การทำความเข้าใจก่อน

3.6.1. ชนิดของสมการ

เนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสำหรับปัญหาต่าง ๆ นั้นมีความหลากหลายและอยู่ในรูปแบบที่แตกต่างกัน และเพื่อเป็นการทำความเข้าใจระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในระดับพื้นฐาน จึงต้องศึกษาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองที่อยู่ในรูปแบบ ดังนี้

$$a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 u}{\partial xy} + c \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (3.53)$$

โดย a, b, c อาจเป็นค่าคงที่หรือฟังก์ชันของ x และ y ส่วน f อาจเป็นค่าคงที่หรือเป็นฟังก์ชันของ $x, y, u, \partial u/\partial x$ และ $\partial u/\partial y$ สามารถจำแนกสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (3.53) ออกเป็นชนิดต่าง ๆ กันได้ ดังต่อไปนี้

(1) สมการเอลลิปติก (Elliptic equation)

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (3.53) จะถูกเรียกว่าเป็นสมการเอลลิปติก หาก $b^2 - 4ac < 0$ ตัวอย่างของสมการในกรณีเช่นนี้ได้แก่สมการลาปลาซ (Laplace's equation) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (3.54)$$

(2) สมการพาราโบติก (Parabolic equation)

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (3.53) จะถูกเรียกว่าเป็นสมการพาราโบติก หาก $b^2 - 4ac = 0$ ตัวอย่างของสมการในกรณีเช่นนี้คือสมการการถ่ายเทความร้อนในแท่งโลหะยาวที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$k \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3.55)$$

โดย k แทนสัมประสิทธิ์การนำความร้อนซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ u แทนลักษณะการกระจายอุณหภูมิซึ่งเป็นตัวแปรตามที่ยื่นอยู่กับตัวแปรต้นอันประกอบด้วยโคออร์ดิเนต x ตามแนวความยาวของแท่งโลหะและเวลา t

(3) สมการไฮเพอร์โบติก (Hyperbolic equation)

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (3.51) จะถูกเรียกว่าเป็นสมการไฮเพอร์โบติก หาก $b^2 - 4ac > 0$ ตัวอย่างของสมการในกรณีเช่นนี้คือสมการ Telegraphist's equations ของการแพร่กระจายของแรงดันในสายส่ง ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$k^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.56)$$

โดย $k_2 = 1/LC$ เมื่อ L และ C คือ ค่าความเหนี่ยวนำ และค่าความจุ ของสายส่ง และ u แทนค่าของแรงดันที่แพร่กระจายในสายส่ง

3.6.2. เงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น

ผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (3.54), (3.55) และ (3.56) ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการเอลลิปติก พาราโบติก และไฮเพอร์โบติก ตามลำดับนั้น ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้น เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) หมายถึงเงื่อนไขที่กำหนดให้ที่ขอบเขตของปัญหานั้น เงื่อนไขขอบเขตสามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ คือ

(1) เงื่อนไขแบบดิริชเลต (Dirichlet condition) เป็นเงื่อนไขของการกำหนดค่าแปรตาม u ที่ขอบเขต

(2) เงื่อนไขแบบนอยมันน์ (Neumann condition) เป็นเงื่อนไขของการกำหนดค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งของตัวแปรตาม u ที่ขอบเขตนั้น

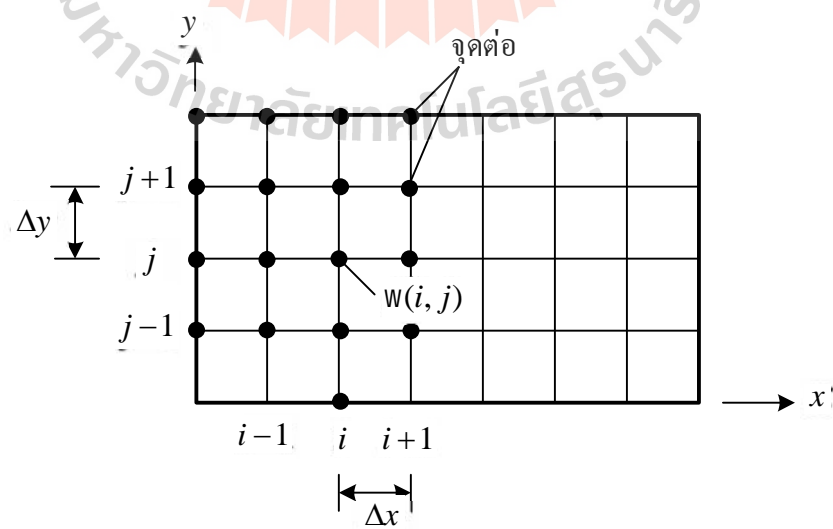
ส่วนเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) หมายถึงเงื่อนไขที่กำหนดให้ในตอนเริ่มต้นของการแก้ปัญหา

ทั้งเงื่อนไขขอบเขตและเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสมจะใช้ควบคู่ไปกับการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการเอลลิปติก พาราโบติก และไฮเพอร์โบติก

3.6.3. ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม

การใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม สำหรับหาผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาสามารถทำได้โดยใช้ขั้นตอน 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 สร้างตารางสี่เหลี่ยมลงในรูปร่างลักษณะของปัญหา กำหนดให้รูปร่างของปัญหาเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งอยู่ในระนาบ x - y ดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 การแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นตารางสี่เหลี่ยม

สี่เหลี่ยมเล็กๆที่ถูกสร้างขึ้นมีขนาด Δx และ Δy ในทางแกน Δx และ Δx ตามลำดับและต่อกันที่จุดต่อ ที่อยู่ตำแหน่งต่างๆกัน และจุดต่อนี้เอง เป็นตำแหน่งของผลเฉลยโดยการประมาณค่า

ขั้นตอนที่ 2 แปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปตัวแปรไม่ทราบค่า ที่จุดต่อต่างๆ โดยเขียนสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของปัญหาให้อยู่ในรูปของตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อด้วยการใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor series) สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของปัญหาทางวิศวกรรมมีทั้งสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับหนึ่ง และ สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การใช้อนุกรมเทย์เลอร์ในการแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสำหรับการแก้ปัญหาค่าได้ 3 รูปแบบ คือ สมการผลต่างการแบ่งย่อยแบบไปข้างหน้า, สมการผลต่างการแบ่งย่อยไปข้างหลัง และสมการผลต่างการแบ่งย่อยแบบตรงกลาง จากรูปที่ 3.40 ถ้ากำหนดให้ตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อ $w(i, j)$ สามารถสรุปการแก้ปัญหาค่าโดยการใช้อนุกรมเทย์เลอร์ได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การแก้ปัญหาค่าสมการเชิงอนุพันธ์โดยการใช้อนุกรมเทย์เลอร์

รูปแบบสมการ	สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง	สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง
สมการผลต่างไปข้างหน้า	$\frac{\partial w(i, j)}{\partial x} = \frac{w(i+1, j) - w(i, j)}{\Delta x}$ $\frac{\partial w(i, j)}{\partial y} = \frac{w(i, j+1) - w(i, j)}{\Delta y}$	$\frac{\partial^2 w(i, j)}{\partial x^2} = \frac{w(i+2, j) - 2w(i+1, j) + w(i, j)}{\Delta x^2}$ $\frac{\partial^2 w(i, j)}{\partial y^2} = \frac{w(i, j+2) - w(i, j+1) + w(i, j)}{\Delta y^2}$
สมการผลต่างตรงกลาง	$\frac{\partial w(i, j)}{\partial x} = \frac{w(i+1, j) - w(i-1, j)}{2\Delta x}$ $\frac{\partial w(i, j)}{\partial y} = \frac{w(i, j+1) - w(i, j-1)}{2\Delta y}$	$\frac{\partial^2 w(i, j)}{\partial x^2} = \frac{w(i+1, j) - 2w(i, j) + w(i-1, j)}{\Delta x^2}$ $\frac{\partial^2 w(i, j)}{\partial y^2} = \frac{w(i, j+1) - w(i, j) + w(i, j-1)}{\Delta y^2}$
สมการผลต่างแบบไปข้างหลัง	$\frac{\partial w(i, j)}{\partial x} = \frac{w(i, j) - w(i-1, j)}{\Delta x}$ $\frac{\partial w(i, j)}{\partial y} = \frac{w(i, j) - w(i, j-1)}{\Delta y}$	$\frac{\partial^2 w(i, j)}{\partial x^2} = \frac{w(i, j) - 2w(i-1, j) + w(i-2, j)}{\Delta x^2}$ $\frac{\partial^2 w(i, j)}{\partial y^2} = \frac{w(i, j) - w(i, j-1) + w(i, j-2)}{\Delta y^2}$

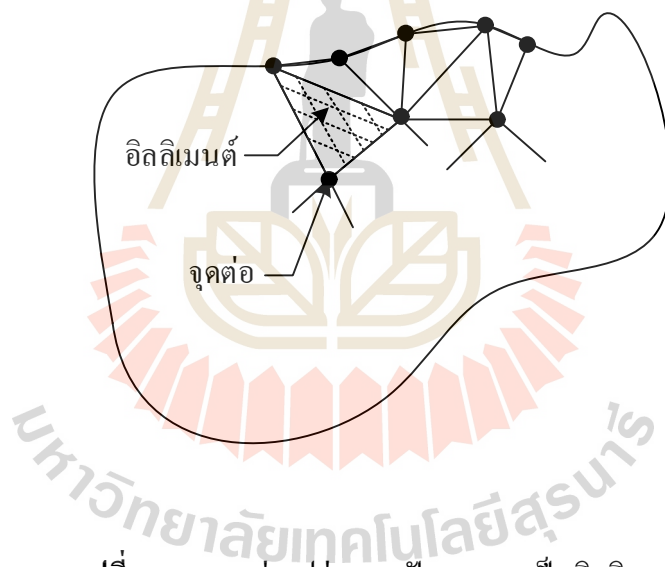
ขั้นตอนที่ 3 กำหนดรูปแบบของสมการลงในทุกๆจุดต่อที่อยู่ในขอบเขตภายในของปัญหา จะก่อให้เกิดระบบของสมการพร้อมกันโดยมีตัวไม่รู้ค่า เช่น $w(i, j)$, $w(i+1, j)$ และ $w(i, j+1)$ เป็นต้น ที่จุดต่อต่างๆ ภายในขอบเขตของปัญหานั้น

ขั้นตอนที่ 4 แก่สมการที่เกิดขึ้น เพื่อหาค่าโดยประมาณของตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อนั้น

3.6.4. ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อหาผลลัพธ์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าโดยประมาณของปัญหาที่กำหนดมาให้ โดยแบ่งส่วนของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อยๆ เรียกว่า “อิลลิเมนต์ (Elements)” อิลลิเมนต์เหล่านี้จะเชื่อมต่อกันที่จุดต่อ (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่คำนวณหาตามค่าตัวแปรที่ต้องการทราบค่า ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลลิเมนต์ประกอบด้วย 6 ขั้นตอนหลัก ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งอิลลิเมนต์ หรือขอบเขตรูปร่างของปัญหา ดังแสดงในรูปที่ 3.40

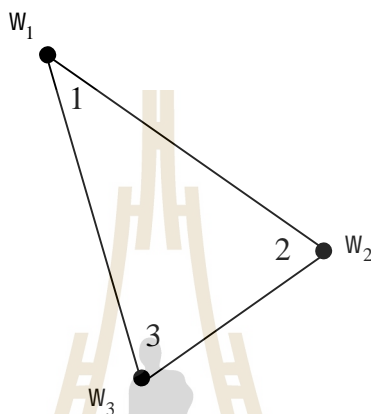


รูปที่ 3.41 การแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 2 เลือกฟังก์ชันประมาณภายในอิลลิเมนต์ ตัวอย่างเช่นอิลลิเมนต์สามเหลี่ยม ดังตัวอย่างอิลลิเมนต์รูปที่ 3.41 อิลลิเมนต์นี้จะประกอบด้วย 3 จุดต่อ กำหนดให้เป็นจุดต่อหมายเลข 1, 2 และ 3 ดังรูปที่ 3.42 โดยที่จุดต่อเป็นฟังก์ชันของตัวแปรไม่ทราบค่า คือ w_1 , w_2 และ w_3 ตามลำดับ การกระจายของตัวแปรไม่ทราบค่าบนอิลลิเมนต์นี้สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายใน และตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อได้คือ

$$w(x, y) = N_1(x, y)w_1 + N_2(x, y)w_2 + N_3(x, y)w_3 \quad (3.57)$$

โดย $N_i(x, y)$, $i = 1, 2, 3$ แทนฟังก์ชันประมาณภายในอิลลิเมนต์



รูปที่ 3.42 อิลลิเมนต์สามเหลี่ยมประกอบด้วยสามจุดต่อ

สมการที่ 3.57 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ คือ

$$w(x, y) = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \underset{(1 \times 3)}{[N]} \underset{(3 \times 1)}{[w]} \quad (3.58)$$

โดย $[N]$ แทนเมทริกซ์ของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ และ $[w]$ แทนเวกเตอร์เมทริกซ์ที่ประกอบด้วยตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อของอิลลิเมนต์นั้น

ขั้นตอนที่ 3 สร้างสมการของอิลลิเมนต์ ดังตัวอย่างของสมการอิลลิเมนต์สามเหลี่ยมในรูปที่ 3.41 จะอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix}_e \quad (3.59)$$

ขั้นตอนที่ 3 เป็นส่วนสำคัญของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การสร้างสมการเอลิเมนต์ในรูปแบบของสมการที่ 3.59 สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (Direct approach)
- วิธีการแปรผัน (Variable approach)
- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals)

ขั้นตอนที่ 4 การนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่ได้มาประกอบรวมกันเข้า ก่อให้เกิดระบบสมการรวม ในรูปแบบดังนี้

$$[K]_{sys} [w]_{sys} = [F]_{sys} \quad (3.60)$$

ขั้นตอนที่ 5 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตลงในสมการที่ 3.58 แล้วแก้สมการเพื่อหา $[w]_{sys}$ ประกอบด้วยตัวแปรไม่ทราบค่าที่จุดต่อซึ่งอาจเป็นค่าของการเคลื่อนตัวตามจุดต่อต่างๆ ของรูปแบบในขอบเขตที่กำหนด

ขั้นตอนที่ 6 คำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่ต้องการต่อไป เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่โหนดต่างๆ แล้วสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่างๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีส่วนที่สำคัญที่สุดคือการสร้างสมการของเอลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนด และในขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะนำไปพัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณ

3.7. สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยซึ่งได้แก่ ทฤษฎีที่เกี่ยวกับระบบสายจ่ายพาดอากาศสำหรับรถไฟไฟฟ้าความเร็วสูง ฟ้าผ่าและการออกแบบสายดินจึงอากาศ การวิเคราะห์การแพร่กระจายแรงดันเสิร์จ การวิเคราะห์สนามไฟฟ้า ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม และด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่จะนำมาใช้หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อ ๆ ไปทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย



บทที่ 4

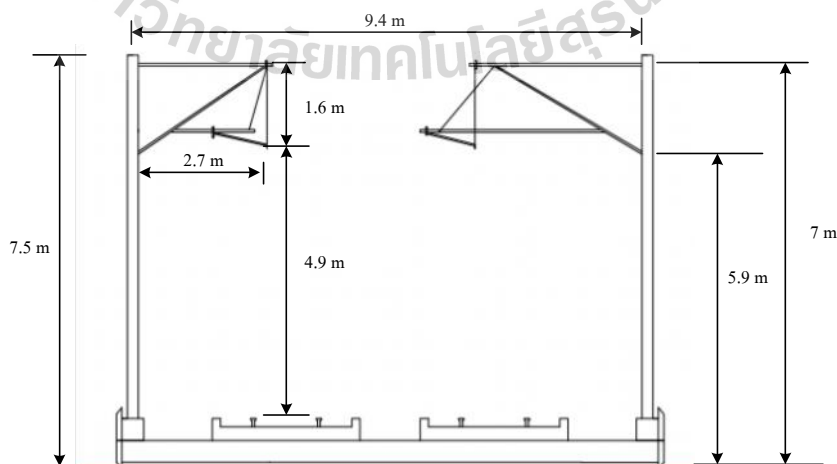
การออกแบบสายดินชิงอากาศ

4.1. บทนำ

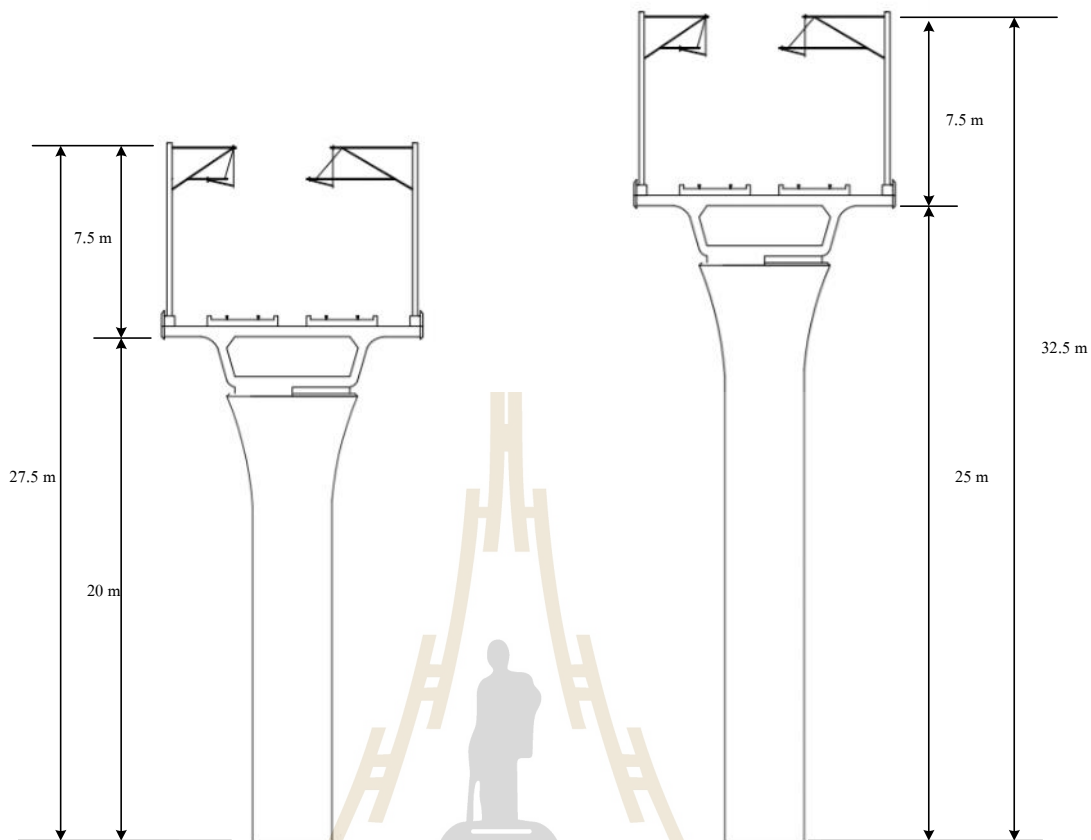
การติดตั้งสายดินชิงอากาศของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี เป็นส่วนช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดฟ้าผ่าลงสายตัวนำของระบบ และตัวรถไฟฟ้าความเร็วสูง โดยการออกแบบหาตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับรถไฟฟ้าความเร็วสูงสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้วิธีทรงกลมกลิ้ง ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย โดยออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี ของรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ และตัวอย่างของโครงสร้างของระบบสายจ่ายพาดอากาศจากประเทศจีน

4.2. โครงสร้างของระบบสายจ่ายพาดอากาศรถไฟฟ้าความเร็วสูง

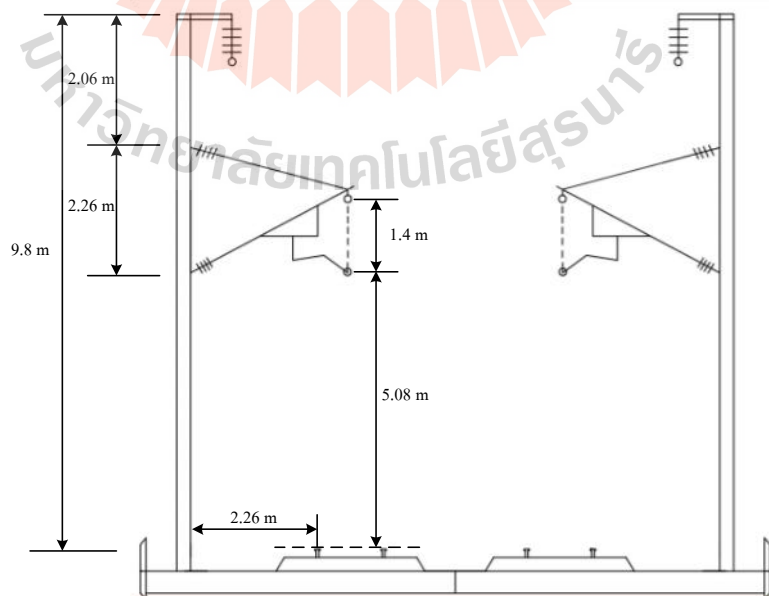
จากตัวอย่างโครงสร้างของระบบสายจ่ายตัวนำพาดอากาศสำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ และรถไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศจีน ตามรูปที่ 3.10 และ 3.11 ในบทที่ผ่านมาผู้วิจัยได้นำโครงสร้างบางส่วนมานำเสนอ เพื่อใช้เป็นกรณีศึกษา และออกแบบระบบป้องกันสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ โดยกำหนดความสูงของรางจากโครงสร้างดังกล่าวไว้ 3 ระดับ คือ ที่ความสูงระดับพื้นดิน, ความสูง 20 m และ 25 m จากระดับพื้นดิน



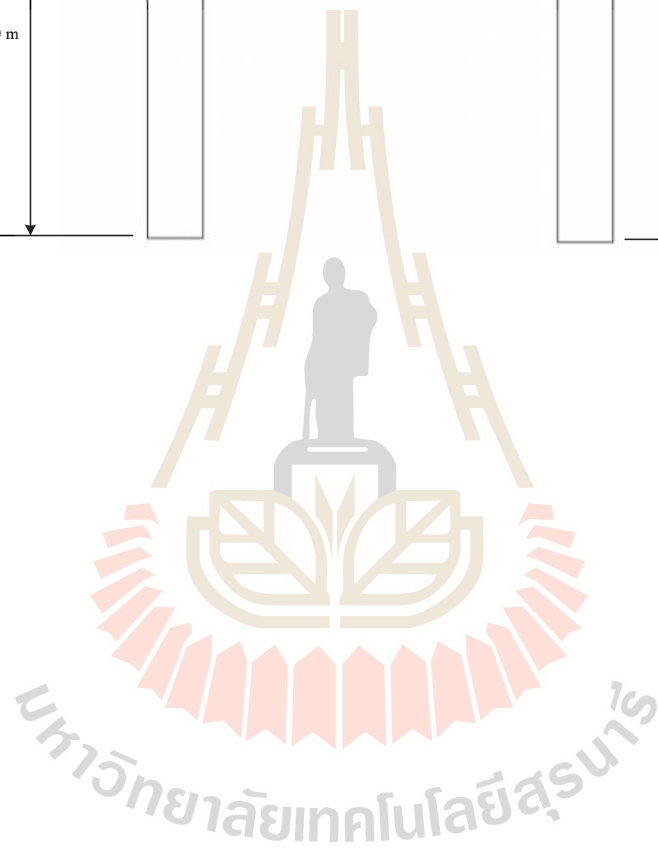
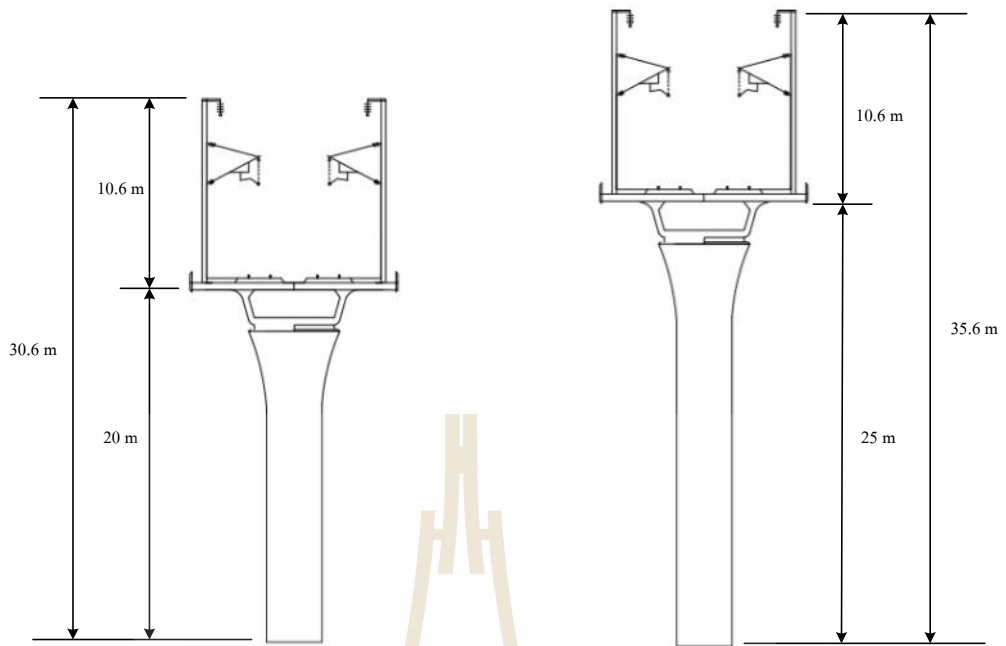
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ที่ระดับพื้นดิน



รูปที่ 4.2 โครงสร้างของระบบบรอดไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ที่วางระดับความสูง 20 m และ 25 m จากพื้นดิน



รูปที่ 4.3 โครงสร้างของระบบบรอดไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศจีนที่ระดับพื้นดิน

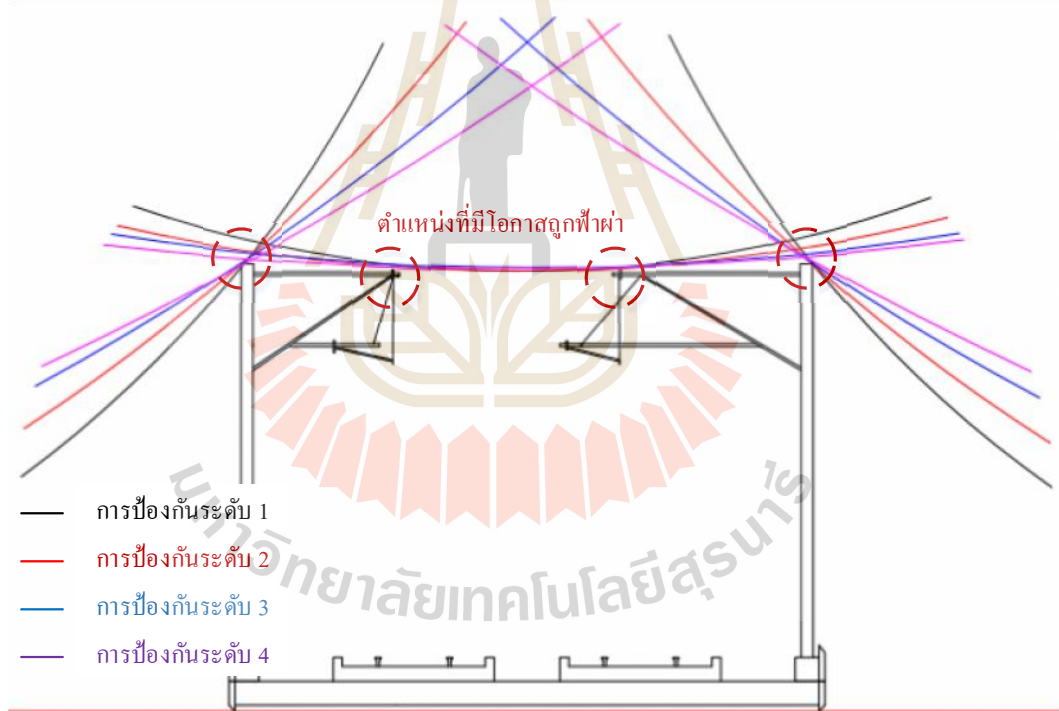


จำนวนวันที่ได้ยื่น เสียงฟ้าร้องต่อปี (TD)	อัตราการเกิดฟ้าผ่าลงสู่ดิน (ครั้งต่อปีต่อตารางกิโลเมตร) Ng	จำนวนครั้งที่ฟ้าผ่าลงสู่สายส่งโดยตรง (ครั้งต่อระยะสาย 100 กิโลเมตรต่อปี)		
		N ₁ (AIEE) ความสูงเฉลี่ย 30 เมตร	N ₁ (Burgsdorf)	
110	22.80	22.73	27.5 เมตร	32.5 เมตร
90	17.39	18.60	22.28	26.33
80	14.83	16.53	19.80	23.40

จากอัตราการเกิดฟ้าผ่าลงสู่พื้นดิน และสายส่งพบว่าระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารีมี โอกาสที่จะเกิดฟ้าผ่าได้ เพื่อลดการสูญเสีย หรือลดอัตราการเกิดฟ้าผ่าที่ระบบดังกล่าว จึงจำเป็นที่ จะต้องติดตั้งสายดินชิงอากาศ ซึ่งจะต้องประเมินตำแหน่งของการเกิดฟ้าผ่าโดยใช้วิธีทรงกลมกลิ้ง ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

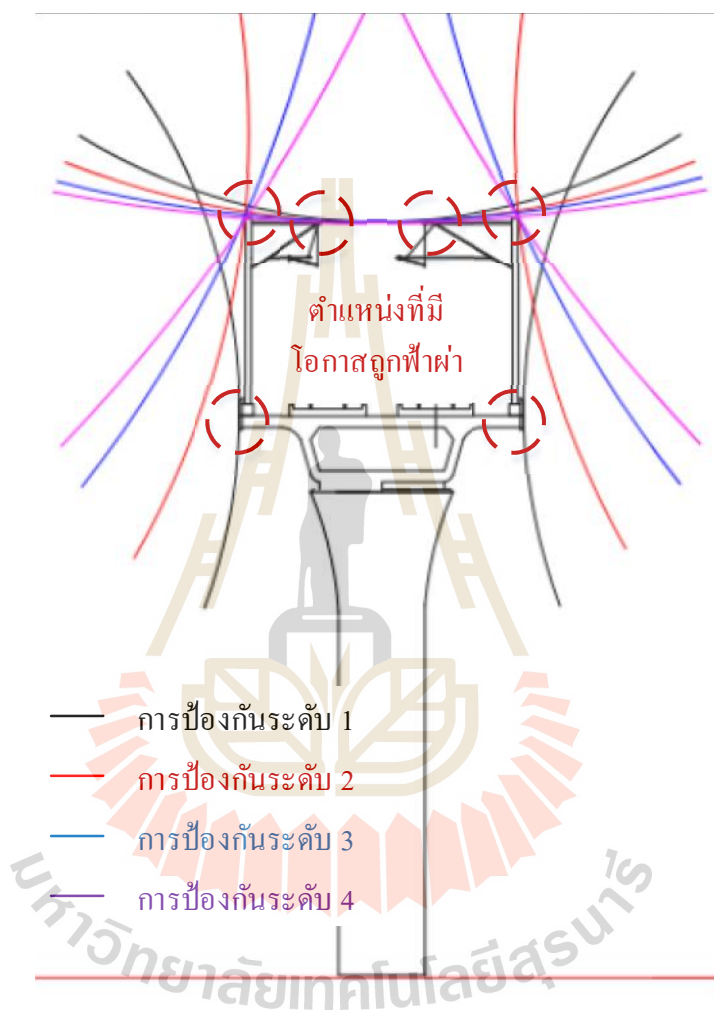
4.3. การประเมินตำแหน่งฟ้าผ่าโดยวิธีทรงกลมกลิ้ง

ตามมาตรฐานการออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศ เป็นระดับของการป้องกัน ออกเป็น 4 ระดับ ขึ้นอยู่กับระดับความสำคัญของบริเวณหรือพื้นที่ สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ป้องกัน โดยตำแหน่งที่ถูกสัมผัสจากทรงกลมกลิ้ง คือตำแหน่งที่มีโอกาสถูกฟ้าผ่ามากที่สุด และเป็น ตำแหน่งที่ทำการติดตั้งสายดินชิงอากาศ ส่วนบริเวณภายใต้เส้นโค้งทรงกลมกลิ้งเป็นบริเวณ ปลอดภัย



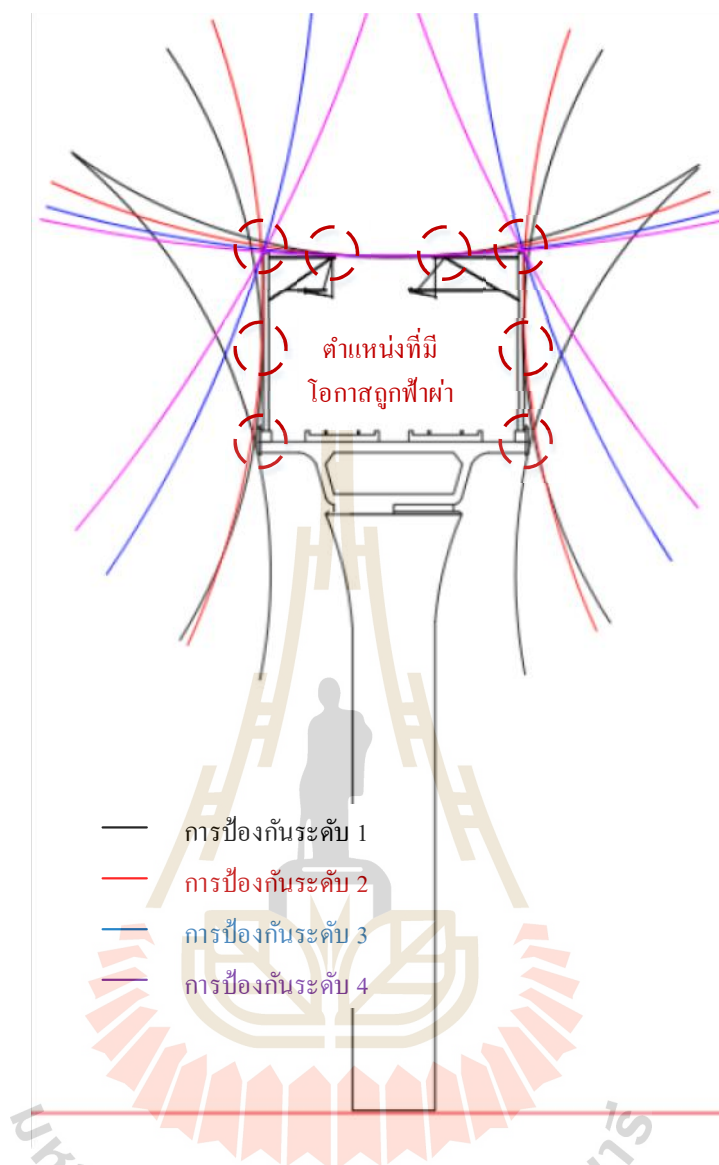
รูปที่ 4.5 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบบรคไฟฟ้าแอร์พอร์ดลิงค์ ที่ระดับพื้นดิน

จากรูปที่ 4.5 เป็นผลของการประเมินตำแหน่งที่มีโอกาสถูกฟ้าผ่ามากที่สุดด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งที่ระดับการป้องกันทั้ง 4 ระดับ ของระบบโครงสร้างสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารีสำหรับรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ พบว่าตำแหน่งปลายยอดเสา และส่วนของคานจับยึดสายตัวนำเป็นตำแหน่งที่มีโอกาสถูกฟ้าผ่ามากที่สุด



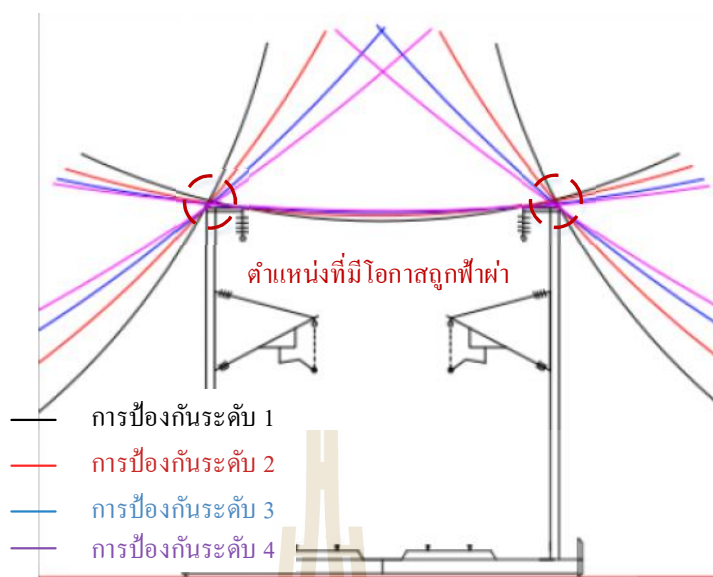
รูปที่ 4.6 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ ที่รางระดับความสูง 20 m

ที่ระดับความสูงของราง 20 m และ 25 m ของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ ตำแหน่งปลายยอดเสา และส่วนของคานจับยึดสายตัวนำเป็นตำแหน่งที่มีโอกาสถูกฟ้าผ่ามากที่สุด เช่นเดียวกับที่รางระดับพื้นดิน แต่จะมีจุดสัมผัสของทรงกลมกลิ้ง หรือตำแหน่งฟ้าผ่าที่โครงสร้างของราง และตัวเสาของสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี

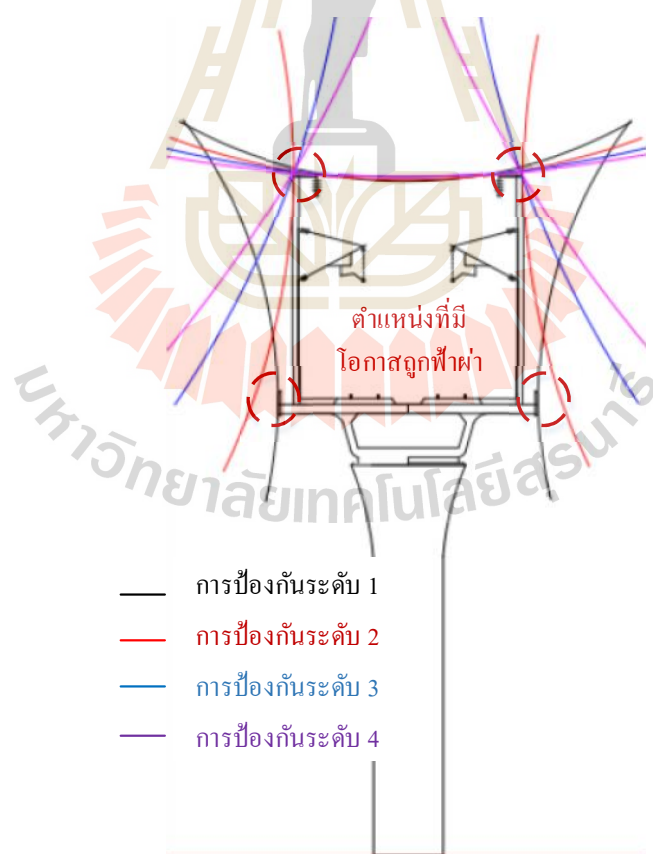


รูปที่ 4.7 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบบรอดไฟฟ้าแอร์พอร์ทลิงค์
ที่รางระดับความสูง 25 m

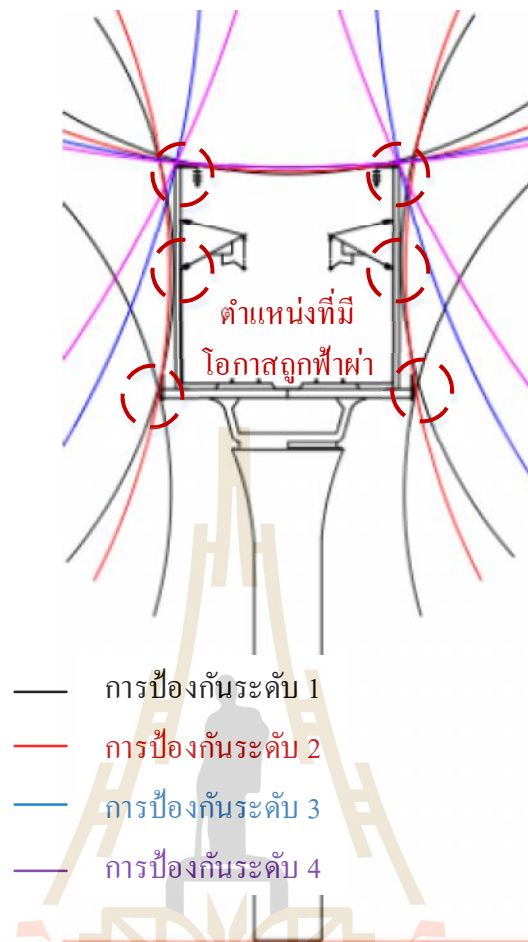
สำหรับผลการประเมินตำแหน่งฟ้าผ่าของระบบบรอดไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศจีนนั้น มีลักษณะเช่นเดียวกับระบบบรอดไฟฟ้าแอร์พอร์ทลิงค์ ซึ่งเป็นตำแหน่งบนยอดเสา และตำแหน่งของรางสำหรับระดับความสูง 20 m และ 25 m ผลการประเมินได้แสดงดังรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.8 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบบรอดไฟฟ้ายาวไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศจีนที่ระดับพื้นดิน



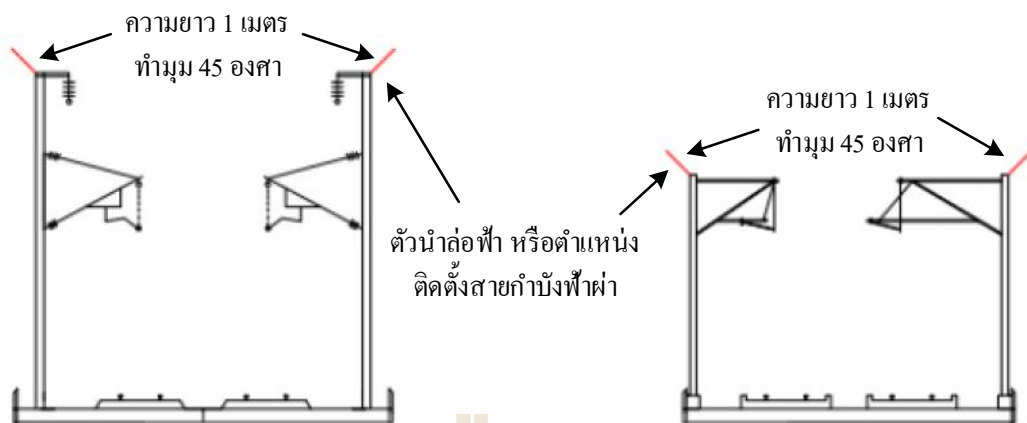
รูปที่ 4.9 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบบรอดไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศจีนที่รางระดับความสูง 20 m



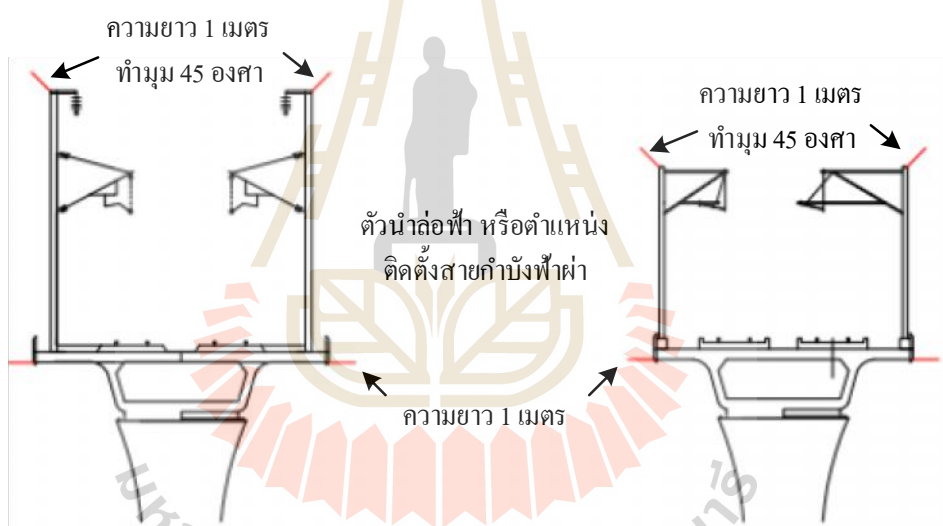
รูปที่ 4.10 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งสำหรับระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศไทยที่รางระดับความสูง 25 m

4.4. การออกแบบตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศ

จากผลการประเมินตำแหน่งฟ้าผ่าในหัวข้อที่ผ่านมา พบว่าตำแหน่งที่มีโอกาสถูกฟ้าผ่าของระบบสายจ่ายพาดอากาศสำหรับรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงก์ และระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงของจีนนั้น เป็นบริเวณยอดเสา ที่ระดับความสูงของรางทั้ง 3 ระดับ และในบริเวณรางรถไฟ ที่ความสูงของราง 20 m และ 25 m ผู้วิจัยได้ออกแบบติดตั้งสายดินชิงอากาศที่ตำแหน่งดังกล่าว โดยมีลักษณะการติดตั้ง ดังรูปที่ 4.11 และ 4.12

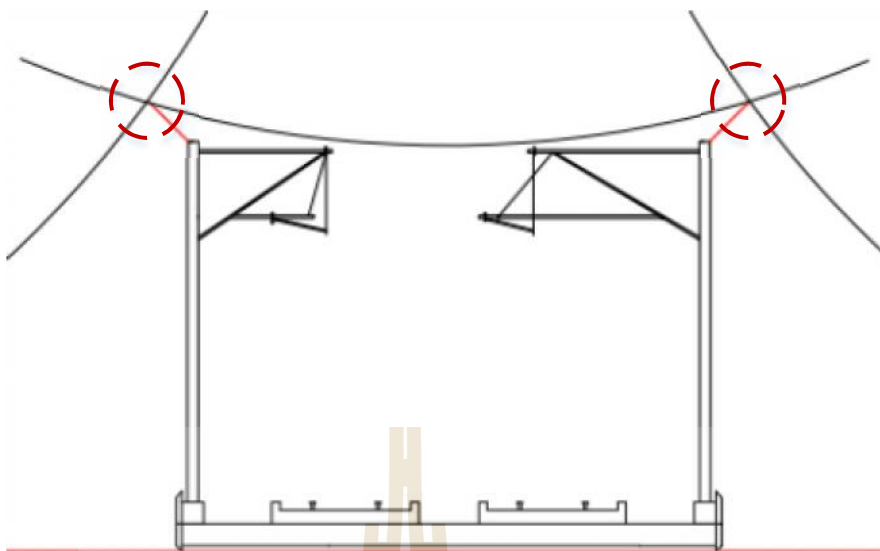


รูปที่ 4.11 ตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบแรงไฟฟ้าที่วางระดับพื้นดิน

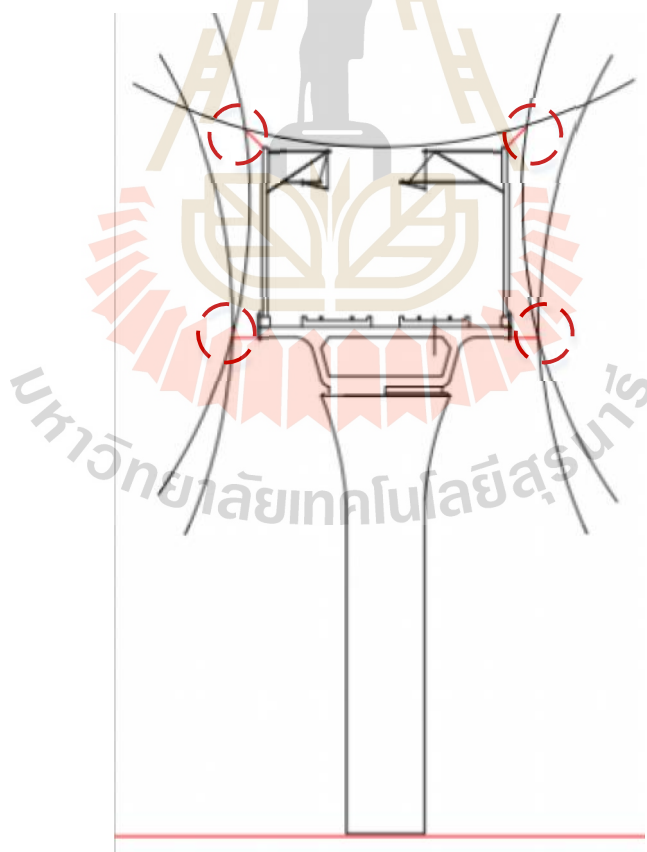


รูปที่ 4.12 ตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบแรงไฟฟ้าที่วางระดับความสูง 20 m และ 25 m จากพื้นดิน

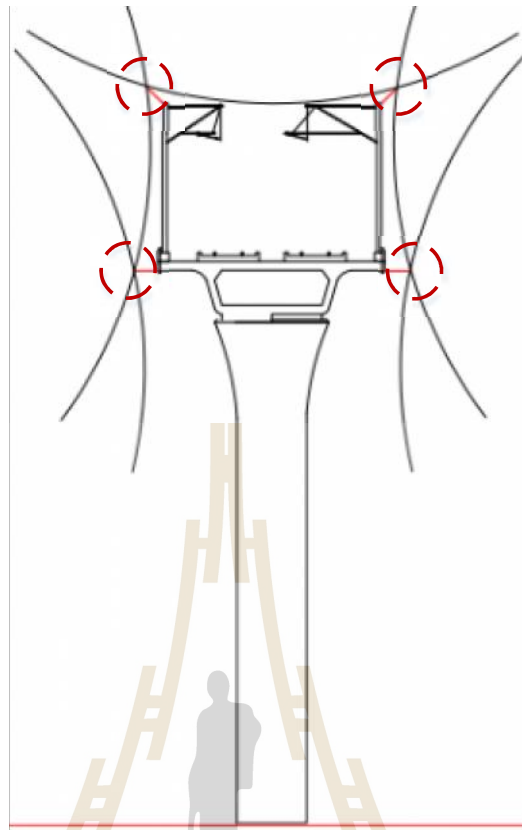
จากการออกแบบตำแหน่งการติดตั้งสายดินชิงอากาศ เนื่องจากระบบของแรงไฟฟ้าหากเกิดความผิดพลาดหรือเสียหายจากการเกิดฟ้าผ่าจะส่งผลกระทบต่อชีวิต ของผู้ใช้งานดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบระบบป้องกันฟ้าผ่าระดับที่ 1 ซึ่งผลของการประเมินตำแหน่งของการเกิดฟ้าผ่าจากการออกแบบแสดงในรูปที่ 4.13 ถึง รูปที่ 4.18



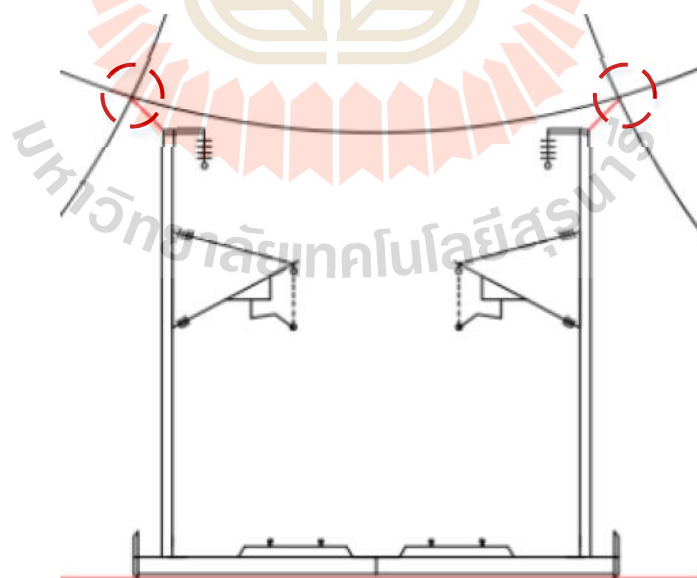
รูปที่ 4.13 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินเชิงอากาศสำหรับระบบแรงไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิ้งค์ที่ระดับพื้นดิน



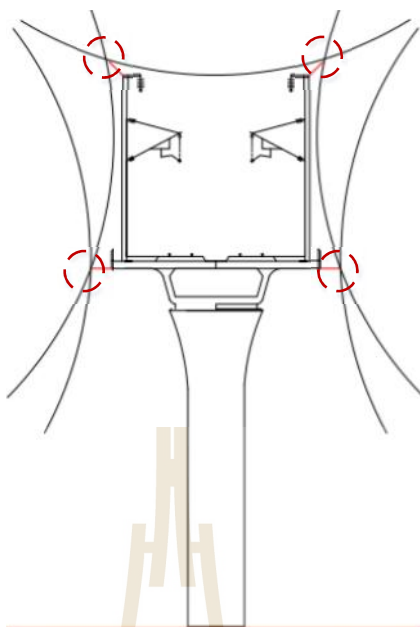
รูปที่ 4.14 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินเชิงอากาศสำหรับระบบแรงไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิ้งค์ที่ราระดับความสูง 20 m จากพื้นดิน



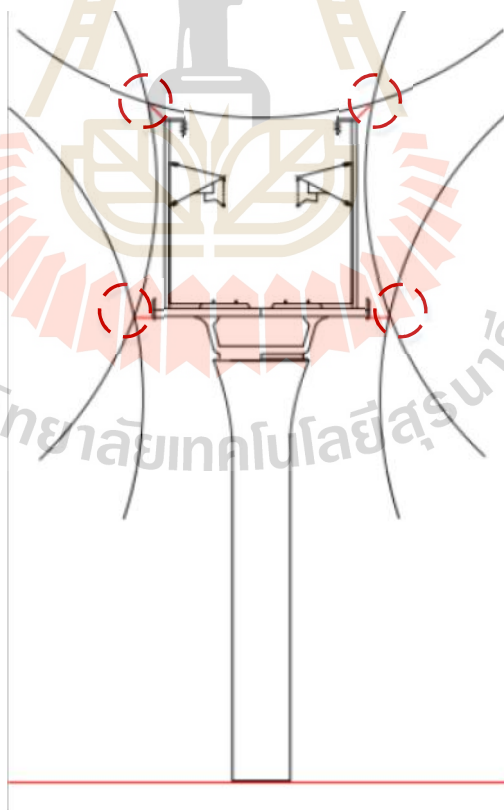
รูปที่ 4.15 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินเชิงอากาศสำหรับระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ที่รางระดับความสูง 25 m จากพื้นดิน



รูปที่ 4.16 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินเชิงอากาศสำหรับระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศจีนที่ระดับพื้นดิน



รูปที่ 4.17 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบแรงไฟฟ้า
ความเร็วสูงของประเทศจีนที่วางระดับความสูง 20 m จากพื้นดิน



รูปที่ 4.18 ผลการประเมินตำแหน่งถูกฟ้าผ่าเมื่อติดตั้งสายดินชิงอากาศสำหรับระบบแรงไฟฟ้า
ความเร็วสูงของประเทศจีนที่วางระดับความสูง 25 m จากพื้นดิน

จากผลการประเมินตำแหน่งฟ้าผ่า พบว่าตำแหน่งที่ถูกฟ้าผ่าเป็นตำแหน่งติดตั้งสายดินซึ่งอากาศ ซึ่งไม่มีส่วนของโครงสร้าง หรือสายตัวนำของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารีใด สัมผัสกับเส้นโค้งของทรงกลมกลิ้ง หรือกล่าวอีกได้ว่าไม่มีส่วนใดในโครงสร้างถูกฟ้าผ่า

4.5. สรุป

สำหรับการออกแบบตำแหน่งสายดินซึ่งอากาศด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ และระบบรถไฟความเร็วสูงของประเทศจีนนั้น จากผลการประเมินตำแหน่งฟ้าผ่าสามารถป้องกัน โครงสร้าง และสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารีได้ ทั้งนี้การออกแบบป้องกันนี้อาจไม่สามารถป้องกันได้ทั้งหมด เนื่องจากปรากฏการณ์ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ อาจเกิดความผิดพลาดจากการป้องกันได้

บทที่ 5

การวิเคราะห์หัดลื่นจร และการเกิดวาทไฟย้อนกลับ

5.1. บทนำ

การวิเคราะห์หัดลื่นจร และการเกิดวาทไฟย้อนกลับสำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะนำเสนอการวิเคราะห์หัดลื่นจรด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องจากสมการสายส่ง โดยจะนำเสนอผลของความต้านทานดินหรือรากสายดิน เมื่อเกิดฟ้าผ่าลงที่สายดินซึ่งอากาศทำให้เกิดหัดลื่นจรขึ้นที่สายดินซึ่งอากาศ และหัดลื่นจรเคลื่อนที่ถึงจุดเชื่อมต่อกับรากสายดิน นำพิจารณาการเกิดวาทไฟย้อนกลับลูกด้วยฉนวนจากหัดลื่นจร และการเกิดวาทไฟย้อนกลับจะวิเคราะห์ในกรณีที่เกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่เสาโครงสร้างของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารีจากค่าความต้านทานดิน จากการเกิดวาทไฟย้อนกลับ และหากมีการป้องกันที่ผิดพลาดทำให้เกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี การเกิดวาทไฟย้อนกลับมายังสายแคทีนารี หรือเกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายแคทีนารีจะทำให้เกิดหัดลื่นจรในสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอคุณลักษณะของหัดลื่นจรในสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารีเมื่อเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งติดตั้งกับดักเสร็จ ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่อง

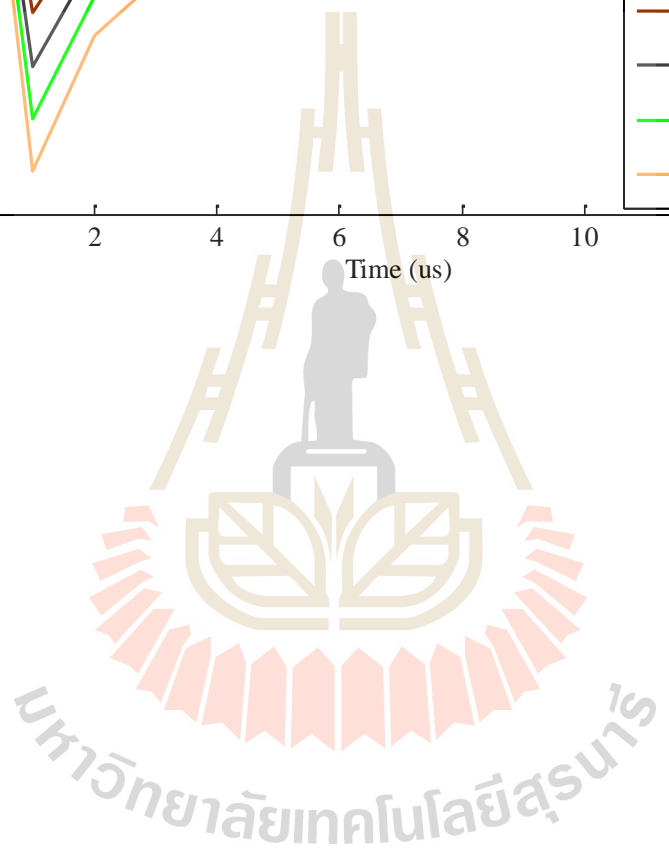
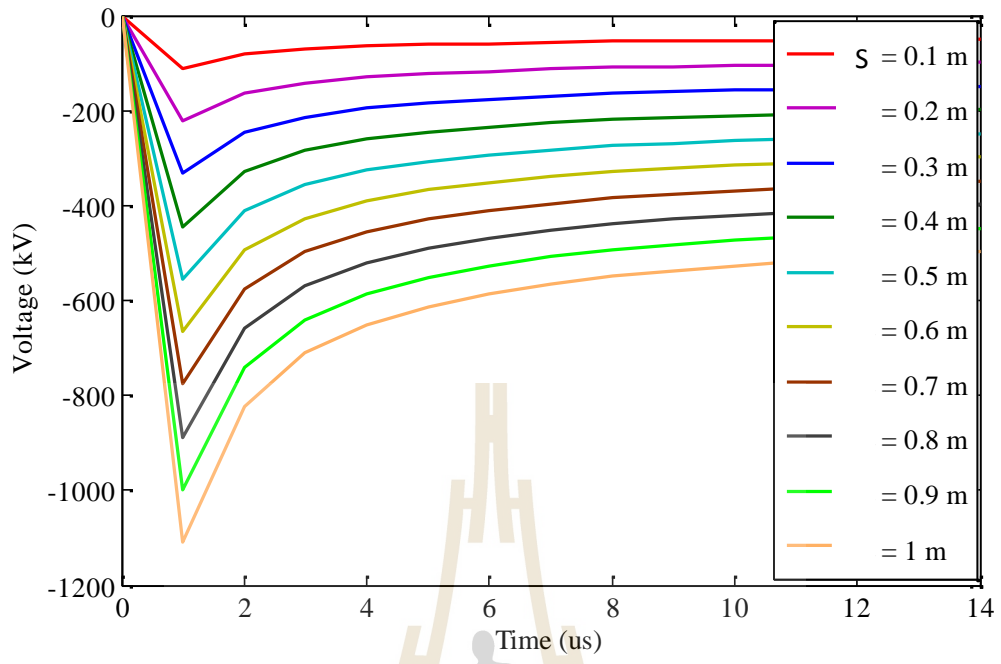
5.2. การวิเคราะห์หัดลื่นจร และการเกิดวาทไฟย้อนกลับ

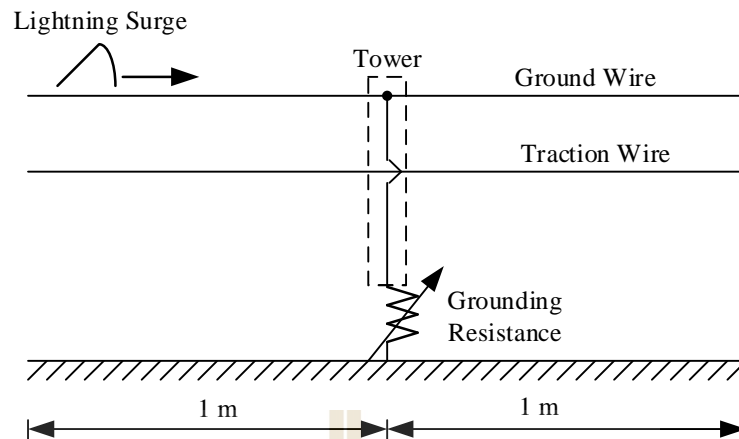
ส่วนสำคัญสำหรับการวิเคราะห์หัดลื่นจรด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่อง จากแบบจำลองสายส่ง จำเป็นที่จะต้องทราบค่า ค่าตัวเหนี่ยวนำ (L) และค่าตัวเก็บประจุ (C) ของสายส่ง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.17 และ สมการที่ 3.18 ตามลำดับ

จากการออกแบบตำแหน่งของสายดินซึ่งอากาศสำหรับรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ และรถไฟฟ้าความเร็วสูงของประเทศจีน ผู้วิจัยจะใช้ตำแหน่งสายดินซึ่งอากาศ และสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี จากโครงสร้างที่ความสูงของราง 25 m ของระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงมาใช้ในการวิเคราะห์หัดลื่นจร เนื่องจากมีโอกาสเกิดฟ้าผ่าลงสายตัวนำ และสายดินซึ่งอากาศมากที่สุด

สำหรับสายดินซึ่งอากาศที่ใช้ เป็นลวดเหล็กตีเกลียวขนาด 25 mm² เช่นเดียวกับสายดินซึ่งอากาศของระบบจำหน่ายในประเทศไทย และสายจ่ายพาดอากาศ ใช้ตัวนำเป็นโลหะผสม

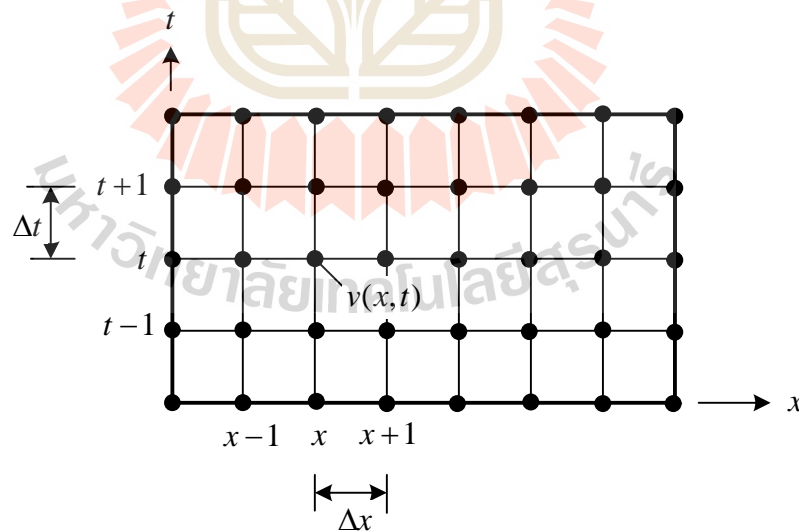
ชนิดของสาย	ระบบรถไฟฟ้า	ความสูง (m)	พื้นที่หน้าตัด (m ²)	<i>L</i> (μH/m)	<i>C</i> (pF/m)	<i>Z_w</i> (/m)
สายดินชิงอากาศ	แอร์พอร์ตลิงค์	33.35	25	318	3.10	10.74
	ประเทศจีน	35.65	25	203	5.47	6.10
สายจ่ายแกทีนารี	แอร์พอร์ตลิงค์	31.50	150	313	3.55	9.40
	ประเทศจีน	31.48	150	313	3.54	9.40





รูปที่ 5.2 แบบจำลองตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ผลของความต้านดินต่อคลื่นจร

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดจุดต่อหรือรูปร่างของปัญหา จากสมการคลื่นจรจะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงดันในระยะทาง x ตามระยะเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป t การกำหนดจุดเชื่อมแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การกำหนดจุดต่อรูปร่างของปัญหา

จากรูปแบบจำลองระยะความยาวสายดินจึงอากาศ เท่ากับ 2 km แบ่งระยะระหว่างจุดต่อ (Δx) ออกเป็น 5 m และระยะเวลาที่ใช้กำหนดให้เป็น 2 ms มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลา (Δt) เป็น 0.1 μ s

ขั้นตอนที่ 2 แปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปตัวแปรไม่ทราบค่า จากสมการเชิงอนุพันธ์ สมการที่ (3.40) และ สมการที่ (3.42) ประกอบด้วยสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง และสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง ซึ่งสามารถแปลงให้อยู่ในรูปตัวแปรไม่ทราบค่าโดยการใช้อนุกรมเทย์เลอร์แบบตรงกลาง ได้ดังนี้

สมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial t} = \frac{v(x,t+1) - v(x,t-1)}{2\Delta t} \quad (5.1)$$

สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง

$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = \frac{v(x+1,t) - 2v(x,t) + v(x-1,t)}{\Delta x^2} \quad (5.2)$$

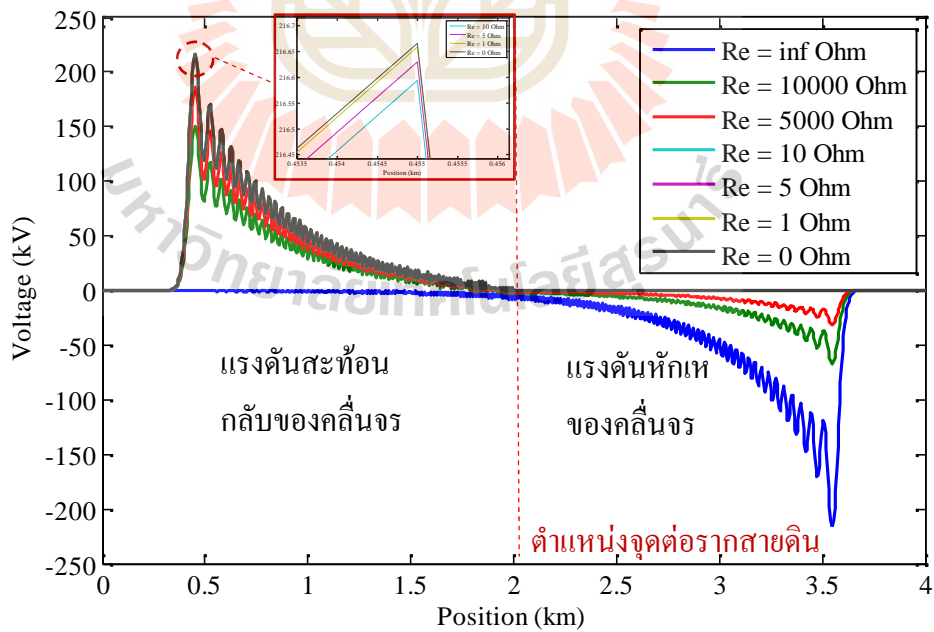
$$\frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = \frac{v(x,t+1) - v(x,t) + v(x,t-1)}{\Delta t^2} \quad (5.3)$$

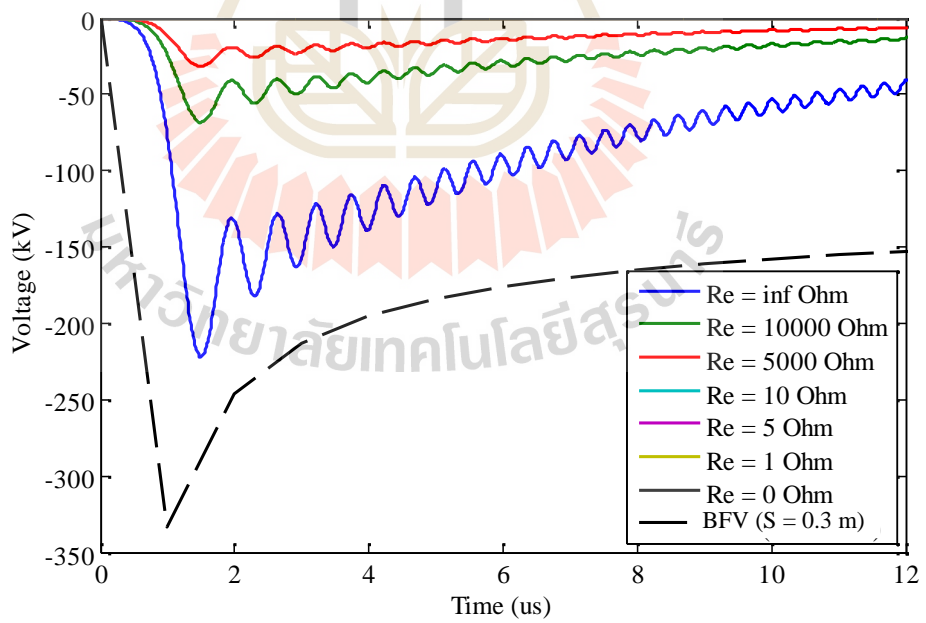
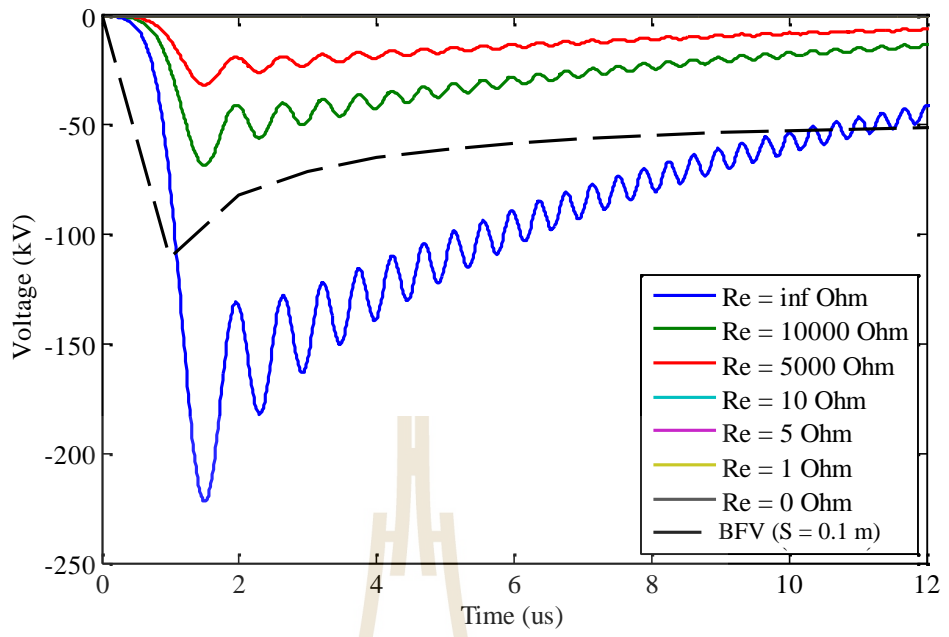
ขั้นตอนที่ 3 กำหนดรูปแบบของสมการจากสมการที่ (3.40) แทนค่าสมการที่ (5.2) และสมการที่ (5.3) จะได้รูปแบบของสมการของสายดินจึงอากาศดังต่อไปนี้

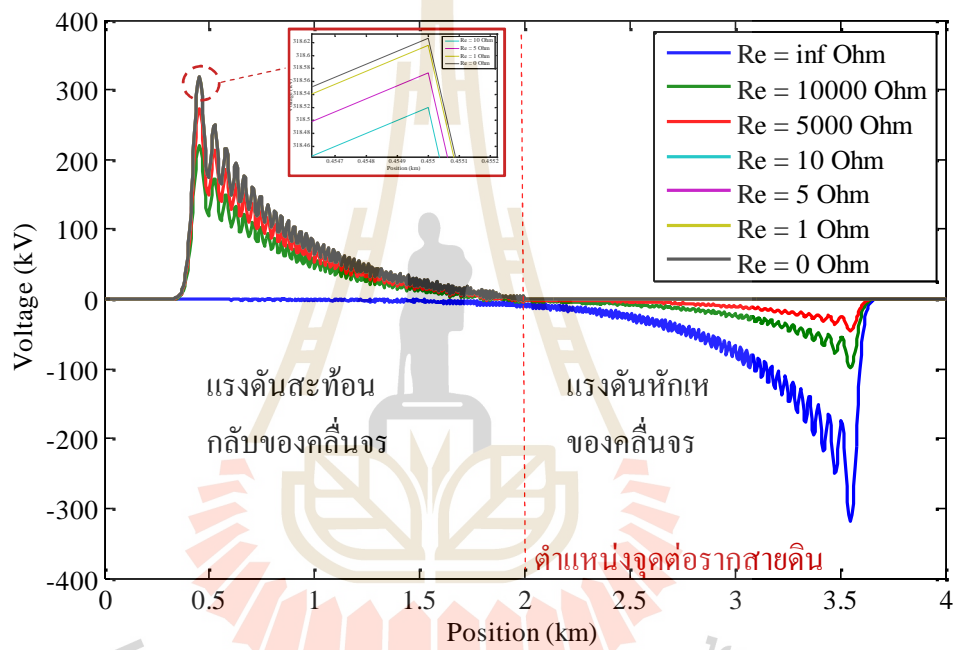
$$v(x,t+1) = \frac{\Delta t^2}{LC\Delta x^2} v(x+1,t) + \frac{\Delta t^2}{LC\Delta x^2} v(x-1,t) - 2\left(\frac{\Delta t^2}{LC\Delta x^2} - 1\right)v(x,t) - v(x,t-1) \quad (5.4)$$

เช่นเดียวกันตำแหน่งที่จุดเชื่อมต่อความต้านทานรากสายดิน แทนค่าจากสมการที่ (5.1), สมการที่ (5.2) และสมการที่ (5.3) ลงในสมการที่ (3.42) จะได้

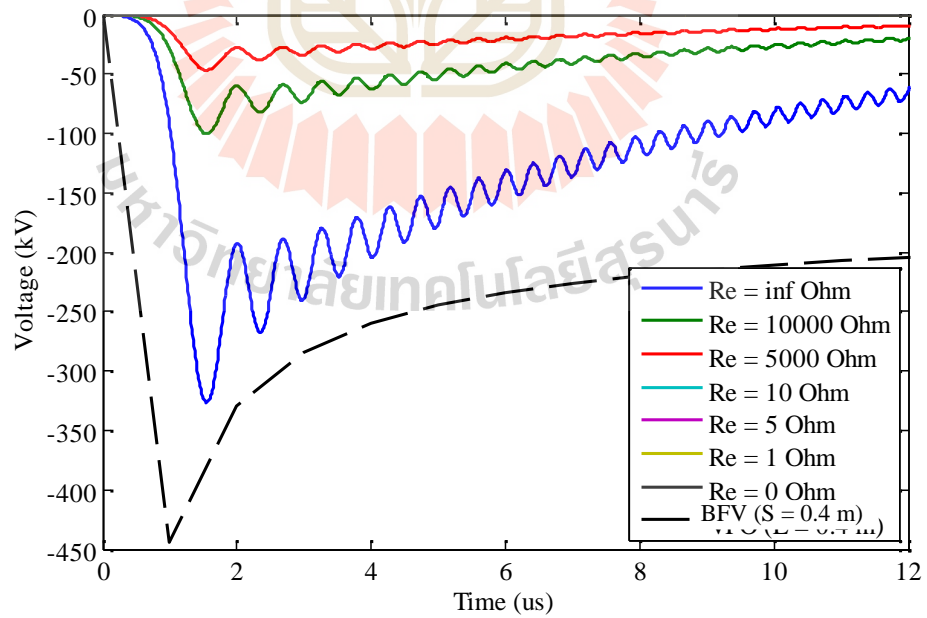
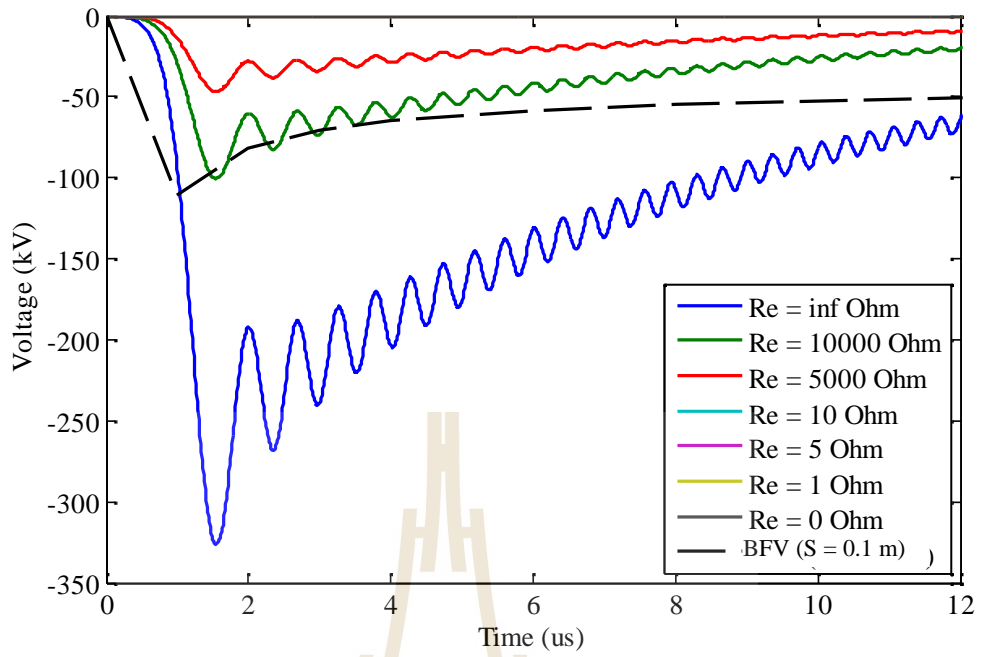
$$v(x, t+1) = -\frac{1}{(\Delta t LG + 2LC)} \left(\frac{2\Delta t^2}{\Delta x^2} v(x+1, t) + \frac{2\Delta t^2}{\Delta x^2} v(x-1, t) \right. \\ \left. - (4LC + \frac{4\Delta t^2}{\Delta x^2}) v(x, t) + (2LC - \Delta t LG) v(x, t-1) \right)$$

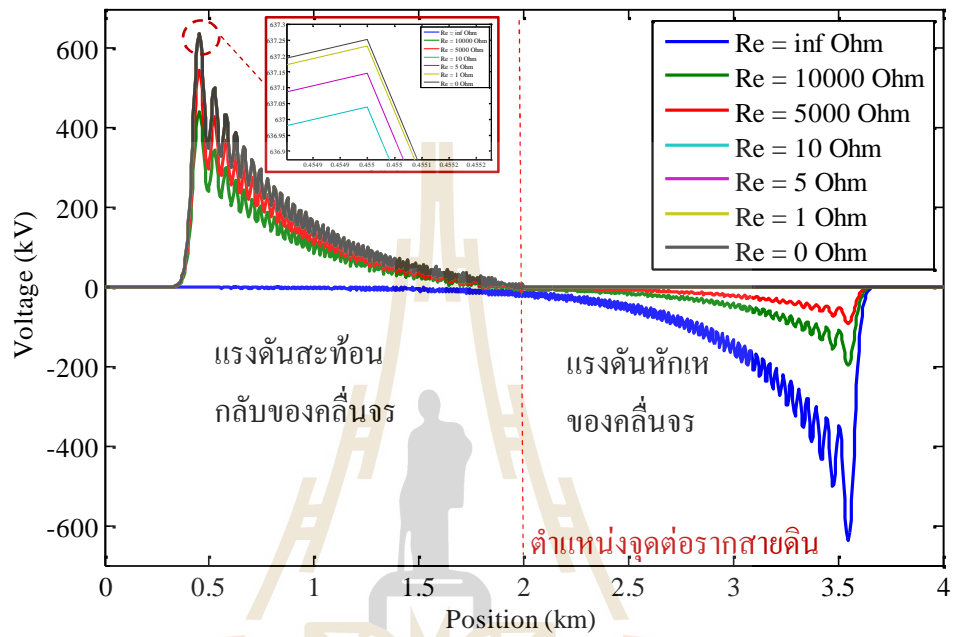


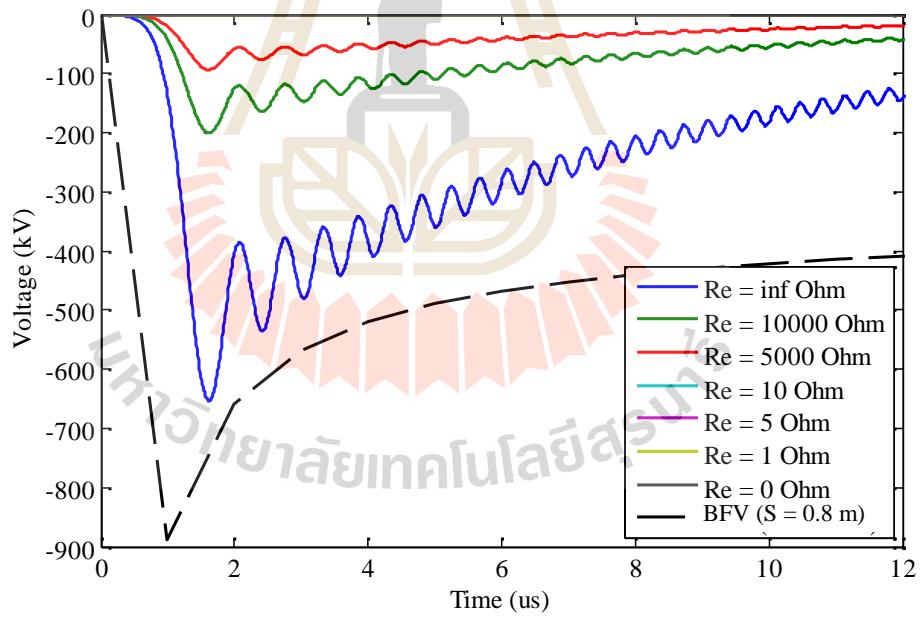
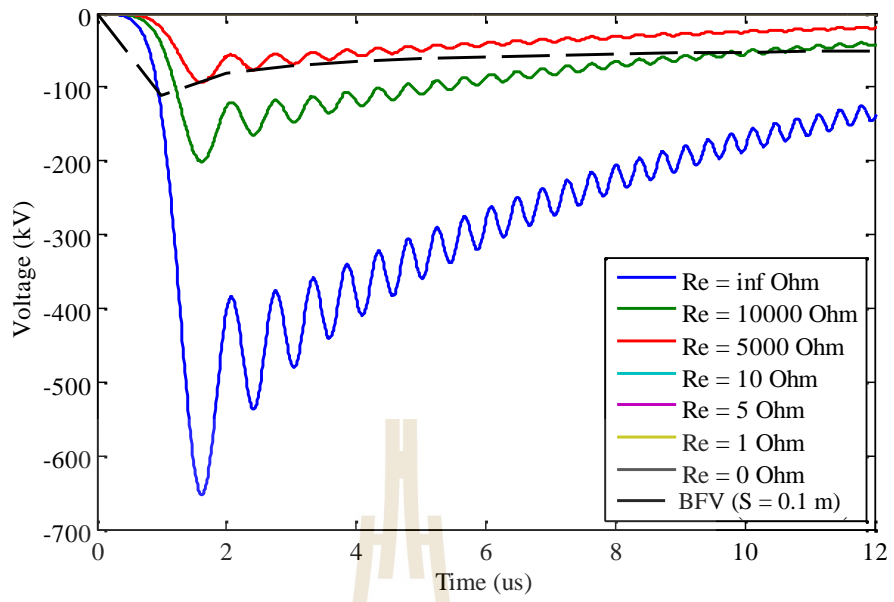




มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

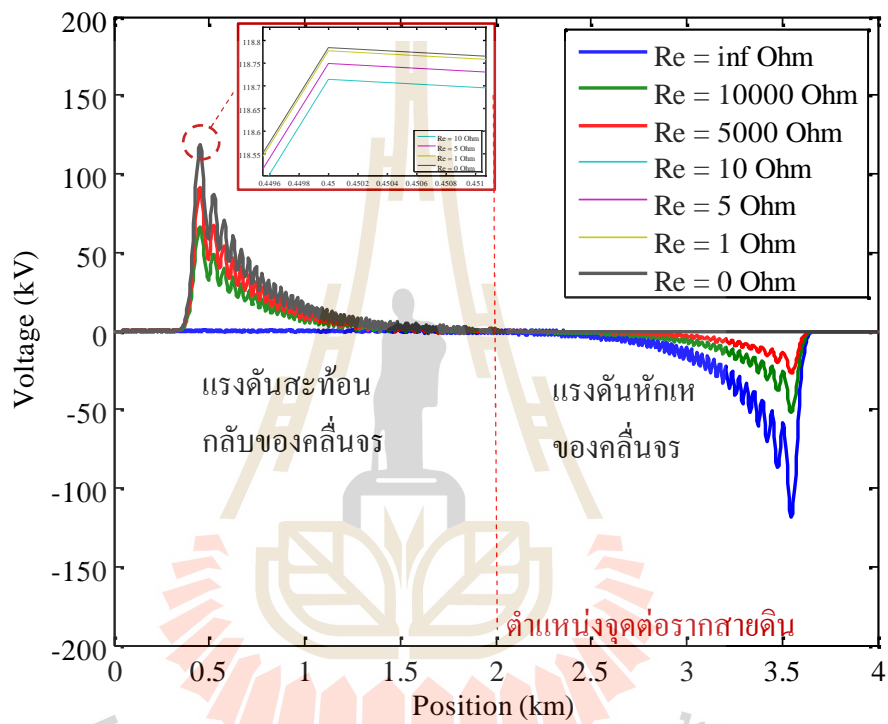




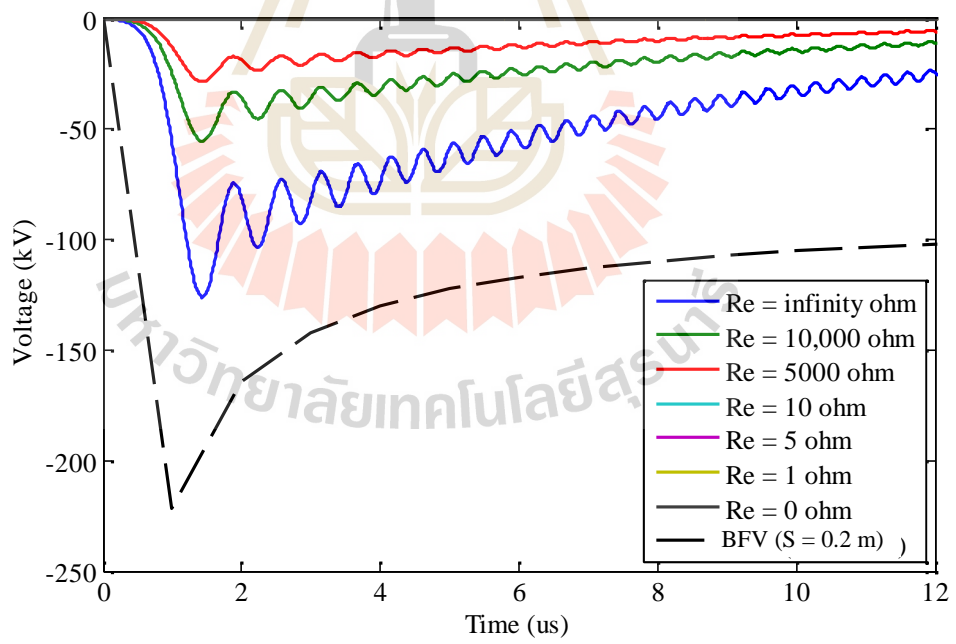
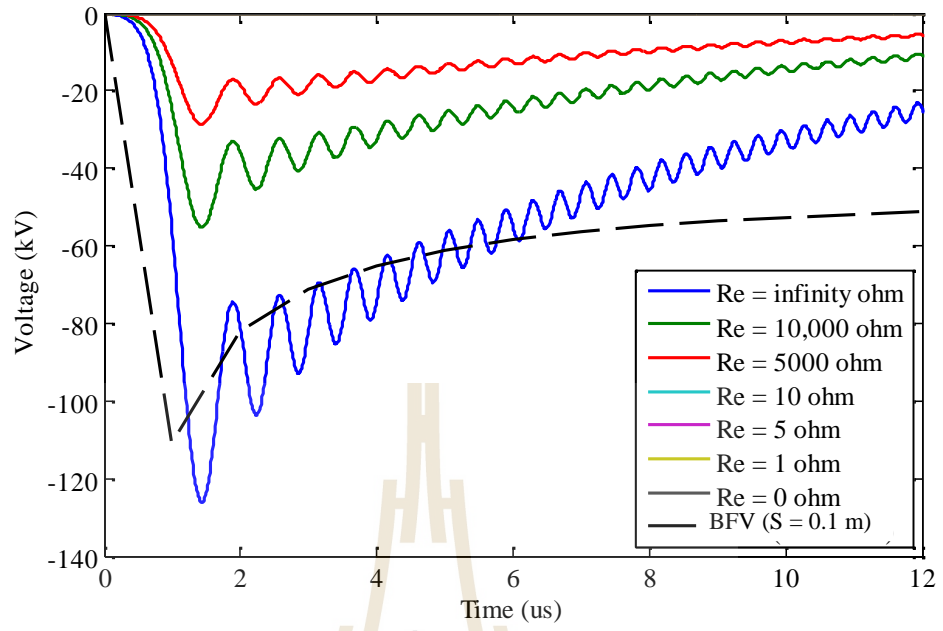


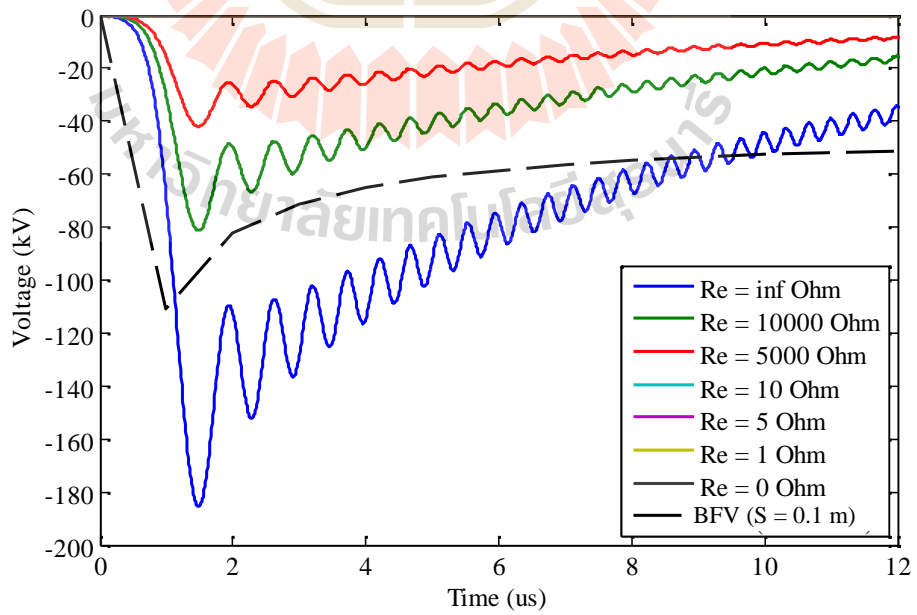
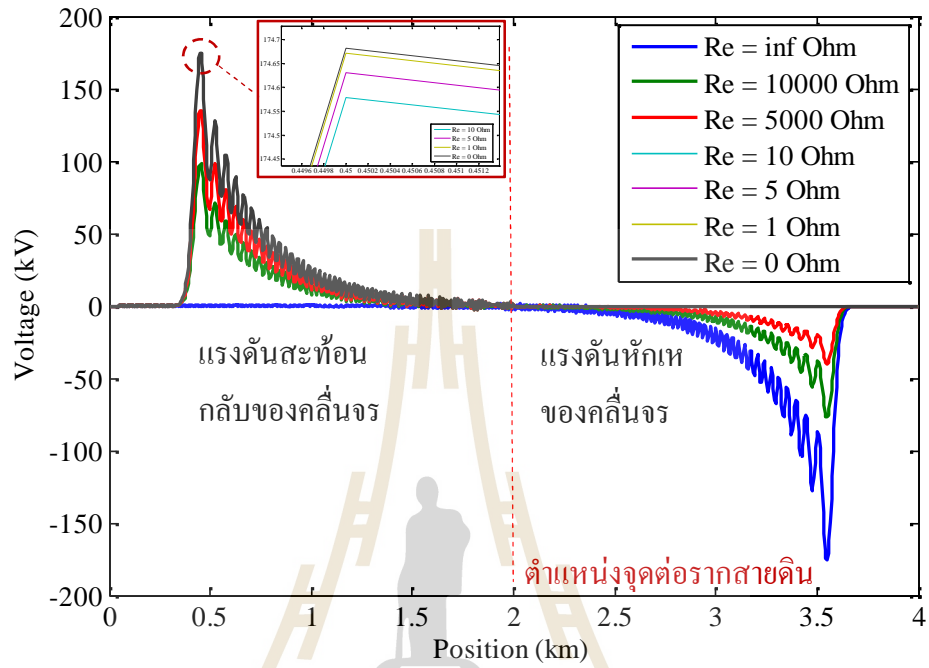
ขนาด กระแส เสิร์จ	ค่าความ ต้านทาน รากสายดิน	ระบบสายจ่ายเคทีนาวีสำหรับโครงสร้างรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์									
		ระยะลูกถ้วยจนวน S (m)									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
-34	0	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	1	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5,000	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10,000	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	infinity	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O
-50	0	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	1	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5,000	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10,000	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	infinity	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O
-100	0	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	1	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5,000	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10,000	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O
	infinity	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O

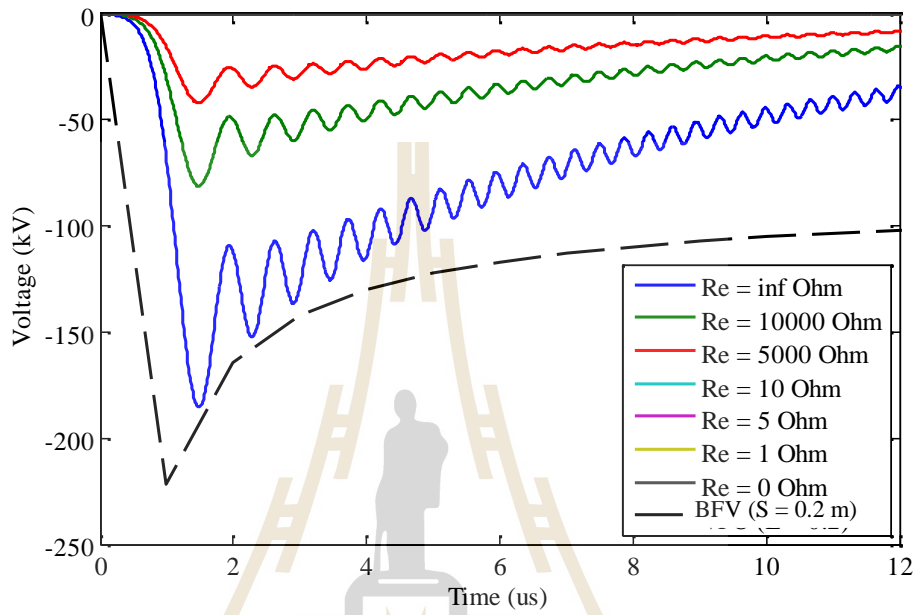
Key : O = No flashover , X = Flashover



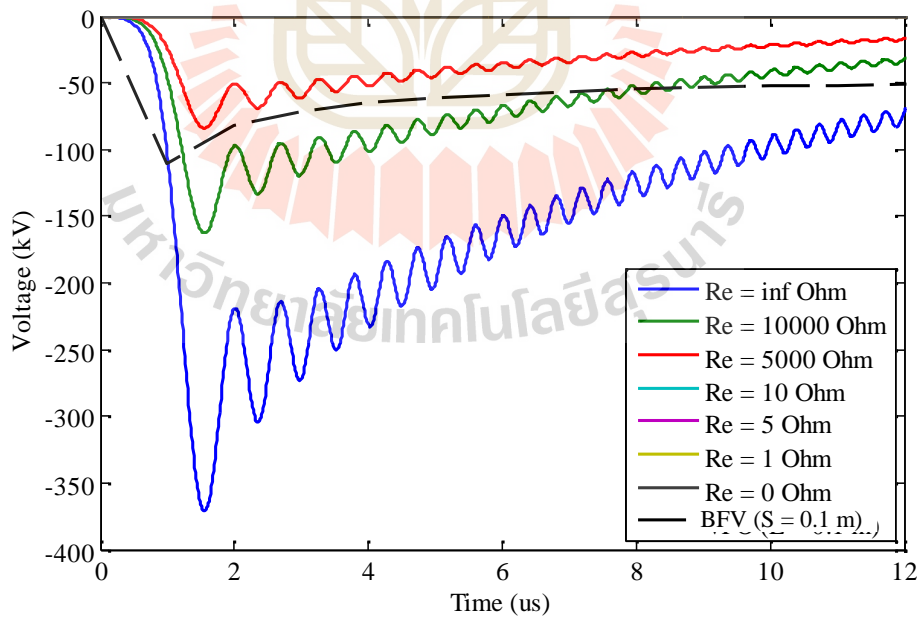
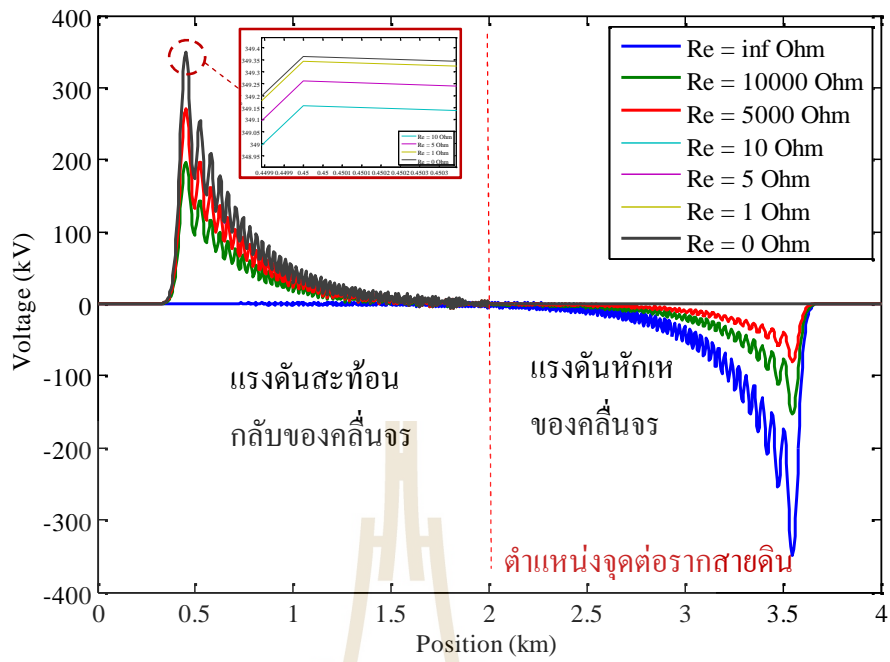
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

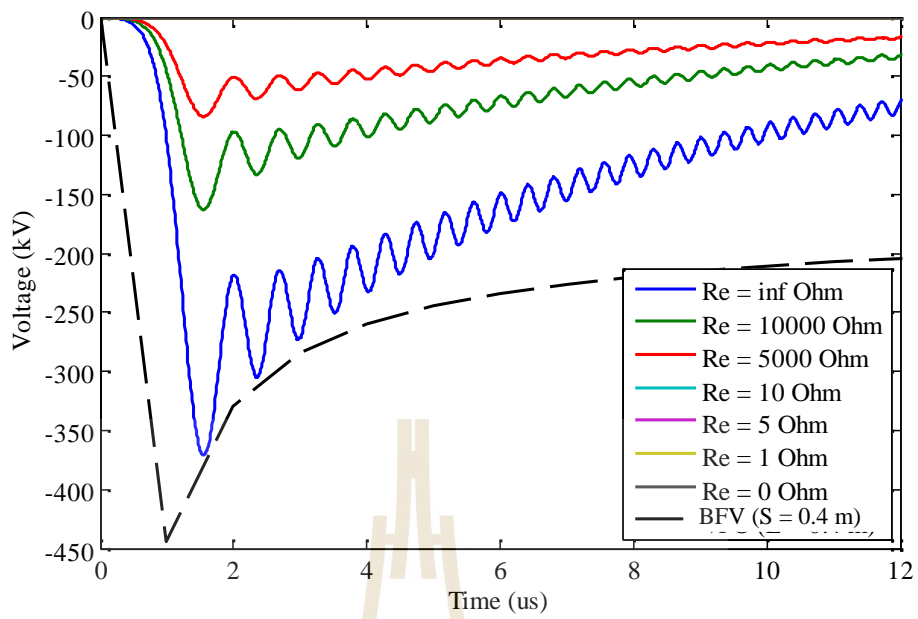






มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี





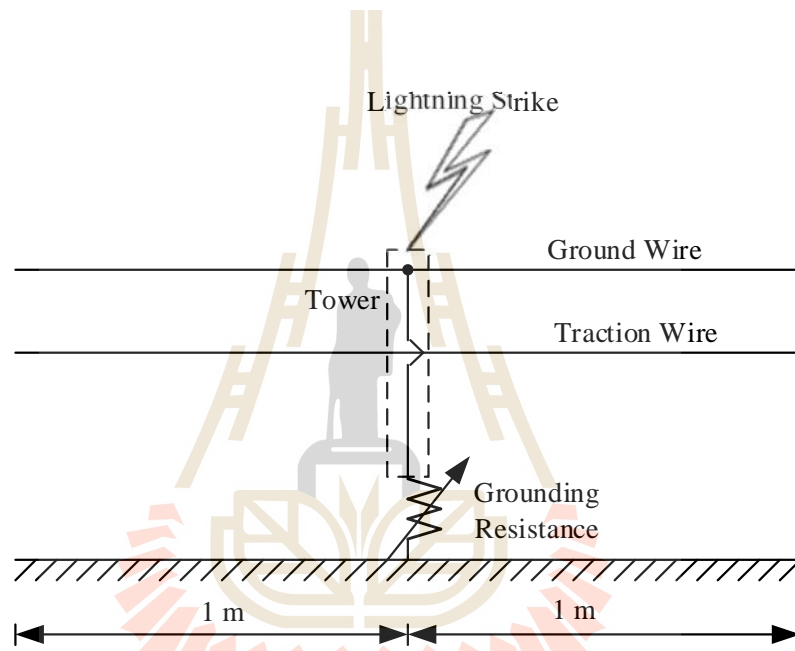
ขนาด กระแส เสิร์จ	ค่าความ ต้านทาน รากสายดิน	ระบบสายจ่ายแคะพินารีสำหรับโครงสร้างรตไฟฟ้าความเร็วสูง										
		ระยะลู่กด้วยนวนน S (m)										
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	
-34	0	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	1	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5,000	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10,000	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	infinity	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
-50	0	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	1	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5,000	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10,000	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	infinity	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
-100	0	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	1	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	5,000	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10,000	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	infinity	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O

Key : O = No flashover , X = Flashover

$$\hat{V} = \hat{I}R_e + L_T \frac{dI(t)}{dt}$$

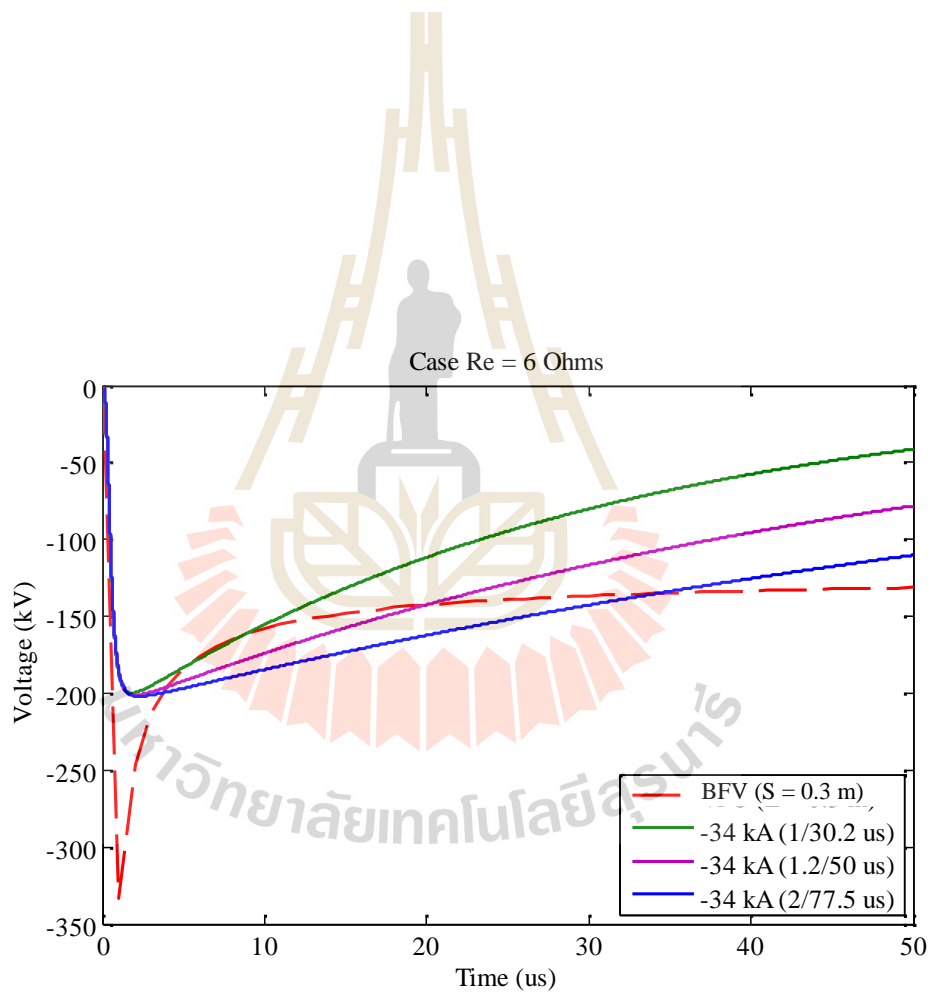
\hat{V} \hat{I} R_e L_T $L_T = 0$

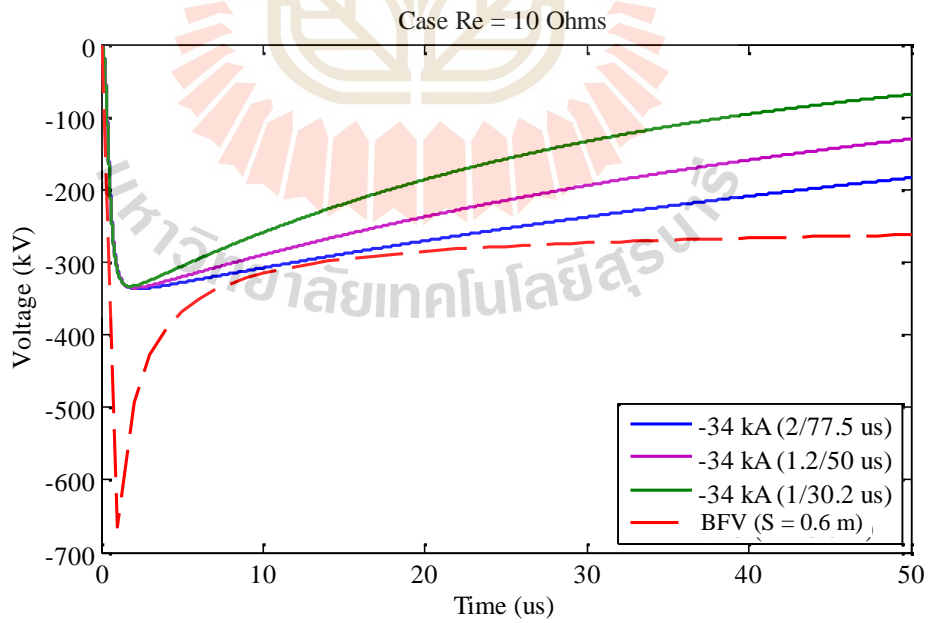
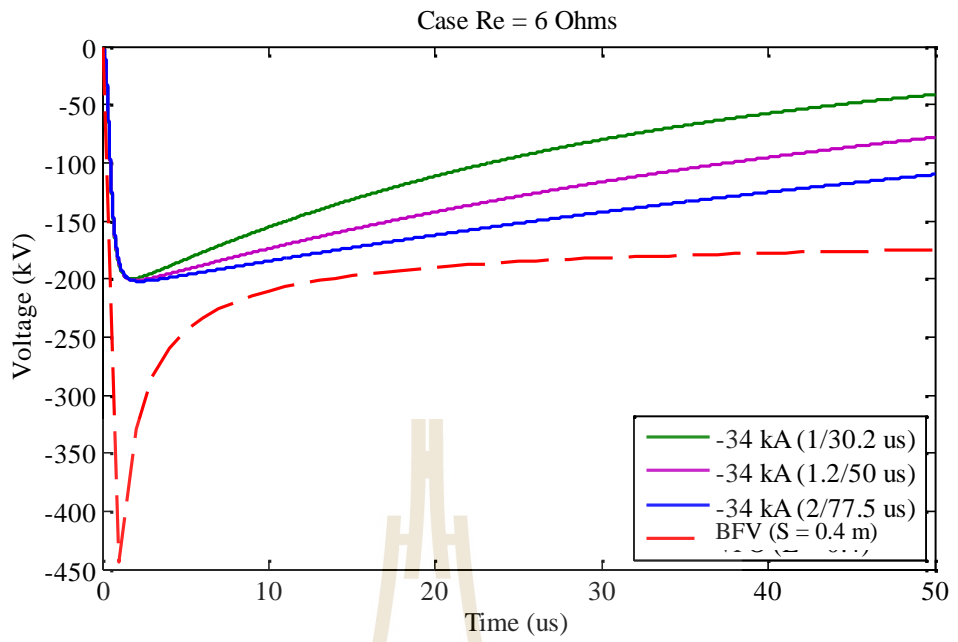
$$\hat{V} = \hat{I}R_e$$



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

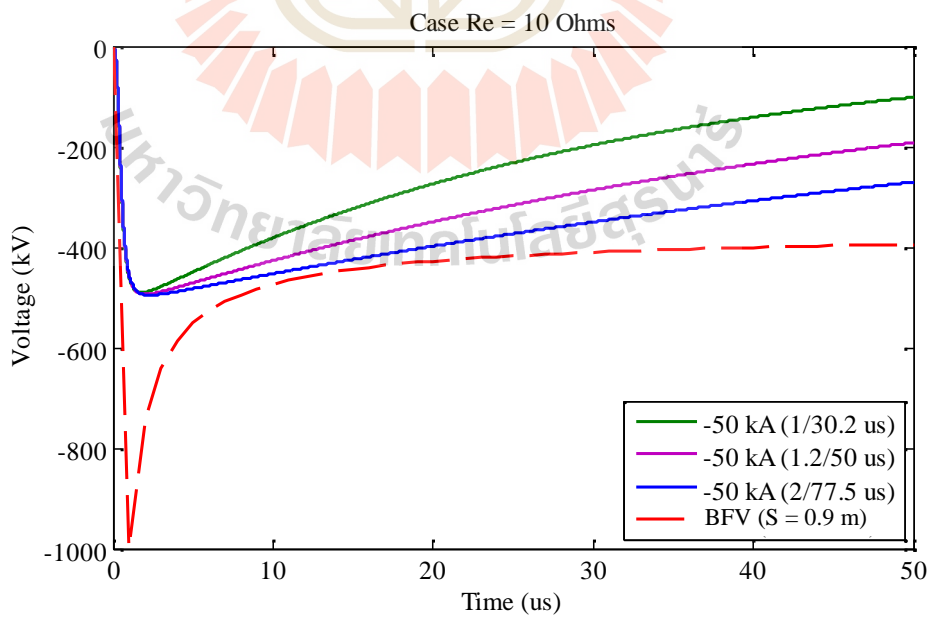
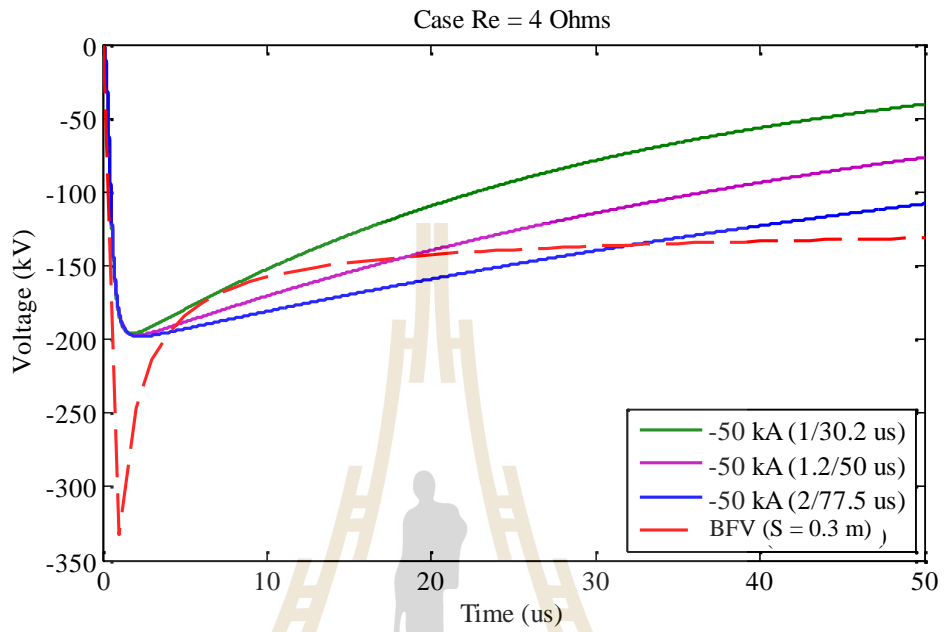
กระแสไฟฟ้า (kA)	ค่าความต้านทานรอกสายดิน ()									
(kA)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-34	-34	-68	-102	-136	-170	-204	-238	-272	-306	-340
-50	-50	-100	-150	-200	-250	-300	-350	-400	-450	-500
-100	-100	-200	-300	-400	-500	-600	-700	-800	-900	-1000





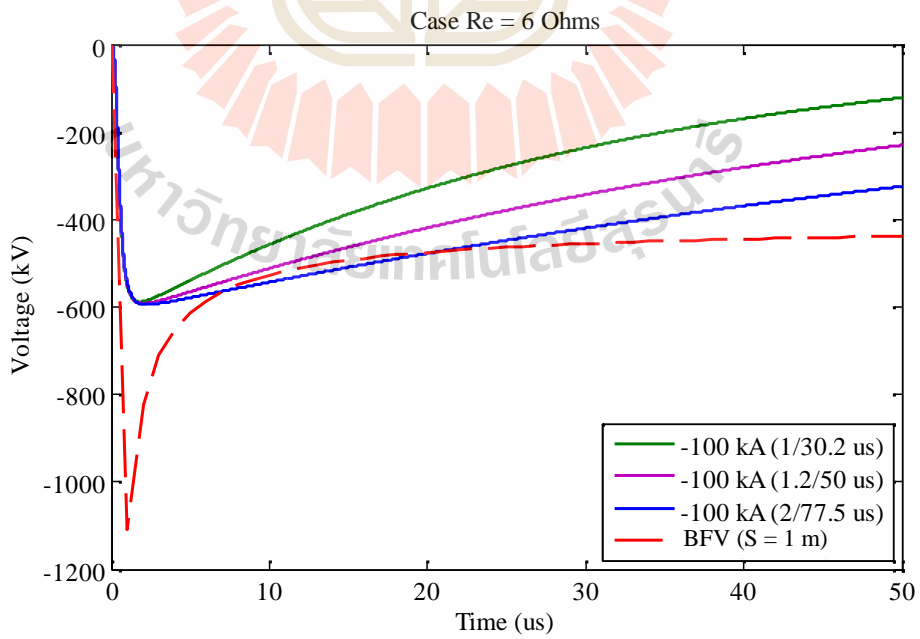
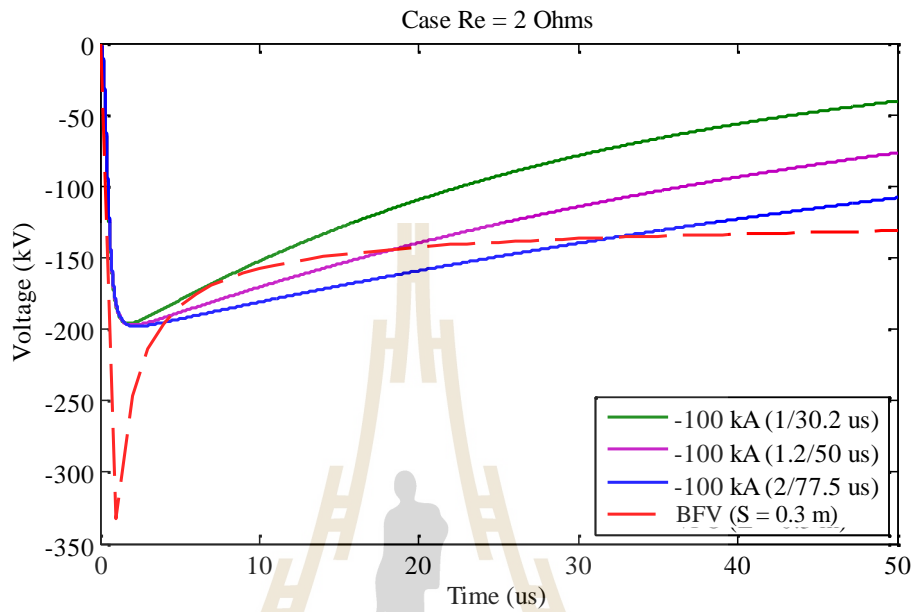
ลักษณะ	ระยะลูกถ้วย	ระบบสายจ่ายเคทีนารีสำหรับโครงสร้างรถไฟฟ้าความเร็วสูง									
รูปคลื่น	ฉนวน	ค่าความต้านทานรากสายดิน ()									
กระแสเล็รี่	(m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-34 kA (1/30.2 us)	0.3	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X
	0.4	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X
	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X
	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-34 kA (1.2/50 us)	0.3	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X
	0.4	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X
	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X
	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-34 kA (2/77.5 us)	0.3	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X
	0.4	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X
	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X
	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Key : O = No flashover , X = Flashover



ลักษณะ	ระยะลูกถ้วย	ระบบสายจ่ายแคะหินรีสำหรับโครงสร้างรถไฟฟ้าความเร็วสูง									
รูปคลื่น	ฉนวน	ค่าความต้านทานรอกสายดิน ()									
กระแสเลีร์จ	(m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50 kA (1/30.2 us)	0.3	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X
	0.4	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X
	0.5	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X
	0.6	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X
	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X
	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-50 kA (1.2/50 us)	0.3	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X
	0.4	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X
	0.5	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X
	0.6	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X
	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X
	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X
	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-50 kA (2/77.5 us)	0.3	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X
	0.4	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X
	0.5	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X
	0.6	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X
	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X
	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X
	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Key: O = No flashover , X = Flashover

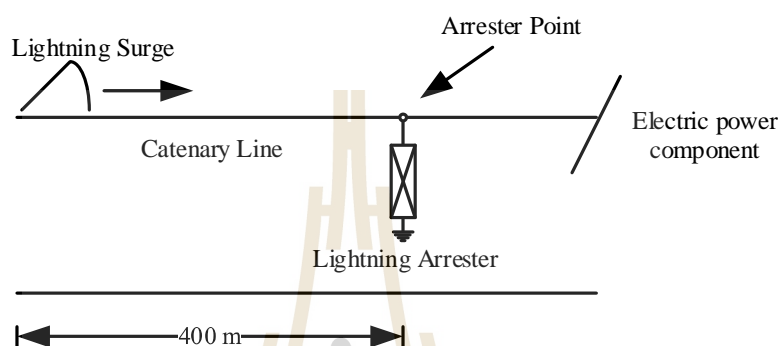


ลักษณะ	ระยะลูกถ้วย	ระบบสายจ่ายเคทีนารีสำหรับโครงสร้างรถไฟฟ้าความเร็วสูง									
รูปคลื่น	ฉนวน	ค่าความต้านทานรอกสายดิน ()									
กระแสเล็รัจ	(m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-50 kA (1/30.2 us)	0.3	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X
	0.4	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X
	0.5	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X
	0.6	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X
	0.7	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X
	0.8	O	O	O	O	O	X	X	X	X	X
	0.9	O	O	O	O	O	O	X	X	X	X
	1	O	O	O	O	O	O	X	X	X	X
-50 kA (1.2/50 us)	0.3	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0.4	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X
	0.5	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X
	0.6	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X
	0.7	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X
	0.8	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X
	0.9	O	O	O	O	O	X	X	X	X	X
	1	O	O	O	O	O	O	X	X	X	X
-50 kA (2/77.5 us)	0.3	O	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	0.4	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X
	0.5	O	O	X	X	X	X	X	X	X	X
	0.6	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X
	0.7	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X
	0.8	O	O	O	O	X	X	X	X	X	X
	0.9	O	O	O	O	O	X	X	X	X	X
	1	O	O	O	O	O	X	X	X	X	X

Key : O = No flashover , X = Flashover

5.2.6. ผลของคลื่นจรเมื่อเคลื่อนที่ถึงจุดติดตั้งกับดักเสิร์จ

การวิเคราะห์แรงดันสะท้อนกลับ และแรงดันหักเหของคลื่นจรที่จุดต่อกับดักเสิร์จในสายตัวนำของระบบ จะใช้ข้อมูลจากการทดสอบจากผู้ผลิตมา ประมวลผลรวมกันกับระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม จากรูปที่ 5.30 จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วน คือสายตัวนำของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี และตำแหน่งจุดต่อกับดักฟ้าผ่า

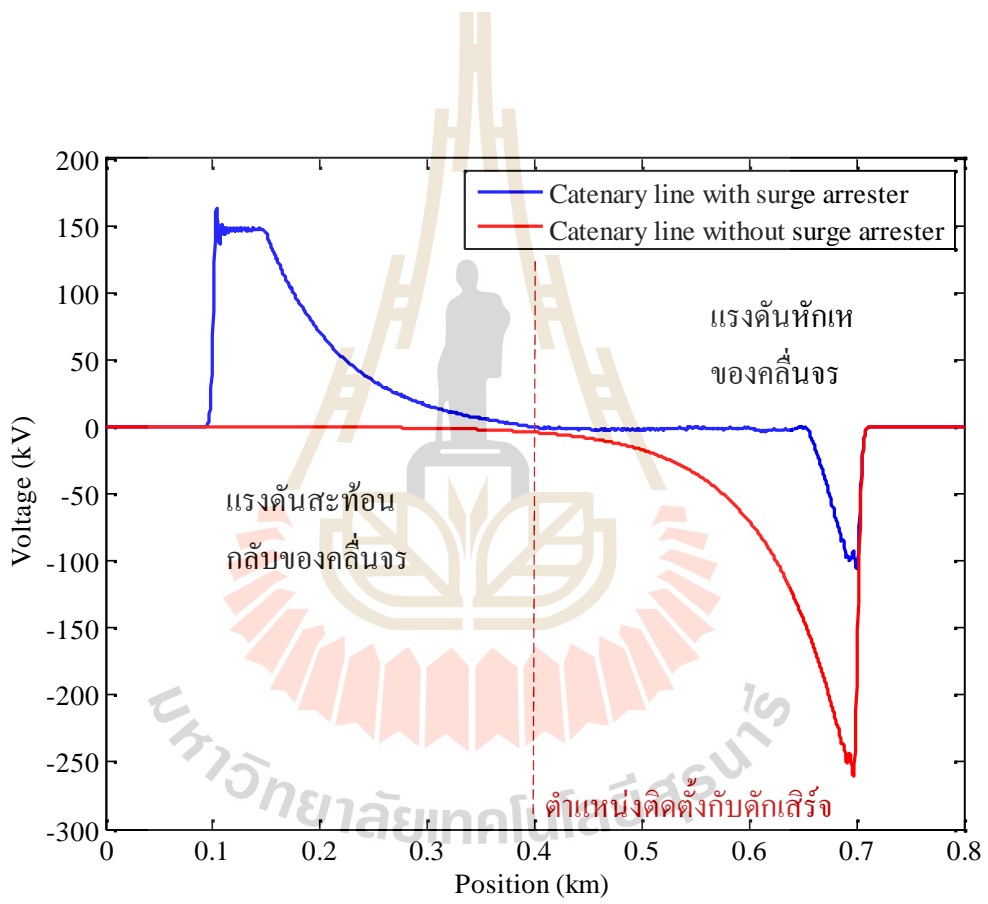


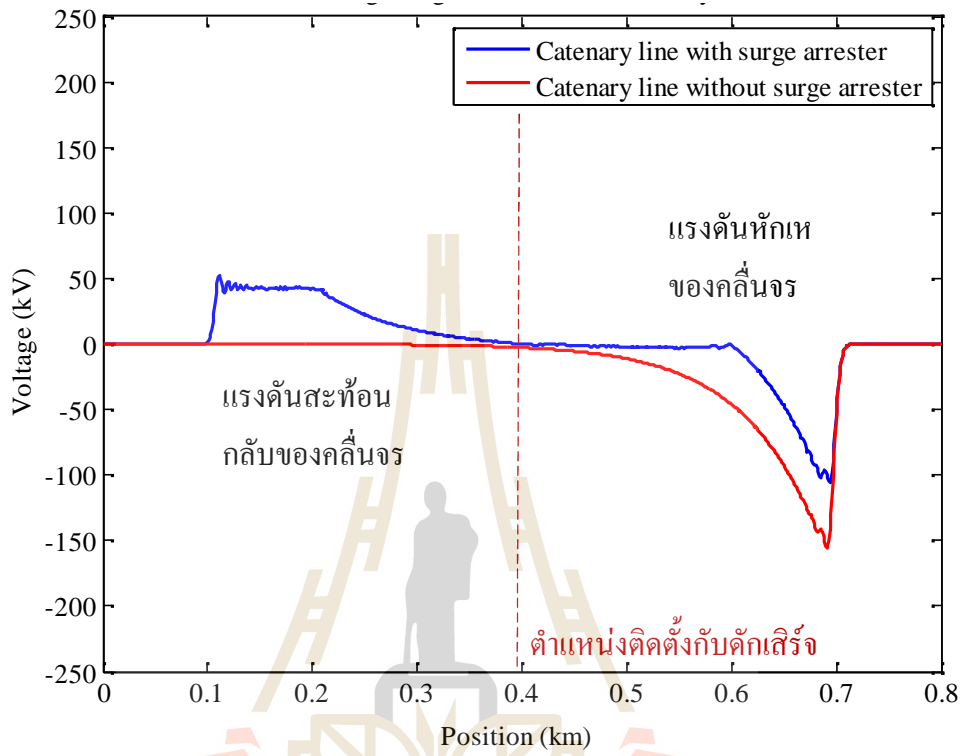
รูปที่ 5.30 แบบจำลองตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ผลของกับดักเสิร์จต่อคลื่นจร

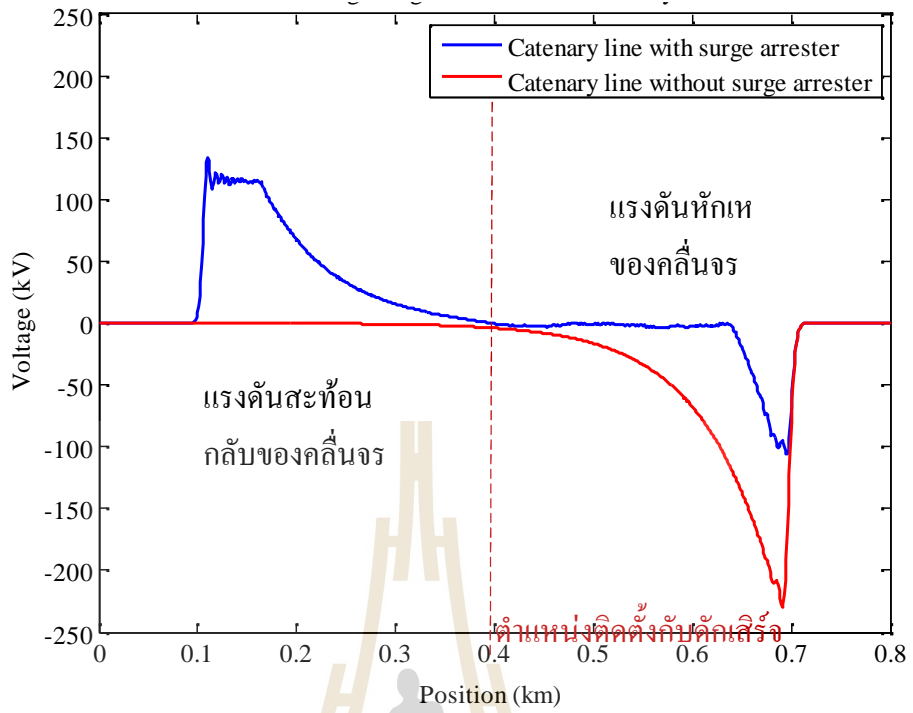
การวิเคราะห์คลื่นจรในสายตัวนำของระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม ใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์คลื่นจรที่สายดินซึ่งอากาศ จากรูปแบบจำลองระยะความยาวสายดินซึ่งอากาศ เท่ากับ 400 m แบ่งระยะระหว่างจุดต่อ (Δx) ออกเป็น 1 เมตร และระยะเวลาที่ใช้กำหนดให้เป็น 0.6 ms มีอัตราการเปลี่ยนแปลงของเวลา (Δt) เป็น 0.1 μ s

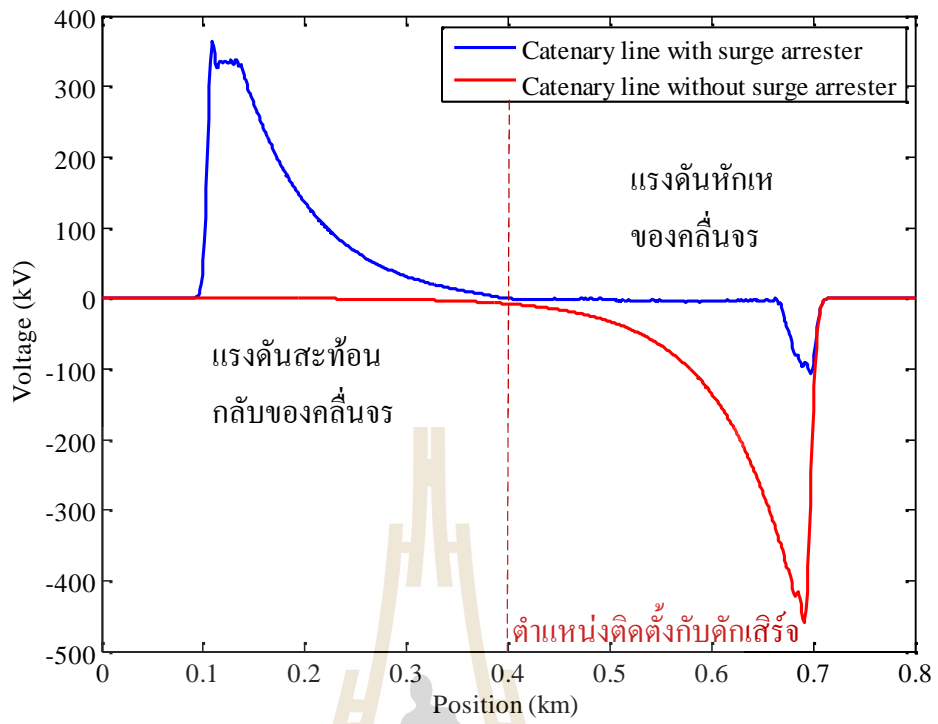
สำหรับการวิเคราะห์คลื่นจรที่จุดต่อกับดักฟ้าผ่า จะนำข้อมูลการทดสอบของผู้ผลิต หรือคุณลักษณะของกับดักเสิร์จมาใช้ในการวิเคราะห์ตามโพลีชาร์ตในรูปที่ 3.36 โดยค่าแรงดันหักเหของคลื่นจรจะมีค่าเท่ากับแรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จ กับดักเสิร์จที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ กับดักเสิร์จชนิด MO รุ่น 3EB4 370 – 5AX32 – 0 ที่พิกัดแรงดันใช้งาน 25 kV ที่การทดสอบด้วยแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขนาด 20 kA 8/20 μ s แรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จมีค่าเท่ากับ 106 kV (Siemens, 2014)

การวิเคราะห์คลื่นจรสำหรับสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารีที่จุดต่อกับดักเสิร์จแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ แรงดันเสิร์จที่เกิดจากการวابلไฟย้อนกลับจากการเกิดฟ้าผ่าที่สายดินซึ่งอากาศ และที่เสา เมื่อกำหนดให้ความยาวของจนวน 0.6 m กำหนดให้ค่าความต้านทานดินมีค่าสูงสุดตาม









บทที่ 6

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าของหม้อแปลงออโต

6.1. บทนำ

การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงออโต เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงดันเสิร์จต่อค่าความคงทนสนามไฟฟ้าของฉนวนภายในหม้อแปลง ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การกำหนดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด ภายในหม้อแปลงได้จากการคำนวณค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของขดลวดภายในหม้อแปลง จากค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งการวิเคราะห์ค่าสนามไฟฟ้าออกได้เป็น 3 กรณี คือ การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตในสภาวะการทำงานปกติ, การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตในสภาวะการเกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายตัวนำโดยตรง และการเกิดวบไฟย้อนกลับ และการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตในสภาวะที่มีการติดตั้งกับดักฟ้าผ่า

6.2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามไฟฟ้า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการแพร่กระจายสนามไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ดังสมการที่

(6.1) (Christopoulos, 1995)

$$\nabla^2 E - \left(\frac{1}{v^2}\right) \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2}\right) - \sim \nabla \left(\frac{\partial E}{\partial t}\right) = 0 \quad (6.1)$$

เมื่อ	E	คือ ค่าสนามไฟฟ้า
	\sim	คือ สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็ก
	v	คือ ความเร็วในการแพร่กระจาย

ความเร็วในการแพร่กระจายสามารถอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์มิตติวิตีของฉนวน (ϵ) กับสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กของฉนวน ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (6.2)

$$v = \frac{1}{\sqrt{\sim v}} \quad (6.2)$$

โดยที่ $v = v_0 v_r$ เมื่อ $v_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m และ v_r คือค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ของฉนวน และ $\sim = \sim_0 \sim_r$ เมื่อ $\sim_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m และ \sim_r คือสภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ของฉนวน แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ กับสมการที่ (6.2) ลงในสมการที่ (6.1) จะได้

$$\nabla^2 E - \sim v \left(\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) - \sim t \left(\frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \quad (6.3)$$

สามารถแปลงรูปจากโดเมนเวลา ให้อยู่ในรูปโดเมนความถี่ได้จากสมการที่ (6.4) และสมการที่ (6.5)

$$\frac{\partial E}{\partial t} \approx j\tilde{S}E \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \approx -\tilde{S}^2 E \quad (6.5)$$

จากสมการที่ (6.3) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกระจายสนามไฟฟ้าของหม้อแปลงสำหรับปัญหา 3 มิติ ได้ดังสมการที่ (6.6)

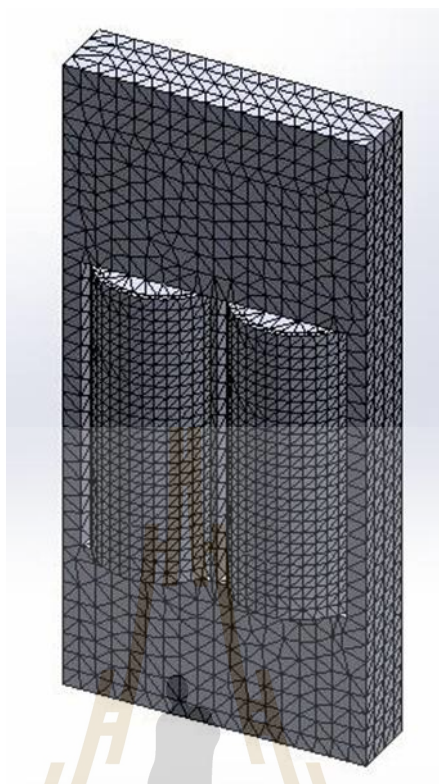
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial z} \right) + (v\tilde{S}^2 - jt\tilde{S})E = 0 \quad (6.6)$$

6.3. การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าในหม้อแปลงออโตด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์

จากสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกระจายของสนามไฟฟ้า สำหรับปัญหาในรูปแบบ 3 มิติ หาผลเฉลยแม่นยำได้ยาก ดังนั้นต้องหาผลเฉลยโดยประมาณด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

6.3.1. ออกแบบอีลิเมนต์ของโครงสร้างภายในของหม้อแปลงออโต

ขั้นตอนแรกเริ่มจากการแบ่งพื้นที่ของส่วนประกอบภายในหม้อแปลงออกเป็น 3 ส่วนหลักคือ ส่วนของขดลวด, แกนเหล็ก และฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ตามโครงสร้างของหม้อแปลงออโตที่ออกแบบ การออกแบบกริดเป็นรูปอีลิเมนต์ต่างๆ ใช้โปรแกรม Solidworks ลักษณะอีลิเมนต์เป็นรูปสามเหลี่ยมสามจุดต่อ สำหรับการออกแบบกริดของปัญหาในแบบ 3 มิติ แสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 การแบ่งอิลลิเมนต์ของหม้อแปลงออโตสำหรับระบบสายจ่ายแคทีนารี 25 kV แบบ 3 มิติ

6.3.2. ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์

รูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ สมมติลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้นจะได้

$$E(x, y, z) = E_1N_1 + E_2N_2 + E_3N_3 + E_4N_4 \quad (6.7)$$

โดยที่ N_n คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลลิเมนต์ เมื่อ $n = 1, 2, 3$ และ 4

E_n คือ ผลลัพธ์ของค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละจุดต่อ $1, 2, 3$ และ 4

จากอิลลิเมนต์รูปทรง 3 มิติ 4 จุดต่อจะได้

$$N_n = \frac{1}{6V}(a_n + b_n x + c_n y + d_n z) \quad (6.8)$$

โดยที่

$$a_1 = x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3)$$

$$a_2 = x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4)$$

$$a_3 = x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2)$$

$$a_4 = x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$

$$b_2 = y_4(z_1 - z_3) + y_3(z_4 - z_1) + y_1(z_3 - z_4)$$

$$b_3 = y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$

$$b_4 = y_3(z_1 - z_2) + y_2(z_3 - z_1) + y_1(z_2 - z_3)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_3(z_4 - z_2) + x_2(z_3 - z_4)$$

$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$

$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_2(z_4 - z_1) + x_1(z_2 - z_4)$$

$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$

$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_3(y_4 - y_1) + x_1(y_3 - y_4)$$

$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$

$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_2(y_3 - y_1) + x_1(y_2 - y_3)$$

และ V คือ ปริมาตรของแต่ละอิลลิเมนต์ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ดังสมการที่ (6.9)

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (6.9)$$

6.3.3. การสร้างสมการอิลลิเมนต์

การสร้างสมการอิลลิเมนต์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์ ซึ่งเป็นการสร้างสมการของอิลลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา สำหรับปัญหาการกระจายสนามไฟฟ้าเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ดังสมการที่ (6.4) แต่สำหรับงานวิจัยนี้ การวิเคราะห์ปัญหาสนามไฟฟ้าจะไม่คำนึงถึงเวลา และความถี่ที่เปลี่ยนแปลง $vS^2 - j\omega S = 0$ ดังนั้นจากสมการที่ (6.4) สมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาการกระจายสนามไฟฟ้า สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (6.10)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial E}{\partial z} \right) = 0 \quad (6.10)$$

วิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง เป็นวิธีการที่นิยมมากที่สุด สำหรับประยุกต์ใช้กับระเบียบวิธีไฟไนต์อิลลิเมนต์เพื่อหาระบบสมการเชิงเส้น ซึ่งวิธีของกาลเออร์คิน (Galerkin) เป็นวิธีการหนึ่งของวิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง โดยเมตริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีการนี้ จะมีความสมมาตร ทำให้ง่ายต่อการพัฒนา การแก้ปัญหาด้วยการเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์ การสร้างสมการอิลลิเมนต์ด้วยการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง มีวิธีการดังนี้ คือแทนค่าผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (6.10) ไม่ให้มีค่าเท่ากับศูนย์ แต่จะมีค่าเท่ากับ R ดังสมการที่ (6.11)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial E}{\partial z} \right) = R \quad (6.11)$$

เศษตกค้าง (Residual : R) เป็น ค่าผิดพลาดโดยประมาณที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแน่นอนตรง ดังนั้นเศษตกค้าง R ควรจะมีค่าต่ำสุดเพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด สำหรับงานวิจัยนี้วิธีการเศษตกค้างจะใช้วิธีของกาลเออร์คิน โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function : W) แล้วอินทิเกรตโดยรอบปริมาตร ดังสมการ

$$\int_V W_n R dV \quad n = 1, 2, 3 \text{ และ } 4 \quad (6.12)$$

สำหรับอิลลิเมนต์จุดที่ไม่ทราบค่ามี 4 จุด ได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจะต้องมีสมการ 4 สมการสำหรับแก้ปัญหา แสดงว่าจากสมการที่ (6.12) จะต้องมีค่า $n = 1, 2, 3$ และ 4 ซึ่งโดยทั่วไปจะเลือก $W_n = N_n$ ดังนั้นเมื่อแทนค่า R ลงไปในสมการที่ (6.11) จะได้

$$\int_V N_n \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial z} \right) \right) dV = 0 \quad (6.13)$$

สำหรับสมการเชิงอนุพันธ์อันดับสอง จะใช้การอินทิเกรตทีละส่วน (Integrate by parts) โดยใช้ทฤษฎีของเกาส์ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (6.14)

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma} N_n \left(\frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial x} n_x + \frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial y} n_y + \frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial z} n_z \right) d\Gamma \\ & - \int_V \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial z} \right) dV = 0 \end{aligned} \quad (6.14)$$

พจน์แรกเป็นพจน์ที่เกี่ยวกับขอบเขตของอิลลิเมนต์ ทำงานประยุกต์เงื่อนไขแบบนอยมันน์ (Neumann condition) กำหนดให้ $\frac{\partial E}{\partial n} = 0$ ดังนั้นจึงได้สมการแสดงดังนี้

$$\int_V \left(\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial z} \right) dV = 0 \quad (6.15)$$

$$\int_V \left(\left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial x} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial y} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\sim} \frac{\partial E}{\partial z} \right) dV = 0 \quad (6.15)$$

จากสมการที่ (6.7) จะได้ลักษณะการกระจายของศักย์เชิงเวกเตอร์สนามไฟฟ้า E โดยประมาณในแต่ละอิลลิเมนต์ ดังสมการที่ (6.16)

$$E(x, y, z) = [N]_{1 \times 4} [E]_{4 \times 1} \quad (6.16)$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{\partial E}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} [E]_{4 \times 1}, \quad \frac{\partial E}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} [E]_{4 \times 1} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial E}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} [E]_{4 \times 1}$$

และสมการไฟไนท์อิลลิเมนต์ เป็นดังสมการที่ (6.17)

$$\int_V \left(\left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\sim} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\sim} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\sim} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV [E]_{4 \times 1} = 0 \quad (6.17)$$

หรือเขียนสมการอิลลิเมนต์แต่ละอิลลิเมนต์ ประกอบด้วย 4 สมการ ได้ดังนี้

$$[K]_{4 \times 4} \{E\}_{4 \times 1} = \{F\}_{4 \times 1} \quad (6.18)$$

หาเมทริกซ์ $[K]_{4 \times 4}$ จากสมการที่ (6.19)

$$[K]_{4 \times 4} = \int_V \left(\left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\sim} \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\sim} \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\sim} \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV \quad (6.19)$$

จากฟังก์ชันการประมาณภายในสมการที่ (6.8)

$$\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{6V}, \quad \frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{6V} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial N_n}{\partial z} = \frac{d_n}{6V} \quad n = 1, 2, 3 \quad (6.20)$$

แทนค่าจากสมการที่ (6.20) ลงในสมการที่ (6.19) จะได้

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{\sim} \int \left(\frac{b_i b_j}{6V 6V} + \frac{c_i c_j}{6V 6V} + \frac{d_i d_j}{6V 6V} \right) dx dy dz \quad i, j = 1, 2, 3 \text{ และ } 4 \quad (6.21)$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36 \sim V} (b_i b_j + c_i c_j + d_i d_j)$$

$$= \frac{1}{36 \sim V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 + d_2 d_1 & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 + d_3 d_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 + d_3 d_2 & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ b_4 b_1 + c_4 c_1 + d_4 d_1 & b_4 b_2 + c_4 c_2 + d_4 d_2 & b_4 b_3 + c_4 c_3 + d_4 d_3 & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{36 \sim V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ & & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ & & & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix}$$

Sym

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36 \sim V} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

จัดรูปแบบใหม่เพื่อต่อการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ได้ดังสมการที่ (6.23)

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{\sim} v [B]_{4 \times 3}^T [B]_{3 \times 4} \quad (6.23)$$

เมื่อ $[B] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix}$

การหาเมทริกซ์ $\{F\}_{4 \times 1}$ จาก

$$\{F\}_{4 \times 1} = 0 \quad (6.24)$$

หรือ
$$\{F\}_{4 \times 1} = (0) \int [N]_{4 \times 1} dx dy dz \quad (6.25)$$

จากฟังก์ชันการประมาณภายในของสมการที่ (6.25) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (6.26)

$$\{F\}_{4 \times 1} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6.26)$$

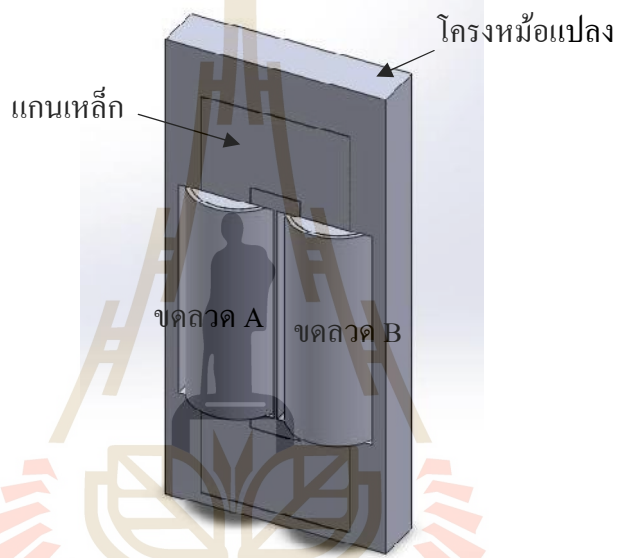
6.3.4. การประกอบสมการอิลลิเมนต์จิ้นเป็นระบบ

นำสมการของแต่ละอิลลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวม หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ ดังนั้นจะได้สมการรวมของสนามไฟฟ้า ในรูปสมการเชิงเส้นดังสมการที่ (6.27)

$$[K]_{n \times n} \{E\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1} \quad (6.27)$$

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ E_n \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad (6.28)$$

เมื่อ K คือสัมประสิทธิ์ของระบบรวม, E คือ ค่าสนามไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่า ณ จุดต่อต่างๆ และ F คือ ค่าแรงภายนอกที่มากระทำ ณ จุดต่อต่างๆ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$E = K^{-1}F$$

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ E_n \end{bmatrix}_{nx1} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & K_{nm} \end{bmatrix}_{nxn}^{-1} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n \end{bmatrix}_{nx1} \quad (6.29)$$

6.4. ผลการจำลองของสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโต

การจำลองผลของสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตจะแบ่งออกเป็น 3 กรณี คือ การจำลองสนามไฟฟ้าที่ระดับแรงดันใช้งาน, การจำลองสนามไฟฟ้าเมื่อเกิดแรงดันเสิร์จ และการจำลองสนามไฟฟ้าที่ติดตั้งกับดักเสิร์จ โดยนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าความคงทนสนามไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง 24.47 kV/mm

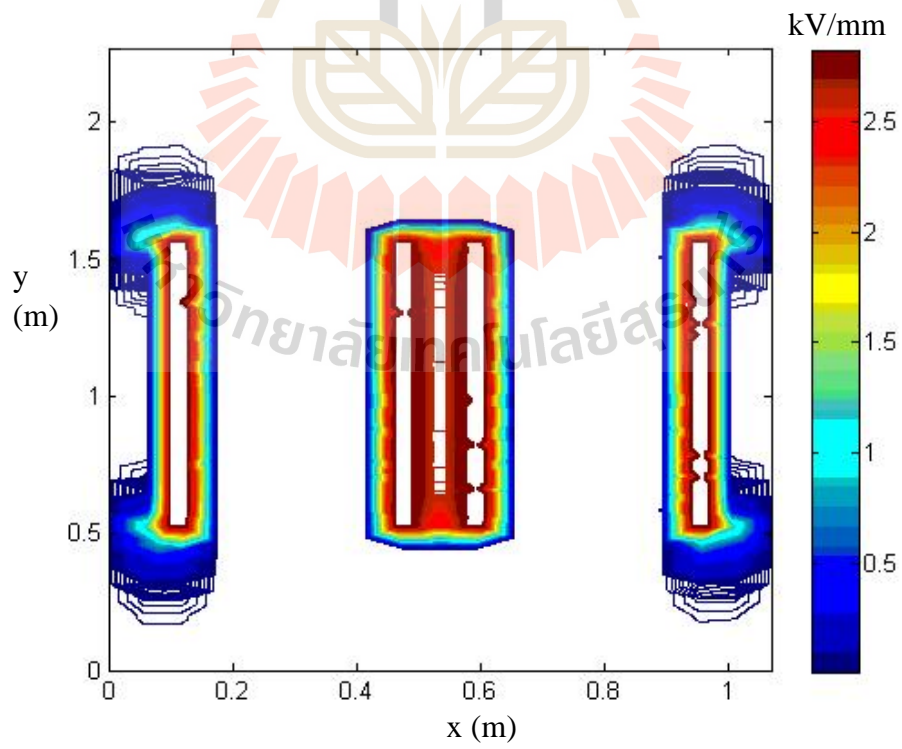
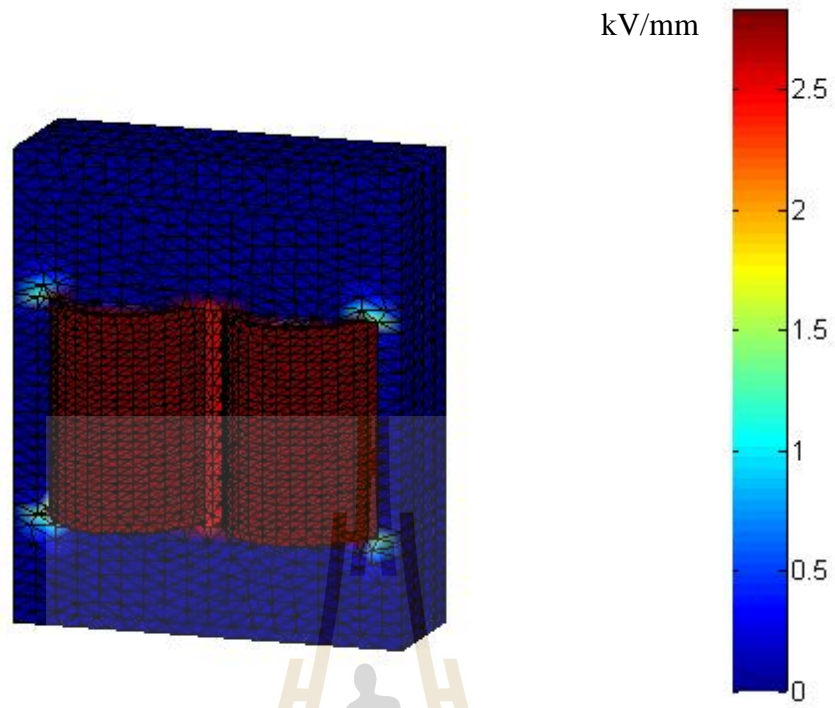
6.4.1. ผลการจำลองสนามไฟฟ้าที่ระดับแรงดันใช้งาน

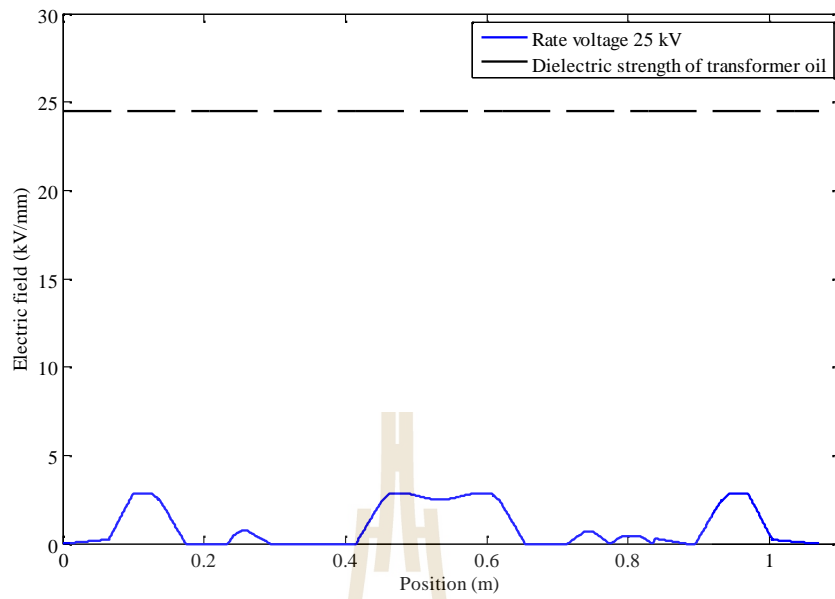
ระดับแรงดันใช้งานของหม้อแปลงออโตสำหรับระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง ขนาด 25 kV 50 Hz มีแรงดันค่ายอด และค่าสนามไฟฟ้าที่ขดลวด A และขดลวด B ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ค่าสนามไฟฟ้าที่ขดลวดหม้อแปลงที่ระดับแรงดันใช้งาน

แรงดันค่ายอด (kV)		ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/mm)	
ขดลวด A	ขดลวด B	ขดลวด A	ขดลวด B
35.35	-35.35	2.83	2.83

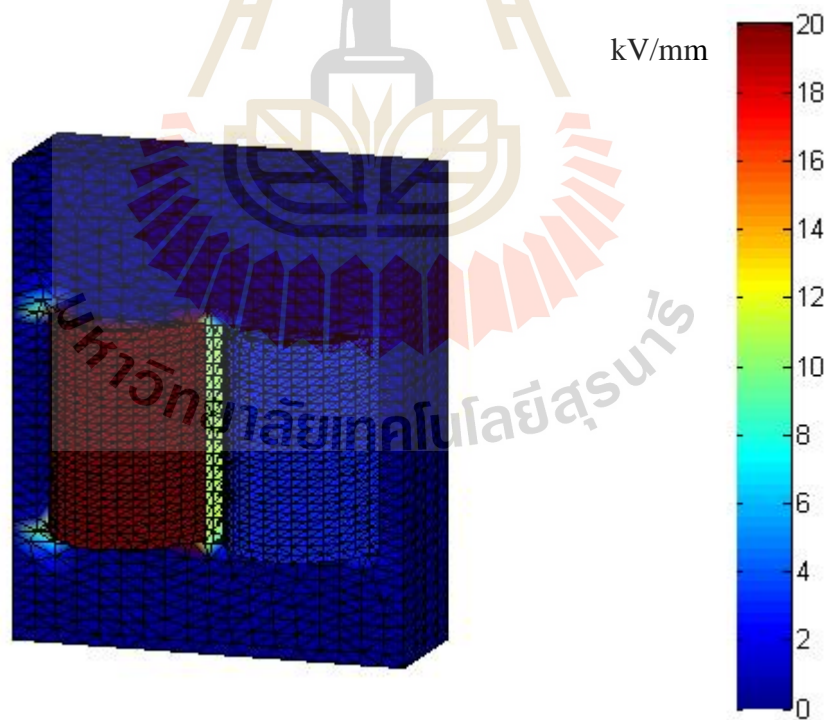
ผลการกระจายสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงออโตของระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูง ในรูปแบบ 3 มิติ และแบบ Contour แสดงดังรูปที่ 6.3 และรูปที่ 6.4 ตามลำดับ

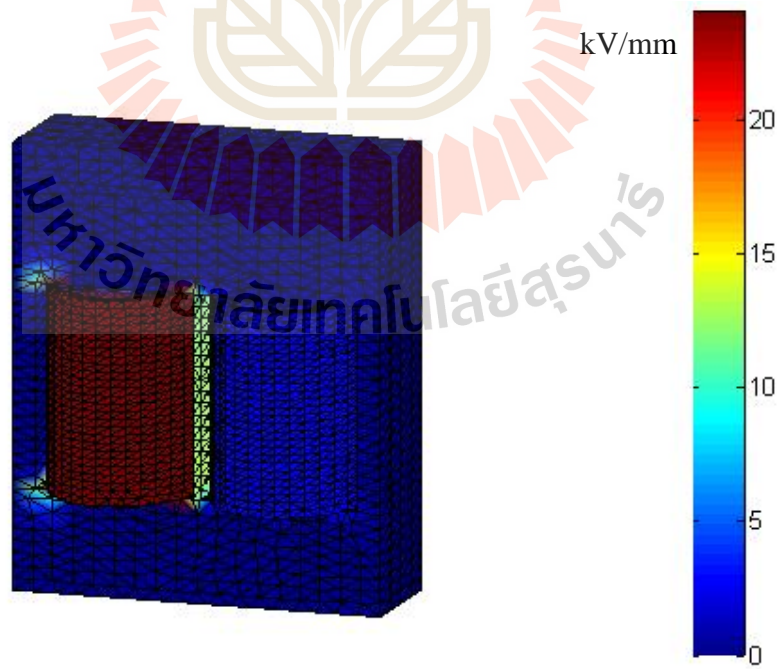
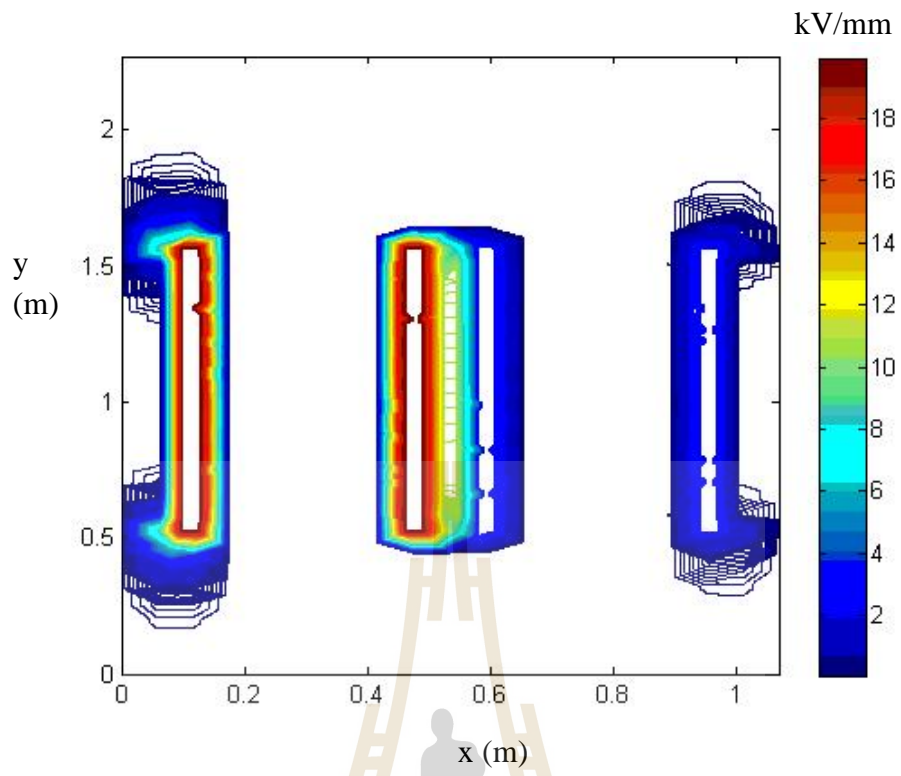


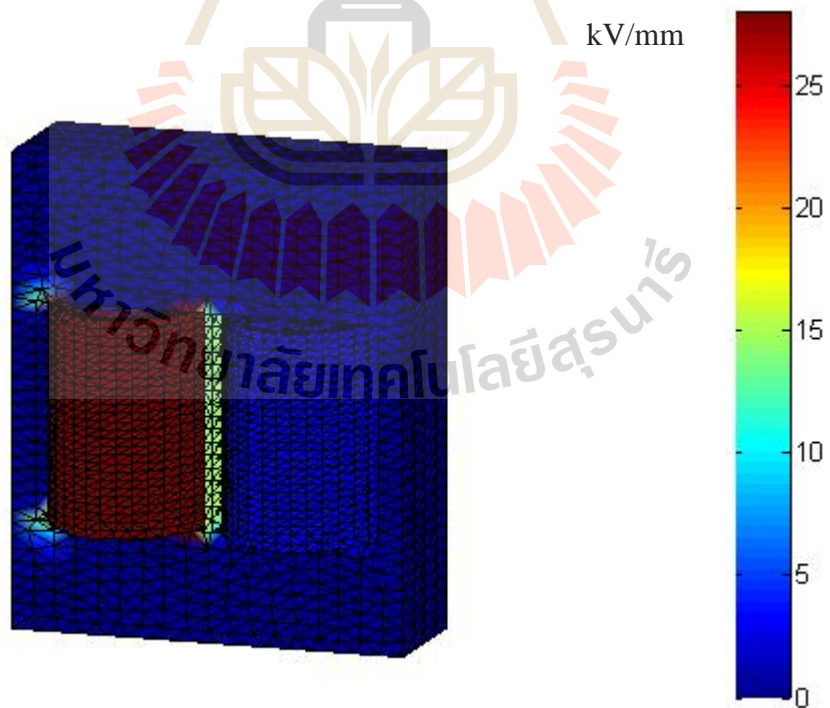
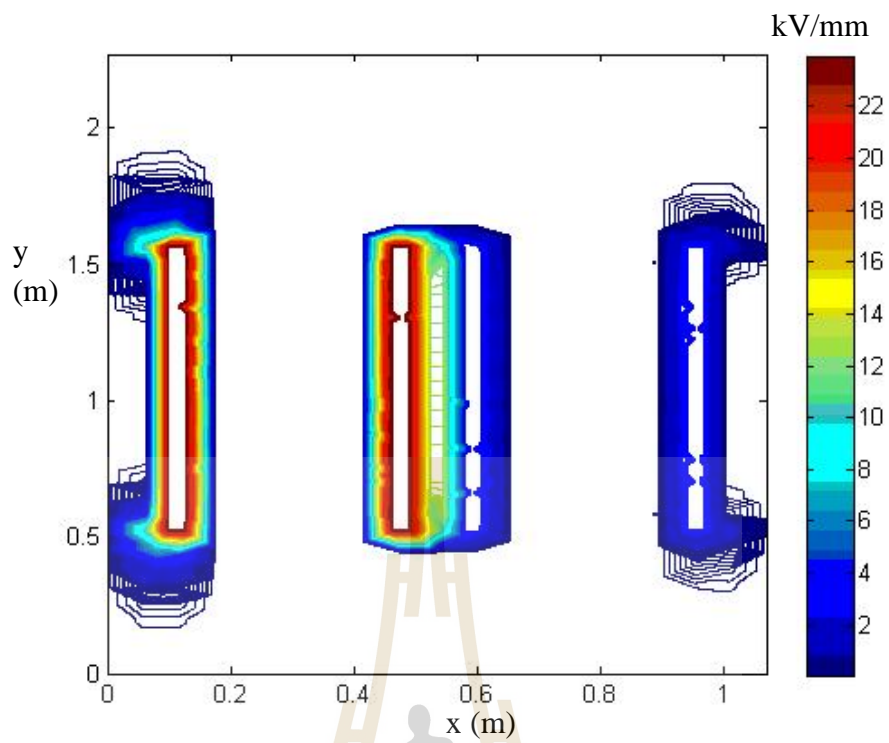


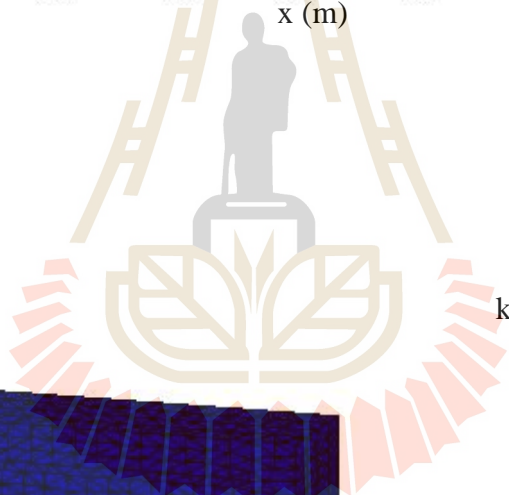
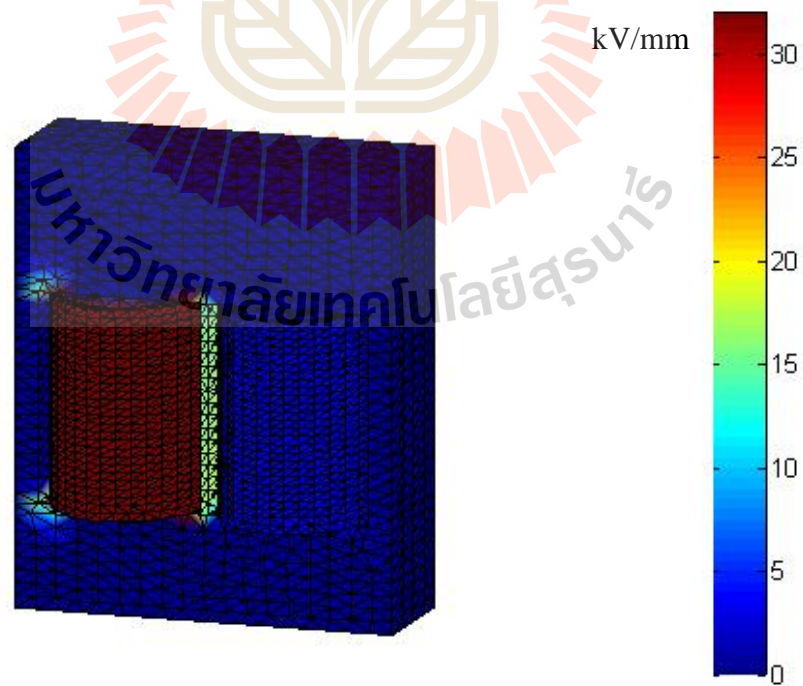
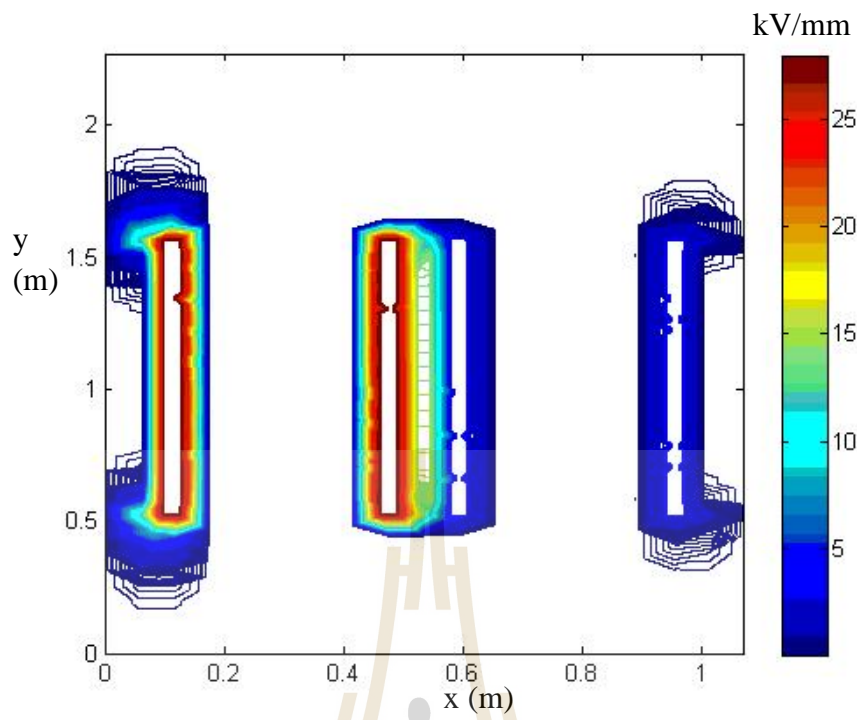
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

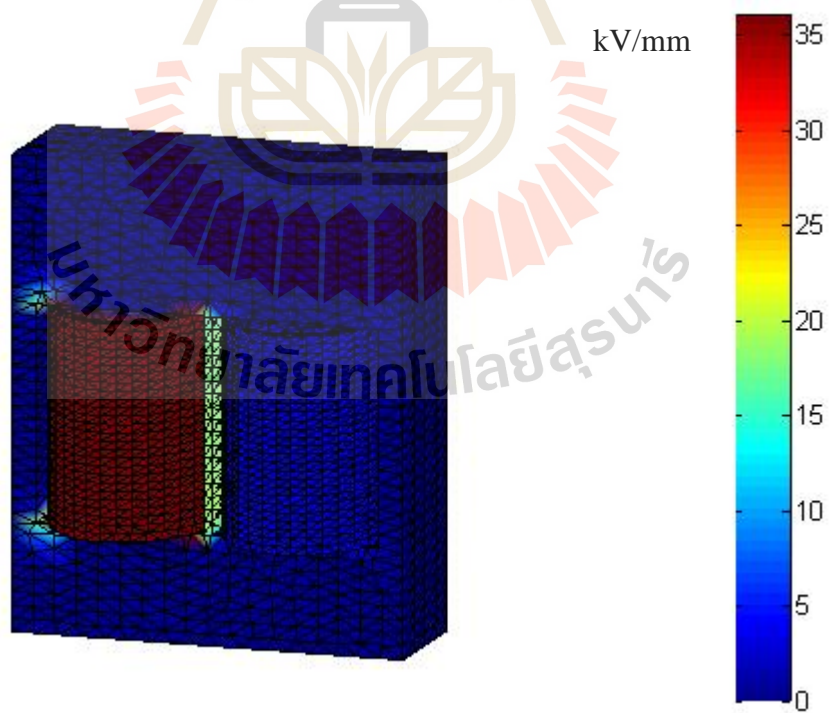
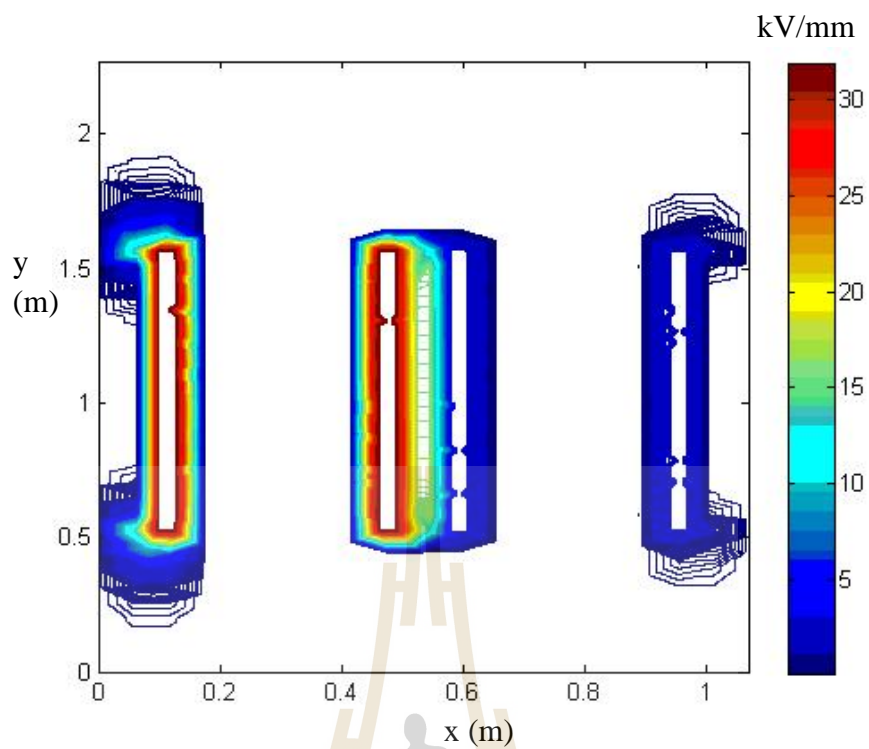
ความต้านทานดิน (Ω)	แรงดันค่าขอด (kV)		ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/mm)	
	ขดลวด A	ขดลวด B	ขดลวด A	ขดลวด B
5	-250	-35.35	20	2.83
6	-300	-35.35	24	2.83
7	-350	-35.35	28	2.83
8	-400	-35.35	32	2.83
9	-450	-35.35	36	2.83
10	-500	-35.35	40	2.83

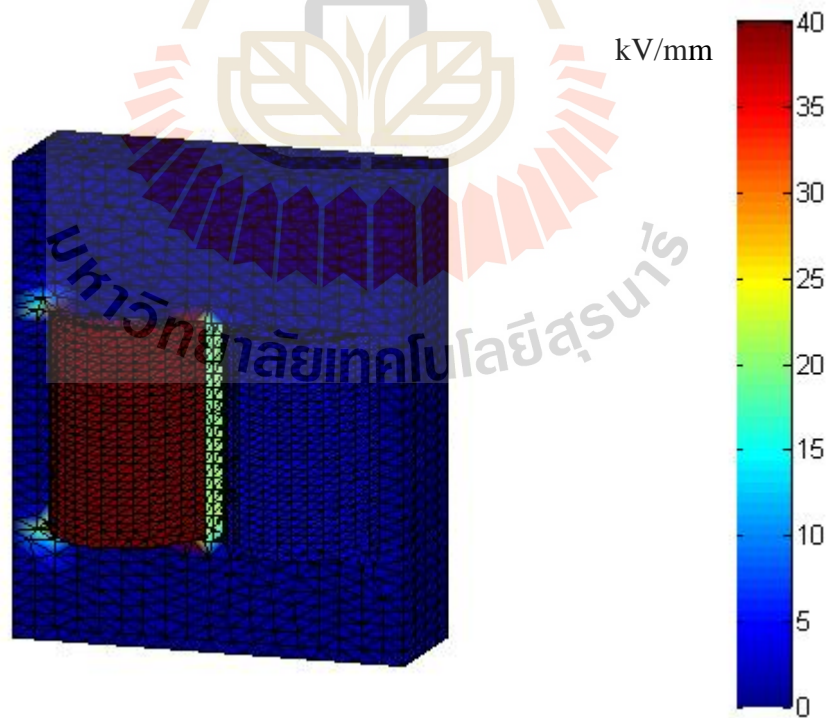
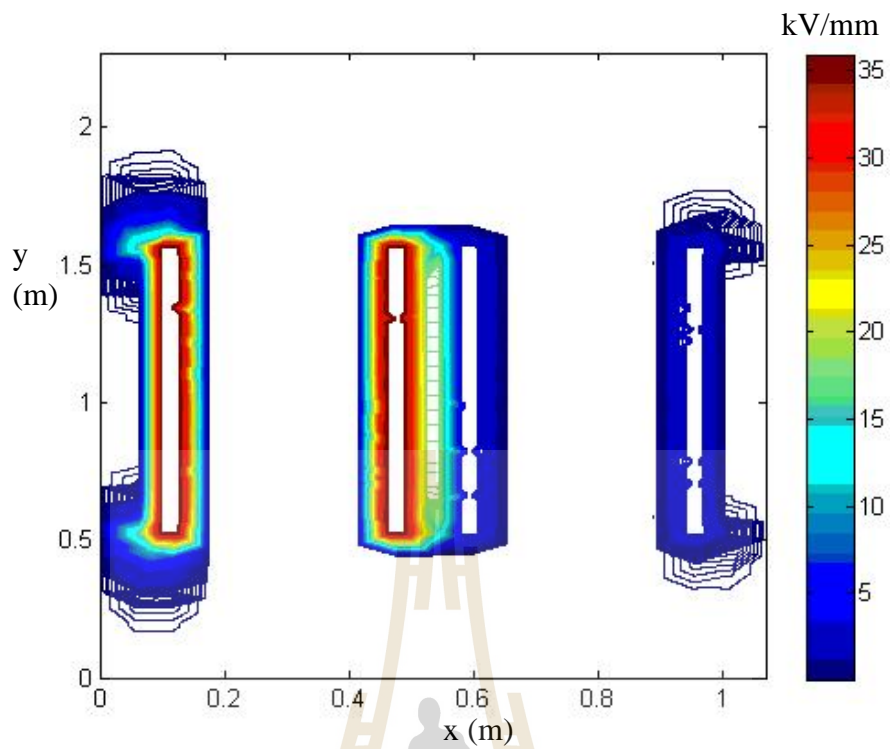


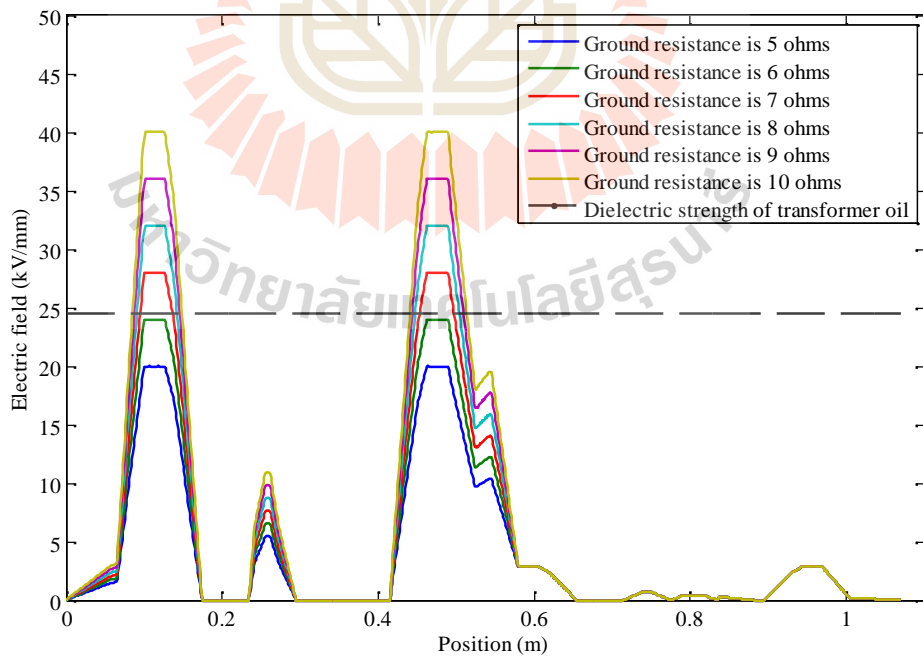
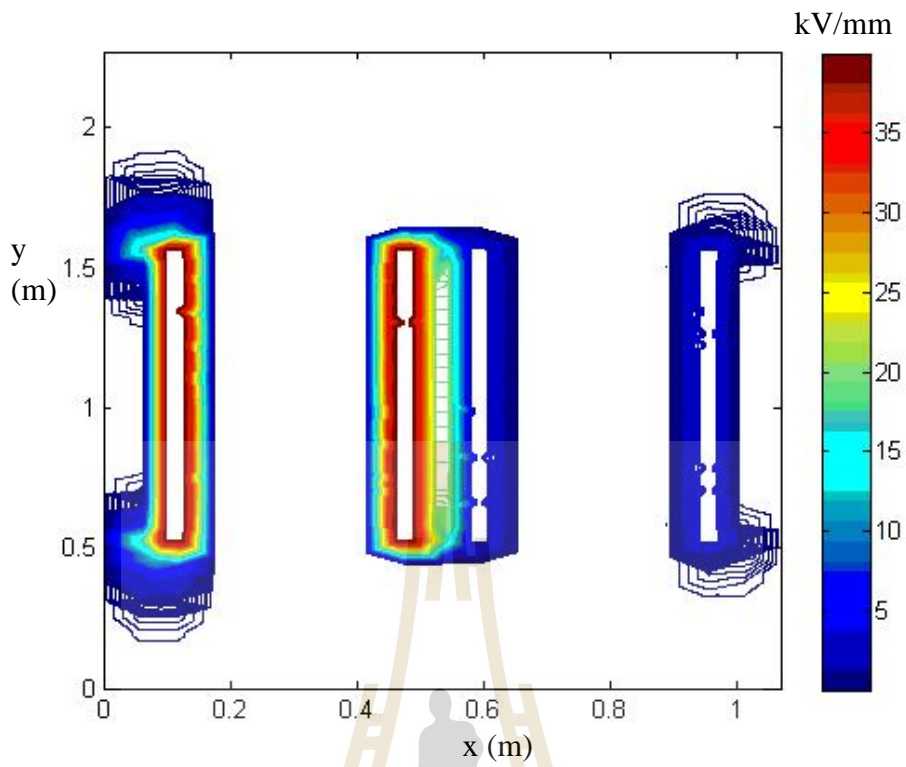


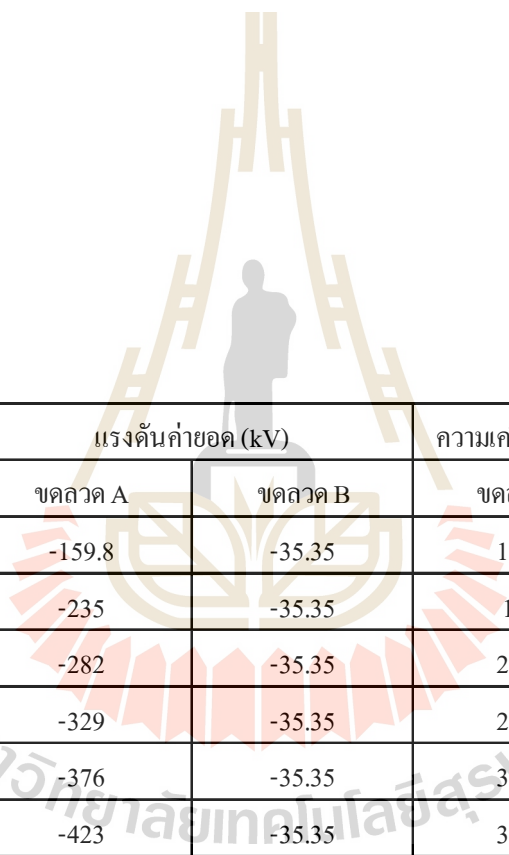




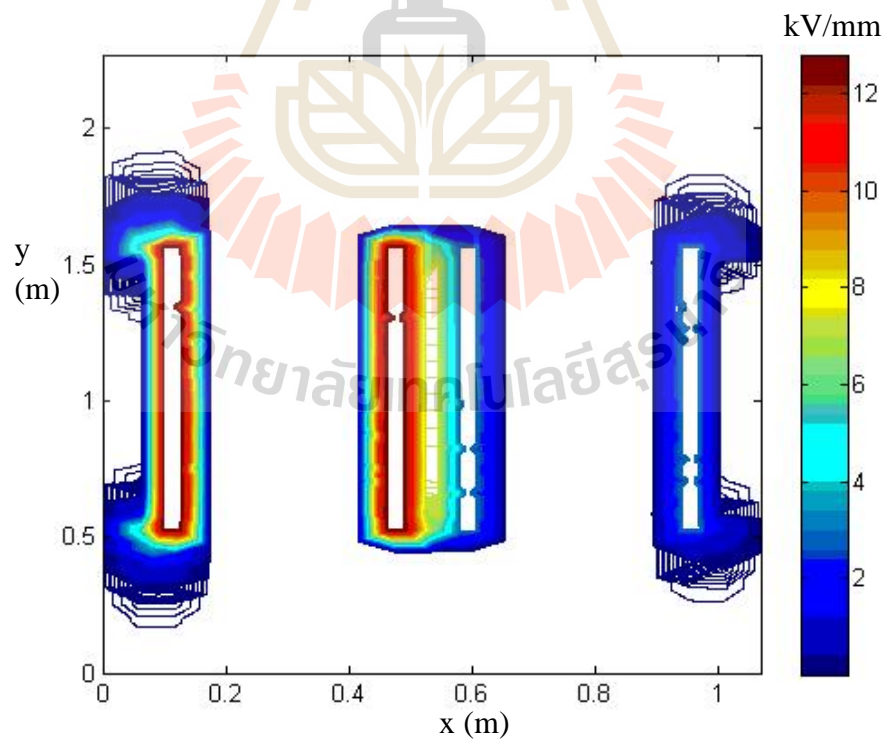
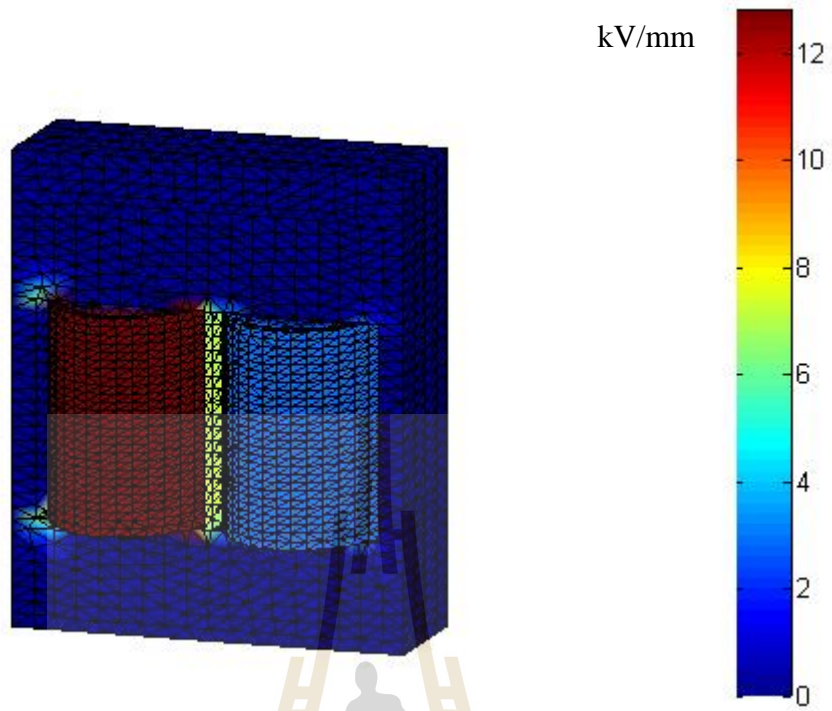


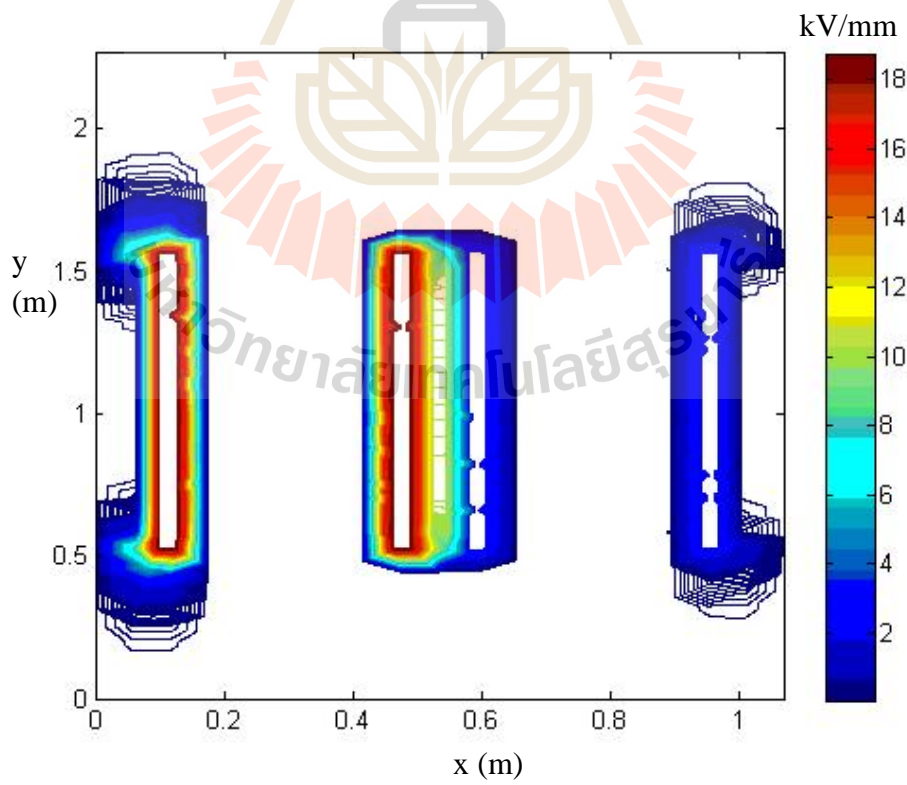
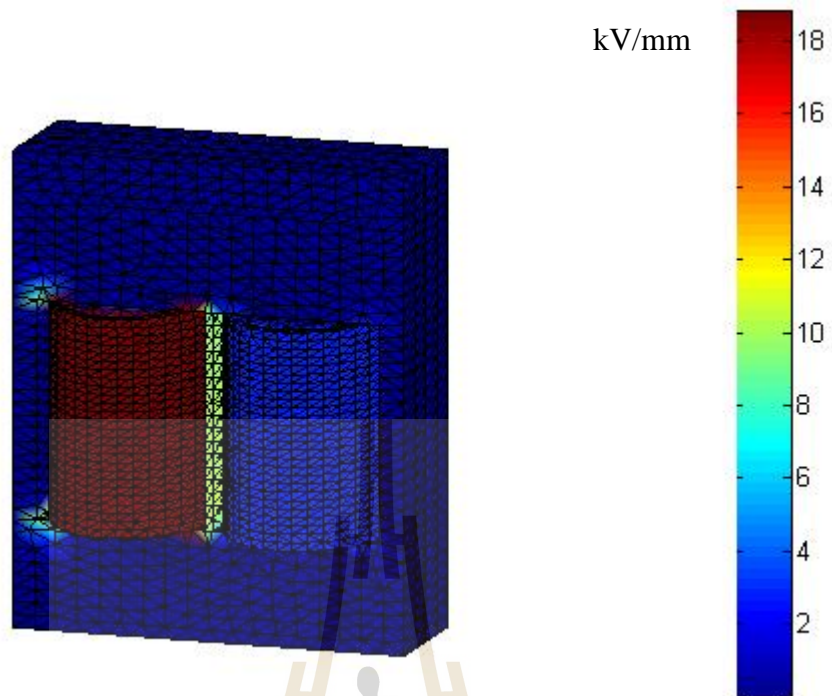


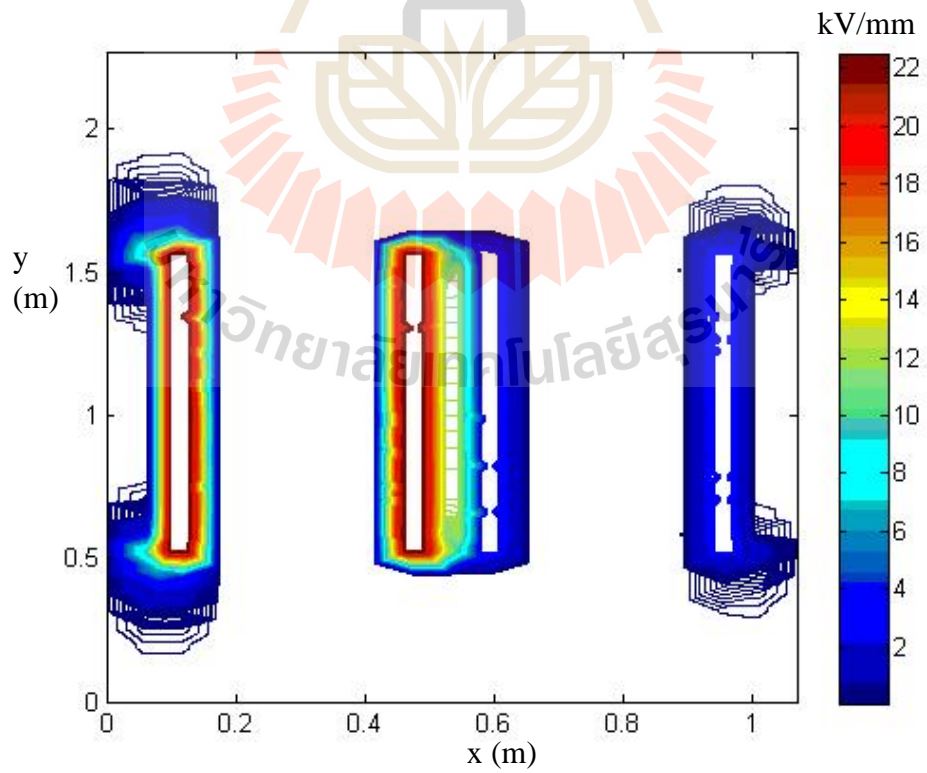
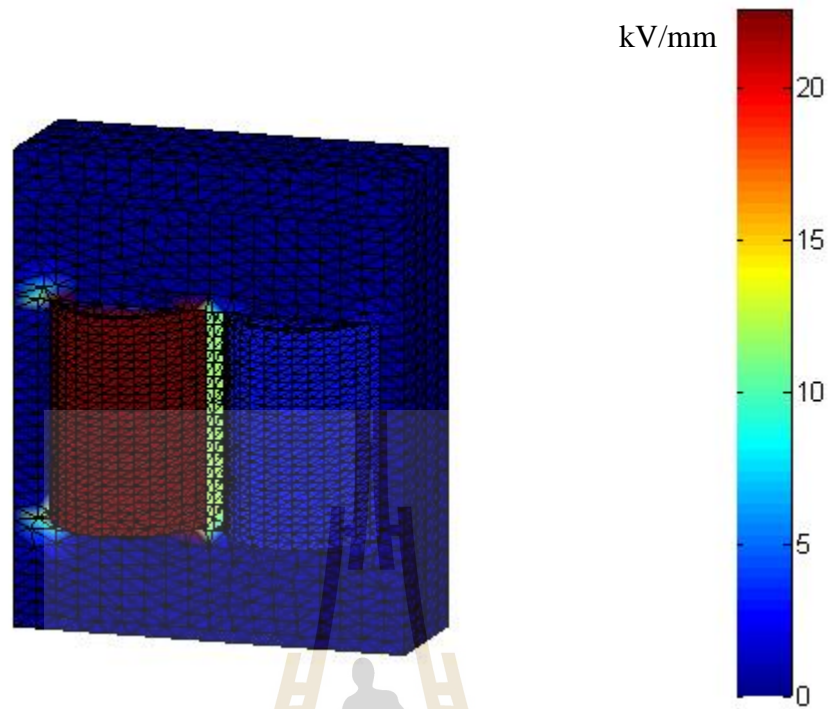


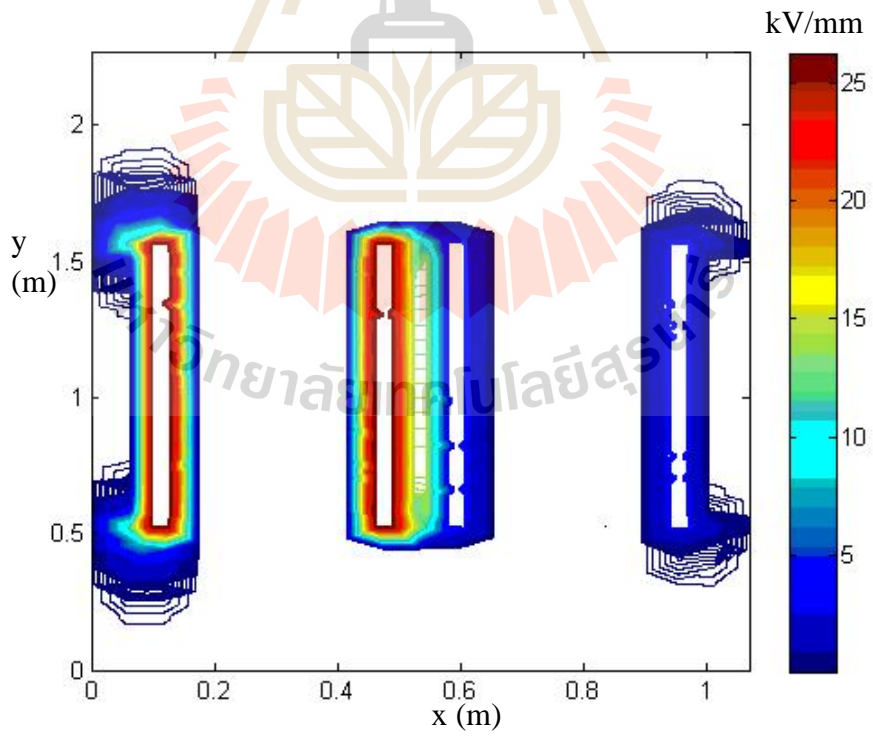
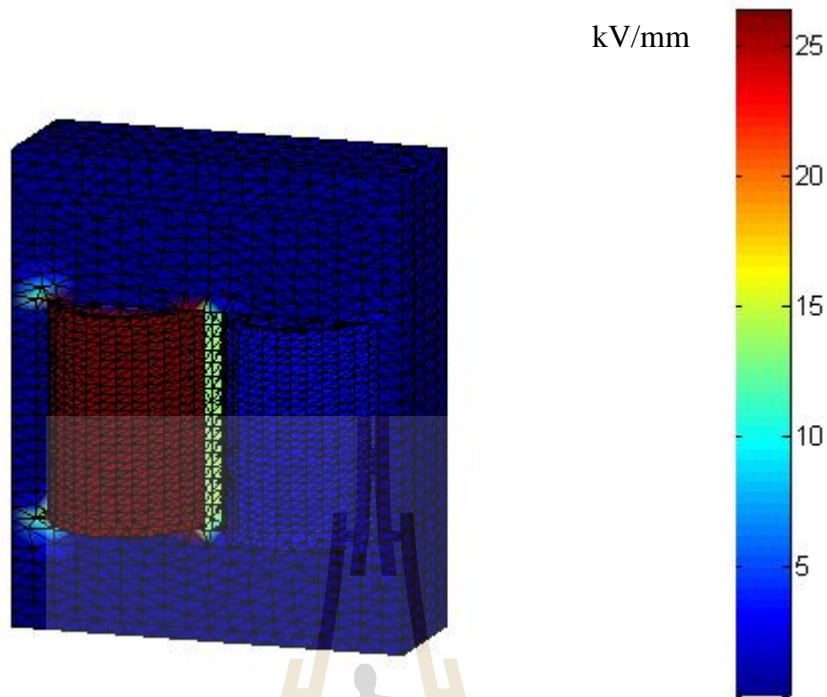


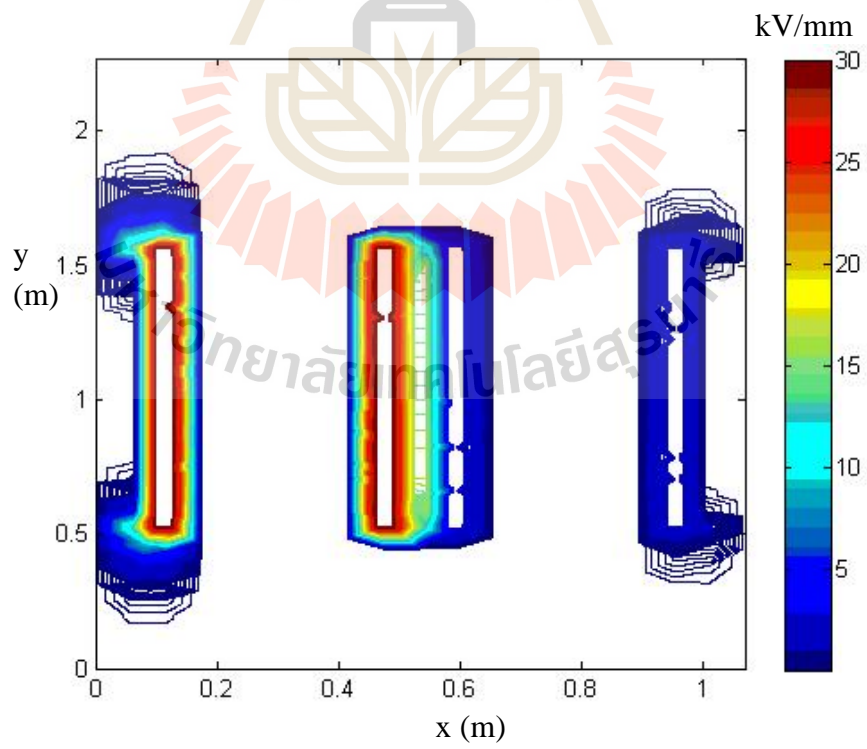
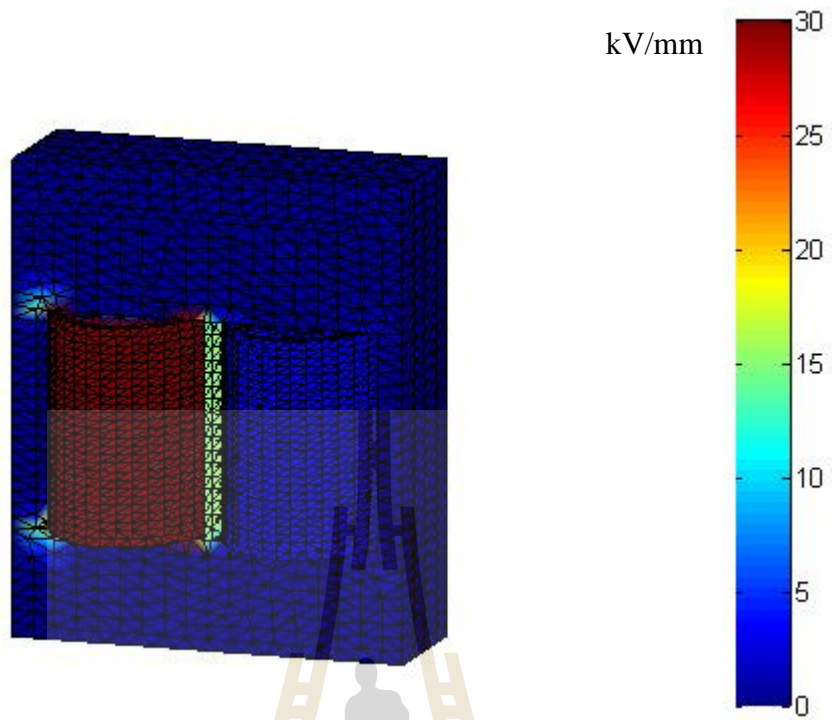
กระแสค่ายอด (kA)	แรงดันค่ายอด (kV)		ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/mm)	
	ขดลวด A	ขดลวด B	ขดลวด A	ขดลวด B
-34	-159.8	-35.35	12.79	2.83
-50	-235	-35.35	18.8	2.83
-60	-282	-35.35	22.56	2.83
-70	-329	-35.35	26.32	2.83
-80	-376	-35.35	30.08	2.83
-90	-423	-35.35	33.84	2.83
-100	-470	-35.35	37.6	2.83

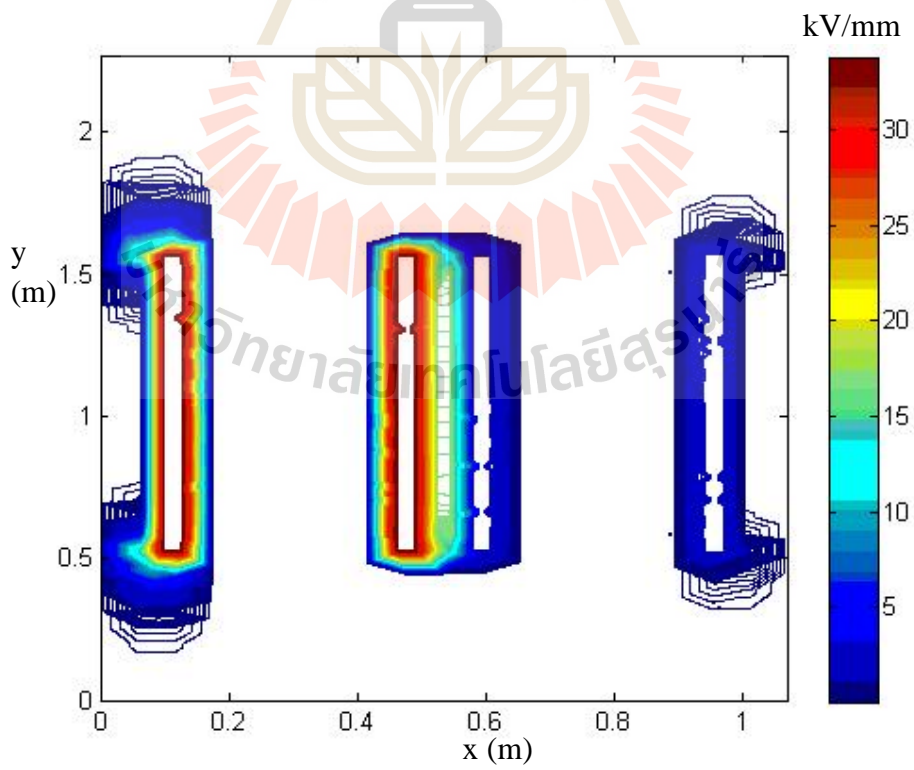
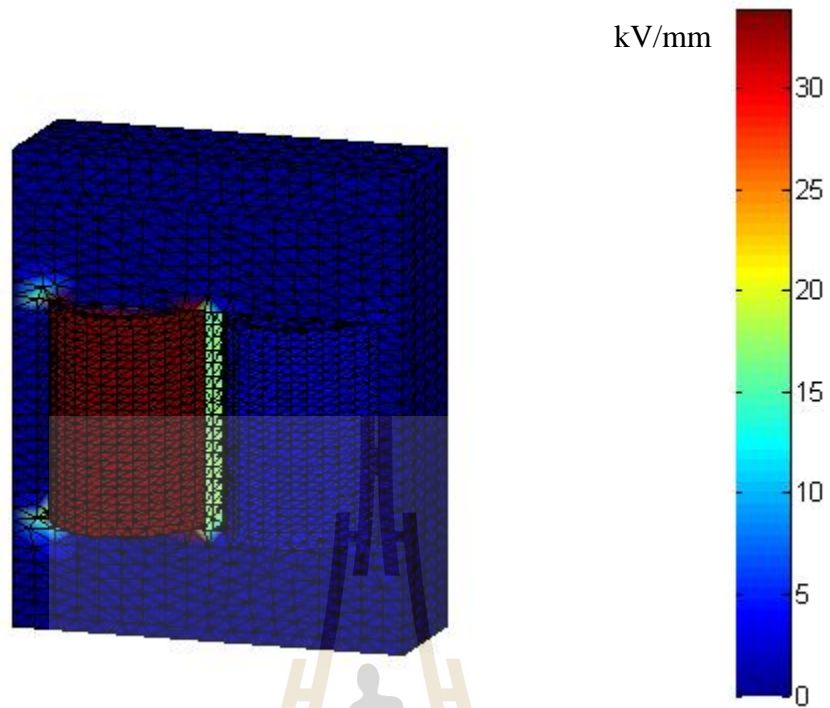


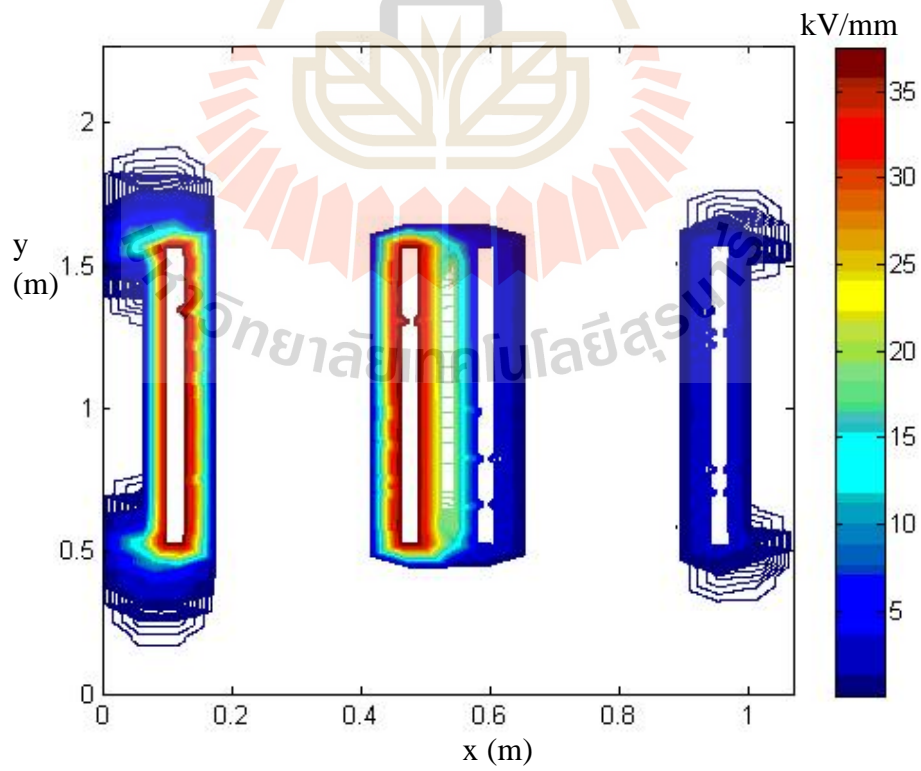
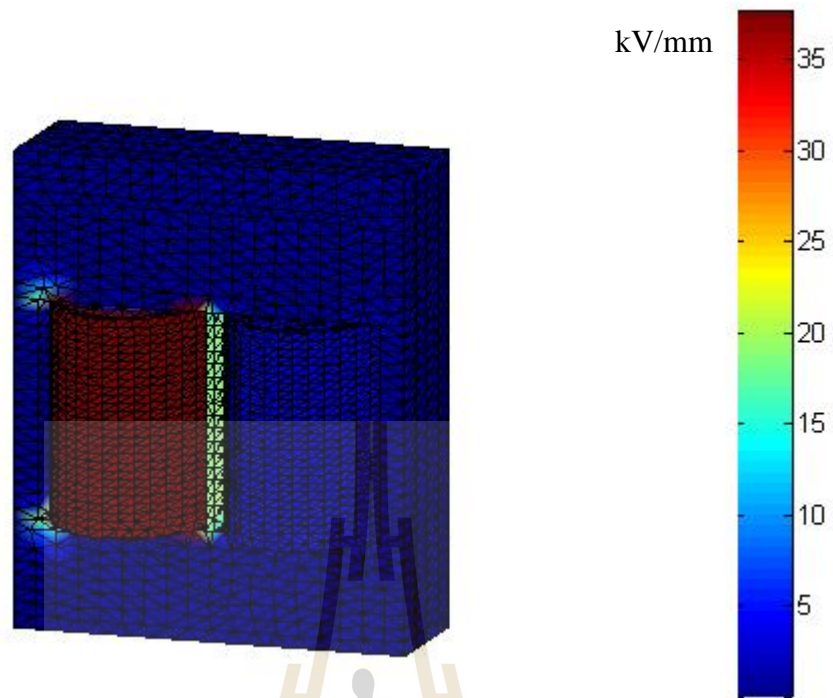


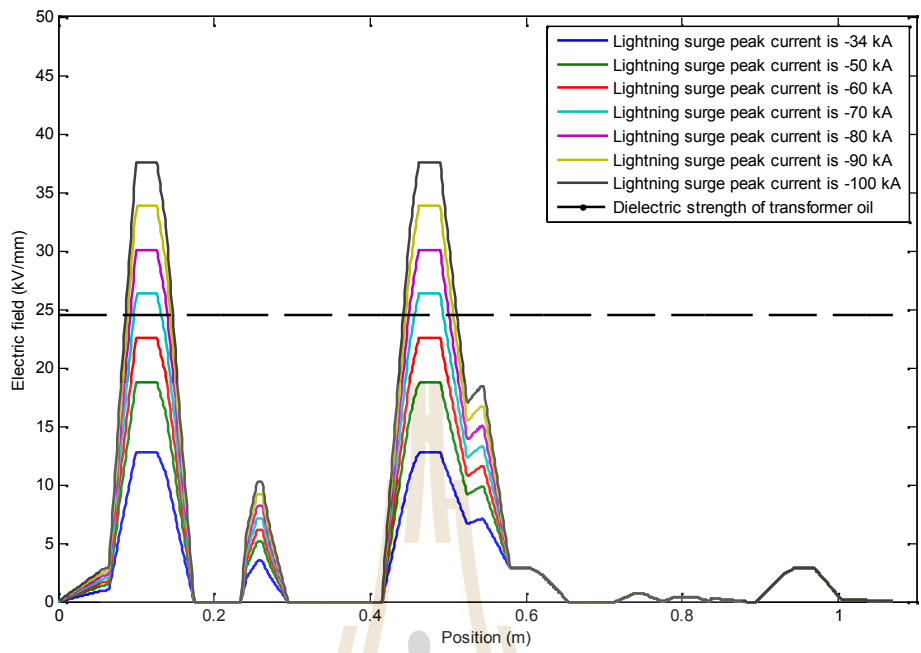




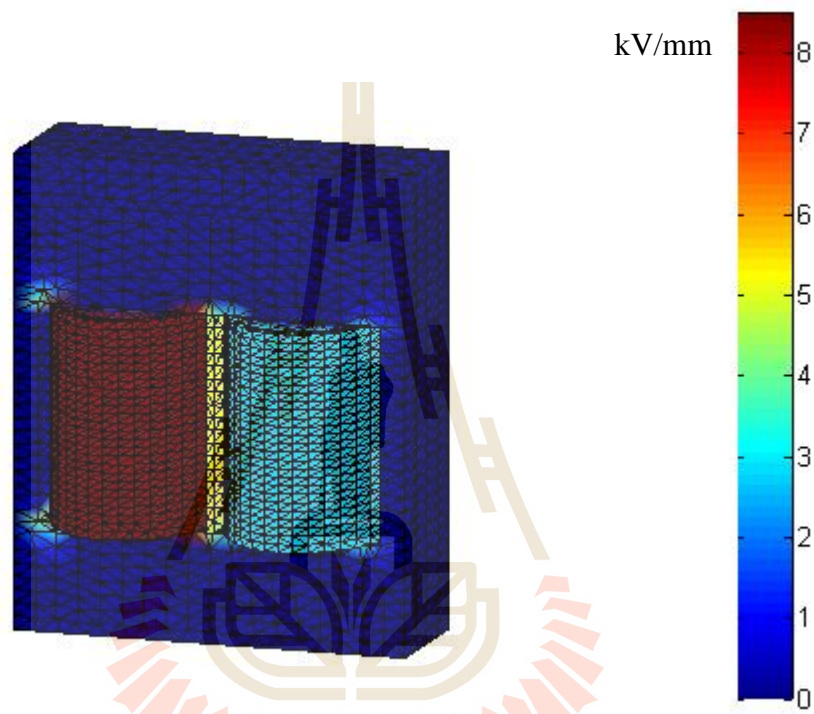




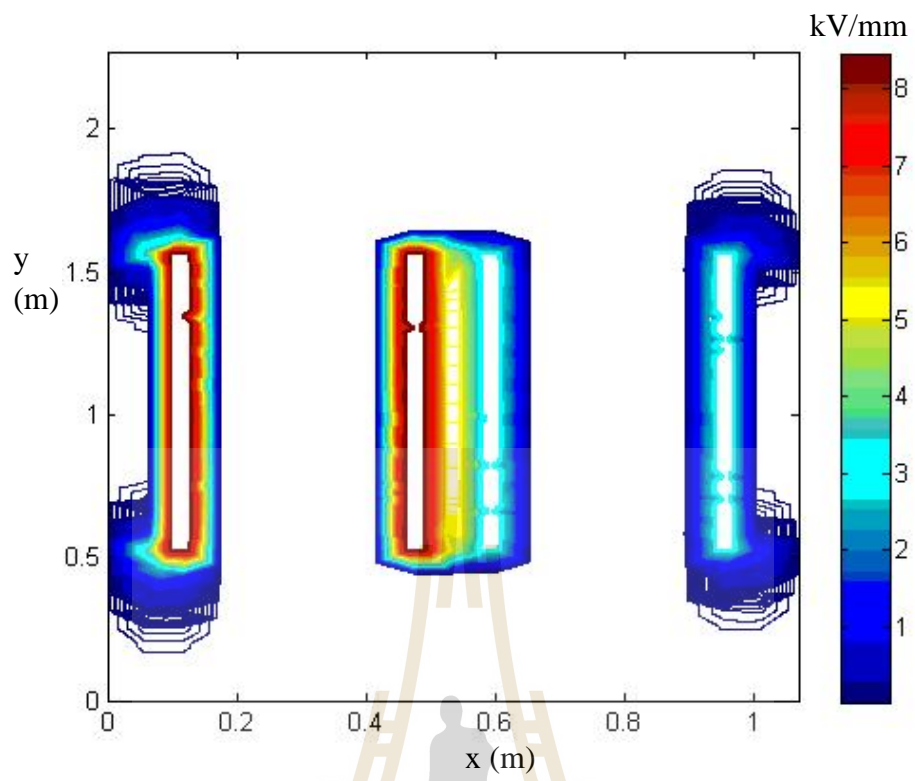




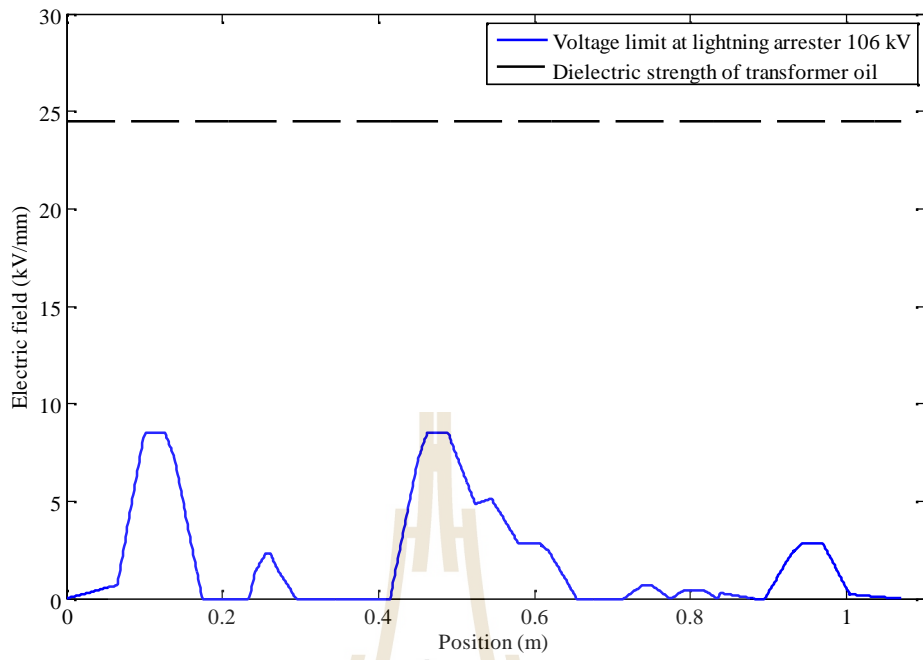
แรงดันค่าขอด (kV)		ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด (kV/mm)	
ขดลวด A	ขดลวด B	ขดลวด A	ขดลวด B
-106	-35.35	8.48	2.83



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบตำแหน่งสายดินชิงอากาศ และการวิเคราะห์ผลของแรงดันเสิร์จในระบบสายจ่ายพาดอากาศแคทีนารี สำหรับรถไฟฟ้ความเร็วสูงที่ใช้ระบบหม้อแปลงออโต การออกแบบสายดินชิงอากาศจะใช้วิธีวิธีทรงกลมกลิ้งตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย สำหรับการวิเคราะห์ผลของแรงดันเสิร์จที่แพร่กระจาย หรือคลื่นจรในสายดินชิงอากาศจะใช้ระเบียบวิธีผลต่างสี่บเนื่องสำหรับการวิเคราะห์คลื่นจรในสายดินชิงอากาศที่จุดเชื่อมต่อรากสายดิน นำผลแรงดันหักเหของคลื่นจร และผลของการเกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่เสามาวิเคราะห์การเกิดวาบไฟย้อนกลับมายังสายจ่ายแคทีนารี สำหรับการวิเคราะห์คลื่นจรในสายจ่ายแคทีนารีจะศึกษาคุณลักษณะของแรงดันหักเห และแรงดันสะท้อนกลับของคลื่นจรที่จุดเชื่อมต่อกับคักเสิร์จ จากคลื่นจรที่เกิดจากวาบไฟย้อนกลับ และเกิดจากฟ้าผ่าโดยตรงที่สายแคทีนารี ระเบียบวิธีไฟในท้อลลิเมนต์ถูกนำมาใช้สำหรับวิเคราะห์สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงออโต จากแรงดันคายอดของระดับแรงดันใช้งาน แรงดันเสิร์จที่เกิดขึ้นในสายจ่ายแคทีนารี และแรงดันเสิร์จที่ถูกจำกัดด้วยคักเสิร์จ ระบบ และโครงสร้างของสายจ่ายพาดอากาศสำหรับรถไฟฟ้ความเร็วสูงที่นำมาใช้ในการออกแบบ และจำลองการทำงาน จะอ้างอิงจากระบบรถไฟฟ้แอร์พอร์ตลิงค์ และระบบรถไฟฟ้ความเร็วสูงของประเทศจีน ที่ระดับแรงดัน 25 kV 50 Hz

การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ อาศัยรากฐานจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ ซึ่งบทที่ 2 ของวิทยานิพนธ์ได้นำเสนอบทปริทัศน์วรรณกรรมเหล่านั้น พร้อมทั้งศึกษาทฤษฎีและหลักการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้และความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ซึ่งต้องพึงพำขั้นต่าง ๆ ที่ใช้ออกแบบสายดินชิงอากาศ และวิเคราะห์ผลของแรงดันเสิร์จในระบบรถไฟฟ้ความเร็วสูงในบทที่ 4 แสดงการออกแบบสายดินชิงอากาศสำหรับ

สายจ่ายพาดอากาศแคทีนารีของระบบรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ และระบบรถไฟฟ้าความเร็วสูงของ ประเทศจีน ด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งเพื่อหาตำแหน่งติดตั้งสายดินชิงอากาศ จากการออกแบบตำแหน่ง ติดตั้งสายดินชิงอากาศมาประเมินด้วยวิธีทรงกลมกลิ้งที่การป้องกันระดับ 1 ไม่มีจุดใดของ โครงสร้างในระบบสายจ่ายแคทีนารีสัมผัสกับทรงกลมกลิ้ง หรือกล่าวได้ว่ามีโอกาสเกิดฟ้าผ่า โครงสร้างของระบบสายจ่ายแคทีนารีน้อยมาก ทั้งนี้ผู้วิจัยได้นำตำแหน่งที่ได้จากการออกแบบมา คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของสายสำหรับนำมาวิเคราะห์ในบทที่ 5 ซึ่งนำเสนอการวิเคราะห์คลื่นจร ด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องของสายดินชิงอากาศที่จุดเชื่อมต่อรากสายดิน ผลที่ได้จากการ เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานดินพบว่า ถ้าความต้านทานดินมีค่าสูง แรงดันหักเหของคลื่นจรจะมี ค่าสูงด้วยเช่นกัน และแรงดันสะท้อนกลับของคลื่นจรจะมีค่าน้อย ในทางกลับกันหากค่าความ ต้านทานดินมีค่าน้อย แรงดันหักเหของคลื่นจรจะมีค่าน้อยลงด้วยเช่นกัน และแรงดันสะท้อนกลับ ของคลื่นจรจะมีค่าสูง สำหรับการวิเคราะห์การวาวไฟย้อนกลับไปยังสายจ่ายแคทีนารี จากแรงดัน หักเหของคลื่นจร และการเกิดฟ้าผ่าที่เสา สามารถแสดงได้ว่าที่ระดับกระแสฟ้าผ่า และค่าความ ต้านทานดินเดียวกัน การเกิดวาวไฟย้อนกลับมาจากการเกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่เสา และมีแรงดันวาวไฟ ย้อนกลับสูงกว่าแรงดันหักเหของคลื่นจรที่สายดินชิงอากาศดังนั้นการติดตั้งสายดินชิงอากาศจึงช่วย ลดการเกิดวาวไฟย้อนกลับได้ และที่ค่าความต้านทานดินน้อยทำให้การเกิดวาวไฟย้อนกลับลด น้อยลง นอกจากการเกิดวาวไฟย้อนกลับมายังสายจ่ายแคทีนารี ยังมีโอกาสเกิดฟ้าผ่าที่สายแคทีนารี โดยตรง ทำให้เกิดคลื่นจรเช่นเดียวกันกับการเกิดฟ้าผ่าที่สายดินชิงอากาศ จากการวิเคราะห์คลื่นจร ที่เกิดขึ้นในสายแคทีนารีเมื่อเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งติดตั้งกับดักเสิร์จ ทำให้เกิดแรงดันสะท้อนกลับ และแรงดันหักเหของคลื่นจร โดยค่าแรงดันหักเหของคลื่นจร คือค่าของแรงดันตกคร่อมกับดักเสิร์จ ตามพิกัดการใช้งานกับดักเสิร์จ สำหรับงานวิจัยนี้แรงดันตกคร่อม หรือแรงดันหักเหของคลื่นจรมี ค่าเท่ากับ 106 kV ตามพิกัดแรงดันใช้งานของกับดักเสิร์จ 25 kV 50 Hz จากการเกิดแรงดันเสิร์จขึ้น ในสายจ่ายแคทีนารีจากการวาวไฟย้อนกลับ หรือจากการเกิดฟ้าผ่าโดยตรง ในบทที่ 6 จะ ได้ กล่าวถึงผลกระทบของแรงดันเสิร์จจากค่าสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในหม้อแปลงออโต เมื่อ เปรียบเทียบกับค่าความคงทนต่อความเครียดสนามไฟฟ้าของฉนวนน้ำมันหม้อแปลง ที่ระดับ แรงดันใช้งาน และหม้อแปลงออโตที่ติดตั้งกับดักเสิร์จมีระดับต่ำกว่าค่าความคงทนต่อสนามไฟฟ้า ของฉนวนจึงไม่มีการเกิดเบรกดาว์น หรือดีสชาร์จภายในหม้อแปลงออโต สำหรับหม้อแปลงที่ไม่มี การติดตั้งกับดักเสิร์จเมื่อเกิดฟ้าผ่าที่เสามีกระแสค่ายอด -100 kA เนื่องมาจากค่าความต้านทานดิน ตั้งแต่ 7 ขึ้นไปและเกิดวาวไฟย้อนกลับจะมีค่าสนามไฟฟ้าภายในหม้อแปลงสูงกว่าค่าความ

คงทนต่อสนามไฟฟ้าของฉนวนจึงทำให้เกิดการดีสชาร์จภายในหม้อแปลงออโต เช่นเดียวกับการเกิดฟ้าผ่าโดยตรงที่สายจ่ายเคทีนารี ที่ระดับกระแสฟ้าผ่าตั้งแต่ -70 kA จะทำให้เกิดการดีสชาร์จภายในหม้อแปลงออโตด้วยเช่นกัน ดังนั้นการติดตั้งกับดักเสิร์จจึงจำเป็นอย่างมากเพื่อลดความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลงออโต และระบบสายจ่ายเคทีนารี

7.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

7.2.1. พัฒนางานวิจัย โดยการวิเคราะห์แรงดันวาทไฟย้อนกลับจากการพิจารณาผลของค่าตัวเหนี่ยวนำของเสาที่เกิดขึ้น กับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสฟ้าผ่า

7.2.2. พัฒนางานวิจัย เพื่อหาสนามไฟฟ้าในสายตัวนำของระบบสายจ่ายพาดอากาศเคทีนารี เมื่อเกิดแรงดันเสิร์จในสาย ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อออกแบบอุปกรณ์ป้องกันการรบกวนจากสนามไฟฟ้า

7.2.3. พัฒนางานวิจัยโดยการเขียนโปรแกรมวิเคราะห์สนามไฟฟ้าภายในอุปกรณ์ของระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าร่วมกับสถานประกอบการ

รายการอ้างอิง

- ชนิดชัย กุลวรรานิชพงษ์. (2551). ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า **Electric Power Transmission and Distribution System**. SUT 4rd Edition, จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์.
- ชนิดชัย กุลวรรานิชพงษ์. (2560). ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ **Railway Electrification**. SUT 1st Edition, จรัลสนิทวงศ์การพิมพ์.
- ปราโมทย์ เดชะอำไพ และ นิพนธ์ วรรณโสภากย์.(2553). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำรวจ สังข์สะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. 3rd Edition, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรพล ดำรงกิตติกุล. (2535). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง **High Voltage Engineering**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อริยศักดิ์ จิตธรรมสาร. (2555). การออกแบบแกนเหล็กของหม้อแปลงจำหน่ายเพื่อลดกำลังงานสูญเสีย. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Achouri, F., Achouri, I. and Khamliche, M.. (2015). Protection of 25Kv Electrified railway system. **4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)**, pp. 1-6.
- An, Q.D., and Wang, J.Z. (1997). Lightning protection in Chinese railway traffic control system. **Electromagnetic Compatibility Proceedings**. pp. 484-488.
- Andrew R. (1999). Hileman, Insulation Coordination for Power Systems, **Marcel Dekker, Inc**, New York.
- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2012). Effect of Train Headway on Voltage Collapses in High-Speed AC Railways. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference**.
- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2012). Numerical Modeling and Very-Fast Transient Simulation of MOV Surge Arresters. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference**.

- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2012). Simulation of Lightning Surge Propagation in Transmission Lines Using the FDTD Method. **World Academy of Science, Engineering and Technology** 6(11), pp. 1297-1302.
- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2013). The FDTD method for lightning surge propagation in 115-kV power transmission systems of PEA's Thailand. **The 2013 World Congress on Advances in Nano, Biomechanics, Robotics, and Energy Research (ANBRE13)**. 25-28 August, Seoul, Korea, pp. 90-100
- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2014). FDTD Method for Lightning Surge Propagation of Power Transmission. **The SIJ Transactions on Computer Networks & Communication Engineering** 2(3), pp. 31-35.
- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2017). Analysis of Surge Propagation with Lightning Arrester using FDTD for 25 kV-AC Transmission Line. **International Journal of Engineering and Applied Sciences** 4(4), pp. 66-70.
- Aodsup, K., Kulworawanichpong, T. and Batsungnoen, K. (2012). Lightning Stroke Shielding of Electric Railway Overhead Catenary Feeding Systems. **Spring Congress on Engineering and Technology**.
- Armstrong, H.R. and Whitehead, E.R. (1968). Field and analytical studies of transmission lines shielding. **IEEE Trans. On PA&S**, pp. 270 – 281.
- Asmontas, I., Gudzius, S., Markevicius, L.A. Morkvenas, A. and Tickka, V. (2012). The Investigation of Overvoltage Transient Processes in Railway Electric Power Feeding Systems. **Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)**, pp. 1-6.
- Benesova, Z. and Kotlan, V. (2006). Propagation of surge waves on non-homogeneous transmission lines induced by lightning stroke. **Advances in Electrical and Electronic Engineering** 5(1-2):198 – 203.
- Bewley, L.V. (1951). Travelling Waves on Transmission Systems. Dover Publication.
- Brown, G.W. and Whitehead, E.R. (1969). Field and analytical studies of transmission lines shielding. **IEEE Trans. On PA&S**, pp. 617 – 626.

- Cervantes, M. and Ramirez, A. (2014). Frequency-Domain Computation of Maximum Lightning Overvoltage Along a Cable Protected by Surge Arresters. **North American Power Symposium (NAPS)**. pp. 1-6.
- Chapra, S.C. and Canale, R.P. (2002). Numerical Method for Engineers. **McGraw-Hill**.
- Chari, M.V.K. (1980). Finite Element Analysis of Electrical Machinery and Device. **IEEE Transactions on Magnetic**. pp. 1014-1019.
- Christopoulos, C. (1995). The Transmission-Line Modeling Method: TLM, **IEEE Press, USA**
- Construction of Railways. **International Conference on Electromagnetic Disturbance**. pp. 81-84.
- Dasgupta I. (2002). Design of Transformers. Tata McGraw-Hill.
- Fausett, L.V. (1999). Applied Numerical Analysis using MATLAB. **Prentice-Hall**.
- Granger, J. J. and Stephenson, W.D. (1994). Power System Analysis. **McGraw-Hill**.
- Hall, C.A. and Porsching, T.A. (1990). Numerical Analysis of Partial Differential Equations. **Prentice-Hall**.
- Hasman, T. (1997). Refraction and Transmission of Traveling Wave on Power Transformer. **IEEE Transactions on Power Delivery**. pp. 1684-1689.
- Hayashiya, H., Hino, M., Murakami, T., Nishimura, Y., Miwa, M., Yoshino, E. and Matsumoto, M. (2010). Proposal of Lightning Risk Assessment Method Base on The Lightning Current Probability Function for Railway Power Supply System. **30th International Conference on Lightning Protection**. pp. 1146(1)-(6).
- Heidler, F. (1985). Travelling current source model for LEMP calculation. **Proceeding of the 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility**, 5-7 March, Zurich, Switzerland, pp. 157-162.
- Henriksen, T., Gustavsen, B., Balog, G. and Baur, U. (2005). Maximum Lightning Overvoltage Along a Cable Protected by Surge Arresters. **IEEE Transactions on Power Delivery**. pp. 859-866.
- Hernández, C. and Arjona, M.A. (2007). Design of distribution transformers based on a knowledge-based system and 2D finite elements. **Finite Elements in Analysis and Design**. pp. 659–665.

- Hileman, A. R. (1999). *Insulation Coordination for Power Systems*. Marcel Dekker.
- Hu, H. and Mashikian, M.S. (1990). Modeling of Lightning Surge Protection in Branched Cable Distribution Network. **IEEE Transactions on Power Delivery**. pp. 846-852.
- Hu, J. and Li, C. (2011). Lightning Protection of Chinese Ancient Architecture. **7th Asia-Pacific International Conference on Lightning** pp.844 – 847.
- IEEE Working Group 3.4.11. (1992). Modeling of Metal Oxide Surge Arresters. **IEEE Transactions**. Power Delivery 7:302 – 309.
- Juan A.M.V. (2010). *Power System Transients Parameter Determination*. **CRC Press**, New York.
- Kim, J., Han, M. and Chang, S.A. (2010). Fault Impedance Calculation as Autotransformer Tap Change in Traction Power Supply System. **Modern Electric Power Systems**, pp. 47-51.
- Kladas, A.G., Papadopoulos, M.P. and Tegopoulos, J.A. (1994). Leakage Flux and Force Calculation on Power Transformer Windings under Short-circuit: 2D and 3D Models based on the Theory of Images and the Finite Element Method Compared to Measurements. **IEEE Transactions on Magnetic**. pp. 3487-3490.
- Li, H.J., Birlasekaran, S. and Choi, S.S. (2002). A Parameter Identification Technique for Metal – Oxide Surge Arrester Model. **IEEE Transactions. Power Delivery** 17:736-741.
- Liu, Y., Cao, Y., Li, Y., Gao, Y and Liu, X. (2008). Design for New Type of Main Insulation of 35kV Electric Power Transformer Based on Electric Field Analysis. **World Automation Congress**. pp. 1-4.
- Markovic, M., Stih, Z. and Cucic, B. (2013). Power Transformer Main Insulation Design Improvement Using BEM and FEM. **Eurocon 2013**. pp. 1553-1559.
- Martinez, J.A. and Durbak, D.W. (2005). Parameter Determination for Modeling Systems Transient Part V: Surge Arrester. **IEEE Transactions. Power Delivery** 20:2073-2078.
- Menemenlis, C. and Chun, Z.T. (1982). Wave Propagation on Nonuniform Lines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**. pp. 833-839.

- Minja, K. M., Chombo, P. V., Promvichai, M., Leeton, U. and Marungsri, B. (2017). Characteristics and Behavior of Transient Current during Multiple Lightning strokes on a Train in Thailand by using ATPDraw. **the 5th IIAE International Conference on Industrial Application Engineering 2017** , pp. 199-205.
- Nevels, R. and Miller, J. (2001). A Simple Equation for Analysis of Nonuniform Transmission Lines. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. pp. 721-724.
- Richard, L.B. and Douglas F.J. (2001). Numerical Analysis. 7th ed, **Brooks/Cole**, USA.
- Sadiku, M.N.O. (2001). Numerical Techniques in Electromagnetics. **CRC Press**.
- Tang, R., Wang, S., Li, Y., Wang, X. and Cui, X. (2000). Transient Simulation of Power Transformers Using 3D Finite Element Model Coupled to Electric Circuit Equations. **IEEE Transactions on Magnetic**. pp. 3487-3490.
- Thanasaksiri, T. (2013). Improving the Lightning Performance of Overhead Distribution and Sub-transmission Lines Applying Additional Underbuilt Shield Wire. **10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)**. 12(2). pp. 1-8.
- Wagner, C.F. (1963). The relation between stroke current and the velocity of the return stroke. **IEEE Trans. On PA&S**, pp. 609 – 613.
- Yamashita, H., Nakamae, E., Namera, A., Cingoski, V and Kitamnra, H. (1999). Design Improvements on Graded Insulation of Power Transformers Using Transient Electric Field Analysis and Visualization Technique. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, pp. 1379-1384.
- Yan, B., Gu, S., Wang, T., Xiang, N., Li, T., Su, J. and Lu, Z. (2014). Lightning distribution characteristics of the Beijing - Shanghai High - speed Railway Corridor. **International Conference on Lightning Protection (ICLP)**. pp. 831-834.
- Young, F.S., Clayton, J.M. and Hileman, A.R. (1963). Shielding of transmission lines. **IEEE Trans. On PA&S**, pp. 132 – 154.



ภาคผนวก ก

การออกแบบหม้อแปลงอัตโนมัติ

Design of the 10 MVA 25 kV Auto – Transformer

Specification of Auto Transformer

Rating	10 MVA
No - load voltage ratio	25/25 kV
No. of phase and frequency	Two Phase / 50 Hz
Winding material	Copper
Tapping	Fixed
No - load and load loss (max)	5/35 kW
Impedance	7.15%
Maximum flux density	1.6 tesla
Maximum current density	3.0 A/sq.mm
Temperature rise	40/50° C
Other Specifications	As per IS-2026
Voltage per phase	$V_p = 25000 \text{ V}$
Current per phase	$I_p = 400 \text{ A}$
Current density assumed	$C_d = 2.6 \text{ A/sq.mm}$
Conductor area	153.85 sq.mm
Equivalent conductor size	13x6x2 nos.
Area of conductor	$[(13 \times 6) - 0.86] \times 2 = 154.28 \text{ sq.mm}$
Therefore, the working current density	$(400/154.28) = 2.59 \text{ A/sq.mm}$

<u>Number of Turn</u>	
Voltage per turn	$E_t = K Q$
Where	$Q = 10000 \text{ KVA}$ and $K=0.39$ (assumed)
Therefore	$E_t = 39$
Number of Turns	Phase voltage/ E_t
	$25000/39$
	641
<u>Core Diameter</u>	
Voltage per turns	$E_t = (25000/641) = 39$
Flux density (assumed)	1.6 Tesla (B_m)
Therefore, gross area (A_g)	$(E_t \times 10^4)/(4.44 \times f \times B_m \times 0.97)$
A_g (sq.mm)	1132
Approximate core diameter	$D = \sqrt{(A_g \times 4)/(\pi \times 0.95)}$
39	$D = 39 \text{ cm}$
<u>Coil Disc Detail</u>	
No. of turn per phase	641 turn
No. of disc being selected	60 disc
turn per disc	641/60
	10(8/12) turn/disc

Formation of coil

Design of coil, its length and diameter

No. of turn per phase	641 turn
No. of disc per phase	60 discs
No. of turn per disc	10(8/12) turn
Conductor (bare)	13 x 6 mm x 2 nos
Coverring	TPC - 0.5 mm
Covered conductor	13.5 x 6.5 mm
Disposition of conductor	1 W x 2 D

	Length	Depth
Covered conductor size	13.5	6.5
Disposition	x 1 W	x 2 D
Size of covered conductor 2 in parallel	13.5	6.5
Development length for 60 discs	x 60	
Radial build for 10 (8/12) T/disc		x 11
	810 mm	71.5 = 72 mm

$$\begin{aligned}
 \text{Coil inside diameter} &= \text{Core diameter} + 25 \text{ mm} \\
 &= 390 \text{ mm} + 25 \text{ mm} \\
 &= 415 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Coil outside diameter} &= \text{ID} + 2 \times \text{radial build} \\
 &= 415 + 2 \times 72 \\
 &= 559 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Length of Coil

Spacer block details	Gap detail
Spacer block between 1st and 13th disc	12 gaps x 3 mm = 36 mm
Spacer block between 13th and 15th disc	2 gaps x 9 mm = 18 mm
Spacer block between 15th and 16th disc	1 gaps x 15 mm = 15 mm
Spacer block between 16th and 18th disc	2 gaps x 9 mm = 18 mm
Spacer block between 18th and 43th disc	25 gaps x 3 mm = 75 mm
Spacer block between 43th and 45th disc	2 gaps x 9 mm = 18 mm
Spacer block between 45th and 46th disc	1 gaps x 15 mm = 15 mm
Spacer block between 46th and 48th disc	2 gaps x 9 mm = 18 mm
Spacer block between 48th and 60th disc	12 gaps x 3 mm = 36 mm
Total height for insulation block	59 gaps = 249 mm
Effective reduction after compression (Approximately 7.5 %)	(-) 19 mm
Height of insulation after compression	230 mm

Therefore, the strunk height of coil after compression

$$\begin{aligned}
 &= \text{Development height for 60 disc} + \text{effective height of block} \\
 &= 810 + 230 = 1040 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

The final details of the coil are as under:

Total turn per phase	=	641 turn
No. of discs per phase	=	60 discs
		10(8/12)
Turns per disc	=	T/disc
Coil inner diameter	=	415 mm
Coil outer diameter	=	459 mm
Coil height (before compression)	=	1059 mm
Coil height (after compression)	=	1040 mm

Core detail

Core diameter	$R \times 2 = 195 \times 2$	390 mm
		(+) 12.5 mm
		402.5 mm
Radial gap between core and coil		(+) 12.5 mm
Core inside diameter	207.5×2	415 mm
		(+) 72 mm
		487 mm
Radial build of core		(+) 72 mm
Core outside diameter	229.5×2	459 mm
		(+) 20 mm
Core limb centre		479 mm
	Rounded - off to the next higher value of	480 mm

Calculation of window height of core

Shrunk height of coil	=	1040 mm
York insulation at top and bottom (65 mm x 2)	=	130 mm
MS pressure plate	=	25 mm
Insulation to the pressure plate	=	5 mm
<hr/>		
Window height of core	=	1200 mm

Design of Tank

The following assumptions are made while calculating the tank dimensions.

1	Gap between coil to the inside of tank on the longer side	65 mm
2	Gap between coil to the inside of tank on the width side	65 mm
3	Gap between core yoke to tank bottom	55 mm
4	Gap between core yoke to ratio switch base	50 mm
5	Height of ratio switch	220 mm
6	Gap between ratio switch top to inside of tank cover	100 mm
7	Gap between coil to the inside of tank on width side	115 mm

Base on the above internal clearances, let us form the tank dimensions as follows:

(a) Length of tank (inside):

$$= \text{CL of core} + \text{Coil O.D} + 2 \times 65 \text{ mm}$$

$$= 480 + 459 + 2 \times 65$$

$$= 1069 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \text{Rounded - off to } 1070 \text{ mm}$$

(b) Width of tank (inside):

$$= 65 + \text{Coil O.D} + 115$$

$$= 65 + 459 + 115$$

$$= 639 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \text{Rounded - off to 640 mm}$$

(c) Height of tank (up to tank flange):

$$= \text{Yoke to tank bottom} + 2 \times \text{width of 1}^{\text{st}} \text{ core step} + \text{W/H core} \\ + \text{gap between yoke to R/S base} + \text{height of R/S} + \text{gap between} \\ \text{R/S to tank top cover}$$

$$= 55 + 2 \times 320 + 1200 + 50 + 220 + 100$$

$$= 2265 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \text{Rounded - off to 2270 mm}$$

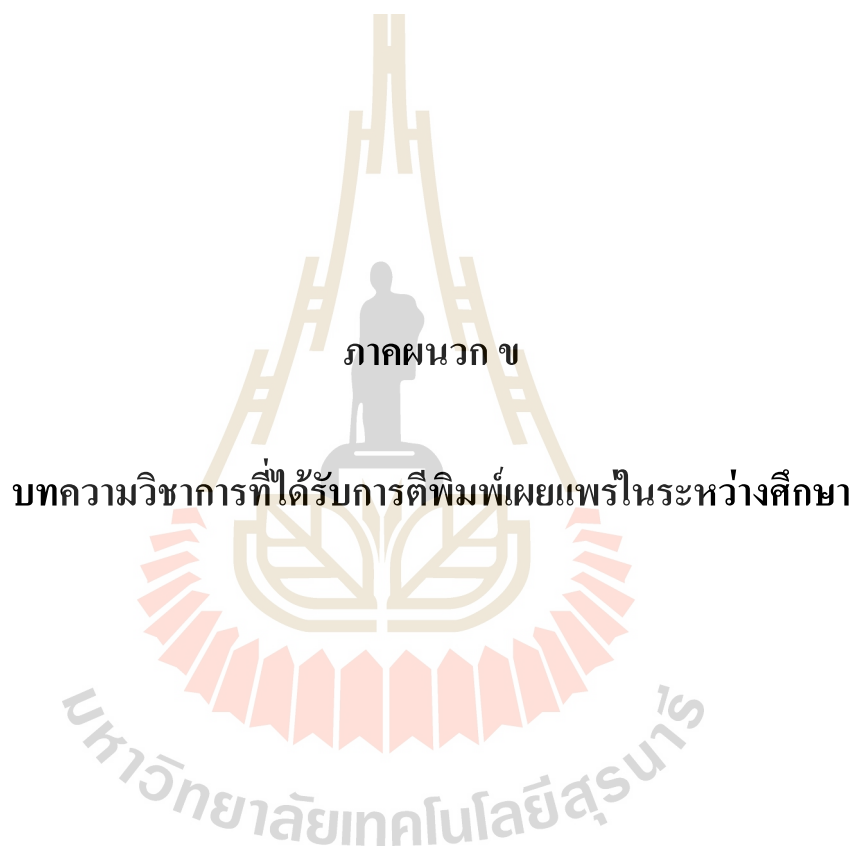
Therefore, the final tank dimensions are:

$$\text{Length} = 1070 \text{ mm}$$

$$\text{Breadth} = 640 \text{ mm}$$

$$\text{Height} = 2270 \text{ mm}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาคผนวก ข

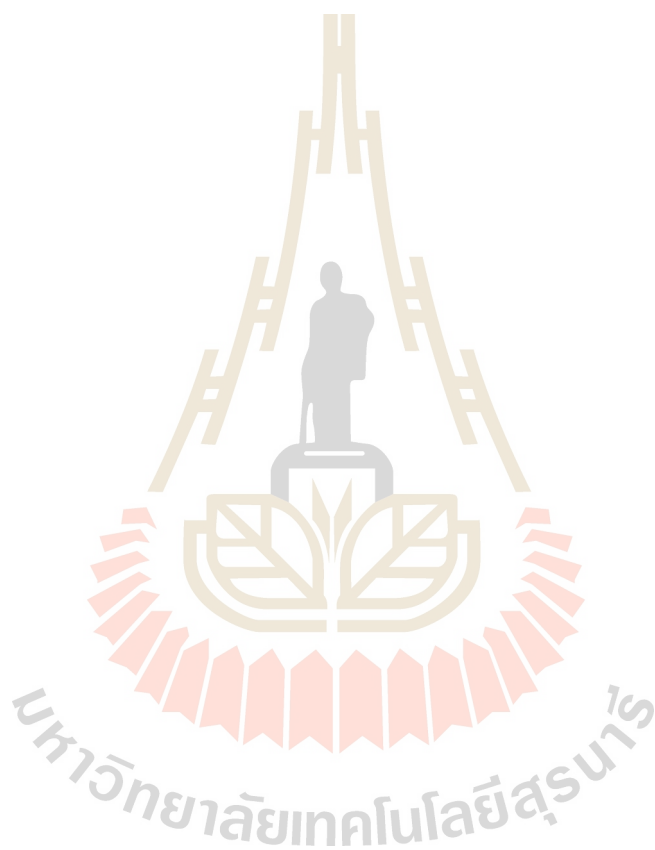
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2012). Effect of Train Headway on Voltage Collapses in High-Speed AC Railways. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference.**
- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2012). Numerical Modeling and Very-Fast Transient Simulation of MOV Surge Arresters. **Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference.**
- Aodsup, K., Kulworawanichpong, T. and Batsungnoen, K. (2012). Lightning Stroke Shielding of Electric Railway Overhead Catenary Feeding Systems. **Spring Congress on Engineering and Technology.**
- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2012). Simulation of Lightning Surge Propagation in Transmission Lines Using the FDTD Method. **World Academy of Science, Engineering and Technology** 6(11), pp. 1297-1302.
- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2013). The FDTD method for lightning surge propagation in 115-kV power transmission systems of PEA's Thailand. **The 2013 World Congress on Advances in Nano, Biomechanics, Robotics, and Energy Research (ANBRE13)**. 25-28 August, Seoul, Korea, pp. 90-100.
- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2014). FDTD Method for Lightning Surge Propagation of Power Transmission. **The SIJ Transactions on Computer Networks & Communication Engineering** 2(3), pp. 31-35.
- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2017). Analysis of Surge Propagation with Lightning Arrester using FDTD for 25 kV-AC Transmission Line. **International Journal of Engineering and Applied Sciences** 4(4), pp. 66-70.

Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2017). Lightning Surge Propagation Analysis in OHGW of Electrified High Speed Railway. **Energy Procedia**.



Effect of Train Headway on Voltage Collapses in High-Speed AC Railways

Kokiat Aodsup

Power System Research Unit, School of Electrical
Engineering Institute of Engineering, Suranaree University
of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000
E-mail: Kokiat_a@hotmail.co.th

Thanatchai Kulworawanichpong

Power System Research Unit, School of Electrical
Engineering Institute of Engineering, Suranaree University
of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000
E-mail: Thanatchai@gmail.com

Abstract—Minimum headway is one of key factors in railway system operation. Most railway passengers normally expect that a next train will arrive at their platform as soon as possible. Due to economical and safety aspects, headway between two consecutive trains must be kept over its critical value. In this paper, multi-train simulation associated with dynamic load flow program instructed in MATLAB is employed. A 50-km AC railway power system is used for test. This test was conducted by decreasing train headway until voltage collapse occurs. As a result, the minimum train headway that causes the voltage collapse for this test system is 50 s. This confirms that the proposed algorithm can be effectively used to identify the point of voltage collapses in AC railway power systems.

Keywords- ac railway ; Voltage Stability; Voltage Collapse, AC Railway Power Systems

I. INTRODUCTION

Voltage instability is a phenomenon which often contributes to the development of power system disturbances. While increasing load admittance, bus voltage decreases to such a degree that the apparent power. As a result, voltage collapses with all consequences resulting from it. The problem of voltage stability concerns the whole power systems, although it usually has a large involvement in one critical area of the power system. During the large-scale power system disturbance, the last line of defense is the load shedding at the stations, reactive reserve management [1]-[2]. IEEE defines voltage collapse as: the process by which voltage instability leads to loss of voltage in a significant part of the power system [3]. Voltage collapse is associated with reactive power demands not being met because of limitations on the production and transmission of reactive power. This topic is also important in AC railway systems. In some countries especially in Asia there is a need for high-speed inter-city railways to connect their people. Due to sudden and frequent changes hungrily in power consumption of high-speed AC railway substation, the relation between train traffic operation and the voltage collapse must be carefully studied.

System analysis within the traction power system is vital to the design and operation of an electrified railway [4]. The traction-power simulators usually include modeling of the track geometry and traction-system characteristics and permit multi-train operations. By solving the power network

equations, the simulators give details of electrical interactions among trains at specific time steps over a long span of time and under different traffic conditions. All moving loads in the railway power feeding system are assumed to be fixed in position at a specific time given. However, in the real world, the running trains change their position at every second. Hence, a full hour operation of train services is required to investigate the effect of minimum headway on the system voltage stability.

This paper organizes a total of five sections. Next section, Section II, illustrates AC railway power supply systems. Section III gives the brief of voltage stability and an algorithm to find the point of voltage collapses. Section IV is the section describing simulation results and discussion. Conclusion remark is in the last section, Section five.

II. AC RAILWAY POWER SYSTEM

A High-speed AC railway power system is a typical overhead centenary feeding system. It is complicated as described in Fig. 1 for its conductor arrangement. To formulate power flow equations, transmission lines and other network components requires sufficiently accurate modeling.

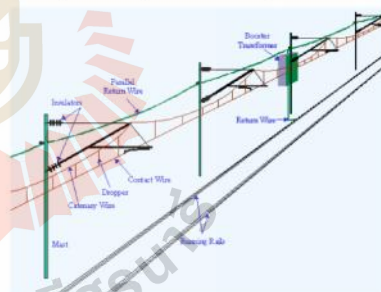


Fig. 1. Single-phase AC railway power feeding configuration

A. Modeling of AC Railway Power Feeding Systems

An AC railway power supply system has several configuration features different to an industrial power system. Notably, it is single phase. Although the AC railway power

feeding systems are intrinsically nonlinear, there are some simplifications of the power network modeling as summarized in Fig. 2. This equivalent circuit is adequate to calculate voltages across trains and phase-to-ground substation and mid-point section voltages.

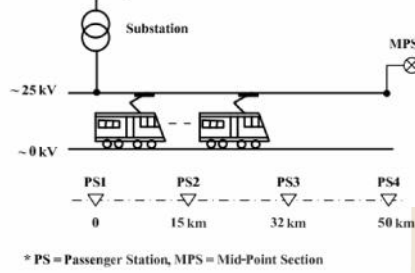


Fig. 2. AC railway power feeding model

B. Power Network Solution

In this paper, only power flow methods based on the bus admittance matrix is determined. According to the Newton-Raphson method [5–6], the decomposed real and reactive power mismatch equations of bus m are shown in (1)–(2).

$$P_{sch,m} - \sum_{i=1}^N |Y_{mi}| V_m V_i \cos(\theta_{mi} - \delta_m + \delta_i) = 0 \quad (1)$$

$$Q_{sch,m} + \sum_{i=1}^N |Y_{mi}| V_m V_i \sin(\theta_{mi} - \delta_m + \delta_i) = 0 \quad (2)$$

With the computation based on the Newton-Raphson method, voltage magnitudes and phases can be updated iteratively by using the following matrix equation where h indicates a counter of iteration.

$$\begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h+1)} = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}^{(h)} + \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^{(h)} \quad (3)$$

III. DYNAMIC LOAD FLOW AND VOLTAGE COLLAPSES

Voltage stability is the ability of a system to maintain voltage at safety regions. Voltage instability is a severe problem in power networks, which are experienced heavily loading, faulted, or with insufficient reactive power supply. Although voltage instability is essentially a local phenomenon, the problem of voltage stability concerns a whole power system. The simplest approach of finding voltage instability is to increase loads until the system voltage goes wire. Voltage stability in this manner is so called "load stability" problem. In addition, voltage collapse is a process by which the sequence of events accompanying voltage instability leads to a blackout or abnormally low voltages in a significant part of the power system. This voltage stability problem can be found in every kind of power systems, including AC railway power systems.

In this paper, voltage collapses in AC railway power systems is determined by varying train headway until the voltage collapse is identified. Train headway is a measure of the distance/time between two adjacent trains in a railway system as shown in Fig. 3. It is commonly defined as the distance from the tip of one train to the tip of the next one behind it. It is widely expressed as the time it will take for the trailing train to cover that distance. A shorter headway means a more frequent train service. To perform this calculation, multi-train simulation of a full hour service equipped with an AC railway power network solver is employed to enable AC railway dynamic load flow. To recognize the voltage collapse in AC railway system, a simple algorithm is needed. The proposed simulation of finding the voltage collapse is carried out repeatedly until the dynamic load flow program is not converged. This point is used as an indicator of the voltage collapse. This algorithm can be summarized as shown in Fig. 4.

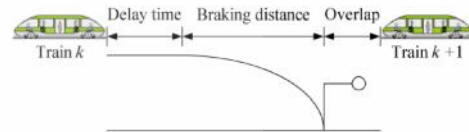


Fig. 3. Minimum train headway

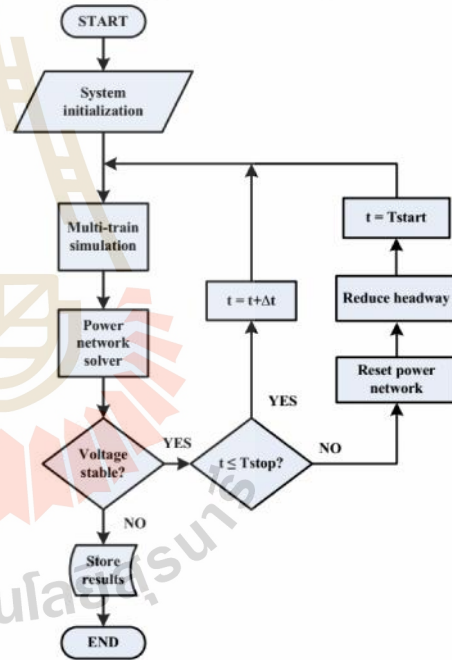


Fig. 4. Algorithm to identify voltage collapse in AC railways

IV. SIMULATION RESULTS

High-speed railway service with a given train headway was modeled for the simulation test as shown in Fig. 2. The trains were all assumed to be identical. The simulation was conducted by assuming four cases of the train headway (300 s, 120 s, 60 s and 50 s). Figs 5, 6, 7 and 8 show the distance vs time curves from these tests using the multi-train simulator for 300-s, 120-s, 60-s and 50-s train headway, respectively. For more detail, the train travel trajectory of the first train on the track is selected and depicted in Fig. 9. This train spent about 1200 s to reach the final passenger station which is 50 km away.

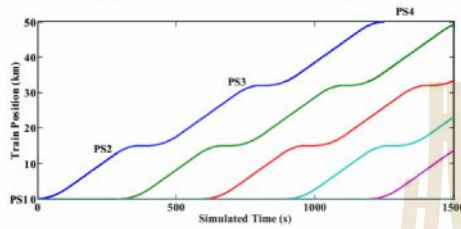


Figure 5. Train position for 300-s train headway

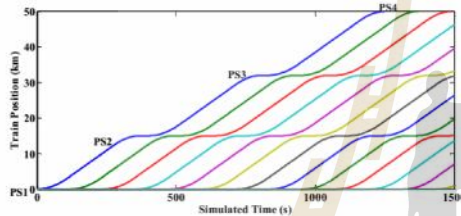


Figure 6. Train position for 120-s train headway

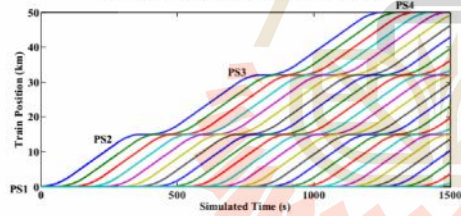


Figure 7. Train position for 60-s train headway

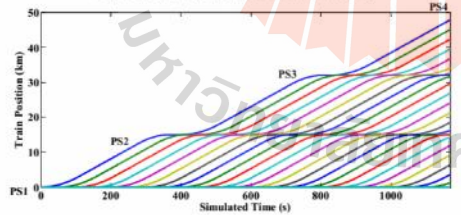


Figure 8. Train position for 50-s train headway

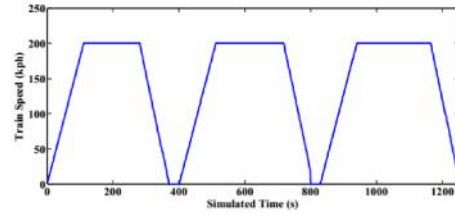


Figure 9. First train trajectory for 60-s headway 60 case

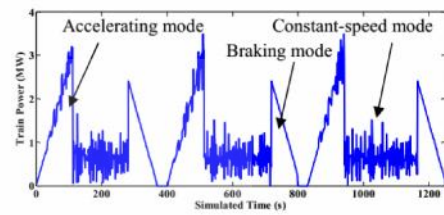


Figure 10. Power consumption of a selected train (60-s headway)

With short train headway, say 120-s as in Fig. 6, a total number of trains running on the same track when the first train arrives PS4 is 10. Assume that each train consumes the maximum of 3.5 MW as shown in Fig. 10. This case leads to the total of 35 MW loading to the AC railway power system. To identify a point of voltage collapses, the mid-point track section as the farthest node and also the weakest node in the system is monitored. For the 300-s, 120-s, 60-s and 50-s train headway, the voltages at mid-point section can be shown in Figs 11, 12, 13 and 14, respectively.

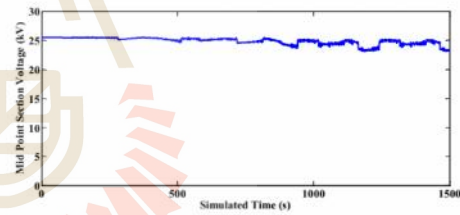


Figure 11. Mid-point track section voltage for 300-s headway

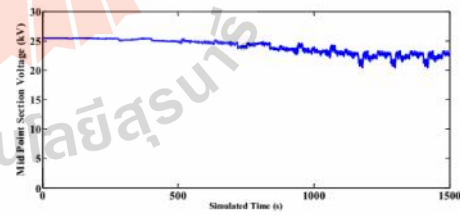


Figure 12. Mid-point track section voltage for 120-s headway

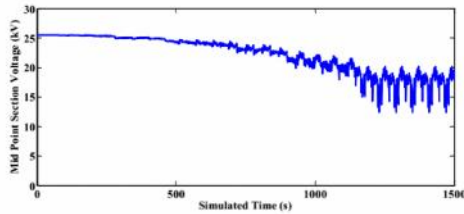


Figure 13. Mid-point track section voltage for 60-s headway

For a case of 50-s train headway, a total number of trains running on the same track when the first train arrives PS4 is just over twice the number of the 120-s headway case. This case leads to the total of 70 MW loading to the AC railway power system. In the same manner, the mid-point track section as the farthest node and also the weakest node in the system is monitored. For the 50-s train headway, the voltage at mid-point section can be shown in Fig. 14.

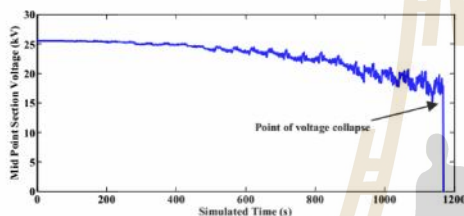


Figure 14. Mid-point track section voltage for 120-s headway

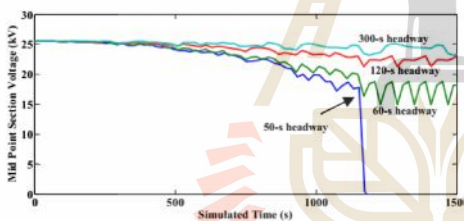


Figure 15. Comparison of the mid-point track section voltages (filtered)

For comparison, the mid-point track section voltage of the four tested train headways is illustrated as shown in Fig. 15. When the train headway is reduced step-by-step from 300 s, 120 s, 60 s and 50 s respectively, the mid-point track section voltage is dropped according to heavily loading of the trains running along the track. The voltage at the mid-point track section is stable as long as the train headway is kept above a value of 50 s. As can be seen from Figs 10 and 11, the voltage collapse occurs at the 50-s train headway and this is the limit of minimum train headway for this system due to the voltage instability.

V. CONCLUSIONS

In this paper, voltage collapses in AC railway power systems is determined by consideration of train headway effect. The train headway is a measure of the distance/time between two adjacent trains in a railway system. When the train headway is reduced, in this work, step-by-step from 300 s, 120 s, 60 s and 50 s respectively, the mid-point track section voltage is dropped according to heavy loading of the trains running along the track. The voltage at the mid-point track section is stable as long as the train headway is kept above a value of 50 s. In this study, the voltage collapse occurs at the 50-s train headway and this is the limit of minimum train headway for this system due to the voltage instability. This confirms that the proposed algorithm can be effectively used to identify the point of voltage collapses in AC railway power systems.

ACKNOWLEDGEMENT

This work supported by Rajamangala University of Technology Lanna. The Scholarship for Ph.D. Program to Kokiatt Aodsup is acknowledged.

REFERENCES

- [1] Andrzej Wiszniewski, "New Criteria of Voltage Stability Margin for the Purpose of Load Shedding", IEEE Transactions. Power Delivery., vol. 22, pp. 1367 – 1371, 2007.
- [2] Feng Dong, B.H. Chowdhury, M.L. Crow and Levent Acar, "Improving Voltage Stability by Reactive Power Reserve Management", IEEE Transactions. Power System., vol. 20, pp. 338 – 345, 2005.
- [3] System dynamic performance subcommittee of the IEEE power system engineering committee, voltage stability of power systems: concepts, analytical tools and industry experience, IEEE Publication No. 90 - T110358-2-PWR..
- [4] T.K. Ho, Y.L. Chi, J. Wang, K.K. Leung, L.K. Siu and C.T. Tse, "Probabilistic load flow in AC electrified railways", IEE Proceeding. Electrical Power, vol. 152, pp. 1003 -1013, 2005.
- [5] H. Sadaat, Power System Analysis, McGraw-Hill
- [6] T. Kulworawanichpong, "Simplified Newton-Raphson power flow solution", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 32, Issue 6, pp. 551 – 558, 2010.

Numerical Modeling and Very-Fast Transient Simulation of MOV Surge Arresters

Kokiat Aodsup

Power System Research Unit, School of Electrical Engineering Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000
E-mail: Kokiat_a@hotmail.co.th

Thanatchai Kulworawanichpong

Power System Research Unit, School of Electrical Engineering Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000
E-mail: Thanatchai@gmail.com

Abstract—This paper describes a numerical model of very-fast transient characteristics for MOV surge arresters. The IEEE frequency-dependent model has been employed. Integro-differential equations involving KCL analysis are formulated. Trapezoidal rule is used for numerical integration in case of current flowing through the model inductance. The current of the model capacitance of the circuit is approximated by using Backward Euler's different formula. Non-linear characteristics of the MOV arrester is simplified by a technique of piece-wise linear interpolation. In this paper, the proposed numerical model has been evaluated in comparison with those of ATP/EMTP and MATLAB PSB surge arrester.

Keywords – Lightning Surge; Surge Arrester; Metal Oxide Surge Arrester; Very-Fast Transient Simulation

I. INTRODUCTION

A lightning flash or stroke becomes a surge when its charge is transferred onto a power system. It takes a wave shape partly dependent on the stroke characteristic and partly due to the system impedance. The lightning surge represents the highest surge risk to insulation on power systems. Even low stroke currents can generate a 1000kV surge on the power system which is more than enough to flash over most insulators or puncture most equipment insulation. The lightning stroke can cause a lightning surge in two ways on a power system. The first is by a direct strike to the phase, and the second by a nearby strike to earth that results in an induced surge on the system. In the second case, the lightning surge is much lower in amplitude. The surge arrester protects the power systems from both the direct and indirect lightning surge by diverting the charge and energy to ground. In the process of diverting, it clamps the surge on the system from the arrester onward. Since the surge arrester has resistance even in its conductive state it does not reduce the lightning surge to zero. Instead it reduces it to a level that will generally not damage equipment. In some cases, the lightning surge traveling down the system after it is clamped can still do damage to the system. This is especially true in the case where the surge comes to an open circuit and is doubled due to reflections.

In this paper, a numerical model of MOV surge arresters based on trapezoidal rule and backward Euler's different formula is described. The model is challenged by injection of

the 4 μ s and 8- μ s half-cycled sinusoidal surge currents and the 8/20- μ s and 2/20- μ s Heidler's surge currents. The accuracy of the proposed model is validated by comparing the simulated results with those obtained by using ATP/EMTP and MATLAB PSB surge arrester.

This paper organizes a total of five sections. Next section, Section II, illustrates typical properties of metal oxide varistors. A numerical modeling of MOV surge arresters and the brief of very-fast transient simulation is presented in Section III. Section IV is the section describing simulation results and discussion. Conclusion remark is in the last section, Section five.

II. V-I CHARACTERISTIC OF METAL OXIDE VARISTORS

Metal oxide varistor (MOV) material has been widely used in today high-voltage surge arresters. It has a highly non-linear V-I characteristics. A typical varistor is made up by using zinc oxide (ZnO) powder. The V-I characteristic of an MO surge arrester exhibits a knee for small currents in milli-ampere region. For the applied voltage close to nominal, the current flowing through the arrester is increased as the voltage increases.

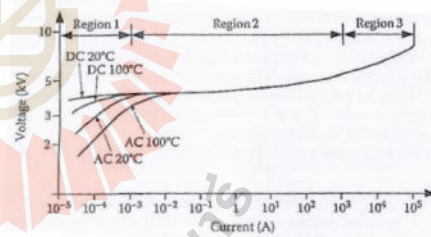


Fig. 1. Typical V-I characteristics of an MO arrester disk [1]

The V-I characteristic of MO arresters can be divided into three regions as shown in Fig. 1. In Region I, the arrester current is less than 1 mA and is capacitive. In Region II, the current is ranged from 1000 or 2000 A and is resistive current.

In Region III, the current is from 1.0 to 100 kA and the V-I characteristic is a linear relationship. The V-I characteristic of an MO surge arrester can be described in various ways. Three piece-wise linear or exponential segments are often employed.

III. NUMERICAL MODELING OF MOV SURGE ARRESTERS AND VERY-FAST TRANSIENT SIMULATION

The frequency-dependent model proposed by IEEE in [2]-[5], is shown in Fig.2. The two non-linear resistances A_0 and A_1 are separated by a RL filter. For arrester discharge currents with slow rising time, the influence of the filter is negligible; thus A_0 and A_1 are essentially in parallel and characterize the static behavior of the MOV surge arrester. For fast rising surge currents, the impedance of the filter becomes more significant, indeed the inductance L_1 derives more current into the non-linear branch A_0 . Since A_0 has a higher voltage for a given current than A_1 , the model generates a higher voltage between its input terminals.

The characteristics of A_0 and A_1 are given for the general case, and listed in the table given in [1] as shown in Fig. 3. The disadvantage is the model complexity.

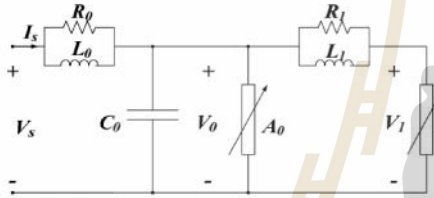


Fig. 2. Frequency-dependent model recommended by IEEE

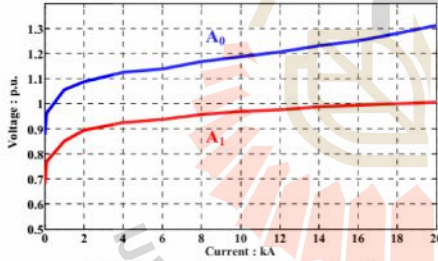


Fig. 3. Non-linear characteristics of A_0 and A_1 [1]

Analysis of the MOV surge arrester voltage across its terminal can be done in a simple manner associating with KCL at node V_s , V_0 and V_1 . The node equations obtained are expressed as follows.

$$\frac{V_s - V_0}{R_0} + \frac{1}{L_0} \int (V_s - V_0) dt - I_s = 0 \quad (1)$$

$$\frac{V_0 - V_1}{R_0} + \frac{1}{L_0} \int (V_0 - V_s) dt + C_0 \frac{dV_0}{dt} + \frac{V_0}{A_0} + \frac{V_0 - V_1}{R_1} + \frac{1}{L_1} \int (V_0 - V_1) dt = 0 \quad (2)$$

$$\frac{V_1 - V_0}{R_1} + \frac{1}{L_1} \int (V_1 - V_0) dt + \frac{V_1}{A_1} = 0 \quad (3)$$

From the above equations, they can be solved numerically. In this paper, trapezoidal rule and Euler's backward different formula are employed for numerical integration and numerical differentiation, respectively, as described in (4) – (5). Working out (1) – (3) at time t , (6) expresses all of these equations simultaneously in a compact matrix form.

$$\int_{t-\Delta t}^t x(t) dt = \frac{\Delta t}{2} \{x(t) + x(t-\Delta t)\} \quad (4)$$

$$\frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t) - x(t-\Delta t)}{\Delta t} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s(t) \\ V_0(t) \\ V_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_s \\ J_0 \\ J_1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Where

$$G_{11} = \frac{1}{R_0} + \frac{\Delta t}{2L_0}$$

$$G_{12} = -\frac{1}{R_0} - \frac{\Delta t}{2L_0} = G_{21}$$

$$G_{13} = 0 = G_{31}$$

$$G_{22} = \frac{1}{R_0} + \frac{\Delta t}{2L_0} + \frac{C_0}{\Delta t} + \frac{1}{A_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{\Delta t}{2L_1}$$

$$G_{23} = -\frac{1}{R_1} - \frac{\Delta t}{2L_1} = G_{32}$$

$$G_{33} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{\Delta t}{2L_1}$$

$$J_s = I_s(t) - \frac{\Delta t}{2L_0} \{V_s(t-\Delta t) - V_0(t-\Delta t)\}$$

$$J_0 = \frac{\Delta t}{2L_0} V_s(t-\Delta t) - \left(\frac{\Delta t}{2L_0} + \frac{\Delta t}{2L_1} + \frac{C_0}{\Delta t} \right) V_0(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2L_1} V_1(t-\Delta t)$$

$$J_1 = \frac{\Delta t}{2L_1} \{V_0(t-\Delta t) - V_1(t-\Delta t)\}$$

Starting with some initial condition of the state variables, the three node voltages can be solved simultaneously. Based on a priori information, (6) is used to update the estimate of the three state voltage variables as each new data point at time t is acquired.

IV. SIMULATION RESULTS

The proposed numerical model is validated by comparing its simulated results with those obtained by using ATP/EMTP and MATLAB Power System Blockset (PSB). Figure 4 and 5 show a schematic diagram of the MOV surge arrester drawn in ATP/EMTP and MATLAB PSB, respectively.

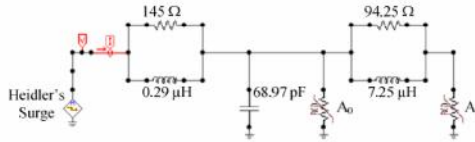


Fig. 4. Schematic diagram of MOV arrester by ATP/EMTP

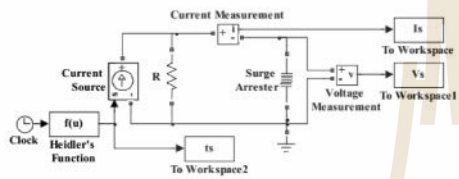


Fig. 5. Schematic diagram of MOV arrester by MATLAB PSB

The model is challenged by injection of the 4 μ s and 8- μ s half-cycled sinusoidal surge currents. Figure 6, 7, 8 and 9 show the validation of the proposed model by comparing its simulated results with those obtained by using ATP/EMTP and MATLAB PSB surge arrester.

Table I also describes the sum of the squared errors comparing the simulated results with the two competitors for the injection of the 4 μ s and 8- μ s half-cycled sinusoidal surge currents

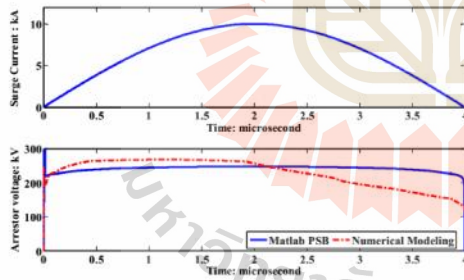


Fig. 6. Comparing the simulated results with those of MATLAB PSB for the injection of the 4 μ s half-cycled sinusoidal surge current

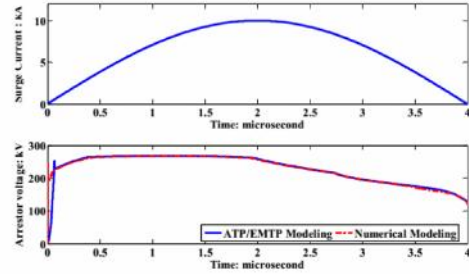


Fig. 7. Comparing the simulated results with those of ATP/EMTP for the injection of the 4 μ s half-cycled sinusoidal surge current

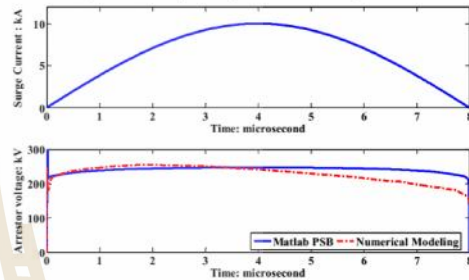


Fig. 8. Comparing the simulated results with those of MATLAB PSB for the injection of the 4 μ s half-cycled sinusoidal surge current

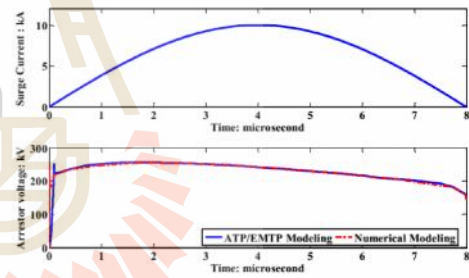


Fig. 9. Comparing the simulated results with those of ATP/EMTP for the injection of the 8 μ s half-cycled sinusoidal surge current

Table I. Sum of the squared errors for the injection of the 4 μ s half-cycled sinusoidal surge current

Sum Square Error (kV)	Half-Cycled Sinusoidal Surge Currents	
	10 kA 4 μ s	10 kA 8 μ s
MATLAB PSB	6.1002×10^7	4.4595×10^7
ATP/EMTP	1.2771×10^7	1.61×10^7

Besides the sinusoidal surge waveform, the model is also challenged by injecting the 2/20- μ s and 8/20- μ s Heidler's surge currents. Figure 10, 11, 12 and 13 show the proposed model validation by comparing the simulated results with those obtained by using ATP/EMTP and MATLAB PSB surge arrester. Table II also describes the sum of the squared errors comparing the simulated results with the two competitors for the injection of the 8/20- μ s and 2/20- μ s Heidler's surge currents.

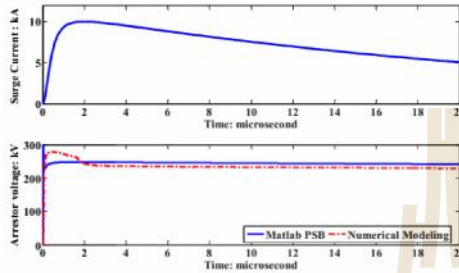


Fig. 10. Comparing the simulated results with those of MATLAB PSB for the injection of the 2/20- μ s Heidler's surge current

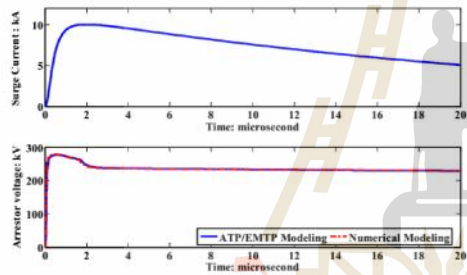


Fig. 11. Comparing the simulated results with those of ATP/EMTP for the injection of the 2/20- μ s Heidler's surge currents.

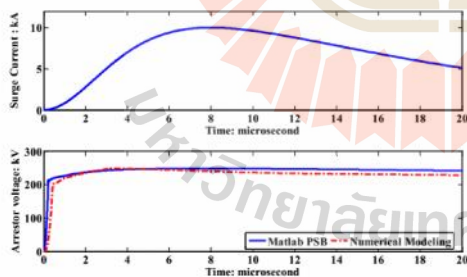


Fig. 12. Comparing the simulated results with those of MATLAB PSB for the injection of the 8/20- μ s Heidler's surge current

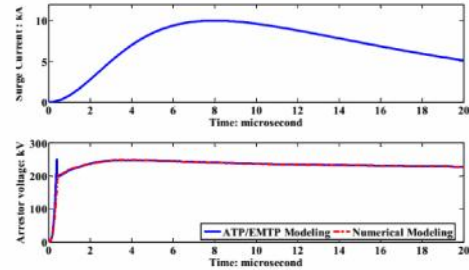


Fig. 13. Comparing the simulated results with those of ATP/EMTP for the injection of the 8/20- μ s Heidler's surge current

Table II. Sum of the squared errors for the injection of the 8/20- μ s and 2/20- μ s Heidler's surge current

Sum Square Error (kV)	Heidler's Surge Currents	
	10 kA 2/20 μ s	10 kA 8/20 μ s
MATLAB PSB	5.5861×10^7	6.7004×10^7
ATP/EMTP	7.9281×10^5	5.0248×10^6

V. CONCLUSIONS

In this paper, a numerical model of MOV surge arresters based on trapezoidal rule and backward Euler's different formula is proposed. The accuracy of the proposed model is validated by comparing the results with those of ATP/EMTP and MATLAB PSB surge arrester. The model is tested by the injection of the 4 μ s and 8- μ s half-cycled sinusoidal surge currents and the 8/20- μ s and 2/20- μ s Heidler's surge currents. The results confirmed the accuracy of the proposed model.

ACKNOWLEDGEMENT

This work supported by Rajamangala University of Technology Lanna. The Scholarship for Ph.D. Program to Kokiatt Aodsup is acknowledged.

REFERENCES

- [1] Andrew R.Hileman, Insulation Coordination for Power Systems, Marcel Dekker, Inc, New York, 1999.
- [2] IEEE Working Group 3.4.11, "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transactions. Power Delivery, vol. 7, pp. 302 – 309, 1992.
- [3] H.J.Li,S.Birlasekaran and S.S.Choi, "A Parameter Identification Technique for Metal – Oxide Surge Arrester Model", IEEE Transactions. Power Delivery, vol. 17, pp. 736 – 741, 2002.
- [4] J.A.Martinez and D.W.Durbak, "Parameter Determination for Modeling Systems Transient Part V: Surge Arrester", IEEE Transactions. Power Delivery, vol. 20, pp. 2073 – 2078, 2005
- [5] Juan A.Martinez-Velasco, Power System Transients Parameter Determination, CRC Press, New York, , 2010.

Lightning Stroke Shielding of Electric Railway Overhead Catenary Feeding Systems

Kokiat Aodsup and Thanatchai Kulworawanichpong
School of Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
kokiat_a@hotmail.co.th; thanatchai@gmail.com

Kiattisak Batsungnoen
School of Occupational Health and Safety
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
kiattisak@sut.ac.th

Abstract—This paper describes shielding of overhead power feeding systems for electric railway. Some additional shield wires are determined to prevent lightning flashes from terminating on phase conductors. The electro-geometric model is employed in order to find the perfect shielding angle where the location of the shield wires is optimized according to the guide of IEEE T&D committee. A typical double-track railway overhead catenary feeding system is examined.

Keywords—perfect angle; lightning flashes; railway overhead catenary system; electro-geometric model;

I. INTRODUCTION

Lightning strikes are electrical discharges in nature caused by lightning and mainly occurred during thunderstorms. Trees are frequent conductors of lightning terminating to the ground and are known to provide protection against lightning damage of nearby building. Direct lightning strike to an electrical system or induced lightning surge propagated along electrical conductors can damage electrical equipment e.g. telephones, modem, computers, electronic control devices, etc. If a lightning bolt strikes an unprotected structure, up to 200 kA of lightning surge current seeks the path of least resistance to earth. Magnetic fields and electrical potential differences in the structure induce transient voltages, which can damage and even destroy electronic devices that have not been emf shielded or lightning protected.

In cases of electric power transmission and distribution lines, when lightning strikes a conductor, no other object shares in carrying the lightning surge current. Most flashes to an unprotected conductor are able to produce flashovers. Shield wires are typically used for transmission lines and distribution lines which are located high above the phase conductor to shield the conductor from direct lightning strokes. One important task of transmission-line designers is to locate the shield wires at a perfect location. Well-planned geometry of conductor arrangement will reduce the probability of lightning striking the phase conductors to an acceptable level. The proper placement of the shield wire above the phase conductors is depended on the shielding angle. In the past, a shielding angle of 30 degree was usually employed for transmission line to produce acceptable lightning performance on existing lines of voltage up to 230 kV. At present, after extensive theoretical studies and careful experiment investigation, the shielding angle should be decreased as the height of the transmission line

increases. Overhead distribution lines for all system voltage levels including long-distance railway overhead catenary feeding systems are exposed to lightning, and outage and damage occur frequently due to this natural phenomenon.

This paper introduces shielding wires to protect long-distance railway power feeding system from direct lightning strokes. The perfect angle to locate the shield wires is determined. In this paper, five sections have been organized. The next section, Section II, gave a brief description of power transmission-line shielding against direct lightning strokes. Section III was a summary of finding the perfect angle to locate shield wires above the phase conductors, especially in power distribution systems. Section IV, Simulation Results, presented a design example of electric railway overhead catenary feeding systems. The last section, Section V, gave the conclusion.

II. SHIELDING AGAINST DIRECT LIGHTNING STROKES

A. Electro-geometric Model

Electro-geometric model (EGM) was proposed and further developed by Armstrong, Brown and Whitehead in 1968 – 1969 [1,2]. In Fig. 1, arcs of radii S are drawn from the phase conductor and from the shield wire. In addition, a horizontal line parallel and located above the earth surface by distance D is constructed. The overlap of these two arcs and the horizontal line defines three line segments representing three zones of lightning flash termination. If a lightning stroke enters Zone A, it will be hit the shield wire and therefore the surge current is shunted to ground through tower footing. In the similar manner, if a lightning stroke enters Zone C, it will not be reached any conductor. This lightning flash is terminated to the earth surface nearby. However, the most severe case occurs when a stroke enters Zone B. The incoming stroke will be hit the phase conductor. Distance D_S and D_C are defined in Fig. 1. They are the vertical exposure distances for the shield wire and the phase conductor, respectively.

B. Striking Distance Equations

The striking distance equation (D or S) is defined by AI_c^B where A and B are coefficients and I_c is the stroke current, representing the last step of the lightning flash was developed by Wagner [3]. Young [4] found that Wagner's equations required some modification. Therefore, several versions of

This work was supported by Rajamangala University of Technology Lanna. The Scholarship for Ph.D. Program to Mr. Kokiat Aodsup is acknowledged.

striking distance equations were released in order to improve the estimation of lightning impulse characteristics. Fig. 2 describes some selected striking distance expressions in graphic.

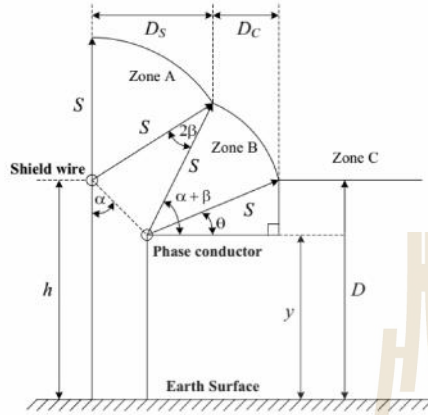


Figure 1. Definition of angles and distances in EGM

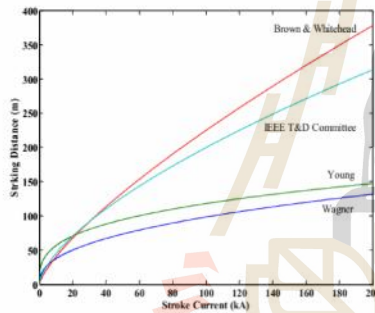


Figure 2. Graphical plot of some selected striking distance equations

C. Maximum Shielding Failure Current

As can be seen from the exponential equation of the stroke current, the striking distance is increased as the stroke current increases. This increment leads to the decrease of the vertical exposure distance of the phase conductor, D_C . The maximum shielding failure current I_m is defined according to this situation where all striking distances coincide at a single point. In this case, D_C becomes zero.

D. Shielding Failure Flashover Rate (SFFOR)

Shielding failure flashover rate is a number of strokes that terminates on the phase conductor and results in flashover. If

the voltage produced by a stroke current across the conductors exceeds the critical flashover voltage, the flashover occurs.

III. PERFECT SHIELDING ANGLE

Perfect angle is defined as a shielding failure flashover rate is zero. This occurs when D_C is zero. It means that Zone B representing the zone of phase conductor termination from lightning stroke is fully covered by Zone A and Zone C as shown in Fig. 3. At this circumstance, $\theta = \alpha + \beta$. This can be achieved by setting I_C to I_m . From Fig. 3 the perfect shielding angle, α_p , can be computed by using the following equation.

$$\alpha_p = \sin^{-1} \left\{ \frac{2D - (h + y)}{2S} \right\} \quad (1)$$

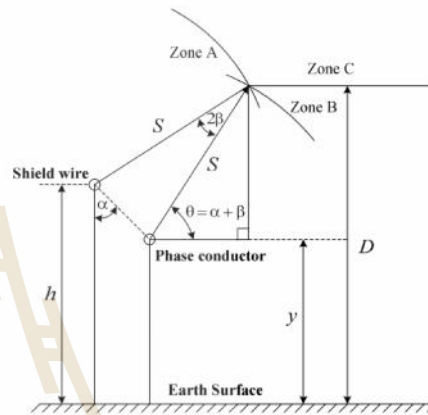


Figure 3. Perfect shielding angle

IV. RAILWAY OVERHEAD CATENARY SYSTEMS

In the past, DC power supplies (1.5 kV from the early 1900s and 3 kV from the 1930s) were mainly used because of ease of control. However, difficulties of DC motor commutation, limitations of feeding distance and expensive power supply equipment led to the restrictions on the use of DC mainline railways. Using a high-voltage AC power transmission system, long-distance feeders have become possible. Until recently, AC/DC converter-fed DC motors were used, with the converters fed from the AC supply through a traction transformer. The advantage of DC motors is simple torque-speed control. There exist different operating frequencies that are used in electrified railways in various parts of the world. Low-frequency high-voltage transmission networks, 15 kV at $16\frac{2}{3}$ Hz and 12 kV at 25 Hz, are used to feed AC commutator motors in some central European countries (Norway, Sweden, Switzerland, Austria and Germany) and in New York, USA, respectively [5,6]. Around

This work was supported by Rajamangala University of Technology Lanna. The Scholarship for Ph.D. Program to Mr. Kokiat Aodsup is acknowledged.

the 1950s, electrified railways at the industrial frequency, 50 Hz, were established. The Valenciennes-Thionville line in France was the first 50 Hz railway electrification [7]. Thus far, a single-phase feeding system with 25 kV at 50 Hz has become the world standard of mainline railway electrification while a 50 kV feeding system has been used for railways with heavily loaded locomotives. Fig. 4 shows a typical double-track railway overhead catenary system. As can be seen from the figure, no shielding wire for direct lightning protection is used.

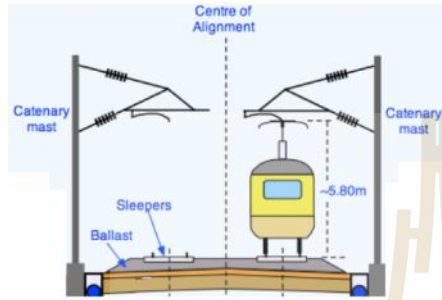


Figure 4. Typical double-track railway catenary feeding system [8]

V. DESIGN EXAMPLE - RESULTS

This section is to apply the shielding wire design for railway overhead catenary systems. System parameters and design parameters are given as follows.

$$y = 6.41 \text{ m} \quad (\text{average})$$

$$S = 10I_c^{0.65} \quad (\text{IEEE T\&D Committee})$$

$$D = \beta SI_c^{0.65} \quad (\text{IEEE T\&D Committee})$$

Where

$$\beta = 0.36 + 0.17 \ln(43 - y)$$

The stroke current, I_c , is uncertain. It cannot be predicted precisely. However, we can estimate the stroke current indirectly by interpreting some statistical data and geographic information. In this paper, ground flash density together with railway track location is used to evaluate the stroke current in design process. The stroke current is large in some areas where the ground flash density is high. Urban and suburban areas where high structures are built and they are always equipped with lightning shield conductors probably have small value of the stroke current.

In this study, we assume that the stroke current can be varied according to the previous mentioned parameters. To examine this effect, the stroked current is varied as given below.

$$I_c = [1 \ 2 \ 4 \ 8 \ 12 \ 15 \ 20 \ 25 \ 30] \text{ kA}$$

By varying the stroke current and by using the system parameters and the design parameter given previously, the perfect angle with respect to the height of the shield wire is obtained. Due to the variation of the stroke current and the height of the shield wire, the perfect angle is not unique. Fig. 5 presented the plot of the perfect angle and the shield wire position while Fig. 6 gave some modification by transforming the perfect angle into the horizontal spacing of the phase conductor and the shield wire.

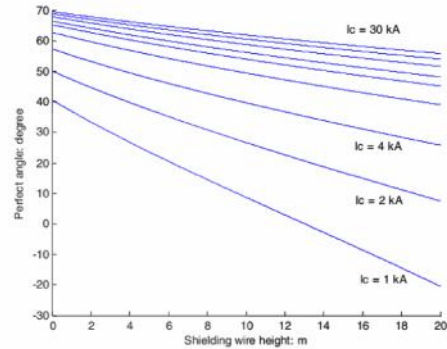


Figure 5. Perfect angle versus shield wire position

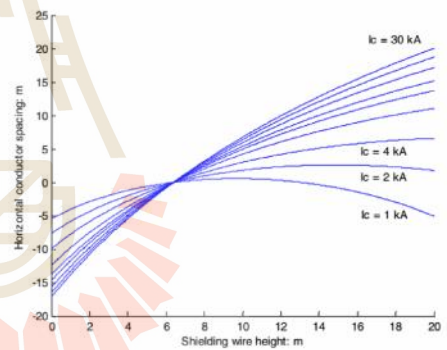


Figure 6. Conductor spacing versus shield wire position

This design example assumes that the railway overhead catenary system has construct across country. It passes urban, suburban and rural areas with different ground flash density in nature. In the design the stroke current is set as 12 kA for suburban and 20 kA for rural areas.

If shielding wire height is fixed at 8 m above the earth surface. The perfect angle and the horizontal conductor spacing can be obtained and put in Table I.

TABLE I. PERFECT ANGLE AND HORIZONTAL CONDUCTOR SPACING

Stroke Current	Shielding Wire Height @ 8 m	
	Perfect angle (Degree)	Horizontal conductor spacing (m)
12 kA (Urban & Suburban)	55.96	2.354
20 kA (Rural)	60.36	2.795

As a result, the location of the designed shield wires of the railway overhead catenary system passing through suburban and rural areas is illustrated graphically as shown in Fig. 7 and Fig. 8, respectively.

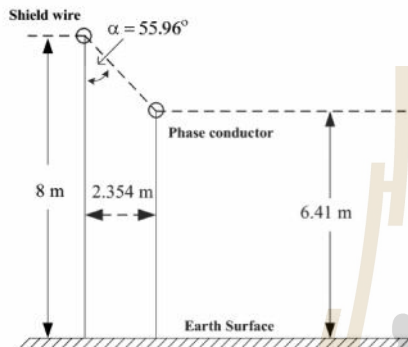


Figure 7. Shield wire position in suburban areas

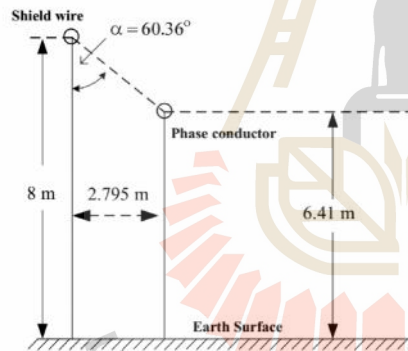


Figure 8. Shield wire position in rural areas

VI. CONCLUSION

This paper introduces shielding wires to protect long-distance railway power feeding system from direct lightning strokes. The perfect angle to locate the shield wires is determined. The electro-geometric model is employed in order to find the perfect shielding angle where the location of the shield wires is optimized according to the guide of IEEE T&D committee. A typical double-track railway overhead catenary feeding system is examined. The results used design the location of shielding of overhead power feeding systems for electric railway.

ACKNOWLEDGMENT

This work supported by Rajamangala University of Technology Lanna. The Scholarship for Ph.D. Program to Kokiatt Aodsup is acknowledged.

REFERENCES

- [1] H.R. Armstrong and E.R. Whitehead, "Field and analytical studies of transmission lines shielding", IEEE Trans. On PA&S, pp. 270 – 281, 1968.
- [2] G.W. Brown and E.R. Whitehead, "Field and analytical studies of transmission lines shielding", IEEE Trans. On PA&S, pp. 617 – 626, 1969.
- [3] C.F. Wagner, "The relation between stroke current and the velocity of the return stroke", IEEE Trans. On PA&S, pp. 609 – 613, 1963.
- [4] F.S. Young, J.M. Clayton and A.R. Hileman, "Shielding of transmission lines", IEEE Trans. On PA&S, pp. 132 – 154, 1963.
- [5] R.J. HILL, "Electric railway traction – Part 2 traction drives with three-phase induction motors", Power Engineering Journal, pp. 143-152, 1994.
- [6] R.J. HILL, "Electric railway traction – Part 1 electric traction and DC traction motor drives", Power Engineering Journal, pp. 47-56, 1994.
- [7] R.J. HILL, "Electric railway traction – Part 3 traction power supplies", Power Engineering Journal, pp. 275-286, 1994.
- [8] <http://www.railway-technical.com>

Simulation of Lightning Surge Propagation in Transmission Lines Using the FDTD Method

Kokiat Aodsup and Thanatchai Kulworawanichpong

Abstract— This paper describes a finite-difference time-domain (FDTD) method to analyze lightning surge propagation in electric power transmission lines. Numerical computation of solving the Telegraphist's equations is determined and investigated its effectiveness. A source of lightning surge wave on power transmission lines is modeled by using Heidler's surge model. The proposed method was tested against medium-voltage power transmission lines in comparison with the solution obtained by using Bewley lattice diagram. As a result, the calculation showed that the FDTD method is one of accurate methods to analyze transient lightning wave in power transmission lines.

Keywords— Finite-difference time-domain (FDTD) method, Traveling wave, Lightning surge, Bewley lattice diagram, Telegraphist's equations.

I. INTRODUCTION

LIGHTNING and switching surges can occur occasionally in electric power transmission lines. These phenomena can produce high voltage level in a very short time that can damage insulation or can cause server flashover [1-3]. Lightning surge may be caused by either direct strokes or by the fields radiated from distant lightning, called indirect strokes. Direct lightning strokes are determined as a serious problem but it rarely occurs. However, indirect strokes, in fact they are less severe than direct strokes, may be a significant problem because of their frequent occurrence. The induced lightning surges can cause significant damages to electric power components, telecommunication equipment, computer networks, etc. These result in severe damages of equipment, interruption of services, increased operation and maintenance cost. Therefore, adequate lightning or surge protection of electrical and electronic systems from electromagnetic disturbances has been increasingly important. For insulation design of the power transmission system, it is vital to exhibit the induced voltage behaviors propagated along the transmission lines. Consequently, both theoretical and experimental studies of lightning induced electromagnetic fields have been conducted continuously in over half a century.

Numerical simulation plays an important role for theoretical studies of electromagnetic problems because of the complex nature of the electromagnetic waves. A close interaction

between theory and practical works is crucial for every developing research field. Numerical computation of lightning surge propagation in power transmission line resulting from either direct or indirect lightning strokes is very important to know various aspects of the problems and equally important in developing protection schemes against such an atmospheric phenomena [4].

In theory, characteristics of lightning surge propagation in transmission lines can be described mathematically in forms of partial differential equations (PDEs) as the well-known Telegraphist's equations [5]. These equations are linear second-order partial differential equations with constant coefficients. These equations fall into three basic categories: parabolic, elliptic and hyperbolic. In case of lossless lines where series resistance of lines and shunt conductance representing insulation losses are neglected, the system equations can be simplified into the wave equations which the lightning surge can propagate along the line without any line attenuation. Although the wave equations as hyperbolic PDEs have an exact equations in some circumstances, further investigation such as appearance of lightning surge arresters somewhere in transmission lines can raise complexity and nonlinearity in the governing system equations. Solutions of these equations were obtained several decades ago by Heaviside in England and Poincare in France [2]. The FDTD method [6-8] is basically a numerical tool and can be adapted in associating with surge arrester models in the future work.

This paper is well organized and separated into six sections. Section II gives a brief review of electric power transmission line and its mathematical model in such a way that lightning surge propagation is intended to be studied. Section III describes the FDTD method and its application in lightning surge propagation in transmission lines. For comparison, section IV devotes for a classical method of Bewley lattice diagram of wave reflection along transmission lines. Section V is for results and discussion. The final section is the conclusion remark.

II. POWER TRANSMISSION LINE MODELING

A. Mathematical Model of a Power Transmission Line

The study of transmission line surges regardless of their origin is very complex. Although the long-line model is recommended for lines more than approximately 150 mi long [9], the lightning surge wave propagation is a very short-time impulse wave-shape therefore the long-line model is a good representation of power lines for a high-frequency impulse of

Kokiat Aodsup is with the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000 (e-mail: kokiat_a@hotmail.co.th.)

Thanatchai Kulworawanichpong is with the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND 30000 (e-mail: thanatch@sut.ac.th)

lightning surges.

Fig. 1 shows the frame and the equivalent circuit of a very small section of a single-phase power transmission line. Assuming that the line conductors are parallel to the ground

and uniformly distributed, the time-domain characteristics in form of partial differential equations of the single-conductor line can be expressed as follows.

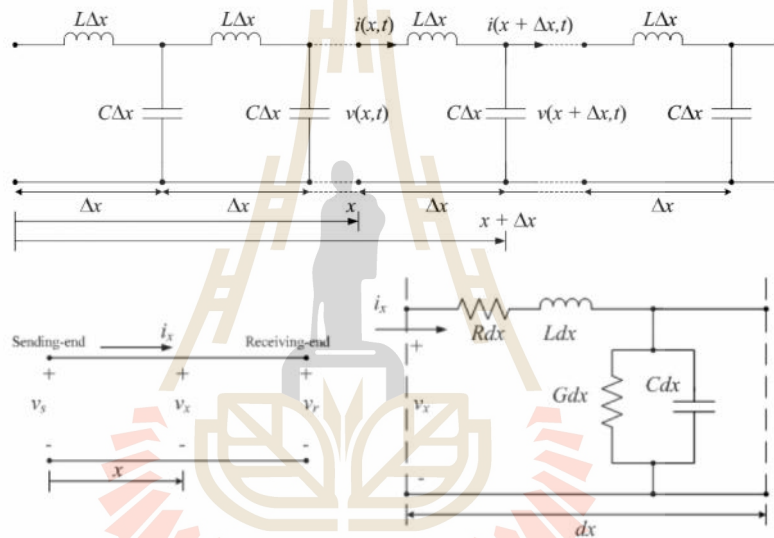


Fig. 1 Distributed line model for power transmission line wave propagation

$$\frac{d}{dx} v(x,t) = -Ri(x,t) - L \frac{d}{dt} i(x,t) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} i(x,t) = -Gv(x,t) - C \frac{d}{dt} v(x,t) \quad (2)$$

time so that they are in form of partial derivatives. Since it assumes that the transmission line is a lossless line, R and G will be equal to zero to give the following expressions.

$$\frac{d}{dx} v(x,t) = -L \frac{d}{dt} i(x,t) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx} i(x,t) = -C \frac{d}{dt} v(x,t) \quad (4)$$

Where $i(x,t)$ is a current surge wave function
 $v(x,t)$ is a voltage surge wave function
 R, L, C and G are per-unit length line parameters

Consider the distance x along the transmission line from the sending end (rather than the receiving end) to the very small different element of length dx shown in the above figure. The voltage $v(x,t)$ and current $i(x,t)$ are both a function of space and

A set of the above equations is also called wave equations. Now either current $i(x,t)$ can be eliminated by taking the partial derivatives of both terms in (3) with respect to x and in (4) with respect to t , or voltage $v(x,t)$ can be eliminated by taking

International Science Index, Electrical and Computer Engineering Vol:6, No:11, 2012 waset.org/Publication/5396

the partial derivatives of both terms in (3) with respect to t and in (4) with respect to x . This will produce a linear second-order partial differential equation in form of hyperbolic PDEs as shown in (5) for the voltage wave equation.

$$\frac{1}{LC} \frac{d^2}{dx^2} v(x,t) = \frac{d^2}{dt^2} v(x,t) \quad (5)$$

Solving the above so-called "travelling wave equation" has a long history. In the mid of the previous century where computer was not efficient, the classical reflection analysis of traveling wave through the line junction was the only potential tool to do so. This method is widely known and broadly accepted as a preliminary tool of study in wave propagation in power transmission lines. It is called "Bewley lattice diagram". It enables the calculation of wave refraction and reflection and any line junctions. This method will be reviewed in the next section.

B. Heidler's Surge Function

The lightning surge wave model for the wave propagation model or the RLC lightning model is represented as an impulse source occurring on somewhere in a transmission line. The solutions for the line voltage and line current are obtained by solving the Telegrapher's equations. In the model, the surge voltage distribution is obtained by taking into account the voltage waves propagate along the line channel with velocity v and the same wave shape. The propagation velocity u is less than the speed of light (usually $1/3 - 2/3$ the speed of light). The model based on the travelling-wave source was introduced by Heidler [10] in which the surge wave propagates at infinitely large speed while the return-stroke speed (front speed) is still finite. The equation for surge function introduced by Heidler satisfies the two basic requirements needed for the lightning surge simulation, i.e. the current does not have discontinuity at $t = 0$ s and the current derivative also does not have a discontinuity at $t = 0$ s provided that $k > 1$. At present time, Heidler representation of the lightning surge wave is one of the most widely-used surge model for the lightning surge propagation in transmission line. The Heidler's surge function can be described by the following equation.

$$f(t) = \left(\frac{F_0}{\eta} \right) \left(1 - e^{-t/\tau_1} \right)^k e^{-t/\tau_2} \quad (6)$$

The waveform of the Heidler's surge function as a current waveform in the range of $0 - 5 \mu\text{s}$ is shown in Fig. 2. The values of the parameters for plotting the Heidler current function are listed below.

$$\begin{aligned} F_0 &= 10 \text{ kA} \\ \eta &= 1 \\ \tau_1 &= 0.1 \mu\text{s} \\ \tau_2 &= 0.3 \mu\text{s} \\ k &= 2 \end{aligned}$$

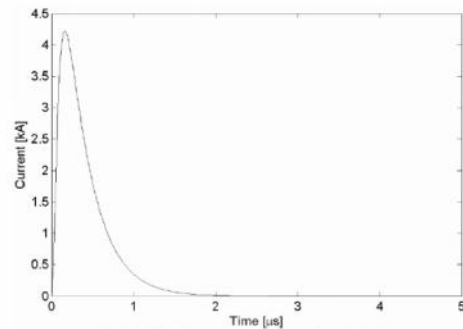


Fig. 2 Heidler's current waveform based on (6)

III. TRANSIENT WAVE REFLECTION ANALYSIS

When a travelling wave on a transmission line reaches a transition point at which there is an abrupt change of line parameters, as open or short-circuit termination, a junction with another line, a machine winding, load termination, etc, a part of the wave is reflected back on the incoming line and the rest may pass through other line section. The travelling wave before reaching the transition point is called the incident wave. The incident wave may be decomposed into two component waves called the reflected wave and the transmitted wave. This relation is a voltage-wave solution of (5) and it can be expressed as in (7). The transmitted wave, $v''(x,t)$, is a wave portion travelling toward the next line section while the reflected wave, $v'(x,t)$, is a wave portion travelling backward to the source. These waves can be illustrated by the equivalent circuit shown in Fig. 3.

$$v(x,t) = v''(x,t) + v'(x,t) \quad (7)$$

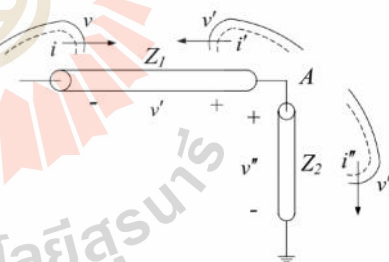


Fig. 3 Waves reflected and transmitted at the junction

If the line section # 1 has the surge impedance of Z_1 and the line section # 2 has the surge impedance of Z_2 , the transmitted and the reflected portions of the travelling wave can be represented in terms of the refraction coefficient β and the reflection coefficient α , respectively, as given in (8) and (9).

$$\beta = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (9)$$

Where $Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ and $Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$
 $u_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ is the wave speed of line 1
 $u_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ is the wave speed of line 2
 L_1 is per-unit inductance of line section 1
 L_2 is per-unit inductance of line section 2
 C_1 is per-unit capacitance of line section 1
 C_2 is per-unit capacitance of line section 2

In practical power network, many line sections are typical. This leads to multiple reflections among line junctions to exhibit complicated resulting waves. However, in a lateral line case, both the reflection and the refraction occur from the left to the right or from the right to the left, coefficients of reflection and refraction can be pre-calculated and then used repeatedly when any incident wave has arrived. The component waves calculated at any time and any position by using this pre-calculation of all coefficients at every junction can be drawn as the so-called "Bewley lattice diagram" [2] as illustrated in Fig. 4.

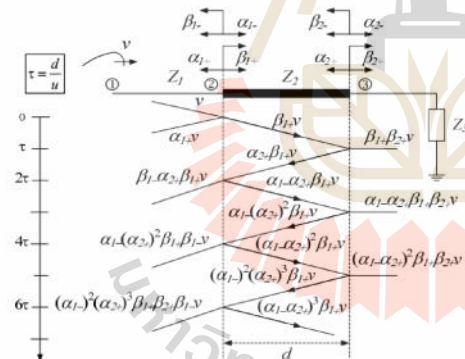


Fig. 4 Example of Bewley lattice diagram

IV. FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN (FDTD) METHOD

The standard example of a hyperbolic PDE is the one-dimensional wave equation as described follows.

$$c^2 \frac{d^2}{dx^2} v(x,t) = \frac{d^2}{dt^2} v(x,t) \quad (10)$$

Initial conditions are given for $v(x,0)$ and also its derivative. The boundary conditions are given at $x = 0$ and $x = L$ where L is the maximum limit of x .

According to the explicit method of solving the wave equation, replacing the space derivative in the wave equation by finite difference formula at the τ^{th} time step, (11) is obtained. In the same manner, replacing the time derivative by the finite difference formula at the λ^{th} space step, (12) is formed. By substituting (11) and (12) into (10), it gives the updated voltage wave solution as summarized in (13).

$$\frac{d^2}{dx^2} v(x,t) = \frac{v(\lambda + 1, \tau) - 2v(\lambda, \tau) + v(\lambda - 1, \tau)}{\Delta x^2} \quad (11)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} v(x,t) = \frac{v(\lambda, \tau + 1) - 2v(\lambda, \tau) + v(\lambda, \tau - 1)}{\Delta t^2} \quad (12)$$

$$v(\lambda, \tau + 1) = \phi^2 v(\lambda - 1, \tau) + 2(1 - \phi^2) v(\lambda, \tau) + \phi^2 v(\lambda + 1, \tau) - v(\lambda, \tau - 1) \quad (13)$$

Where $\phi = c \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{\Delta t}{\Delta x \sqrt{LC}}$ is the aspect ratio

V. SIMULATION RESULTS AND DISCUSSION

The study of successive reflection of travelling waves caused by either direct or indirect lightning stroke can be investigated through a test example of power transmission lines as shown in Fig. 5. This example consists of four transmission line sections with the open far-end. The line parameters of each section are given as follows.

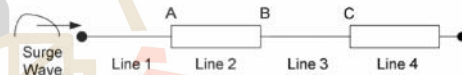


Fig. 5 The example transmission line systems

The parameter of transmission line systems is :

- Line 1**
Line length: 1 km
 $L_1 = 120 \mu\text{H/m}$, $C_1 = 10 \text{ pF/m}$
- Line 2**
Line length: 1 km
 $L_2 = 480 \mu\text{H/m}$, $C_2 = 10 \text{ pF/m}$
- Line 3**
Line length: 1 km
 $L_3 = 240 \mu\text{H/m}$, $C_3 = 10 \text{ pF/m}$
- Line 4**
Line length: 1 km
 $L_4 = 360 \mu\text{H/m}$, $C_4 = 10 \text{ pF/m}$

The Heidler's surge model of the lightning induced voltage can be characterized by the waveform in Fig. 6. The Heidler's surge wave has the 8.5-kV peak and 12/30- μs of the rise and decay time constants.

International Science Index, Electrical and Computer Engineering Vol:6, No:11, 2012 waset.org/Publication/5396

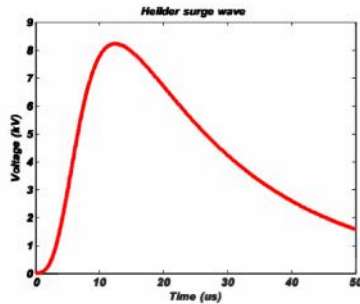


Fig. 6 Heilder's surge wave for the test example

With the help from MATLAB programming, lightning surge waves propagation on transmission lines can be simulated numerically. In this paper, this simulation used the time step of $0.5 \mu\text{s}$ and the step length of 5 m.

Assume that the lightning surge was induced at the sending end of the transmission line. The incident wave can travel along the line section 1 with a constant speed and without attenuation approach line junction A as shown in Fig. 7. After the incident wave hitting the junction, the incident wave of 8.5-kV peak was separated into the reflected wave of 3.5-kV peak and the transmitted wave of 12-kV peak. These two wave components can be depicted as shown in Fig. 8.

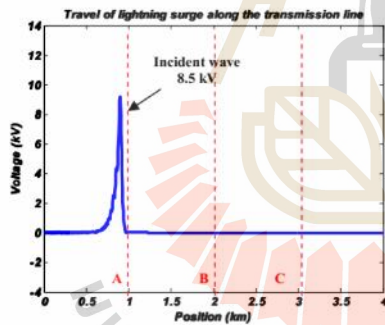


Fig. 7 Incident wave before arriving line junction A

The simulation had been carried out further by extending the propagation of the transmitted wave toward the line junction B. In this case, before the incident wave of 12-kV peak hitting the junction, the voltage in line section 3 is zero at all positions. After the incident wave hitting the junction, the incident wave of 12-kV peak was decomposed into the reflected wave of 4-kV peak (out-of-phase) and the transmitted wave of 8-kV peak penetrating deeply into the line section 4 as depicted in Fig. 9.

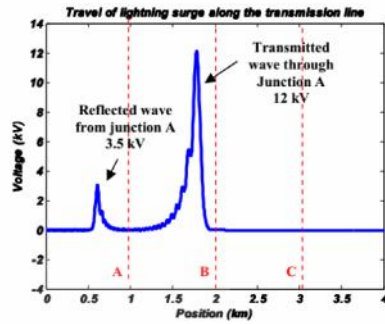


Fig. 8 Transmitted and reflected waves at junction A

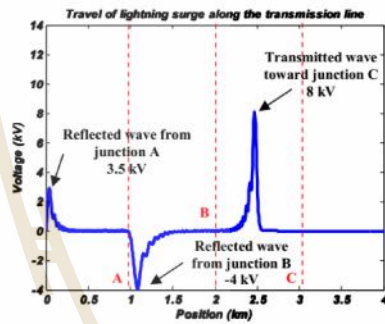


Fig. 9 Transmitted and reflected waves at junction B

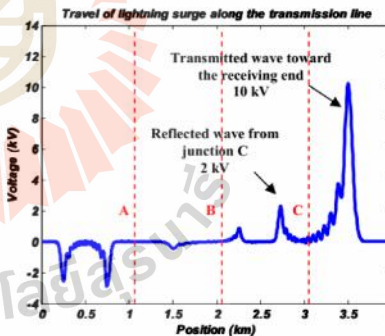


Fig. 10 Transmitted and reflected waves at junction C

The wave reflected from and transmitted through the line junction C can be exhibited as shown in Fig. 10. In this case, before the incident wave of 8-kV peak hitting the junction, the

International Science Index, Electrical and Computer Engineering Vol:6, No:11, 2012 waset.org/Publication/53396

voltage in line section 4 is zero at all positions. After the incident wave hitting the junction, the incident wave of 8-kV peak was split into the reflected wave of 2-kV peak and the transmitted wave of 10-kV peak penetrating toward the receiving end.

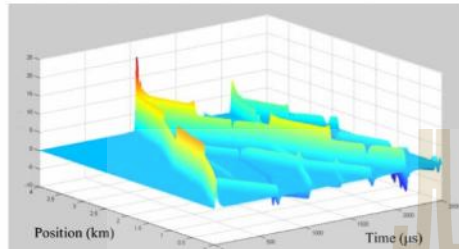


Fig. 11 Lightning surge propagation along the transmission lines of the test example after 2 ms

In addition, the full simulation of the whole system which consists of four line sections having a total of 4-km line length and the total time span of 2500 μs can be plotted in 3D surface as shown in Fig. 11.

VI. CONCLUSION

In this paper, the finite-difference time-domain (FDTD) method to analyze lightning surge propagation in electric power transmission lines has been presented. Numerical solutions for the Telegraphist's equations, in case of the wave equation were investigated its effectiveness in comparison with those obtained by using Bewley lattice diagram. A source of lightning surge wave on power transmission lines was modeled by using Heidler's surge model. The proposed method was tested against medium-voltage power transmission lines consisting of four line sections. As a result, the calculation showed that the effectiveness and the accuracy of the solutions obtained by the FDTD method are confirmed.

ACKNOWLEDGMENT

This work supported by Rajamangala University of Technology Lamna. The Scholarship for Ph.D. Program to Kokiat Aodsup is acknowledged.

REFERENCES

- [1] J. A. Martinez-Velasco, *Power System Transients Parameter Determination*. CRC Press, 2010.
- [2] L. V. Bewley, *Travelling Waves on Transmission Systems*. Doyer Publication, 1951.
- [3] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*. Marcel Dekker, 1999.
- [4] Z. Benesova, and V. Kotlan, "Propagation of surge waves on non-homogeneous transmission lines induced by lightning stroke," *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 5, no. 1 – 2, pp. 198 – 203, 2006.
- [5] M. N. O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*. CRC Press, 2001.

- [6] L. V. Fausett, *Applied Numerical Analysis using MATLAB*. Prentice-Hall, 1999.
- [7] S. C. Chapra, and R. P. Canale, *Numerical Method for Engineers*. McGraw-Hill, 2002.
- [8] C. A. Hall, and T. A. Porsching, *Numerical Analysis of Partial Differential Equations*. Prentice-Hall, 1990.
- [9] J. J. Granger, and W. D. Stephenson, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1994.
- [10] F. Heidler, "Travelling current source model for LEMP calculation," in *Proc. 6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, March 5-7, Zurich, Switzerland, 1985, pp. 157-162.

The FDTD method for lightning surge propagation in 115-kV power transmission systems of PEA's Thailand

* Kokiatt Aodsup¹⁾ and Thanatchai Kulworawanichpong²⁾

^{1), 2)} Power System Research Unit, School of Electrical Engineering Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND

¹⁾ kokiatt_a@hotmail.co.th and ²⁾ Thanatchai@gmail.com

ABSTRACT

This paper describes a simulation of lightning surge propagation in power transmission lines of provincial electricity authority (PEA) Thailand by using finite-difference time-domain (FDTD) method. Numerical computation of solving the Telegraphist's equations is determined and investigated. A source of lightning surge wave on the line is modeled by using Heidler's surge model. The proposed method was tested against 115-kV power transmission systems in comparison with the solution obtained by using Bewley lattice diagram. As a result, the calculation showed that the FDTD method is one of accurate methods to analyze transient lightning surge wave in power transmission lines.

1. INTRODUCTION

Lightning and switching surge are any disturbance on a transmission of steady-state condition. These phenomena can produce high voltage level in a very short time that can damage insulation or can cause server flashover described in (Bewley 1951), (Hileman 1990).

Lightning or surge protection of electrical and electronic systems from disturbances has been increasingly important. Because the induced lightning surges can cause significant damages to electric power components, telecommunication equipment, computer networks, etc. These result in severe damages of equipment, interruption of services, increased operation and maintenance cost. For insulation design of the power transmission system, it is vital to exhibit the induced voltage behaviors propagated along the transmission lines. Consequently, both theoretical and experimental studies of lightning induced electromagnetic fields have been conducted continuously (Kokiatt 2012).

In theory, characteristics of lightning surge propagation in transmission lines can be described mathematically in forms of partial differential equations (PDEs) as the well-known Telegraphist's equations (Benesova 2006). These equations are linear second-order partial differential equations with constant coefficients. These equations fall into three basic categories: parabolic, elliptic and hyperbolic. These equations are

¹⁾ Graduate Student

²⁾ Professor

hyperbolic. In case of lossless lines where series resistance of lines and shunt conductance representing insulation losses are neglected, the system equations can be simplified into the wave equations which the lightning surge can propagate along the line without any line attenuation. Although the wave equations as hyperbolic PDEs have an exact equations in some circumstances, further investigation such as appearance of lightning surge arresters somewhere in transmission lines can raise complexity and nonlinearity in the governing system equations. Solutions of these equations were obtained several decades ago by Heaviside in England and Poincare in France (Bewley 1951). The FDTD method is basically a numerical tool and can be adapted in associating with surge arrester models in the future work.

2. POWER TRANSMISSION LINE

2.1 Mathematical model of a power transmission line

The study of transmission line surges regardless of their origin is very complex. Although the long-line model is recommended for lines more than approximately 150 mi long (Granger 1994), the lightning surge wave propagation is a very short-time impulse wave-shape therefore the long-line model is a good representation of power lines for a high-frequency impulse of lightning surges.

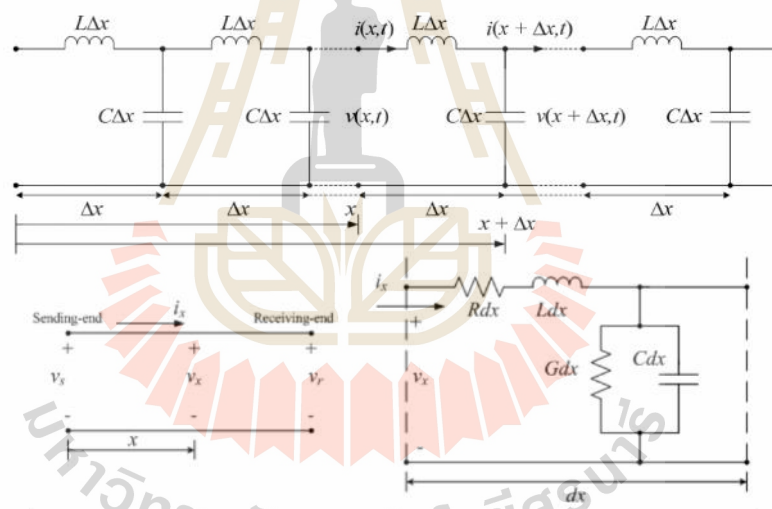


Fig. 1 Distributed line model for power transmission line wave propagation

Fig. 1 shows the frame and the equivalent circuit of a very small section of a single-phase power transmission line. Assuming that the line conductors are parallel to the ground and uniformly distributed, the time-domain characteristics in form of partial differential equations of the single-conductor line can be expressed as follows.

$$\frac{d}{dx}v(x,t) = -Ri(x,t) - L \frac{d}{dt}v(x,t) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx}i(x,t) = -Gv(x,t) - C \frac{d}{dt}i(x,t) \quad (2)$$

Where $i(x,t)$ is a current surge wave function
 $v(x,t)$ is a voltage surge wave function
 R, L, C and G are per-unit length line parameters

Consider the distance x along the transmission line from the sending end (rather than the receiving end) to the very small different element of length dx shown in the above figure. The voltage $v(x,t)$ and current $i(x,t)$ are both a function of space and time so that they are in form of partial derivatives. Since it assumes that the transmission line is a lossless line, R and G will be equal to zero to give the following expressions.

$$\frac{d}{dx}v(x,t) = -L \frac{d}{dt}i(x,t) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dx}i(x,t) = -C \frac{d}{dt}v(x,t) \quad (4)$$

Now either current $i(x,t)$ can be eliminated by taking the partial derivatives of both terms in Eq.(3) with respect to x and in Eq. (4) with respect to t , or voltage $v(x,t)$ can be eliminated by taking the partial derivatives of both terms in Eq. (3) with respect to t and in Eq. (4) with respect to x . This will produce a linear second-order partial differential equation in form of hyperbolic PDEs as shown in Eq. (5) for the voltage wave equation or called "travelling wave equation".

$$\frac{1}{LC} \frac{d^2}{dx^2}v(x,t) = \frac{d^2}{dt^2}v(x,t) \quad (5)$$

2.2 Heidler's Surge Function

The model based on the travelling-wave source was introduced by Heidler (Bewley 1951). in which the surge wave propagates at infinitely large speed while the return-stroke speed (front speed) is still finite. The equation for surge function introduced by Heidler satisfies the two basic requirements needed for the lightning surge simulation, i.e. the current does not have discontinuity at $t = 0$ s and the current derivative also does not have a discontinuity at $t = 0$ s provided that $k > 1$. At present time, Heidler representation of the lightning surge wave is one of the most widely-used surge model for the lightning surge propagation in transmission line. The Heidler's surge function can be described by the following equation.

$$f(t) = \left(\frac{F_0}{\eta} \right) \left(1 - e^{-t/\tau_1} \right)^k e^{-t/\tau_2} \quad (6)$$

3. FINITE-DIFFERENCE TIME-DOMAIN (FDTD) METHOD

The standard example of a hyperbolic PDE is the one-dimensional wave equation as described follows.

$$c^2 \frac{d^2}{dx^2} v(x,t) = \frac{d^2}{dt^2} v(x,t) \quad (10)$$

Initial conditions are given for $v(x,0)$ and also its derivative. The boundary conditions are given at $x = 0$ and $x = L$ where L is the maximum limit of x . According to the explicit method of solving the wave equation, replacing the space derivative in the wave equation by finite difference formula at the λ^{th} time step, Eq. (11) is obtained. In the same manner, replacing the time derivative by the finite difference formula at the λ^{th} space step, Eq. (12) is formed. By substituting Eq. (11) and Eq. (12) into Eq. (10), it gives the updated voltage wave solution as summarized in Eq. (13).

$$\frac{d^2}{dx^2} v(x,t) = \frac{v(\lambda + 1, \tau) - 2v(\lambda, \tau) + v(\lambda - 1, \tau)}{\Delta x^2} \quad (11)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} v(x,t) = \frac{v(\lambda, \tau + 1) - 2v(\lambda, \tau) + v(\lambda, \tau - 1)}{\Delta t^2} \quad (12)$$

$$v(\lambda, \tau + 1) = \phi^2 v(\lambda - 1, \tau) + 2(1 - \phi^2) v(\lambda, \tau) + \phi^2 v(\lambda, \tau) - v(\lambda, \tau - 1) \quad (13)$$

Where $\phi = c \frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{\Delta t}{\Delta x \sqrt{LC}}$ is the aspect ratio

4. REFLECTION OF TRAVELING WAVES

When a travelling wave on a transmission line reaches a transition point at which there is an abrupt change of line parameters a part of the wave is reflected back on the incoming line and the rest may pass through other line section. The travelling wave before reaching the transition point is called the incident wave. The incident wave may be decomposed into two component waves called the reflected wave and the transmitted wave. This relation is a voltage-wave solution of Eq. (5) and it can be expressed as in Eq. (7). The transmitted wave, $v''(x,t)$, is a wave portion travelling toward the next line section while the reflected wave, $v'(x,t)$, is a wave portion travelling backward to the source. These waves can be illustrated by the equivalent circuit shown in Fig. 2.

$$v(x,t) = v''(x,t) + v'(x,t) \quad (7)$$

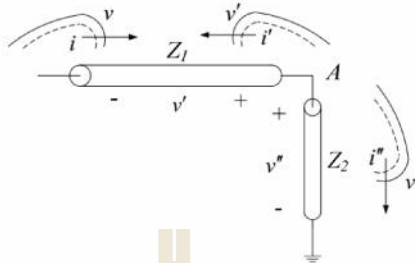


Fig. 2 Waves reflected and transmitted at the junction

If the line section # 1 has the surge impedance of Z_1 and the line section # 2 has the surge impedance of Z_2 , the transmitted and the reflected portions of the travelling wave can be represented in terms of the refraction coefficient (β) and the reflection coefficient (α), respectively, as given in Eq. (8) and Eq. (9).

$$\beta = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (9)$$

Where

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \text{ and } Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$$

$u_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ is the wave speed of line 1

$u_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ is the wave speed of line 2

L_1 is per-unit inductance of line section 1

L_2 is per-unit inductance of line section 2

C_1 is per-unit capacitance of line section 1

C_2 is per-unit capacitance of line section 2

In practical power network, many line sections are typical. This leads to multiple reflections among line junctions to exhibit complicated resulting waves. However, in a lateral line case, both the reflection and the refraction occur from the left to the right or from the right to the left, coefficients of reflection and refraction can be pre-calculated and then used repeatedly when any incident wave has arrived. The component waves calculated at any time and any position by using this pre-calculation of all coefficients at every junction can be drawn as the so-called "Bewley lattice diagram" (Bewley 1951) as illustrated in Fig. 3.

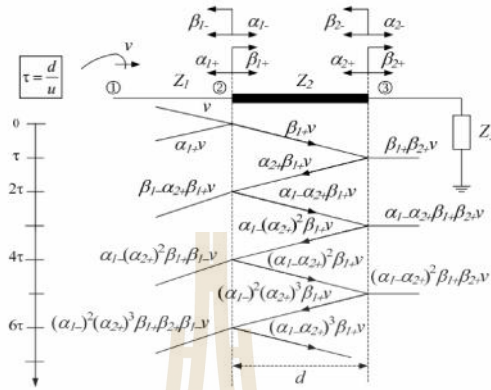


Fig. 3 Example of Bewley lattice diagram

4. SIMULATION RESULT AND DISCUSSION

The study of successive reflection of travelling waves caused by either direct or indirect lightning stroke can be investigated through a test in power transmission lines of provincial electricity authority (PEA) Thailand as shown in Fig. 4. This example consists of two transmission line sections with the open and short circuit line termination. The line parameters of each section are given as follows.

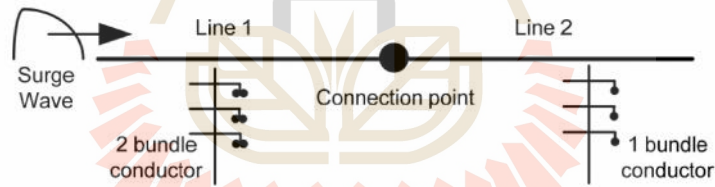


Fig. 4 The transmission line systems

The parameter of transmission line systems is :

Line 1 Transmission line from substations of Uthaitani to a connection point.

Line length: 2 km, $L_1 = 0.0012$ H/m, $C_1 = 0.0566$ F/m

Line 2 Transmissions line from a connection point to substations of Chainat.

Line length: 2 km, $L_2 = 0.00085$ μ H/m, $C_2 = 0.0412$ F/m

The Heidler's surge model of the lightning induced voltage can be characterized by the waveform in Fig. 5. The Heidler's surge wave has the 10-kV peak and 12/30- μ s of the rise and decay time constants.

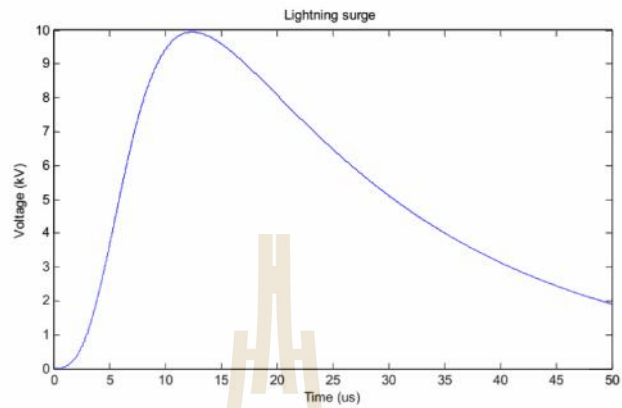


Fig. 5 Heilder's surge wave for test the transmission line systems

With the help from MATLAB programming, lightning surge waves propagation on transmission lines can be simulated numerically. In this paper, this simulation used the time step of $0.1 \mu\text{s}$ and the step length of 5 m.

Assume that the lightning surge was induced at the sending end of the transmission line. The incident wave can travel along the line section 1 with a constant speed and without attenuation approach line junction A as shown in Fig. 6. After the incident wave hitting the junction, the incident wave of 10-kV peak was separated into the reflected wave of -1.527-kV peak and the transmitted wave of 8.442-kV peak. These two wave components can be depicted as shown in Fig. 7

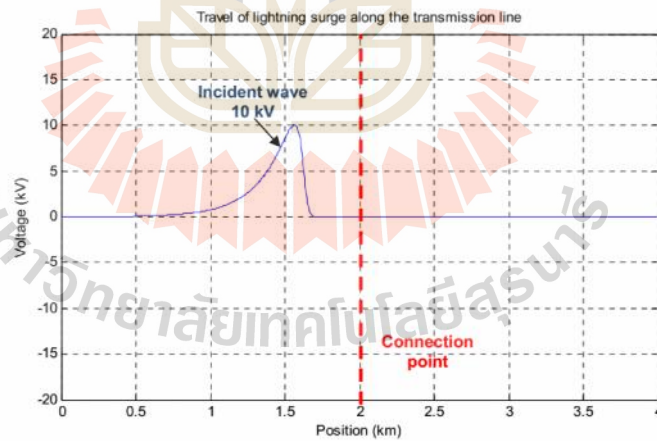


Fig. 6 Incident wave before arriving connection point.

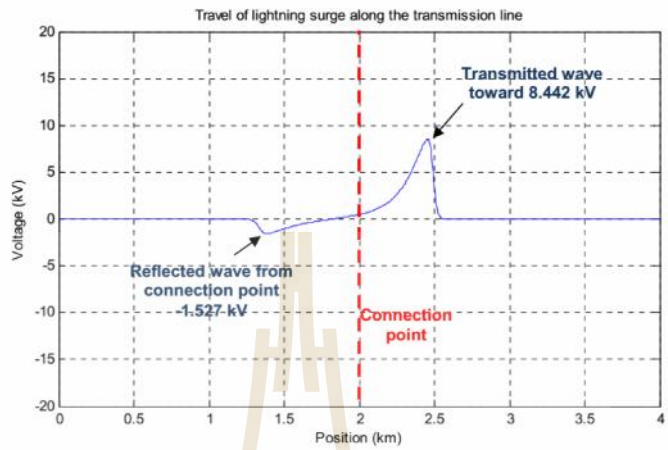


Fig. 7 Transmitted and reflected waves at connection point

When transmitted wave on a transmission line reaches a line terminal at which there is open and short circuit. Transmitted wave components can be depicted as shown in Fig. 8 and Fig.9 for a line terminal is open and short circuit respectively

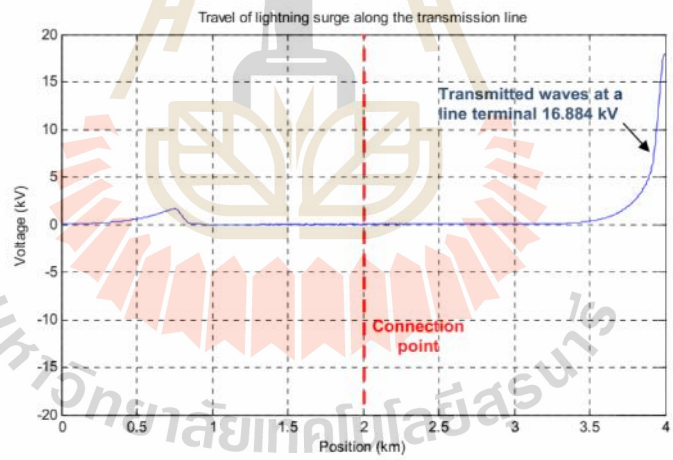


Fig. 8 Transmitted waves at a line terminal is open circuit

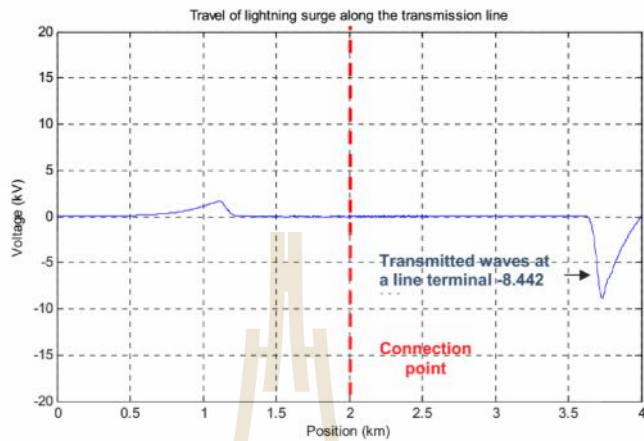


Fig. 9 Transmitted waves at a line terminal is short circuit

In addition, the full simulation of the whole system which consists of two line sections having a total of 4-km line length and the total time span of 2500 μs can be plotted in 3D surface for open and short circuit at terminal line as shown in Fig. 10 and Fig. 11 respectively.

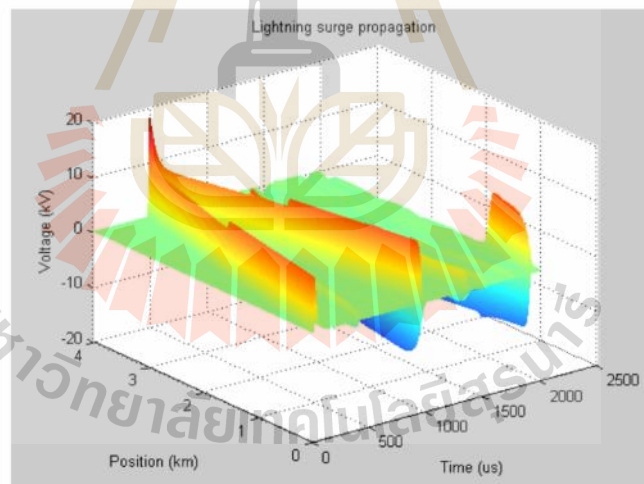


Fig. 10 Lightning surge propagation along the transmission lines of the test systems at open circuit line terminal after 2.5 ms

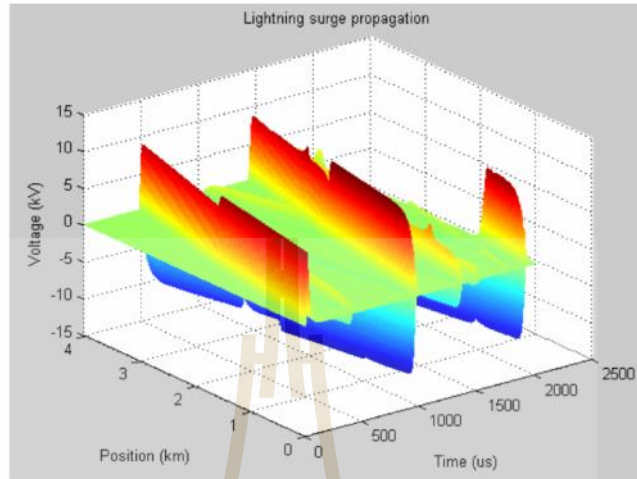


Fig. 11 Lightning surge propagation along the transmission lines of the test systems at short circuit line terminal after 2.5 ms

The FDTD method is compared with the solution obtained by using Bewley lattice diagram as shown in Table 1.

Table 1 The FDTD method comparison with the solution by using Bewley lattice diagram.

	Reflection	Refraction
Bewley lattice diagram	-1.142 kV	8.858 kV
FDTD method	-1.527 kV	8.442 kV

6. CONCLUSIONS

In this paper, the finite-difference time-domain (FDTD) method to analyze lightning surge propagation in power transmission lines of provincial electricity authority (PEA) Thailand. Numerical computation of solving the Telegraphist's equations is determined and investigated. A source of lightning surge wave on the line is modeled by using Heidler's surge model. The proposed method was tested against 115-kV power transmission systems in comparison with the solution obtained by using Bewley lattice diagram. As a result, the calculation showed that the effectiveness and the accuracy of the solutions obtained by the FDTD method are confirmed.

REFERENCES

- Bewley Cadappa, L. V. (1951), "Travelling Waves on Transmission Systems", Dover Publication.
- Hileman, A. R. (1999), "Insulation Coordination for Power Systems", Marcel Dekker.
- Granger, J. J. and Stephenson, W. D. (1994), "Power System Analysis", McGraw-Hill.
- Benesova, Z. and Kotlan, V. (2006), "Propagation of surge waves on non-homogeneous transmission lines induced by lightning stroke", Advances in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 5, no. 1 – 2, 198 – 203.
- Fausett, L. V. (1999), "Applied Numerical Analysis using MATLAB". Prentice-Hall.
- Aodsup, K. and Kulworawanichpong, T. (2012), "Simulation of Lightning Surge Propagation in Transmission Lines Using the FDTD Method", World Academy of Science, Engineering and Technology, Issue 71, 427 – 432.



FDTD Method for Lightning Surge Propagation of Power Transmission Lines

Kokiatt Aodsup* & Thanatchai Kulworawanichpong**

*School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND.
E-Mail: kokiatt_a[at]hotmail[dot]co[dot]th

**School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND.
E-Mail: thanatchai[at]gmail[dot]com

Abstract—The Telegraphist equation is a set of mathematical formulas to characterize surge propagation in power transmission lines. Two line portions of 1-km length line are used for test. The proposed FDTD method was tested with loss and lossless power transmission systems in comparison with the solution obtained by using Bewley lattice diagram. The surge voltage is decayed in practical transmission lines due to energy loss dissipation in the power lines. The results show that the FDTD method is accurate to analyze surge propagation in power transmission lines in both loss and lossless power transmission lines.

Keywords—Bewley Lattice Diagram; Finite Difference Time Domain Method; Lightning Surge; Surge Propagation; Telegraphist's Equations; Travelling Wave.

Abbreviations—Finite Difference Time Domain (FDTD); Partial Differential Equations (PDEs).

I. INTRODUCTION

SURGE divided into two types are lightning surge and switching surge. Lightning and Switching surges can cause significant damages to electric power components, telecommunication equipment, computer networks, etc [Hileman, 1999]. These result in severe damages of equipment, interruption of services, increased operation and maintenance cost. For insulation design of the power transmission system, it is vital to exhibit the induced voltage behaviors propagated along the transmission lines [Martinez-Velasco, 2010]. The power transmission lines divided into two models are loss power transmission line and lossless power transmission line [Granger & Stephenson, 1994]. In case of lossless lines where series resistance of lines and shunt conductance representing insulation losses are neglected, the system equations can be simplified into the wave equations which the lightning surge can propagate along the line without any line attenuation [Nevels & Miller, 2001].

The Telegraphist equation is mathematical of surge propagation in transmission lines [Kokiatt Aodsup & Thanatchai Kulworawanichpong, 2012]. These equations are linear second-order partial differential equations with constant coefficients. The FDTD method is basically a numerical tool for Partial Differential Equations (PDEs) [Fausett, 1999; Burden Richard & Douglas Faires, 2001].

Solutions of these equations were obtained several decades ago by Heaviside in England and Poincare in France [Bewley, 1931].

This paper is well organized and separated into five sections. Section 2 gives a brief review of electric power transmission line and its mathematical model in such a way that surge propagation is intended to be studied. Section 3 describes the FDTD method and its application in lightning surge propagation in transmission lines. For comparison, section 4 devotes for a classical method of Bewley lattice diagram of wave reflection along transmission lines. Section 5 purpose results and discussion. The final section is the conclusion remark.

II. MATHEMATICAL MODEL OF TRANSMISSION LINES

The surge wave propagation is a very short-time impulse wave-shape therefore the long-line model is a good representation of power lines for a high-frequency impulse of surges [McEachron et al., 1930]. The frame and the equivalent circuit of a very small section of a single-phase power transmission line, show in figure 1.

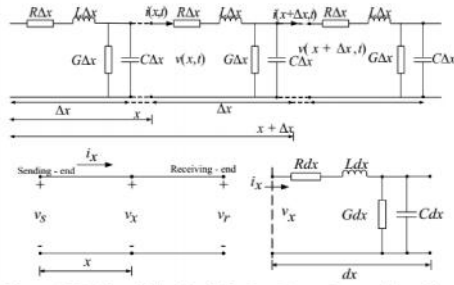


Figure 1: Distributed Line Model for Loss Power Transmission Line Wave Propagation

From Telegraph equations

$$-\frac{\partial v(t,x)}{\partial x} = Ri(t,x) + L \frac{\partial i(t,x)}{\partial t} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial i(t,x)}{\partial x} = Gv(t,x) + C \frac{\partial v(t,x)}{\partial t} \quad (2)$$

Where

$i(x,t)$ is a current surge wave function
 $v(x,t)$ is a voltage surge wave function
 R, L, C and G are per-unit length line parameters

Current $i(x,t)$ can be eliminated by taking the partial derivatives terms in Eq.(1) with respect to

$$-\frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial x^2} = R \frac{\partial i(t,x)}{\partial x} + L \frac{\partial^2 i(t,x)}{\partial x \partial t} \quad (3)$$

Voltage $v(x,t)$ can be eliminated by taking the partial derivatives of terms in Eq. (2) with respect to t

$$-\frac{\partial^2 i(t,x)}{\partial x \partial t} = G \frac{\partial v(t,x)}{\partial t} + C \frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial t^2} \quad (4)$$

Substitute from Eq. (2) and Eq. (4) to Eq. (3)

$$-\frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial x^2} = -R(Gv(t,x) + C \frac{\partial v(t,x)}{\partial t}) - L(G \frac{\partial v(t,x)}{\partial t} + C \frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial t^2}) \quad (5)$$

So,

$$\frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial x^2} = RGv(t,x) + (RC + LG) \frac{\partial v(t,x)}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial t^2} \quad (6)$$

The transmission line is a lossless line, R and G will be equal to zero. The frame and the equivalent circuit of a very small section of a single-phase power transmission line, show in figure 2.

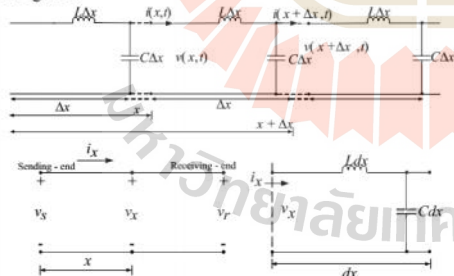


Figure 2: Distributed Line Model for Lossless Power Transmission Line Wave Propagation

From Eq. (6) R and G will be equal to zero.

$$\frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial t^2} \quad (7)$$

III. FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN (FDTD) METHOD

For numerical solution of wave equation (6) and (7) we used the method of finite differences. The boundary conditions are given at $x = 0$ and $x = L$ where L is the maximum limit of x .

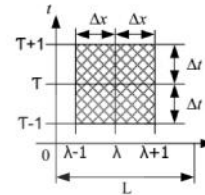


Figure 3: The Scheme of Central Difference Approximation

According to the explicit method of solving the wave equation, replacing the space derivative in the wave equation by finite difference formula at the T^{th} time step 2^{nd} order, Eq.(8) is obtained [Benesova & Kotlan, 2006]. In the same manner, replacing the time derivative by the finite difference formula at the λ^{th} space step, (9) is formed and the T^{th} time step 1^{st} order, Eq.(10) is obtained.

$$\frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial x^2} = \frac{v(\tau+1,\lambda) - 2v(\tau,\lambda) + v(\tau-1,\lambda)}{\Delta x^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 v(t,x)}{\partial t^2} = \frac{v(\tau,\lambda+1) - 2v(\tau,\lambda) + v(\tau,\lambda-1)}{\Delta t^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial v(t,x)}{\partial t} = \frac{v(\tau+1,\lambda) - v(\tau-1,\lambda)}{2\Delta t} \quad (10)$$

By substituting (8), (9) and (10) into (6), it gives the updated voltage wave solution as summarized in (11).

$$v(\tau+1,\lambda) = \frac{1}{(\Delta v(RC - LG) - 2LC)} \left(\frac{2\Delta t^2}{\Delta x^2} v(\tau,\lambda+1) + \frac{2\Delta t^2}{\Delta x^2} v(\tau,\lambda-1) - (2\Delta t^2 RG + 4LC + \frac{4\Delta t^2}{\Delta x^2}) v(\tau,\lambda) + (\Delta v(RC - LG) + 2LC) v(\tau-1,\lambda) \right) \quad (11)$$

By substituting (8) and (9) into (7), it gives the updated voltage wave solution as summarized in (12).

$$v(\tau+1,\lambda) = \frac{\Delta t^2}{LC\Delta x^2} v(\tau,\lambda+1) + \frac{\Delta t^2}{LC\Delta x^2} v(\tau,\lambda-1) - 2 \left(\frac{\Delta t^2}{LC\Delta x^2} - 1 \right) v(\tau,\lambda) + v(\tau-1,\lambda) \quad (12)$$

IV. BEWLEY LATTICE DIAGRAM

When a travelling wave on a transmission line reaches a transition point at which there is an abrupt change of line parameters a part of the wave is reflected back on the incoming line and the rest may pass through other line section [Hedman, 1971; Robinson, 2012]. The travelling wave before reaching the transition point is called the incident wave. The incident wave may be decomposed into two component waves called the reflected wave and the transmitted wave

[Menemenlis & Zhu Tong, 1982; Hasman, 1997]. This relation is a voltage-wave solution of Eq. (7) and it can be expressed as in Eq. (13). The transmitted wave, $v''(x,t)$, is a wave portion travelling toward the next line section while the reflected wave, $v'(x,t)$, is a wave portion travelling backward to the source. These waves can be illustrated by the equivalent circuit shown in figure 4.

$$v(x,t) = v'(x,t) + v''(x,t) \quad (13)$$

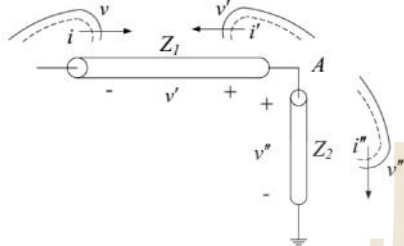


Figure 4: Waves Reflected and Transmitted at the Junction

If the line section # 1 has the surge impedance of Z_1 and the line section # 2 has the surge impedance of Z_2 , the transmitted and the reflected portions of the travelling wave can be represented in terms of the refraction coefficient (β) and the reflection coefficient (α), respectively, as given in Eq. (14) and Eq. (15).

$$\beta = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (14)$$

$$\alpha = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (15)$$

Where

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \text{ and } Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$$

$u_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ is the wave speed of line 1

$u_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$ is the wave speed of line 2

L_1 is per-unit inductance of line section 1

L_2 is per-unit inductance of line section 2

C_1 is per-unit capacitance of line section 1

C_2 is per-unit capacitance of line section 2

In practical power network, many line sections are typical. This leads to multiple reflections among line junctions to exhibit complicated resulting waves. However, in a lateral line case, both the reflection and the refraction occur from the left to the right or from the right to the left, coefficients of reflection and refraction can be pre-calculated and then used repeatedly when any incident wave has arrived. The component waves calculated at any time and any position by using this pre-calculation of all coefficients at every junction can be drawn as the so-called "Bewley lattice diagram" [Bewley, 1951] as illustrated in figure 5.

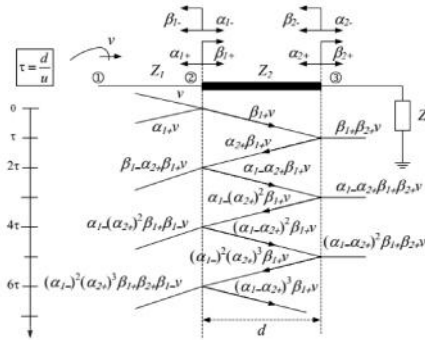


Figure 5: Example of Bewley Lattice Diagram

V. SIMULATION RESULT AND DISCUSSION

This example consists of two transmission line sections with loss and lossless transmission line. The line parameters of each section are given as follows.

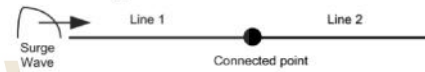


Figure 6: The Transmission Line Systems

The parameter of transmission line systems is :

Line 1: Line length: 1 km, $L_1 = 120 \mu\text{H/m}$, $C_1 = 10 \text{pF/m}$
 $R_1 = 0.1 \Omega/\text{m}$, $G_1 = 0 \Omega/\text{m}$ (Lossless line R_1 and G_1 are zero)

Line 2: Line length: 1 km, $L_2 = 480 \mu\text{H/m}$, $C_2 = 10 \text{pF/m}$
 $R_2 = 0.1 \Omega/\text{m}$, $G_2 = 0 \Omega/\text{m}$ (Lossless line R_2 and G_2 are zero)

The component waves calculated at any time and any position by using Bewley lattice diagram as illustrated in figure 7.

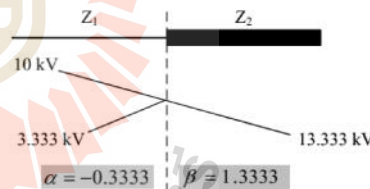


Figure 8: The Reflection and the Refraction by using Bewley Lattice Diagram

The surge wave source has the 10-kV peak and 12/30- μs of the rise and decay time constants. The incident wave can travel along the line section 1 at origin point surge voltage has 10-kV peak in loss and lossless transmission lines systems as shown in figure 8.

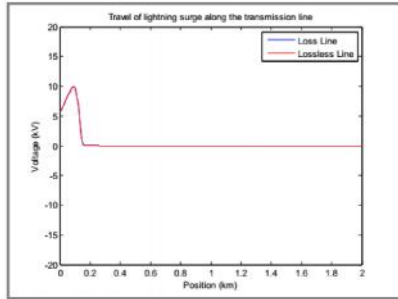


Figure 8: The Incident Wave Travel along the Line Section 1 at Origin Point

The incident wave can travel along the line section 1 before arriving connection point surge voltage has 10-kV peak in lossless transmission lines systems and surge voltage has 9-kV peak in loss transmission lines systems as shown in figure 9.

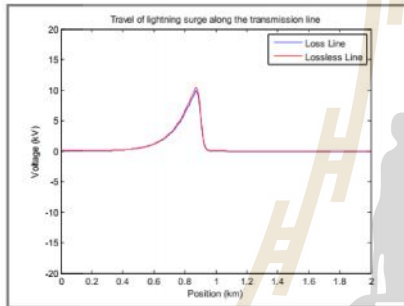


Figure 9: Incident Wave before Arriving Connection Point

After the incident wave hitting the junction, the incident wave was separated into the reflected wave and the transmitted wave. These two wave components can be depicted as shown in figure 10.

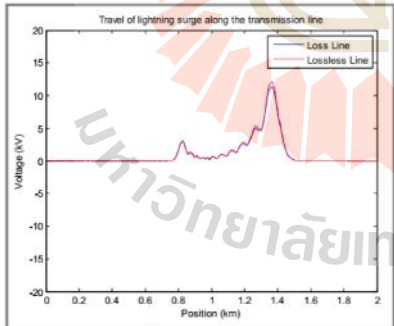


Figure 10: Transmitted and Reflected Waves at Connection Point

The full simulation of the lossless transmission lines of two line sections having a total of 2-km line length and the total time span of 1500 ms can be plotted in 3D surface as shown in figure 11.

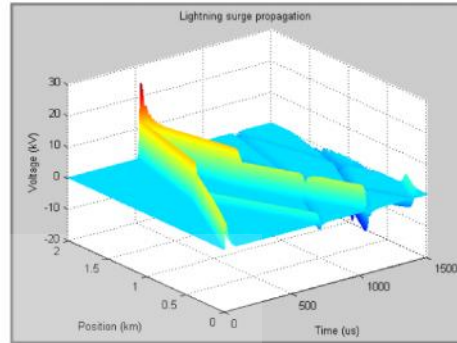


Figure 11: Lightning Surge Propagation along the Lossless Transmission Lines of the Test Systems after 1.5 ms

The full simulation of the loss transmission lines of two line sections having a total of 2-km line length and the total time span of 1500 ms can be plotted in 3D surface as shown in figure 12.

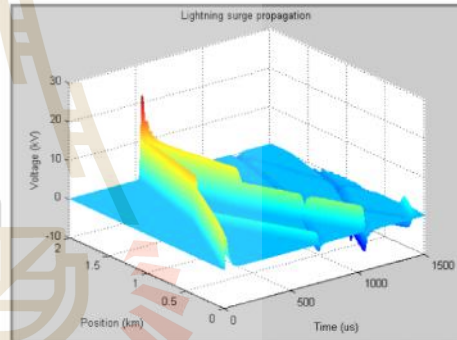


Figure 12: Lightning Surge Propagation along the Loss Transmission Lines of the Test Systems after 1.5 ms

The FDTD method is compared with the solution obtained by using Bewley lattice diagram as shown in table 1.

Table 1: The FDTD Method Comparison with the Solution by using Bewley Lattice Diagram

	Reflection	Refraction
Bewley Lattice Diagram	3.333	13.333
FDTD Method (Lossless Transmission Lines)	2.222	12.222
FDTD Method (Practical Transmission Lines)	1.444	11.444

VI. CONCLUSIONS

This paper illustrates the finite difference time domain method to analyze lightning surge propagation in power transmission lines in both practical (loss) and lossless lines. The telegraphist equations are used to characterize the travelling wave. From the simulation results, the surge voltage is decayed in practical transmission lines while that of lossless transmission lines is not attenuated and the proposed method was tested power transmission systems in comparison with the solution obtained by using Bewley lattice diagram. As a result, the calculation showed that the effectiveness and the accuracy of the solutions obtained by the FDTD method are confirmed.

REFERENCES

- [1] K.B. McEachron, J.G. Hemstreet & H.P. Seelye (1930), "Study of the Effect of Short Lengths of Cable on Traveling Waves", *American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 49, No. 4, Pp. 1432-1441.
- [2] L.V. Bewley (1931), "Traveling Waves on Transmission Systems", *American Institute of Electrical Engineers*, Vol. 50, No. 2, Pp. 532-550.
- [3] L.V. Bewley (1951), "Travelling Waves on Transmission Systems", *Dover Publication*.
- [4] D.E Hedman (1971), "Theoretical Evaluation of Multiphase Propagation", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 90, No. 6, Pp. 2460-2471.
- [5] C. Menemenlis & C. Zhu Tong (1982), "Wave Propagation on Nonuniform Lines", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 101, No. 4, Pp. 833-839.
- [6] J.J. Granger & W.D. Stephenson (1994), "Power System Analysis", *McGraw-Hill*.
- [7] T. Hasman (1997), "Reflection and Transmission of Traveling Waves on Power Transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 4, Pp. 1684-1689.
- [8] L.V. Fausett (1999), "Applied Numerical Analysis using MATLAB", *Prentice-Hall*.
- [9] A.R. Hileman (1999), "Insulation Coordination for Power Systems", *Marcel Dekker*.
- [10] R. Nevels & J. Miller (2001), "A Simple Equation for Analysis of Nonuniform Transmission Lines", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 49, No. 4, Pp. 724-721.
- [11] L. Burden Richard & J. Douglas Faires (2001), "Numerical Analysis", *Brooks/Cole*, Edition 7, USA.
- [12] Z. Benesova & V. Kotlan (2006), "Propagation of Surge Waves on Non-Homogeneous Transmission Lines Induced by Lightning Stroke", *Journal of Advances in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 5, Pp. 198-203.
- [13] J.A. Martinez-Velasco (2010), "Power System Transients Parameter Determination", *CRC Press*.
- [14] Kokiat Aodsup & Thanatchai Kulworawanichpong (2012), "Simulation of Lightning Surge Propagation in Transmission Lines using the FDTD Method", *Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 71, Pp. 427-432.
- [15] B.C Robinson (2012), "The Propagation of Surge Voltages through Turbo-Alternators with Concentric-Conductor-Type Windings", *Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering*, Vol. 103, Pp. 355-369.



Kokiat Aodsup. He received B.Eng in Electrical Engineering from Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand (2005) and M.Eng. in Electrical Engineering from Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand (2009). He worked as an Engineer, Ys Pund Company Limited, Bangkok, Chachoengsao, Thailand (2005 - 2006). Currently he received a scholarship from Rajamangala University of Technology Lanna to pursue his Ph.D. in School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima. His research interests include electrical power systems, railway electrification, traction system and electric vehicle and optimization.



Thanatchai Kulworawanichpong. He is an associate professor of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. He received B.Eng. with first-class honour in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand (1997), M.Eng. in Electrical Engineering from Chulalongkorn University, Thailand (1999), and Ph.D. in Electronic and Electrical Engineering from the University of Birmingham, United Kingdom (2003). His fields of research interest include a broad range of electrical power systems, railway electrification, traction system and electric vehicle, power electronic, electrical drives and control, optimization and artificial intelligent techniques. He has joined the school since June 1998 and is currently a leader in Electric Transportation Research and Electrical Power System, Suranaree University of Technology, to supervise and cosupervise over 15 postgraduate students.

Analysis of Surge Propagation with Lightning Arrester using FDTD for 25 kV-AC Transmission Line

Kokiat Aodsup, Thanatchai Kulworawanichpong

Abstract— This paper analyzes lightning surge propagation and reflection as the surge arrives at a lightning arrester. Telegraphist equations have been used to characterize the voltage and current of a travelling wave in a lossless power transmission line and finite difference time domain (FDTD) method has been used to analyze lightning surge propagation. The characteristics of the reflected wave and transmitted wave have been compared in two cases: (i) using silicon carbide (SiC) arrester, and (ii) using metal oxide varistor (MOV) arrester. The results have shown that, reflected and transmitted waves from the MOV arrester are almost equal in magnitude to those from the SiC arrester, however, the former is more preferable because it has a smoother waveform.

Index Terms—Finite Difference Time Domain, Surge Propagation, Lightning Arrester.

I. INTRODUCTION

Overtoltage in an electrical power system results from switching surge and lightning surge caused by the lightning striking on the overhead shield wire with a subsequent flashover to the phase conductor or the lightning directly striking the phase conductor [1]-[4],[16]. The travelling wave or surge propagates and arrives at an electric power component giving rise to shielding failures and faults in the systems [4], [5]. The lightning surge voltage magnitude and waveform dictates the design of the protection system and insulation of the component. A surge arrester protects a power system from the surge propagation by diverting the charge and energy to ground [10]-[12], [18]. A surge arrester model has a non-linear resistive characteristic [10]-[12]. Due to impedance change at a transition point, part of the surge is reflected back and the rest passes through. The pass-through surge can cause significant damages to electric power components. Normally, a transmission line is a distributed parameter network composed of inductance and resistance in series and a branch of shunt capacitance and resistance [6], [17]. The telegraphist equation mathematically describes the propagation of the surge voltage and current in transmission lines [7], [8], [15]. These equations are partial differential equations (PDEs). The finite difference time domain (FDTD) method basically approximates PDEs [14],[15].

This paper analyzes characteristics of surge propagation

Kokiat Aodsup, Department of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, Phone No.+66-44-224-404

Thanatchai Kulworawanichpong, Department of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand, Phone No.+66-44-224-404

and reflection in a transmission line which uses either SiC arrester or MOV arrester. The FDTD method is used to estimate the reflected wave and the transmitted wave.

The paper consists of seven sections. Section two describes surge propagation. Section three reviews mathematical model of a power transmission line. Surge arrester in power systems is described in section four. Section five presents the FDTD method. Simulation and results are presented in section six. Lastly, conclusion is in section seven.

II. SURGE PROPAGATION

Voltage surges maybe caused by a lightning strike at a conductor, flashover from an air terminal, or switching operation such as opening and closing of a circuit breaker. The surge propagates from the point of disturbance and travels along a transmission line. As the surge propagates past a junction between two components such as transmission lines with different impedances, some part of the surge will refract or pass through the junction called the transmitted wave and the rest will reflect as shown in Figure 1.

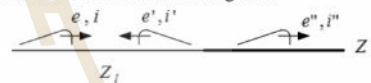


Figure 1: The reflection and refraction of the surge propagation at the junction between two different transmission lines.

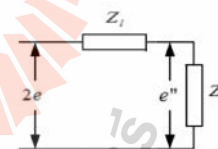


Figure 2: Thevenin equivalent circuit of two different transmission lines.

Where e, i is the voltage and current of the surge propagation.

e', i' is the voltage and current of the reflected wave.

e'', i'' is the voltage and current of the transmitted wave.

Z_1 is the impedance of the transmission line 1.

Z_k is the impedance of the transmission line 2.

From the Thevenin equivalent circuit in Figure 2, the surge voltage e'' travelling past the junction, and the reflected voltage e' can be obtained in (1) and (2) respectively.

Analysis of Surge Propagation with Lightning Arrester using FDTD for 25 kV-AC Transmission Line

$$e'' = \frac{2Z_k}{Z_1 + Z_k} e \quad (1)$$

$$e' = e'' - e \quad (2)$$

If a junction comprises several different transmission lines as shown in Figure 3, the refracted voltage surge e'' is given by (3).

$$e'' = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_t} e \quad (3)$$

$$\text{where } Z_t = \frac{Z_2 Z_3 Z_4}{Z_2 Z_3 + Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4}$$

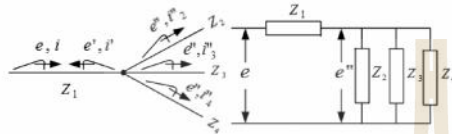


Figure 3: Thevenin equivalent circuit for several transmission lines connected at the junction.

Analysis of a surge propagation moving past a surge arrester installation point uses the same principle as the case of several different conductors connected to the junction. When no surge is presented, the impedance of an arrester is ideally infinite as shown in Figure 4 (b). The voltage across the surge arrester is surge voltage ($e'' = e$) and the reflected voltage is zero ($e' = 0$). When a surge arrives at the arrester, and the arrester starts conducting, its impedance is ideally zero as shown in Figure 4 (c). The voltage across the surge arrester is zero ($e'' = 0$) and the reflected voltage is the opposite of the of surge voltage ($e' = -e$).

In practice however, there exist some voltage across the surge arrester during its operation because the resistance of the surge arrester is non-linear. Accordingly, the voltage across the surge arrester will be tested and provided by the manufacturer.

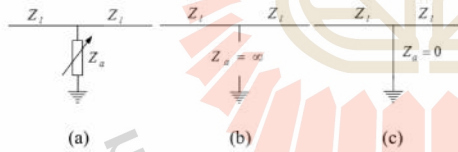


Figure 4: Impedance of the surge arrester in the ideal condition (b) no surge is presented (c) diverting the current to ground.

III. MATHEMATICAL MODEL OF A POWER TRANSMISSION LINE

The equivalent circuit of a single-phase transmission line showed in Figure 5 consists of a resistor and inductor in series connected with a branch of resistor and capacitor in parallel in each section. The time-domain characteristics in form of partial differential equations of the single-phase transmission line can be expressed as in (4) and (5).

$$\frac{\partial}{\partial x} v(x,t) = -Ri(x,t) - L \frac{\partial}{\partial t} i(x,t) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} i(x,t) = -Gv(x,t) - C \frac{\partial}{\partial t} v(x,t) \quad (5)$$

where

R, L, G and C are the line parameters in per unit length. $v(x,t)$ and $i(x,t)$ are the voltage and current.

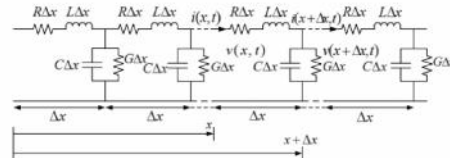


Figure 5: Distributed line model for a power transmission line.

If a transmission line is assumed to be lossless, the R and G in Figure 5 are eliminated (they will be equal to zero). The resulting transmission line model is shown in Figure 6. The partial differential equations of the single-phase transmission line can be expressed as in (6) and (7) which are also known as wave equations.

$$\frac{\partial}{\partial x} v(x,t) = -L \frac{\partial}{\partial t} i(x,t) \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} i(x,t) = -C \frac{\partial}{\partial t} v(x,t) \quad (7)$$

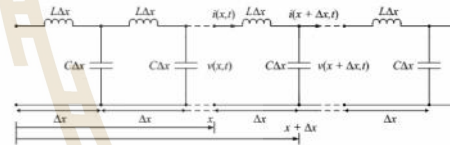


Figure 6: Lossless line model for a power transmission line.

Considering from both (6) and (7), this will produce a linear second-order partial differential equation in form of hyperbolic PDEs as shown in (8) for the voltage wave equation.

$$\frac{1}{LC} \frac{\partial^2}{\partial x^2} v(x,t) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} v(x,t) \quad (8)$$

From the voltage wave equation, the finite-difference time-domain (FDTD) method can be used to analyze lightning surge propagation in electric power transmission lines [7]-[9].

IV. LIGHTNING ARRESTER IN A POWER SYSTEM

Lightning arresters protect power systems from lightning surges, by diverting the charge and energy to ground. There are two types of lightning arresters used in medium voltage lines, namely, silicon carbide arresters (SiC) and metal oxide varistor arresters (MOV). This section highlights the characteristics of the two arresters, and describes the algorithm to analyze voltage across an arrester when voltage surge passes through it.

A. Characteristics of a Lightning arrester

The SiC arrester uses a silicon-carbide material (which has a nonlinear resistive characteristic) connected in series with a spark gap. The spark gap provides high impedance preventing

the flow of current during normal conditions. When the surge arrives at the arrester, current is allowed to pass through the arrester after the sparkover. The V-I characteristic of the SiC type surge arrester is a combination of both the SiC material and the spark gap [10]. The MOV arrester on the other hand, does not have a spark gap, its V-I characteristic is extremely non-linear such that spark gap is unnecessary [11], [12]. The V-I characteristics of the SiC and MOV arresters are shown in Figure 7.

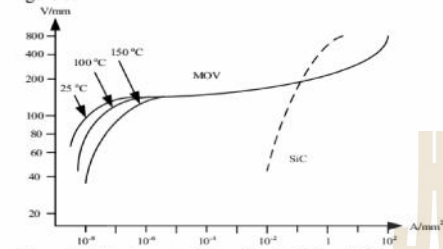


Figure 7: V-I characteristics of the MOV and SiC arresters [1].

Lightning surge test of an arrester in 25-kV system uses 230 kV peak, 10 kA peak discharge current and 8/20 μ s waveform. [10], [11]. The sparkover of the SiC arrester from the test occurs at the surge voltage of about 90 kV and the peak voltage across the arrester is 66 kV at 8 μ s as shown in Figure 8.

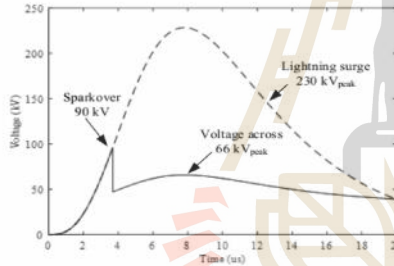


Figure 8: Curves of the surge voltage and the voltage across the SiC arrester.

For the MOV arrester, the peak voltage across the arrester is 70.2 kV at 8 μ s as shown in Figure 9.

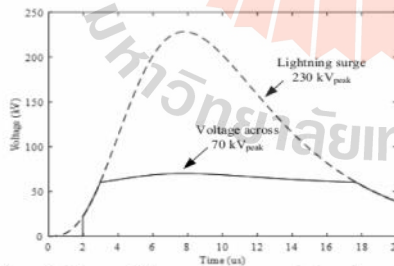


Figure 9: Curves of the surge voltage and the voltage drops across the MOV arrester.

B. Final Stage Algorithm of Lightning Arrester Analysis

The flowchart of the algorithm used to calculate the voltage

across the lightning arrester is shown in Figure 10.

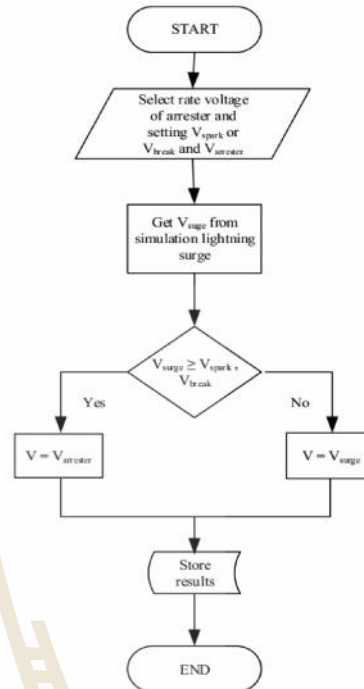


Figure 10: Flow chart to determine the voltage across the arrester.

The first step is to select the rating voltage of the arrester and preset the sparkover voltage (V_{spark} : the voltage level that causes the sparkover at the spark gap) for the SiC arrester and the breakover voltage (V_{break} : the voltage level at which the arrester begins conduction) for the MOV arrester. The values of the peak voltage across the lightning arrester ($V_{arrester}$) are derived from standard tests. Then, obtain a surge voltage from the lightning surge simulation and compare with the sparkover voltage (for the SiC arrester) or the breakover voltage (for the MOV arrester). If the surge voltage is less than the sparkover or breakover voltage, the voltage across the lightning arrester is equal to the surge voltage else the voltage across the lightning arrester is equal to $V_{arrester}$.

V. FINITE DIFFERENCE TIME DOMAIN (FDTD) METHOD

The voltage wave equation in (8) is a hyperbolic PDE. The standard of a hyperbolic PDEs is given in (9).

$$c^2 \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} \quad (9)$$

The explicit method of solving the wave equation, replacing the space derivative in the wave equation by the finite difference formula at the λ^{th} time step, (10) is obtained. In the same manner, replacing the time derivative by the finite

Analysis of Surge Propagation with Lightning Arrester using FDTD for 25 kV-AC Transmission Line

difference formula at the τ^{th} space step, (11) is formed. By substituting (10) and (11) into (8), it gives the updated voltage wave solution as summarized in (12).

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} v(x, \tau) = \frac{v(\lambda + 1, \tau) - 2v(\lambda, \tau) + v(\lambda - 1, \tau)}{\Delta x^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial \tau^2} v(x, \tau) = \frac{v(\lambda, \tau + 1) - 2v(\lambda, \tau) + v(\lambda, \tau - 1)}{\Delta \tau^2} \quad (11)$$

$$v(\lambda, \tau + 1) = \phi^2 v(\lambda - 1, \tau) + 2(1 - \phi^2)v(\lambda, \tau) + \phi^2 v(\lambda, \tau - 1) - v(\lambda, \tau - 1) \quad (12)$$

Where $\phi = c \frac{\Delta \tau}{\Delta x} = \frac{\Delta \tau}{\Delta x \sqrt{LC}}$ is the aspect ratio.

VI. SIMULATION AND RESULTS

The simulation program is created by using MATLAB. It takes into account the characteristics of the lightning surge propagation to a lightning arrester. The lightning surge voltage for a simulation has 230 kV peak and 8/20 μ s waveform. The line length of transmission line systems to the lightning arrester is 400 m as show in Figure 11, the inductance and capacitance of transmission lines are 143 μ H and 7.5 pF, respectively. The specifications of both types of arresters are given in Table 1.

Table 1. The specifications of SiC and MOV arresters [10], [13].

Voltage ratings = 25 kV, Current Discharge = 10 kA (8/20 μ s)		
SiC arrester	Sparkover voltage (V_{spark})	90 kV
	Voltage across (V_{arrester})	66 kV
MOV arrester	Brakeover voltage (V_{break})	65 kV
	Voltage across (V_{arrester})	70 kV

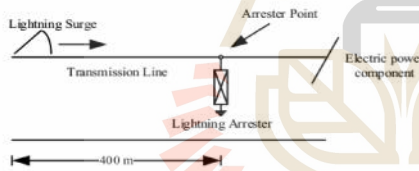


Figure 11: The transmission line system used in the simulation.

The incident wave travelling along the line before hitting the lightning arrester point has 230-kV peak in lossless transmission line systems as shown in Figure 12.

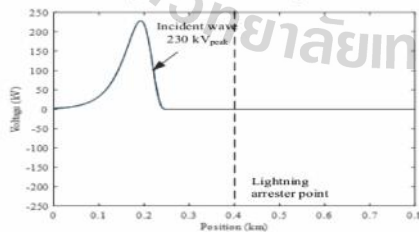


Figure 12: Incident wave before hitting the lightning arrester point.

After hitting the lightning arrester point, the incident wave was separated into the reflected wave and the transmitted wave. The transmitted wave is the voltage across the lightning arrester. These two wave components are shown in Figure 13 and Figure 14.

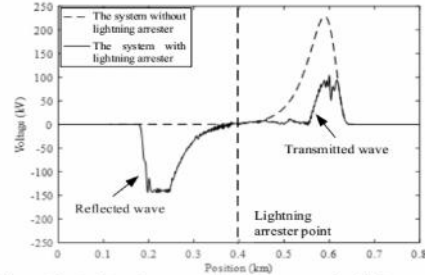


Figure 13: Reflected wave and voltage across the SiC arrester.

The peak voltage across the SiC arrester, as shown in Figure 13, is about 90 kV from the sparkover voltage and the negative peak voltage of the reflected wave is about -164 kV.

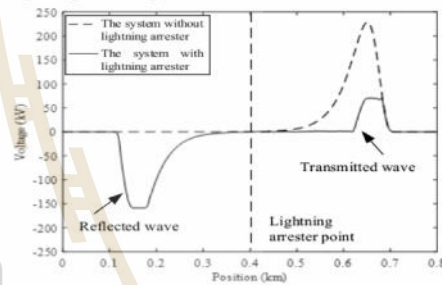


Figure 14: Reflected wave and voltage across the MOV arrester.

For the MOV arrester shown in Figure 14, the peak voltage across the arrester is about 70 kV and the negative peak voltage of the reflected wave is about -160 kV. It can be seen that the reflected and transmitted wave from the MOV arrester are almost equal in magnitude to those from the SiC arrester, however, the former has smoother waveform.

In addition, the full simulation of the whole system having a total of 0.8-km line length, is plotted in Figure 15 and Figure 16 for SiC and MOV arresters respectively.

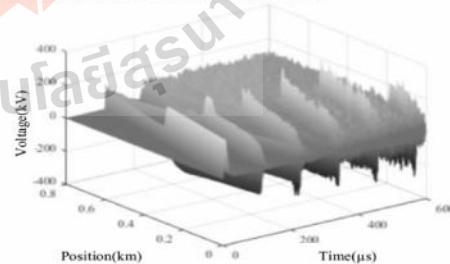


Figure 15: Lightning surge propagation along the transmission lines of the SiC arrester at short circuit line terminal after 600 μ s.

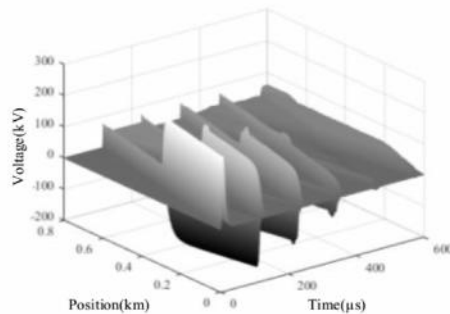


Figure 16: Lightning surge propagation along the transmission lines of the MOV arrester at short circuit line terminal after 600 μ s.

VII. CONCLUSION

This paper analyzes characteristics of surge propagation and reflection in a transmission line that uses either silicon carbide (SiC) arrester or metal oxide varistor (MOV) arrester. The finite difference time domain (FDTD) method is used to estimate the reflected wave and the transmitted wave. The simulation done in MATLAB includes a case where no arrester is used. From the simulation results, it was shown that the incident surge travels along a transmission line to a power equipment without being reflected, if no arrester is used and, the use of the MOV arrester has a slight advantage over the use of the SiC arrester due to the smoother reflected and transmitted wave.

REFERENCES

- [1] A.R. Hileman, "Insulation Coordination for Power Systems," Marcel Dekker, 1999.
- [2] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines," *IEEE standards*, 2011, pp. 1410-2010.
- [3] J. A. Martinez-Velasco, "Power System Transients Parameter Determination," CRC Press, 2010.
- [4] L. V. Bewley, "Travelling Waves on Transmission Systems," Dover Publication, 1951.
- [5] K. Aodsup, T. Kulworawanichpong and K. Batsungnoen, "Lightning Stroke Shielding of Electric Railway Overhead Catenary Feeding Systems," *2012 Spring Congress on Engineering and Technology (S-CET)*, May, 2012, pp. 27-30.
- [6] J.J. Granger and W. D. Stephenson, "Power System Analysis," New York: McGraw-Hill, 1994.
- [7] K. Aodsup and T. Kulworawanichpong, "Simulation of Lightning Surge Propagation in Transmission Lines Using the FDTD Method," *Journal of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2012, pp. 1297 – 1302.
- [8] Z. Benesova, and V. Kotlan, "Propagation of surge waves on non-homogeneous transmission lines induced by lightning stroke," *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 2006, pp. 198–203.
- [9] L. V. Fausett, "Applied Numerical Analysis using MATLAB," Prentice-Hall, 1999.
- [10] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for the Application of Gapped Silicon-Carbide Surge Arresters for Alternating Current Systems," *IEEE standards*, 1989.
- [11] IEEE Power & Energy Society "IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems" *IEEE standards*, 2009.
- [12] J.A.Martinez and D.W.Durbak, "Parameter Determination for Modeling Systems Transient Part V: Surge Arrester" *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, 2005, pp. 2073–2078.

- [13] Siemens, "Surge arresters for railway applications," Product guide, 2014.
- [14] Y. Baba, N. Tanabe, N. Nagaoka, and A. Ametani, "Transient Analysis of a Cable With Low-Conducting Layers by a Finite-Difference Time-Domain Method," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol.46, 2004, pp.488 – 493.
- [15] T.H. Thang, Y. Baba, N. Nagaoka, A. Ametani, J. Takami, S.Okabe and V. A. Rakov, "FDTD Simulation of Lightning Surges on Overhead," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol.54, 2012, pp. 1234–1243.
- [16] J. Takami, T. Tsuboi, K. Yamamoto, S. Okabe and Y. Baba, "Lightning Surge Characteristics on Inclined Incoming Line to Substation based on Reduced-scale Model Experiment," *IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation*, vol.20, 2013, pp.739–745.
- [17] A. Predota, Z. Benesova and L. Koudela, "Surge Phenomena in System of Transmission Line and Transformer Winding," *2012 ELEKTRO Conference*, 2012.
- [18] T. Henriksen, B. Gustavsen, . G. Balog, and U. Baur, "Maximum Lightning Overvoltage along a Cable Protected by Surge Arresters," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.20, 2005, pp.859–866.



Kokiat Aodsup. He received B.Eng in Electrical Engineering from Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand (2005) and M.Eng in Electrical Engineering from Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand (2009). He worked as an Engineer, Ys Pund Company Limited, Bangkok, Chachoengsao, Thailand (2005 – 2006). Currently he received a

scholarship from Rajamangala University of Technology Lanna to pursue his Ph.D. in School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima. His research interests include electrical power systems, railway electrification, traction system and electric vehicle and optimization.



Thanatchai Kulworawanichpong. He is an associate professor of the School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, THAILAND. He received B.Eng. with first-class honour in Electrical Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand (1997), M.Eng. in Electrical Engineering from Chulalongkorn University, Thailand (1999), and Ph.D. in Electronic and Electrical Engineering from the University of Birmingham, United Kingdom (2003). His fields of research interest include a broad range of electrical power systems, railway electrification, traction system and electric vehicle, power electronic, electrical drives and control, optimization and artificial intelligent techniques. He has joined the school since June 1998 and is currently a leader in Electric Transportation Research and Electrical Power System, Suranaree University of Technology, to supervise and cospervise over 15 postgraduate students.



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Energy Procedia 00 (2017) 000–000

Energy

Procedia

www.elsevier.com/locate/procedia

2017 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies

Lightning Surge Propagation Analysis in OHGW of Electrified High Speed Railway

Kokiat Aodsup^a and Thanatchai Kulworawanichpong^{a*}

^a*School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand*

Abstract

This paper proposes the analysis of the lightning surge propagation along overhead ground wires based on the telegraph equations which describe the voltage and current on a power transmission line and the finite difference time-domain (FDTD) method. The proposed FDTD method was tested with the 25-kV power transmission system of a high-speed railway in comparison with the solution obtained by using the Bewley method. From the results, after the travelling surge reaches the contact point between the overhead ground wire and the transmission pole, the surge is partially reflected and partially passes through. If the grounding resistance at a transmission pole is small, the peak of the reflected voltage surge is greater than that of the surge passing through. However, the higher value of grounding resistance causes the higher peak of the surge that passes through than the peak of the reflected surge. The computations show that the FDTD method is one of the most accurate methods to analyze lightning surge propagation in power transmission lines.

© 2017 The Authors. Published by Elsevier Ltd.

Peer-review under responsibility of the Organizing Committee of 2017 AEDCEE.

Keywords: Surge propagation, overhead ground wire, finite-difference time-domain method, lightning surge.

* Corresponding author. Tel.: +66-4422-4400; fax: +66-4422-4601
E-mail address: thanatchai@gmail.com

1. Introduction

A lightning strike in the overhead catenary system of high-speed railway causes of the high transient over voltage, which results in tips-out of the traction substation or interfering with the high-speed train's communication system and causing accidents [1,2]. There is an effect on the reliability of the system and a life of people. Then a lightning protection of overhead catenary system is very important. The overhead ground wire is lightning protection of a conduction wire in power transmission line system. When a lightning strikes to the overhead ground wire, creating a traveling wave that travels on the overhead ground wires [3]. The surge voltage is yielded by the stroke current and the combined impedance of the tower and the ground wires. The tower impedance is footing tower resistance or grounding resistance. If a grounding resistance is high, as a cause of the voltage across the tower is also very high chance to engender the flashover and short circuit in the system [4]. The Telegraphist equation is mathematical of surge propagation in transmission lines [5,6]. This equation is a linear second-order partial differential equation with constant coefficients. The finite difference time-domain (FDTD) method is basically a numerical tool for partial differential equations (PDEs)

This paper is divided into six sections. Section 2 gives a brief review of electric power transmission line model and its mathematical model in such a way that lightning surge propagation is intended to be studied. Section 3 describes the surge propagation on a single conductor circuit analysis by a classical method of Bewley method of wave reflection along transmission lines. Section 4 describes the FDTD method and its application in lightning surge propagation in transmission lines. Section 5 purposes results and discussion. The final section is the remarkable conclusion.

2. Power transmission line model

A characteristic of the lightning surge propagation in transmission lines can be described mathematically in forms of PDEs as the well known of Telegraphist's equations. Fig. 1 shows the equivalent circuit of a single-phase power transmission line. Assuming that the line conductors are parallel to the ground and uniformly distributed, the time-domain characteristics in form of PDEs of a single-conductor line can be expressed as follows:

$$\frac{d}{dx} v(x,t) = -L \frac{d}{dt} i(x,t) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dx} i(x,t) = -C \frac{d}{dt} v(x,t) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dx} i(x,t) = -Gv(x,t) - C \frac{d}{dt} v(x,t) \quad (x + \Delta x = xT) \quad (3)$$

Where $i(x,t)$ is a current surge wave function, $v(x,t)$ is a voltage surge wave function, L and C are the per-unit inductance and capacitance in the length of the transmission line and G is a tower grounding conductance. Now either current $i(x,t)$ can be eliminated by taking the partial derivatives of both terms in (1) with respect to x and in (2) and (3) with respect to t , or voltage $v(x,t)$ can be eliminated by taking the partial derivatives of both terms in (1) with respect to t and in (2) and (3) with respect to x . This produces a linear second-order partial differential equation in the form of hyperbolic PDEs as shown in (4) and (5) for the voltage wave equations.

$$\frac{d^2}{dx^2} v(x,t) = LC \frac{d^2}{dt^2} v(x,t) \quad (4)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} v(x,t) = LG \frac{d}{dt} v(x,t) + LC \frac{d^2}{dt^2} v(x,t) \quad (x + \Delta x = xT) \quad (5)$$

If the line section 1 has the surge impedance of Z_1 and the line section 2 has the surge impedance of Z_2 and the grounding resistance of R , the transmitted and the reflected portions of the travelling wave can be represented in (7) and (8), respectively.

$$v^+(x, t) = \frac{2Z_2 R}{Z_2 R + Z_1 R + Z_1 Z_2} v(x, t) \quad (7)$$

$$v^-(x, t) = \frac{Z_2 R - Z_1 R - Z_1 Z_2}{Z_2 R + Z_1 R + Z_1 Z_2} v(x, t) \quad (8)$$

$$\text{Where } Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad \text{and} \quad Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$$

L_1 and L_2 is the per-unit inductance of the line section 1 and section 2
 C_1 and C_2 is the per-unit capacitance of the line section 1 and section 2

4. Finite difference time domain method

The voltage wave equation is a linear second-order partial differential equation in the form of the hyperbolic PDEs as shown in (4) and (5). Initial conditions are given for $v(x, 0)$ and also its derivative. The boundary conditions are given at $x = 0$ and $x = L$, where L is the maximum limit of x .

According to the explicit method of solving the wave equation, the space derivative in the wave equation is replaced by the finite difference formula at the i^{th} time step 2nd order, obtained in (8). In the same manner, the time derivative is replaced by the finite difference formula at the j^{th} space step, formed in (9), and the i^{th} time step 1st order, obtained in (10).

$$\frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial t^2} = \frac{v(\tau+1, \lambda) - 2v(\tau, \lambda) + v(\tau-1, \lambda)}{\Delta t^2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} = \frac{v(\tau, \lambda+1) - 2v(\tau, \lambda) + v(\tau, \lambda-1)}{\Delta x^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial v(t, x)}{\partial t} = \frac{v(\tau+1, \lambda) - v(\tau-1, \lambda)}{2\Delta t} \quad (10)$$

By substituting (8) and (9) into (4), it gives the updated voltage wave solution as summarized in (11) and substituting (8), (9) and (10) into (5), it gives the updated voltage wave solution as summarized in (12).

$$v(\tau+1, \lambda) = \frac{\Delta t^2}{LC\Delta x^2} v(\tau, \lambda+1) + \frac{\Delta t^2}{LC\Delta x^2} v(\tau, \lambda-1) - 2\left(\frac{\Delta t^2}{LC\Delta x^2} - 1\right)v(\tau, \lambda) - v(\tau-1, \lambda) \quad (11)$$

$$v(\tau+1, \lambda) = -\frac{1}{(\Delta tLG + 2LC)} \left(\frac{2\Delta t^2}{\Delta x^2} v(\tau, \lambda+1) + \frac{2\Delta t^2}{\Delta x^2} v(\tau, \lambda-1) - (4LC + \frac{4\Delta t^2}{\Delta x^2})v(\tau, \lambda) + (2LC - \Delta tLG)v(\tau-1, \lambda) \right) \quad (12)$$

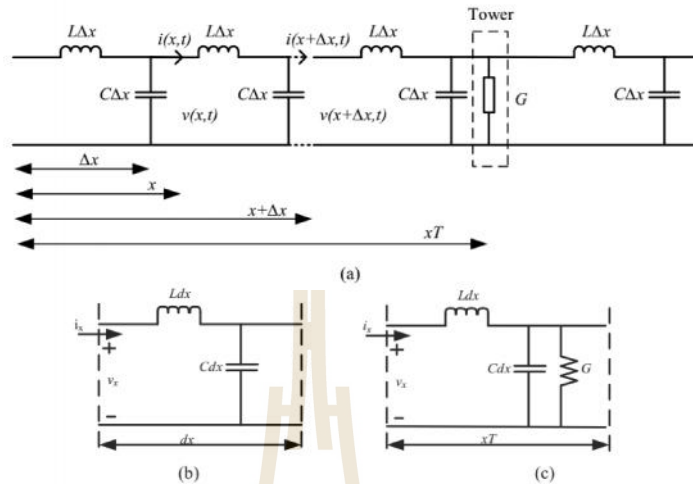


Fig. 1. (a) Power transmission line model for overhead ground wire wave propagation; (b) The very small different element of length dx ; (c) The very small different element at tower.

3. Surge propagation on a single conductor circuit

In the majority of problems dealing with traveling waves, it is sufficient to make the calculations on the basis of a single-wire circuit [7]. The potential and current waves are the results of the surge impedance of the circuit. When a travelling wave on a single conductor reaches a transition point at which is an abrupt change of line parameters, as a junction with grounding resistance line at a tower of the overhead ground wire, a part of the wave is reflected back to the incoming line and the rest may pass through other line section. The travelling wave before reaching the transition point is called the incident wave. The incident wave may be decomposed into two component waves called the reflected wave and the transmitted wave. This relation is a voltage-wave solution can be expressed as in (6).

$$v(x,t) = v''(x,t) + v'(x,t) \tag{6}$$

The transmitted wave, $v''(x,t)$, is a wave portion travelling toward the next line section while the reflected wave, $v'(x,t)$, is a wave portion travelling backward to the source. These waves can be illustrated by the equivalent circuit shown in Fig. 2.

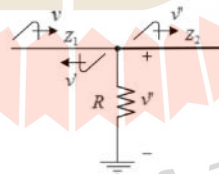


Fig. 2. Junction between single conductor circuits.

5. Simulation results and discussion

The study of the successive reflection of travelling waves caused by lightning stroke to overhead ground wire can be investigated through a test example of catenary systems as shown in Fig. 3. The parameters of lightning protection of catenary systems are as follows:

- Line length of the overhead ground wire to tower: 1 m
- Surge inductance of overhead ground wire (L): 143 $\mu\text{H}/\text{mm}$
- Surge capacitance of overhead ground wire (C): 7.5 pF/mm
- Ground resistance is varied (R_g): 0, 5, 10, 100, 1000, 5000 and infinity ohm

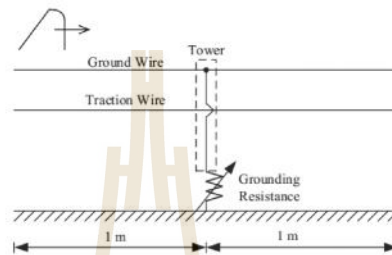


Fig. 3. The example lightning protection of catenary systems.

The lightning surge wave has 10 kV peak and 12/30 μs of the rise and decay time constants. The reflected and transmitted wave through the line junction grounding resistance can be exhibited as shown in Fig. 4. The peak value of the reflected wave using FDTD method is compared with the solution obtained by using Bewley method as shown in Table 1.

Table 1. The FDTD method comparison with the solution by using Bewley method.

Grounding resistance (Ω)		0	5	10	100	1000	5000	inf
Reflection (kV)	Bewley method	-10	-9.9962	-9.9924	-9.924	-9.24	-6.25	0
	FDTD method	-10	-9.996	-9.992	-9.921	-9.255	-6.47	0
Refraction (kV)	Bewley method	0	0.0038	0.0076	0.076	0.76	3.75	10
	FDTD method	0	0.004	0.008	0.081	0.757	3.533	10

From Fig. 4, the reflected wave and the transmitted wave after the incident wave hit the junction at the difference of grounding resistance. As the result, the incident wave is all reflected, if a grounding resistance is zero and all transmitted, when a grounding resistance is an infinity. Therefore, the reflected wave and transmitted wave depend on the grounding resistance.



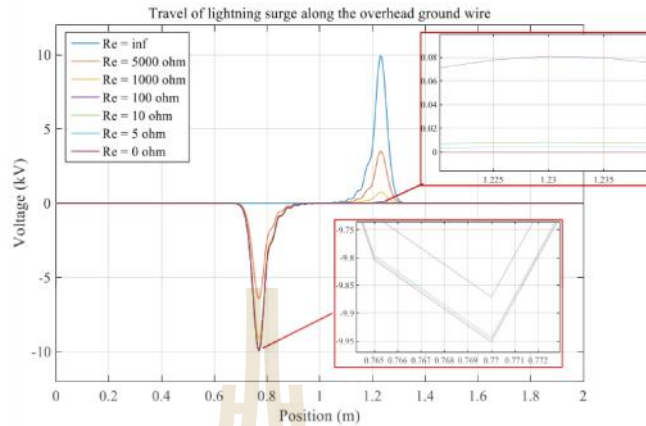


Fig. 4. Transmitted and reflected waves at connection point with tower grounding.

6. Conclusion

In this paper, the finite-difference time-domain (FDTD) method to analyze the lightning surge propagation in overhead ground wire has been presented. Numerical solutions for the Telegraphist's equations, in case of the wave equation were investigated its effectiveness in comparison with those obtained by using Bewley method. From the results, after the travelling surge reaches the contact point between the overhead ground wire and the transmission pole, the surge is partially reflected and partially passes through. If the grounding resistance at a transmission pole is small, the peak of the reflected voltage surge is greater than that of the surge passing through. However, the higher value of grounding resistance causes the higher peak of the surge that passes through than the peak of the reflected surge. As a result, the calculation showed that the effectiveness and the accuracy of the solutions obtained by the FDTD method is confirmed.

References

- [1] Van Biwu, Gu Shangqiang, Xiang Nianwen, Li Tao, Su Jie, Lu Zejun. Research on lightning protection performance evaluation of high-speed railway Traction Network. International Conference on Lightning Protection 2014;850-853.
- [2] LUO Xun, w Guangning, ZHANG Xianyi, CAO Xiaobin, HE Fangfang. Lightning impulse characteristic of weak current grounding system of the high-speed railway roadbed section. International Conference on Lightning Protection 2014;647-650.
- [3] Hileman A. R. Insulation coordination for power systems. New York: CRC Press Taylor & Francis Group; 1999.
- [4] Bewley L.V. Critique of ground wire theory[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1931, 50(1):1-18.
- [5] Kokiat Aodsup, Thanatchai Kulworawanichpong. FDTD method for lightning surge propagation of power transmission lines[J]. The SIJ Transactions on Computer Networks & Communication Engineering, 2014, 2(3):31-35.
- [6] Kokiat Aodsup, Thanatchai Kulworawanichpong. Simulation of lightning surge propagation in transmission lines using the FDTD method[J]. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2012, 6(11):1297-1302.
- [7] Bewley L.V. Traveling waves on transmission systems[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1931, 50(2):532-550.

ประวัติผู้เขียน

นายก่อเกียรติ อ้อดทรัพย์ เกิดวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2525 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนตากพิทยาคม จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาช่างไฟฟ้า ที่ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตตาก หรือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก ในปัจจุบัน

สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีการศึกษา 2548

ปี พ.ศ. 2549 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และสำเร็จการศึกษา ปีการศึกษา 2552

ปัจจุบันทำงานในตำแหน่ง อาจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี